GEOLIT

# XII JORNADAS DE GEOMORFOLOGÍA LITORAL

Valencia. 25-27 de septiembre de 2024
Universitat Politècnica de València

## LIBRO DE ACTAS

edUPV
Universitat Politècnica de València



Organizadores

CGAT
Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Patrocinadores

MDPI

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA GEODÉSICA CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

in think azul

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA, GEODESIA Y FOTOGRAMETRÍA

# XII Jornadas de Geomorfología Litoral

GEOLIT 24

Valencia, 25-27 de septiembre de 2024

edUPV
Universitat Politècnica de València

*Colección Congresos UPV*

***GEOLIT24 - Libro de Actas - XII Jornadas de Geomorfología Litoral***
Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico que en ella se relaciona y según el procedimiento que se recoge en
http://ocs.editorial.upv.es/index.php/GEOLIT/GEOLIT24/about/editorialPolicies

Editores Científicos

Jesús Palomar Vázquez
Josep Eliseu Pardo Pascual

© de los textos: los autores

Editado por

© 2024, Editorial Universitat Politècnica de València
www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6734_01_01_01

ISBN 978-84-1396-212-2

DOI: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.19128



*GEOLIT24 - Libro de Actas - XII Jornadas de Geomorfología Litoral*
se distribuye bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.
Basada en una obra en http://ocs.editorial.upv.es/index.php/GEOLIT/GEOLIT24

## Presentación

La costa es por definición una frontera, probablemente la más obvia de las fronteras. En cualquier mapa, por simple que sea, si se cartografía una zona costera se tendrá que trazar obligatoriamente su posición. Pero, curiosamente, a pesar de ser obvia, no es una frontera clara sino más bien borrosa, móvil y cambiante, pero a la vez atractiva, interesante y hasta peligrosa. Resulta pues evidente que un espacio geográfico que adjetivamos de esta manera tiene una vocación clara de ser estudiado, analizado y comprendido en detalle. Nos interesa saber cómo es la costa, cómo evoluciona, qué cambios se producen y a qué ritmo o velocidad lo hace. Nos interesa desarrollar diferentes métodos y técnicas, así como utilizar diferentes fuentes de información para poder caracterizar su dinamismo. Nos interesa entender cómo y porqué cambia, tanto en su parte emergida como en la sumergida. Nos interesa también entender de qué forma afectan los cambios que en ella se producen a las sociedades que allí habitan o que explotan sus recursos y, a su vez, cómo impactan las acciones humanas sobre ella, qué grado de responsabilidad tienen en sus alteraciones y a qué escala temporal y espacial se producen. Nos interesa sumamente aprender cómo gestionarla adecuadamente para asegurar su riqueza ambiental, pero también sus valores que la convierten en un recurso social y económico de primer orden, muy especialmente en nuestro país. De hecho, esto último se ha convertido en una urgencia para poder afrontar adecuadamente los complejos retos que la acechan ya y que, con seguridad, se acrecentarán en un futuro próximo.

La Geomorfología Costera como disciplina científica ha ido avanzando rápidamente en estos últimos años y por ello resulta especialmente estimulante hallar un entorno donde los investigadores podemos compartir los nuevos conocimientos, herramientas y soluciones que vamos desarrollando y hacerlo en un ambiente abierto, que facilita tanto compartir como debatir. En el caso de la Geomorfología Litoral española son estas Jornadas que han servido de base para lograr ese contacto científico, pero también personal, que ayuda a conocer y a conocernos, a compartir y trabar relaciones que pueden fructificar en nuevos proyectos. Este año las Jornadas han llegado, finalmente, a Valencia.

Han tenido que pasar once ediciones para que Valencia fuera la nueva sede de las Jornadas, a pesar de que la escuela valenciana de geomorfología litoral sea una de las más antiguas de España. Debemos mucho en nuestra formación y en la forma de hacer los estudios geomorfológicos al trabajo del profesor Vicenç Mª Rosselló i Verger, catedrático durante muchos años del Departamento de Geografía de la Universitat de València, que ya en 1963, publicó el primer estudio geomorfológico de la costa valenciana, al que siguió pocos años después (1969) su libro sobre *El litoral valencià* (en dos tomos). El profesor Rosselló fue el padre científico de una larga saga de investigadores entre los que no podemos dejar de citar a la Dra. Eulàlia Sanjaume, que con su libro sobre *Las Costas Valencianas. Sedimentología y morfología* del año 1985, marcó un claro hito en el conocimiento sobre la morfología costera valenciana. Muchos hemos seguido sus huellas tomando cada uno de nosotros caminos propios: unos más centrados en la evolución cuaternaria, otros en procesos actuales y el desarrollo de nuevas tecnologías.

Puede resultar sintomático de la propia evolución de la disciplina el hecho de que estas jornadas las organice el grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universitat Politècnica de València en tanto que prueba el creciente interés que las técnicas geomáticas y la teledetección han ido adquiriendo dentro de los estudios de Geomorfología costera. Pero, como prueban los múltiples

trabajos aquí expuestos, estas técnicas se suman a muchas otras, y es justamente la integración de los conocimientos y saberes previos, la confluencia de técnicas diferentes y el imprescindible trabajo de campo, lo que está permitiendo que nuestra disciplina avance a paso firme, tratando siempre de dar respuesta a la necesidad que la sociedad tiene de un conocimiento profundo sobre cómo son y cómo cambian las costas, para así poder proponer soluciones frente a los retos del futuro.

Valencia, septiembre de 2024

*Josep E. Pardo Pascual*
*Jesús Palomar Vázquez*

# COMITÉS

## Comité Organizador

Josep E. Pardo Pascual
Jesús Palomar Vázquez
Luis Ángel Ruiz Fernández
Carlos Cabezas Rabadán
Jorge Recio Recio
Jaime Almonacid Caballer
Ausiàs Roch Talens
Juan José Valero Fernández
Alfonso Fernández Sarría

## Comité científico

Alejandro Gómez Pazo (Universidad de Santiago de Compostela)
Alfonso Fernández Sarría (Universitat Politècnica de València)
Amanda Sancho García (Universidad Católica de Valencia)
Ana María Blázquez Morilla (Universidad Católica de Valencia)
Ángela Fontán Bouzas (Universidad de Vigo)
Antoni Calafat (Universitat de Barcelona)
Carles Sanchis Ibor (Universitat Politècnica de València)
Carlos Cabezas Rabadán (Universitat Politècnica de València)
Daniel Calvete (Universitat Politècnica de Catalunya)
Emilia Guisado Pintado (Universidad de Sevilla)
Emma Pérez-Chacón (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria)
Eulalia Sanjaume Saumell (Universitat de València)
Fátima Navas (Universidad Pablo de Olavide)
Francisca Segura Beltrán (Universitat de València)
Germán Flor (Universidad de Oviedo)
Gonzalo Málvarez (Universidad Pablo de Olavide)
Guillem Xavier Pons (Universitat de les Illes Balears)
Ignacio Alonso (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria)
Inmaculada Rodríguez (Universidad Rey Juan Carlos)
Isabel Montoya (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria)
Ismael Vallejo (Universidad de Sevilla)
Jaime Almonacid Caballer (Universitat Politècnica de València)
Javier Alcántara (Universidad Autónoma de Madrid)
Javier Benavente (Universidad de Cádiz)
Javier Gracia (Universidad de Cádiz)
Jesús Palomar Vázquez (Universitat Politècnica de València)
Jorge Guillén (Instituto de Ciencias del mar – CSIC)

José Luis del Río (Junta de Andalucía)
José Ojeda (Universidad de Sevilla)
Josep Pinto (Universitat de Girona)
Josep E. Pardo Pascual (Universitat Politècnica de València)
Juan Antonio Morales (Universidad de Huelva)
Laura del Río (Universidad de Cádiz)
Laura del Valle (Universitat de les Illes Balears)
Lluís Gómez-Pujol (Universitat de les Illes Balears)
Luis Hernández (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria)
Macarena Tejada (Universidad Pablo de Olavide)
María José Sánchez (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria)
Paulo Batista (Universidad de Aveiro)
Paulo Silva (Universidad de Aveiro)
Ramón Blanco Chao (Universidad de Santiago de Compostela)

**SESIONES DE LAS JORNADAS**

1. Gestión costera, vulnerabilidad y riesgos en el entorno litoral.
2. Aplicaciones en la teledetección a la geomorfología costera.
3. Ambientes rocosos y evolución a largo plazo
4. Formas y procesos en ambientes sedimentarios
5. Métodos y técnicas aplicadas al litoral
6. Geomorfología marina, plataforma litoral y análisis regionales
7. Otros

# ÍNDICE DE COMUNICACIONES

**Sesión 1**

Propuesta de diseño sostenible basado en la naturaleza del frente costero de Matalascañas (Almonte, Huelva)..... 1
*Morales, J.A.; Sedrati, M.; Rodríguez Ramírez, A. y Morales L.A.*

Influencia de la presión antrópica en una flecha arenosa de baja energía..... 7
*Montes, J.; Del Río, L.; Benavente, J. y Plomaritis, T.A*

Evolución de un sistema costero con alta presión antrópica: el caso de Sotogrande (San Roque, Cádiz)..... 14
*Del Río, L.; Montes, J. y Benavente, J.*

Análisis preliminar de la edificación del litoral en Canarias (2022)..... 20
*Medina-Lorenzo, E.; Ferrer-Valero, N.; Pérez-Chacón Espino, E. y Hernández-Calvento, L.*

Puesta en marcha de bases Coastsnap para el monitoreo de la evolución de la línea de costa de la playa de Las Canteras (Gran Canaria)..... 26
*Gómez-Clemente, D.; Sánchez-García, M. J.; Sanromualdo-Collado, A. y González-Villanueva, R.*

Gestión de Dunas Costeras: Impacto de la Expansión Urbana y Estrategias de Restauración en Rio Grande do Sul, Brasil..... 32
*Portz, L.; Rockett, G.C.L.; Cristiano S.C.; Fontán-Bouzas, A.; Alcántara-Carrió, J. y Manzolli, R.P.*

Evolución de campos dunares asturianos (oriente-centro) entre 2014 y 2023 y su relación con el cambio climático..... 39
*Pardo-Rivera, N.; Flor-Blanco, G.; Gomez Lende, M. y Sanjosé Blasco, J.J.*

Enfrentando los riesgos del Cambio Climático desde la perspectiva de los ciudadanos: El caso del Delta del Ebro..... 45
*Tejada-Tejada, M; Genua-Olmedo, A; Alcaraz, C; Fernandez-Muñoz, J.J; Navarro, N. y Rodriguez-Santalla, I.*

A citizen initiative for the development and application of an empirical measure of soft protection against coastal erosion in the Colombian Caribbean..... 51
*G. Serna, J. Alcántara-Carrió, A. Jaramillo-Vélez & A. Fontán-Bouzas*

Clientes web interactivos (geovisores y dasboard) para la exploración y difusión web de datos masivos de riesgos costeros..... 58
*Ojeda-Zújar, J.; Prieto-Campos, A.; Sánchez-Rodríguez, E. y Vallejo-Villalta, I.*

El papel a largo plazo de los usos del suelo y los incendios en una cuenca hidrográfica para producir y aportar sedimento a una playa urbana..... 65
*Marrero-Rodríguez, N. y García-Romero, L.*

Análisis de la distribución espacio-temporal de usuarios de playa mediante el uso de drones..... 71
*Guisado Pintado, E y Lopez-Nieta, D.*

La fase final de la transgresión holocena en el NO Peninsular ..... 78
*Cajade-Pascual, D.; Costa-Casais, M. y Blanco-Chao, R.*

Riesgos en el litoral de Catalunya: Evaluación de los peligros de inundación, erosión y movimientos de ladera para la gestión costera ..... 84
*Pinyol, J.; Carles, R.; Micheo, F. y González, M.*

Análisis preliminar de la cartografía geomorfológica de las superficies inundadas por temporales recientes en la franja litoral catalana..... 91
*Carles, R.; Micheo, F.; Pinyol, J. y González, M.*

Análisis de la percepción social de las estrategias de acomodación y las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) en el frente litoral catalán..... 97
*Badia, M.; Giffard, E.; Villares, M. y Roca, E.*

Coastal changes and anthropogenic structures: An analysis of the beaches of the Gulf of Roses (NW Mediterranean Sea, Spain)..... 103
*Salvador, M.; Guinau, M.; Casamor, J.L. & Calafat, A.*

**Sesión 2**

Frequency distribution of emerged beach area based on daily shorelines over decades (2001-2022)..... 109
*Guillén, J. & Simarro, G.*

Monitorización tridimensional del sistema playa-duna en el segmento Gandia-Dénia (2017-2022) mediante técnicas fotogramétricas .....115
*Almonacid-Caballer, J.; Pardo-Pascual, J.E.; Gorkovchuk, D.; Cabezas-Rabadán, C. y Palomar-Vázquez, J.*

Aproximación a la segmentación y clasificación semiautomática de dunas costeras ..... 121
*López-Nieta, D.; Guisado-Pintado, E. y Rodríguez-Galiano, V.F.*

Validación espacio-temporal de modelos batimétricos derivados de satélite..... 128
*Roch-Talens, A.; Almonacid-Caballer, J.; Cabezas-Rabadán, C.; Palomar-Vázquez, J. y Pardo-Pascual, J.E.*

On the use of high space-time resolution satellite videos to infer bathymetries ..... 134
*Marco-Peretó, C.; Simarro, G.; Calvete, D.; Palombo-Blascetta, N.; Durán, R. y Guillén, J.*

Limitaciones para la detección de cambios en la línea de costa a partir de datos de satélite: la incertidumbre asociada a la pendiente de la playa ..... 140
*Gomes da Silva, P.; Gallego, A.; Pellón E; Martínez, J. y Silio-Calzada, A.*

Detección y caracterización de megacúspides a partir de líneas de costa derivadas de sensores remotos ..... 146
*Angelats. E.; Angelini, R.; de-Urmeneta, F. y Ribas, F.*

Técnicas geomáticas aplicadas al análisis de las consecuencias provocadas por la construcción de estructuras rígidas en las playas urbanas del entorno de "La Magdalena" (Santander) ..... 153
*Flor-Blanco, G.; Sánchez Fernández, M.; de Sanjosé Blasco, J.J. y Flor, G.*

**Sesión 3**

Dinámica de bloques mediante sensores RFID en la Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Ilha de São Jorge, Archipiélago de las Azores) ..... 159
*Gómez-Pazo, A.; Hipólito, A.; Pérez-Alberti, A.; Quartau, R.; Avila, S.P.; Melo, C.; Andrade, M.; Martín-González, E.; Andrade, C. y Ramalho, R.S.*

La investigación en Geomorfología de Costas Rocosas en España: producción científica y su impacto a través de publicaciones periódicas y congresos ..... 165
*Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J.*

Morfología y arquitectura de una eolianita del Pleistoceno superior adosada al acantilado (Punta de l'Avançada, Mallorca, Mediterráneo occidental) ..... 171
*del Valle, L.; Perazotti, F. y Fornós, J.J.*

**Sesión 4**

Dinámica sedimentaria de playa sobre un afloramiento patrimonial del Pleistoceno: la superficie de pisadas de El Pichilín (Almonte, Huelva) ..... 177
*Morales, J.A.; Rodríguez Ramírez, A.; Mayoral, E.; Díaz-Delgado, R.; Santos, A.; Duveau, J.; Díaz-Martínez, I. y Gómez Olivencia, A.*

Estudio preliminar sobre la foredune en Cabo Verde: Naturaleza y Amenazas ..... 183
*García-Romero, L.; Marrero-Rodríguez, N.; Beltrán-Yanes, E.; Taxonera, A.; Tavares, V. y Dóniz-Páez, J.*

Particle size analysis of mixed sediments in oscillating flows with mobile beds ..... 189
*Abreu, T; Ferreira, C.C.; Matos, J.; Bernabeu, A.M. and Silva, P.A.*

Material particulado en las marismas de la Bahía de Cádiz: Tasas de acumulación y composición orgánica ..... 194
*Benavente, J.; Galindo, M.; Peralta, G.; Vergara, J.J.; y Yamuza, A.*

Estructura interna de la duna de Valdevaqueros, Cádiz ..... 201
*Rodríguez-Santalla, I.; Gómez-Ortiz, D.; González-Martin, L. y Muñoz-Pérez, J.J.*

Acumulación y permanencia de arribazones de Posidonia oceanica en las playas de Mallorca y Menorca: una década de datos de videomonitorización costera ..... 207
*Gómez-Pujol L.; Arbona, G.; Guevara, M.T.; Fernández-Mora, A. y Orfila, A.*

High-resolution morphometric analysis of the rocky coast of the Prebetic System (western Mediterranean) ..... 214
*Alcántara-Carrió, J.; Tent-Manclús, J.; Bonomo, D.; Fontán, A.; Manzolli, R, & Portz, L.*

The Pleistocene double tombolo of Calpe and the submerged fault scarps between Moraria Point and Ifach Rock (western Mediterranean)..... 221
*Alcántara-Carrió, J.; Tent-Manclús, J.E.; Bonomo, D. & Fontán, A.*

Interpretación paleoambiental de la Albufera de Valencia a partir de asociaciones de foraminíferos bentónicos..... 228
*Briones, M.S. y Blázquez, A.M.*

Optimización de parámetros morfométricos para caracterizar las playas encajadas de la costa mediterránea peninsular..... 235
*Sancho-García, A.; Simarro, G.; Lambarri, L.; Expósito, L.; Rodríguez-Gómez, A.C.; Guillén, J. y Durán, R.*

**Sesión 5**

Beach response to sea-level rise for equilibrium shoreline modelling: understanding the wave reshaping..... 241
*D'Anna, M.; Vitousek, S.; Castelle, B.; Idier, D.; Ribas, F.; Falqués, A.; Coco, G.; Yates, M. & Le Cozannet, G.*

SEATool: una toolbox de ArcGIS Pro para el análisis de evolución de líneas de costa..... 247
*Gallego, A.; Pellón, E. y Gomes da Silva, P.*

Estudio con sonar de barrido lateral de la base del acantilado del Morro de Toix (Calpe, Alicante)..... 254
*Bonomo, D.; Ronda, J. L.; Benabdeloued, B. Y. N.; Tent-Manclús, J. E.; Salcedo-Justicia, E. M. y Alcántara-Carrió, J.*

Análisis preliminar de la importancia de las características de las playas de Gran Canaria en el desarrollo urbanístico de su entorno..... 260
*Suárez-Pérez, C.A.; García-Romero, L.; Sanromualdo-Collado, A.; Peña-Alonso, C. y Hernández-Calvento, L.*

Análisis sedimentológico de las playas del norte del municipio de Telde (Gran Canaria, España): Experiencia didáctica..... 266
*Montoya-Montes, I.; Sánchez-García, M.J.; Alonso, I. y Mangas, J.*

**Sesión 6**

Descripción geomorfológica de los sistemas deposicionales en la línea de costa de la isla de Cabrera (Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera, Islas Baleares)..... 272
*Servera-Nicolau, J.; Pons, G.X. y del Valle, L.*

Procesos de recuperación de la playa del Parque Nacional de Doñana después del temporal Emma (2018)..... 279
*Plomaritis, T.A.; Montes Perez, J.B.; Gutiérrez Gálvez, D.J. y Benavente, J.*

Sand inputs to embayed beaches: fluvial and longshore transport..... 285
*Durán, R.; Guillén, J.; Amblas, D.; Marco-Peretó, C.; Moya, J. & Calafat, A.*

Modificación de la red de drenaje de las cuencas bajas de la Costa del Sol Occidental y su implicación en la evolución de la costa..... 291
*Del Río, J.L.; Navas, F. y Malvárez, G.*

**Sesión 7**

Los procesos geomorfológicos como indicadores para evitar la fragmentación de competencias en la gestión de espacios naturales costeros protegidos ..... 298
*Sanromualdo-Collado, A.; Ferrer, N.; Marrero-Rodríguez, N.; García-Romero, L. y Hernández-Cordero, A. I.*

Aproximación cronológica de la formación de los cordones de dunas de la barrera al sur del río Xúquer durante época histórica ..... 304
*M. L. Acosta-Real*

El efecto de las hamacas de playa en la dinámica sedimentaria eólica de un campo de dunas árido: un estudio evolutivo Pre y Post-COVID-19 .....311
*Marrero-Mena, E.M.; Flor-Blanco, G.; Sanromualdo-Collado, A.; Viera-Pérez, M.; Peña-Alonso, C. y García-Romero, L.*

Evolución reciente del notch del acantilado marino del Morro de Toix (Alicante, SE España)..... 318
*Tent-Manclús, J.E.; Bonomo, D.; Alcántara-Carrió, J. y Salcedo-Justicia, E.M.*

Numerical and geomorphic approach to the characterization of tsunami deposits on the southern coast of Mallorca (western Mediterranean)..... 324
*Roig-Munar, F. X.; Gelabert, B.; Gómez-Pujol, L. y Fernàndez-Mora, A.*

Monitorización de la anchura de las playas de Orpesa: 1984-2022 ..... 330
*Pardo-Pascual, J.E.; Almonacid-Caballer, J.; Cabezas-Rabadán; Roch-Talens, A. C. y Palomar-Vázquez, J.*

Dinámica eólica en la interfaz playa-duna de un blowout ..... 336
*Delgado-Fernández, I. & O'Keeffe, N.*

GEOLIT

# SESIÓN 1



XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18679

# Propuesta de diseño sostenible basado en la naturaleza del frente costero de Matalascañas (Almonte, Huelva)

*Nature-based sustainable design proposal of the Matalascañas coastline (Almonte, Huelva)*

**Juan A. Morales[a], Mouncef Sedrati [b], A. Rodríguez-Ramírez[a], Luis A. Morales**

[a] Departamento de Ciencias de la Tierra, CCTH-Centro de Investigación Científico Tecnológico, Campus de El Carmen, Universidad de Huelva, 21071 Huelva, España. jmorales@uhu.es; arodri@uhu.es

[b] Geo-Ocean, Univ Bretagne Sud, Univ Brest, CNRS, Ifremer, UMR6538, F- 56000, Vannes, France. mouncef.sedarti@univ-ubs.fr

[b] Al Futuro Arquitectura. c/ José Fariñas, 21006 Huelva, España. luis@alfuturoarquitectura.com

How to cite: Morales, J.A.; Sedrati, M.; Rodríguez Ramírez, A.; Morales L.A.. 2024. Hacia un plan de gestión sostenible del frente costero de Matalascañas (Almonte, Huelva). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18679

## *Abstract*

*In a context of climate change, the vulnerability of coastal systems is increasing, threatening property, infrastructure and even human life. Faced with this situation, managers have traditionally relied on conventional protection methods (dikes, groins, breakwaters, riprap) to defend themselves against the sea. However, these interventions are no longer sufficient: they are only a temporary solution, systematically associated with disruption of natural sedimentary dyndmics, and maintenance costs could become unrealistically high. This is the case of the Matalascañas coastline studied here, which in a segment has undergone intense urbanization associated with the loss of its dune cordon. The installation of a series of groins to reduce sediment erosion and the risk of marine submersion has proved to be an ineffective management policy. In this article, we propose a new combined development model based on a nature-based solution (reconstruction of a littoral dune) combined with ecological and adaptable frontage redevelopment in the urban segment.*

***Keywords**: Beach erosion, dune retreat, vulnerability, coastal nature-based-solution*

## *Resumen*

*En el contexto del cambio climático, la vulnerabilidad de los sistemas costeros está aumentando, amenazando propiedades, infraestructuras e incluso vidas humanas. Ante esta situación, los gestores se han apoyado tradicionalmente en métodos de protección convencionales (diques, espigones, ropeolas, escolleras) para defenderse del mar. Sin embargo, estas intervenciones ya no son suficientes: son sólo una solución temporal, sistemáticamente asociada con la alteración de la dinámica sedimentaria natural, y los costes de mantenimiento podrían llegar a ser irracionalmente altos. Este es el caso del litoral de Matalascañas aquí estudiado, que en uno de sus tramos ha sufrido una intensa urbanización asociada a la pérdida de su cordón dunar. La instalación de una serie de espigones para reducir la erosión de los sedimentos y el riesgo de inmersión marina ha demostrado ser una política de gestión ineficaz. En este artículo, proponemos un nuevo modelo de desarrollo combinado basado en una solución basada en la naturaleza (reconstrucción de una duna litoral) combinada con una reurbanización ecológica y adaptativa en la fachada del tramo urbanizado.*

***Palabras clave:** Erosión de playas, retroceso de dunas, vulnerabilidad, solución costera basada en la naturaleza.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

La playa de Matalascañas se localiza en el tramo central de la costa oriental de Huelva, entre el acantilado de El Asperillo y la flecha de Doñana, que cierrra el estuario del Guadalquivir (Fig. 1A) justo en el límite oeste del Parque Nacional de Doñana. Esta playa se caracteriza por presentar un carácter disipativo con una intensa dinámica de barras longitudinales (Sedrati y Morales, 2017). No obstante, esta costa tiende secularmente a la erosión, como muestra la presencia del frente acantilado y las ruinas de la almenara de Torre La Higuera. Esta torre fue construida en el Siglo XVII y que se encuentran actualmente en al agua (Menanteau, 1979).

El tramo noroeste de la playa presenta un funcionamiento completamente natural. Su dinámica está fuertemente influida por la dinámica transversal de las barras, pero también por una dinámica longitudinal inducida por la deriva litoral (Morales et al., 2018) y por el suministro extraordinario de arena que representa el ataque de las olas al frente acantilado (Morales et al., 2024). Tras unos fuertes temporales, en este tramo apareció en 2020 un importante afloramiento del Pleistoceno (Fig. 1B) que contiene numerosas huellas de homínidos (Neandertales o Pre-Neandertales) y que resulta de un elevado interés patrimonial (Mayoral et al., 2021; Mayoral et al., 2022). La dinámica de las barras ha vuelto a cubrir el afloramiento, preservándolo por el momento de la erosión costera.

El tramo sureste de la playa se encuentra fuertemente antropizado. Sobre el frente acantilado se ha construido de forma extensiva una urbanización con toda su infraestructura turística (Fig. 1C). El cordón de dunas que se desarrollaba bajo el acantilado fue destruido para edificar un paseo marítimo que se extiende más de 4 Km. Desde la construcción del paseo marítimo éste se ha visto afectado por eventos destructivos durante las tormentas (Rodríguez-Ramírez et al., 2003). Este hecho hizo que con el fin de preservar las infraestructuras turísticas se construyera en los años 80 unos 15 espigones en peine distribuidos a lo largo de 3200 metros. Además de la construcción de estos espigones la playa tuvo que ser regenerada con aportes artificiales de arena. En 1996 ambos tramos de la playa se regeneraron con 125.000 $m^3$ de arena distribuidos a lo largo de 18 Km, invirtiendo un presupuesto total de 413.636 € (Muñoz Pérez et al., 2001).




***Fig. 1**. A) Localización del área de estudio. B) Tramo de funcionamiento natural con el yacimiento de huellas fósiles. C) Panorámica del inicio del tramo urbanizado con los restos de la torre almenara afectados por el oleaje.*

Ambos tramos de costa necesitan una adecuada gestión y protección frente a los procesos erosivos. El primero de ellos por contener restos con valor patrimonial y el segundo por contener infraestructuras turísticas con un importante valor económico. El presente trabajo tiene como objetivo el planteamiento de algunas posibles soluciones desde el punto de vista de la gestión integral de las zonas costeras.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

## 2. Marco dinámico y problemática asociada

La dinámica de este tramo de costa está marcada por un régimen de oleaje de baja energía, con olas de altura significante media de 0,5 m. Con este régimen energético tan bajo, clásicamente se han considerado para esta costa olas de tormentas aquellas con alturas superiores a 1,5 m (Sedrati y Morales, 2017). En estos temporales invernales se alcanzan frecuentemente los 4 m y han llegado a medirse olas de hasta 7 metros (Rodríguez Ramírez et al., 2003). Desde el punto de vista de las mareas, se trata de una costa meso-mareal, con un rango medio de 2 m, aunque oscila entre los 1,25 m de las mareas muertas y los 3,8 m de las mareas vivas. Teniendo en cuanta ambos procesos y siguiendo los criterios de Davis y Hayes (1984) puede clasificarse como una costa de energía mixta cuyas características geomorfológicas están controladas por la acción conjunta de olas y mareas.

Durante las condiciones de oleaje de buen tiempo la pendiente de la playa produce una disipación del oleaje favoreciendo el desarrollo de sistemas de barras y surcos. Estas barras funcionan estacionalmente remontando desde el *shoreface* para adosarse en pocos días al *foreshore* adosándose a la parte alta de la playa en el frente del acantilado. En invierno, cuando coinciden las mareas meteorológicas con pleamares vivas el nivel del mar alcanza la base de los acantilados y permite al oleaje de tormenta desmantelar las barras depositadas durante el buen tiempo y transportar la arena hacia el *shoreface*. En estas condiciones el oleaje puede incluso atacar y erosionar el frente acantilado del sector noroeste incorporando al sistema importantes volúmenes de arena desde las unidades pleistocenas de carácter arenoso. Durante estos periodos el afloramiento rocoso que contiene las huellas puede encontrarse expuesto y ser erosionado en algunas condiciones dinámicas, mientras que en otras permanece bajo espesores significativos de arena (Morales et al. 2024). Por otra parte, en el sector sureste, urbanizado, el oleaje de temporal puede atacar el paseo marítimo, de tal forma que es recurrente que éste tenga que ser reconstruido por las autoridades locales.

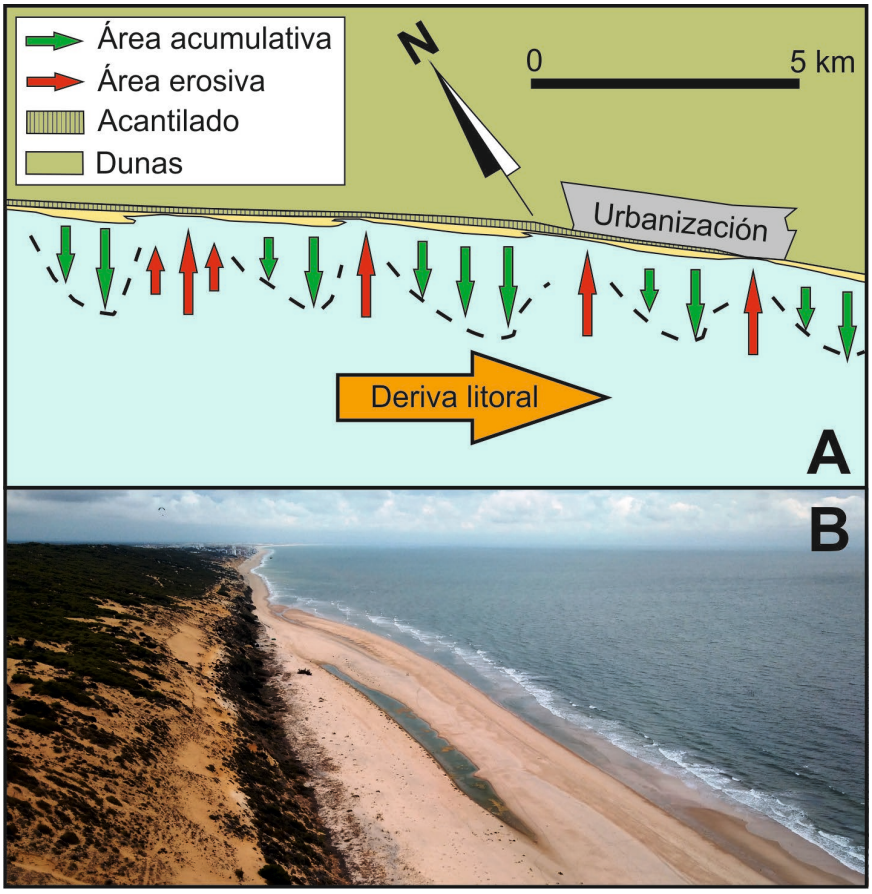



***Fig. 2**. A) Esquema de distribución de lóbulos sedimentarios y zonas erosivas en la zona de estudio. B) Vista panorámica del final de uno de los lóbulos sedimentarios (en primer plano) y el comienzo de una zona erosiva.(en la distancia).*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Por otra parte, el perfil de las playas en este tramo costero está sujeto a migración hacia el este de lóbulos sedimentarios y entrantes erosivos (Fig. 2) que se alternan a lo largo de la playa (Morales et al., 2018). El desplazamiento de estos lóbulos se produce gracias a la deriva litoral y supone un tránsito sedimentario de grandes volúmenes de arena hacia la flecha de Doñana.

## 3. Metodología

El conocimiento preciso de la dinámica litoral de este tramo costero ha sido publicado por los autores de este trabajo en artículos anteriores y se ha utilizado como fundamento para realizar una propuesta de actuación. En otros tramos de litoral onubense se ha puesto de manifiesto la importancia de la existencia de un cordón de dunas para la flexibilización estacional del perfil de playa (Morales et al., 2018). De ahí que la propuesta se base en las soluciones naturales ante los fenómenos de erosión e incluya la reconstrucción de una duna en el frente costero de la zona urbanizada. Para la propuesta del perfil de la duna en este tramo se han establecido los perfiles topográficos des dunas frontales en 6 playas de la costa de Huelva que no presentan problemas de erosión continuada (Isla Canela, Islantilla, Nueva Umbría, La Bota, Punta Umbría y Doñana). Los perfiles se levantaron con una estación total Nikon DTM 332. El sedimento de esas dunas fue caracterizado granulométricamente por tamizado. Con estos datos se ha establecido un perfil topográfico medio, y una granulometría característica que son los que se incluyen en esta propuesta.

## 4. Propuesta de actuación

Teniendo en cuenta la dinámica descrita y el desplazamiento de los lóbulos sedimentarios hacia el sureste a lo largo de la costa, la amenza de erosión en los dos tramos de playa estudiados (natural y urbano) resulta ser circunstancial y tiene un carácter cíclico. De tal forma que un tramo de playa erosivo puede pasar a ser acumulativo en dos circunstancias. La primera de ellas puede suceder cuando uno de los lóbulos lo ocupa migrando desde el noroeste. La segunda sucede cuando un temporal ataca el frente acantilado haciéndolo retroceder introduciendo en el sistema importantes volúmenes de arena que son distribuidos por la playa en forma de barras sedimentarias. Por razones obvias, esta segunda posibilidad no puede suceder en el tramo urbano de la playa.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que en el tramo urbano, la construcción de un peine de espigones ha favorecido la dinámica transversal frente a la longitudinal según los estudios de Sedrati y Morales (2017). La presencia de estos espigones puede ser negativa, ya que dificultará el tránsito longitudinal entre los diferentes segmentos de playa cuando se produzca la llegada de uno de los lóbulos sedimentarios al sector urbano de la playa. La propuesta de actuación presentada en este trabajo recomienda eliminar estos espigones.

Sin embargo, durante los momentos en que los lóbulos sedimentarios están ausentes, seguiría existiendo un riesgo elevado de que, tanto el afloramiento con las huellas humanas pleistocenas situado en el tramo natural, como el paseo marítimo del tramo urbano sean atacado por las olas durante los temporales. Este escenario requiere una gestión adecuada con actuaciones concretas.

El tramo natural es el que presenta un problema más complejo de gestión, pues las actuaciones a adoptar dependerán del tipo de protección que se pretenda dar al afloramiento patrimonial. En el caso de pretenteder mantenerlo expuesto y visitable se requeriría una eliminación permanente de la cobertura sedimentaria. Esta opción presenta el inconveniente de exponer las huellas al oleaje que podría erosionarlas y destruirlas. Por lo tanto, la opción tendría que venir acompañada de la construcción de un recinto permanente que evitase la inundación marina de las mismas y la actuación del oleaje sobre ellas. Este recinto tendría que cumplir además el requisito de no interrumpir la deriva litoral para que el tramo de playa subsiguiente no se viera efectado por esta interrupción. Técnica y económicamente, esta opción se nos antoja bastante inviable. La opción que perece más factible para su protección sería la cobertura con arena de playa, que protegería permanentemente el afloramiento de la erosión; aunque este caso tendría el inconveneinte de que las huellas no serían visibles. La caída del acantilado en los temporales de 2021 hizo que esta sea la situación actual. En un futuro, cuando esta

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

zona presente de nuevo un déficit de arena y las huellas vuelvan a quedar expuestas, sería recomendable un aporte artificial de arena que vuelva a cubrir y proteger el afloramiento.

En el tramo urbano, es la ausencia de un cordón dunar la que deja expuesto el paseo marítimo a los temporales. En este caso la propuesta de actuación sería la reconstrucción del sistema dunar con aportación de arena, plantación de vegetación psamófila, cierre con postes y cuerdas de todo el ámbito dunar y creación tras las dunas de un paseo de madera con pasos elevados para alcanzar la playa por encima del sistema dunar (Fig. 3).



***Fig. 3**. Propuesta de actuación en el frente urbano de la playa de Matalascañas.*

Se propone reconstruir una duna con el perfil promedio de las playas onubenses que no presentan problemas de erosión continuada (Fig. 4). La granulometría de los sedimentos cuya utilización se propone es la granulometría característica de todas las dunas estudiadas, compuesta por arena bien clasificada de tamaño medio a fino.

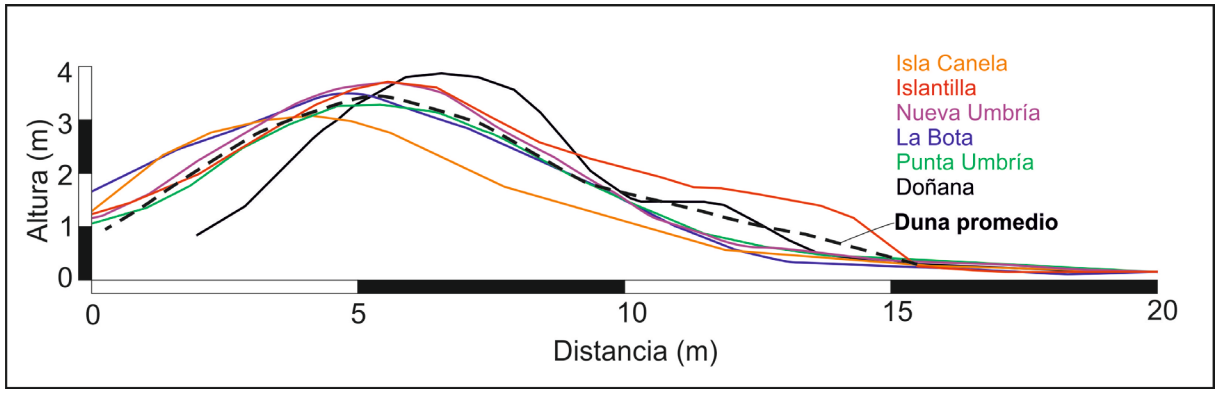



***Fig. 4.** Perfiles topográficos de las dunas estudiadas y perfil promedio propuesto para la reconstrucción del cordón dunar en la primera línea de la playa urbanizada de Matalascañas.*

Esta actuación es conforme a la propuesta reciente de Zainuddin et al. (2024), y también es similar a la adoptada en 2014 por el Area Metropolitana de Barcelona con buenos resultados (Palacios, 2019). Todo el conjunto debería de ir acompañado de paneles de señalización e información.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 5. Agradecimientos

Este trabajo es resultado del proyecto de Investigación 2993/2023, "Caracterización, seguimiento y control del yacimiento de icnitas humanas en el Espacio Natural de Doñana: un reto ante el Cambio Global", concedido por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales. El equipo de investigación que redacta este trabajo disfruta de un convenio de colaboración con el Ayuntamiento de Almonte (Huelva).

## 6. Referencias

Davis, R.A. & Hayes, M.O. (1984). What is a wave-dominated coast? *Marine Geology*, 60: 313-329. https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90155-5

Mayoral, E., Díaz-Martínez, I. & Duveau, J. et al. (2021): Tracking late Pleistocene Neandertals on the Iberian coast. *Scientific Reports*, 11: 4103. https://doi.org/10.1038/s41598-021-83413-8

Mayoral, E., Duveau, J., Santos, A., et al. (2022): New dating of the Matalascañas footprints provides new evidence of the Middle Pleistocene (MIS 9-8) hominin paleoecology in southern Europe. *Scientific Reports*, 12: 17505. https://doi.org/10.1038/s41598-022-22524-2

Morales, J.A., Rodríguez Ramírez, A. & Sedrati, M. (2018). Beaches of Huelva. In: Morales, J.A. (Ed). The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management. Springer Nature. Heidelberg. pp. 335-359.

Morales, J.A., Rodríguez Ramírez, A., Mayoral, E., et al. (2024). Dinámica sedimentaria de playa sobre un afloramiento patrimonial del Pleistoceno: la superficie de pisadas de El Pichilín (Almonte, Huelva). En este mismo libro de actas.

Muñoz Pérez, J.J., Lopez de San Roman-Blanco, B., Gutierrez-Mas, J.M. &/ Moreno, L. (2001). Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Coastal Engineering*, 42(2):143-153. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00054-5

Palacios, D. (2019). La erosion en las playas del Área Metropolitana de Barcelona. La perspectiva del gestor. X Jornadas de Geomorfología Litoral. Libro de Ponencias. 101-104.

Rodríguez-Ramírez, A., Ruiz, F., Cáceres, L.M., Rodríguez-Vidal, J., Pino, R. & Muñoz, J.M. (2003). Analysis of the recent storm record in the south-western Spain coast: implications for littoral management. *The Science of the Total Environment* 303, 189–201. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00400-X

Sedrati, M. & Morales, J.A. (2017). Efecto de los espigones transversales en la dinámica de las playas disipativas con barras: Ejemplo de Matalascañas, Huelva. Geo-Temas, 17: 239-242.

Zainuddin, S.N.H., Ariffin, E.H., Taslin, P.N.A. et al. (2024). Sand dune restoration as sustainable natural architectural design for coastal protection along seasonal storm-prone beach. *Results in Engineering*, 22: 102149. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102149

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18867

# Influencia de la presión antrópica en una flecha arenosa de baja energía

*Influence of anthropogenic pressure on a low-energy sand spit*

**Juan Montes[a], Laura del Río[a], Javier Benavente[a] y Theocharis A. Plomaritis[b]**

[a]Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, Cádiz, España (juan.montes@uca.es; laura.delrio@uca.es; javier.benavente@uca.es). [b]Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, Cádiz, España (haris.plomaritis@uca.es).

How to cite: Montes, J.; Del Río, L.; Benavente, J. y Plomaritis, T.A. 2024. Influencia de la presión antrópica en una flecha arenosa de baja energía. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18867

***Abstract***

*This study analyses the influence of the anthropic pressure on the evolution of the Palmones sand spit, located in the inner part of Algeciras Bay. For this purpose, medium-term changes have been analysed through multi-temporal aerial photography, and short-term changes through topographic surveys on beach profiles and dune toe monitoring. Results show how the evolution of the sand spit is highly conditioned by the presence of anthropic structures, among which the Bahía de Algeciras Port can be highlighted, as it has generated a process of tilt of the sand spit over the central area, leading to severe erosion in the northern area and accretion in the southern area. In addition, erosion of the dune sector provides sediment to the system, protecting the beach and preventing even higher erosion rates.*

***Keywords:*** *Palmones sand spit, Algeciras Bay, coastal erosion, aerial photograph, topographic monitoring, dune system.*

***Resumen***

*El presente trabajo analiza la influencia de la presión antrópica en la evolución de la flecha de Palmones, situada en el interior de la Bahía de Algeciras. Para ello se han analizado los cambios a medio plazo a través de un estudio de fotografía aérea, y a corto plazo a través de un seguimiento topográfico consistente en la realización de perfiles y el seguimiento del pie de duna. Los resultados muestran cómo la evolución de la flecha está altamente condicionada por la presencia de estructuras antrópicas, entre las que destaca el Puerto Bahía de Algeciras, que ha generado un proceso de basculamiento de la flecha sobre la zona central, con erosión importante en la zona norte y acreción en la zona sur. Además, la erosión del sistema dunar proporciona sedimento al sistema, protegiendo la playa y evitando tasas de erosión aún mayores.*

***Palabras clave:*** *Flecha de Palmones, Bahía de Algeciras, erosión costera, fotografía aérea, seguimiento topográfico, sistema dunar.*

## 1. Introducción

Las zonas costeras favorecen la concentración de la población y promueven actividades comerciales, industriales y recreativas. En los últimos 70 años, el número de grandes ciudades situadas en la franja costera se ha multiplicado por 4,5, incrementándose a su vez el desarrollo urbanístico (Barragán y De Andrés, 2015). Por otro lado, las playas situadas en el interior de bahías o estuarios, como las presentes en el interior de la Bahía de Algeciras, han sido

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

menos estudiadas que las playas expuestas a mar abierto, por lo que existe un déficit de conocimiento sobre su morfodinámica (Vila-Concejo et al., 2010). Estas playas se encuentran en estuarios o bahías muy modificados, donde las estructuras y actividades antrópicas ejercen un importante control sobre su forma y comportamiento (Fellowes et al., 2021). El objetivo del presente trabajo es analizar la evolución a medio y corto plazo de la flecha de Palmones (Bahía de Algeciras) y determinar los factores que condicionan su comportamiento. Para ello se han utilizado tanto fotografías aéreas como datos de campañas topográficas RKT-DGPS.

## 2. Área de estudio

La flecha de Palmones se extiende a lo largo de 1,5 km con dirección SSO-NNE, en el interior de la Bahía de Algeciras (Fig. 1A), en el entorno del Estrecho de Gibraltar. La Bahía de Algeciras está conectada al Estrecho de Gibraltar a través de una abertura de unos 7,5 km orientada al sur, y tiene profundidades que exceden los 500 m en un cañón submarino situado en la zona central. En el interior de la bahía desembocan los ríos Palmones y Guadarranque, de gran pendiente y un marcado carácter torrencial, en los que se alternan periodos de estiaje con grandes avenidas (Gracia, 2008), ambos regulados mediante embalses.

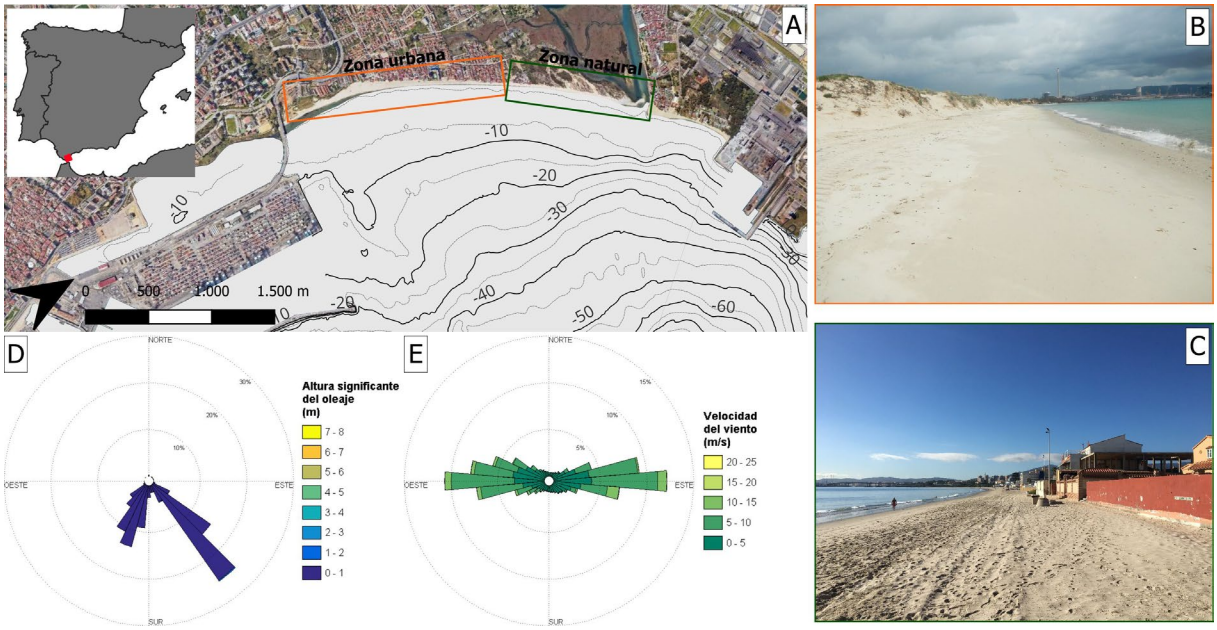



***Fig. 1.*** *A: Localización de la zona de estudio. B y C: aspecto de las zonas natural y urbana de la flecha de Palmones. D y E: Rosas de oleaje y viento en el punto SIMAR 6065025 (datos proporcionados por Puertos del Estado).*

El viento presenta un comportamiento bimodal (Fig. 1E), con alternancia entre vientos de Poniente (oeste) y vientos de Levante (este), que alcanzan velocidades medias superiores a 72 km/h (Gómez-Enri et al., 2019). Los vientos de Levante adquieren mayor importancia en esta zona debido a su aceleración al pasar por el Estrecho de Gibraltar (Dorman et al., 1995). Además, el viento de Levante es el generador del oleaje en esta zona, mientras que los vientos de Poniente tienen escasa influencia debido al corto *fetch* que poseen. En el interior de la Bahía de Algeciras, la altura media del oleaje es inferior a 0,1 m debido a su situación protegida y condiciones batimétricas, y rara vez sobrepasa 1,5 m de altura (Fig. 1D). Los temporales presentan una estacionalidad poco marcada debido a que el oleaje de alta energía está asociado a los fuertes vientos de Levante, asociados a altas presiones y que se pueden producir durante todo el año. Además, al estar asociados a sistemas de altas presiones, no suelen ir acompañados de una subida de los niveles de *storm surge*. La marea en esta zona es de carácter semidiurno y micromareal, con un rango que oscila entre 0,98 m en condiciones de mareas vivas y 0,36 m en condiciones de mareas muertas.

La corriente de deriva litoral en el interior de la Bahía de Algeciras circula en sentido horario, desde la parte oeste hacia la parte este, lo que permitió la formación de flechas litorales como la flecha de Palmones. En esta flecha se

 BY-NC-SA

localiza la playa de Rinconcillo, una playa estrecha, con pendientes pronunciadas y en la que, ocasionalmente, se observan sistemas de cúspides. En ella se pueden diferenciar claramente dos zonas: urbana y natural (Fig. 1B y Fig. 1C). La primera está situada en la parte SO, completamente urbanizada, con casas que se sitúan directamente sobre la parte posterior de la playa. La segunda se encuentra en la parte NE, y posee un sistema dunar vegetado con alturas que varían entre 3 y 5 m, generado por los fuertes vientos de Levante (Gracia et al., 2018).

## 3. Metodología

Para analizar la evolución de la flecha de Palmones a medio y corto plazo se han utilizado diferentes técnicas. Las variaciones a medio plazo se han analizado mediante un estudio de ortofotografías aéreas de los últimos 60 años (1956-2016, 13 ortofotografías) utilizando la herramienta *DSAS 4.3* (*Digital Shoreline Analysis System*; Thieler et al., 2009). Los estadísticos seleccionados, calculados en transectos espaciados de forma homogénea cada 50 m, fueron la envolvente del cambio costero (SCE, *Shoreline Change Envelope*), la tasa de punto final (EPR, *End Point Rate*) y la tasa de regresión lineal (LRR, *Linear Regression Rate*). Como indicador de la línea de costa se ha utilizado la marca de agua, que a pesar de que puede introducir errores derivados de la marea, el oleaje y la forma del perfil de la playa (Boak & Turner, 2005), es el único indicador disponible en todos los vuelos; además, la variabilidad de la marca de agua en la zona de estudio es relativamente baja al ser un área micromareal.

Además del cálculo de las tasas para todo el periodo de estudio, la tasa LRR ha sido calculada diferenciando dos periodos, 1956-1997 y 1997-2016, con el objetivo de comparar los cambios a medio y corto plazo, y así cuantificar si los procesos dominantes en las diferentes zonas permanecen constantes, se aceleran o se revierten. La selección de estos periodos, de 40 años el primero y 20 años el segundo, responde a dos premisas: tener un número de datos similar en cada periodo (6 ortofotos en el primer periodo y 7 ortofotos en el segundo), y cuantificar las tendencias existentes en la zona desde el final de la década de los 90, en la que se produjo un gran desarrollo urbanístico en el litoral de este sector de la provincia.

Para analizar las variaciones espaciales y temporales de la playa a corto plazo se ha realizado un seguimiento topográfico con un RTK-DGPS. Las campañas, realizadas entre octubre de 2015 y abril de 2019, se han llevado a cabo con periodicidad quincenal o mensual dependiendo de la ocurrencia de eventos de alta energía y de las condiciones de la marea, resultando en un total de 45 campañas. En cada zona de la playa, natural y urbana, se han realizado 6 perfiles espaciados unos 50 m entre sí. Para seleccionar un indicador que diera información sobre las variaciones de la playa, se realizaron test de correlación vertical y horizontal (Robinet et al., 2016) sobre los diferentes perfiles. De forma complementaria, se han identificado los temporales durante el periodo de estudio usando los umbrales establecidos por Del Río et al. (2012).

Además, en el sector de la zona natural donde se han realizado los perfiles se ha llevado a cabo un seguimiento del pie de duna en cada una de las campañas topográficas. Este seguimiento ha permitido realizar un análisis de las variaciones horizontales (XY) y verticales (Z) del pie de duna. Las variaciones horizontales han sido analizadas siguiendo la misma metodología que la aplicada para analizar la evolución a medio plazo, mediante transectos espaciados cada 2 m. Las variaciones verticales han sido calculadas en los mismos transectos.

## 4. Resultados

### 4.1. Evolución a medio plazo

Los resultados del análisis de ortofotografía aérea muestran que la flecha de Palmones presenta tres sectores con comportamientos bien diferenciados (Fig. 2). El tramo sur, apoyado en el puerto, muestra una fuerte acreción, con valores de LRR superiores a 2 m/año. En este tramo, la línea de costa avanza alrededor de 75 m desde su posición original en 1956 hasta la posición en 2016. El tramo central presenta un comportamiento estable, con valores de LRR comprendidos entre -0,25 y 0,25 m/año, y la posición de la línea de costa, a pesar de presentar algunas variaciones en determinados años, retrocede menos de 5 m desde su posición original. Por último, el tramo norte, en el que se encuentra la desembocadura del río Palmones, presenta una erosión moderada, con valores de LRR

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

entre -0,25 y -0,5 m/año. La línea de costa en este tramo retrocede más de 20 m respecto a su posición original. Cabe destacar que toda la flecha muestra una gran estabilidad durante los primeros años del periodo analizado, cambiando las tendencias en los tres sectores en torno al año 1995 (Fig. 3).

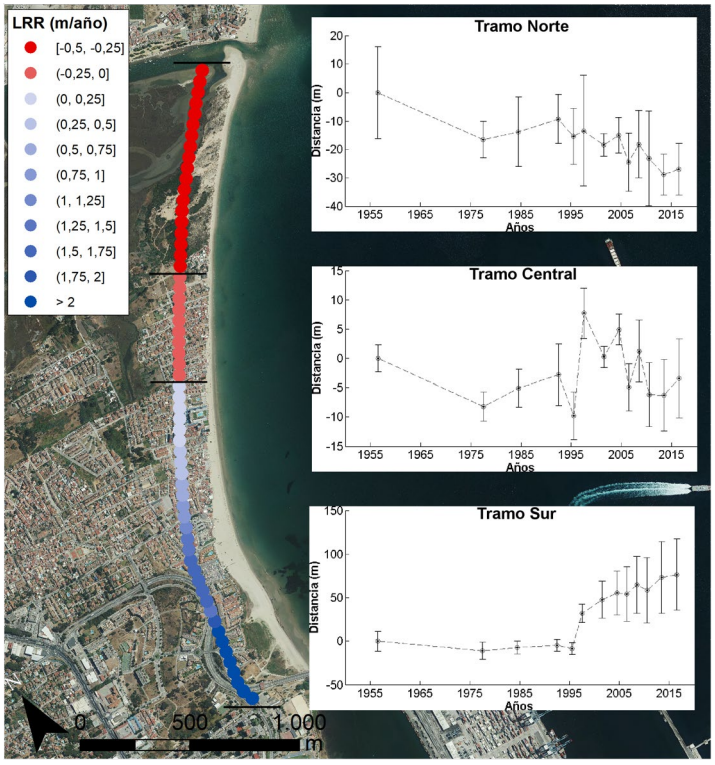



***Fig. 2.*** *Valor de la LRR en la Flecha de Palmones, junto con la evolución de la posición de la línea de costa entre 1956 y 2016 para cada tramo utilizando como referencia la posición de 1956. Las barras de error representan la variabilidad longitudinal en la posición para cada año.*

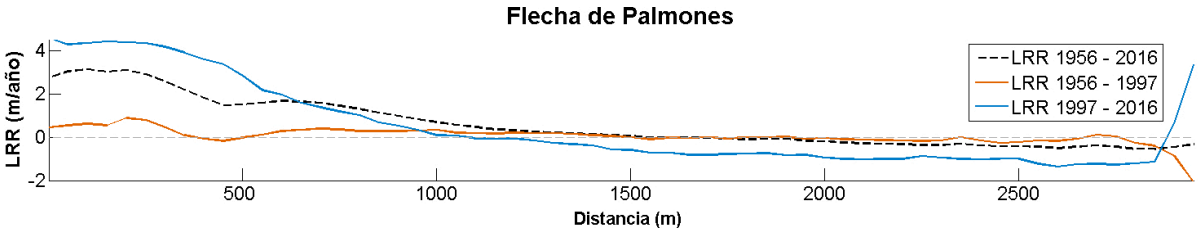



***Fig. 3.*** *Valores de la LRR para todo el periodo analizado (línea negra discontinua), el periodo 1956-1997 (línea naranja) y el periodo 1997-2016 (línea azul). La distancia 0 (eje x) es el punto más meridional.*

Los valores de EPR, que se calcula usando la posición de la línea de costa más antigua y la más moderna, muestran una erosión de entre -0,25 y -0,75 m/año en la zona natural y una acreción superior a 2,25 m/año en la parte cercana al puerto de la zona urbana. Por último, el 65% de la flecha presenta valores de SCE entre 6 y 50 m, aunque en algunas zonas pueden oscilar entre 100 y 175 m (Fig. 2).

### 4.2. Evolución a corto plazo

A partir del seguimiento topográfico se ha observado un comportamiento similar en las zonas urbana y natural de la altura de playa, que es el indicador que mejor información proporciona sobre la evolución (Fig. 4). En el intervalo de febrero a abril de 2017, coincidente con la mayor concentración de temporales durante el periodo analizado, se observa una fuerte disminución de la altura de la playa en ambas zonas, con recuperaciones relativamente rápidas en los periodos entre tormentas, aunque solo parciales. Al final del periodo analizado, la altura de la playa presenta en ambas zonas un valor inferior a la inicial, observándose una tendencia erosiva.

 BY-NC-SA

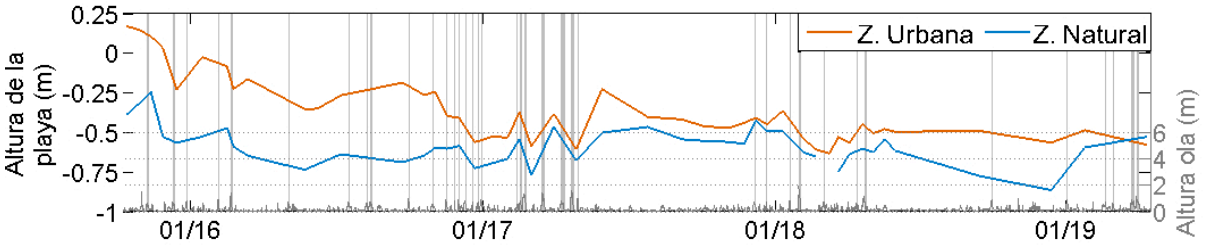



***Fig. 4.*** *Evolución de la altura de la playa durante el periodo analizado frente al oleaje. Las barras grises verticales indican las tormentas identificadas.*

En cuanto al análisis del pie de duna de la zona natural, los resultados muestran una erosión generalizada, ya que tanto la LRR como la EPR presentan valores negativos. El valor medio de LRR es de -1,3 m/año para todo el sector analizado, alcanzando en algunos puntos hasta -2,2 m/año. En cuanto a la EPR, presenta un valor medio de -1,15 m/año, con valores máximos de -1,8 m/año. Los valores de SCE varían entre 3,75 y 5,5 m.

## 5. Discusión y conclusiones

El análisis de los cambios costeros en las últimas décadas muestra que las playas de la flecha de Palmones están altamente influenciadas por la presencia de estructuras antrópicas. En esta zona existía un sistema dunar bien desarrollado en los años 50 que ha sufrido un proceso de urbanización paulatino, durante el cual se han perdido unos 200 $m^2$ de dunas por la construcción de edificaciones a lo largo de 1 km de costa. Además, la Bahía de Algeciras, enclave estratégico por su posición y por la forma de la propia bahía, favorece la presencia de grandes superficies portuarias, que a su vez fomenta el desarrollo de grandes núcleos de población en su entorno (Gracia et al., 2013). En ella se sitúan dos de los puertos más importantes de la Península Ibérica, el de Algeciras y el de Gibraltar. Entre el final de la década de los 50 y el principio de la década de los 90, en esta zona se incrementó de forma considerable la superficie urbana, industrial y portuaria, con un aumento asociado de los terrenos ganados al mar (Vallejo Villalta et al., 2000). La evolución reciente de la flecha de Palmones está claramente condicionada por el desarrollo del Puerto Bahía de Algeciras. Aunque el puerto ya se observa en la fotografía aérea de 1956, su superficie ha aumentado considerablemente tras diferentes obras de ampliación, las más relevantes en torno a los años 2000 y 2010. Estas ampliaciones supusieron un incremento de la longitud de la línea de costa en el interior de la Bahía de Algeciras, solo entre 1956 y 1997, de unos 20 km (Vallejo Villalta et al., 2000). Durante este periodo existe una pequeña acumulación en la parte sur de la playa del Rinconcillo, pero es en el segundo periodo (1997-2016), tras las grandes ampliaciones de la terminal de contenedores, cuando se observa un gran cambio en la evolución de toda la playa con tasas de avance superiores a 4 m/año en la zona sur y velocidades de retroceso de alrededor de -1 m/año en la zona norte (Fig. 3). En este segundo periodo la flecha pivota sobre un sector situado a unos 1000 m del extremo sur y se genera un proceso de retrogradación en el tramo norte. Según Manno et al. (2016), la zona del Puerto de Algeciras y la flecha de Palmones pasó de tener 10 km de construcciones sobre la costa en el año 1956, a 22,7 km en 1977, 35,2 km en 2001 y 41 km en 2010.

A su vez, el seguimiento topográfico ha permitido observar que el impacto de temporales en esta zona genera una fuerte erosión, que ha dañado casas en la zona urbana y ha hecho retroceder el pie de duna en la zona natural, asociada a la duración de estos eventos. Este tipo de playas, situadas en el interior de bahías, son muy sensibles al oleaje, incluso si la altura de ola no es muy elevada, cuando el oleaje incide con una dirección atípica (Gallop et al., 2020). Por otro lado, el pie de duna se erosiona por la acción directa del oleaje, que genera el colapso de la cresta de la duna, pone el sedimento a disposición de los procesos de *swash*, lo transporta hacia la playa y protege temporalmente las dunas y hace que el pie de duna se mueva hacia tierra y hacia arriba (van Gent et al., 2008).

A partir de este estudio se han identificado 3 sectores bien diferenciados, que presentan un basculamiento del sistema en torno al sector central, que se mantiene prácticamente invariable (zona de basculamiento), mientras que el sector norte presenta una clara erosión y el sector sur una clara acreción. Además, es probable que la erosión del sistema dunar esté aportando sedimento a todo el sistema, evitando una erosión mayor y permitiendo una recuperación parcial después de algunos temporales.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los proyectos ADACOSTA (CGL2014-53153-R) y CRISIS (PID2019-109143RB-I00), financiados por el MINECO, y al grupo RNM-328 del Plan Andaluz de Investigación (PAI). J.M. ha sido financiado por el contrato BES-2015-073218 y por un contrato postdoctoral Margarita Salas en la Universidad de Cádiz (Ministerio de Universidades y fondos NextGenerationEU de la Unión Europea).

## Referencias

Barragán, J. M., & De Andrés, M. (2015). Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean and Coastal Management*, *114*, 11–20. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.004

Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, *214*, 688–703. https://doi.org/10.2112/03-0071.1

Del Río, L., Plomaritis, T. A., Benavente, J., Valladares, M., & Ribera, P. (2012). Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz coast. *Geomorphology*, 143, 13-23. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.048

Dorman, C. E., Beardsley, R. C., & Limeburner, R. (1995). Winds in the strait of gibraltar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *121*(528), 1903–1921. https://doi.org/10.1002/qj.49712152807

Fellowes, T. E., Vila-Concejo, A., Gallop, S. L., Schosberg, R., de Staercke, V., & Largier, J. L. (2021). Decadal shoreline erosion and recovery of beaches in modified and natural estuaries. *Geomorphology*, *390*, 107884. https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2021.107884

Gallop, S. L., Vila-Concejo, A., Fellowes, T. E., Harley, M. D., Rahbani, M., & Largier, J. L. (2020). Wave direction shift triggered severe erosion of beaches in estuaries and bays with limited post-storm recovery. *Earth Surface Processes and Landforms*, *45*(15), 3854–3868. https://doi.org/10.1002/esp.5005

Gómez-Enri, J., González, C. J., Passaro, M., Vignudelli, S., Álvarez, O., Cipollini, P., Mañanes, R., Bruno, M., López-Carmona, M. P., & Izquierdo, A. (2019). Wind-induced cross-strait sea level variability in the Strait of Gibraltar from coastal altimetry and in-situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, *221*(May 2018), 596–608. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.042

Gracia, F. J. (2008). Los espacios naturales de la provincia de Cádiz. In F. J. Gracia (Ed.), *Geomorfología de los espacios naturales protegidos de la provincia de Cádiz* (p. 195).

Gracia, F. J., Del Río, L., Aranda, M., Anfuso, G., Talavera, L., Montes, J., & Benavente, J. (2018). Dunes in the Gibraltar Strait realm. In J. A. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management* (pp. 661–680). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_28

Gracia, V., Sánchez-Arcilla, A., & Anfuso, G. (2013). Spain. In E. Pranzini & A. T. Williams (Eds.), *Coastal Erosion and Protection in Europe* (p. 457). Routledge.

Manno, G., Anfuso, G., Messina, E., Williams, A. T., Suffo, M., & Liguori, V. (2016). Decadal evolution of coastline armouring along the Mediterranean Andalusia littoral (South of Spain). *Ocean and Coastal Management*, *124*, 84–99. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.02.007

Robinet, A., Castelle, B., Idier, D., Le Cozannet, G., Déqué, M., & Charles, E. (2016). Statistical modeling of interannual shoreline change driven by North Atlantic climate variability spanning 2000–2014 in the Bay of Biscay. *Geo-Marine Letters*, *36*(6), 479–490. https://doi.org/10.1007/s00367-016-0460-8

Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 – An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. In *U.S. Geological Survey Open-File Report, 2008– 1278*.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Vallejo Villalta, I., Sánchez Rodriguez, E., & Ojeda Zújar, J. (2000). Transformaciones territoriales y de la dinámica litoral en la Bahía de Algeciras: aplicaciones de los SIG y la teledetección. *Tecnologías Geográficas Para El Desarrollo Sostenible*, 148–163.

van Gent, M. R. A., van Thiel de Vries, J. S. M., Coeveld, E. M., de Vroeg, J. H., & van de Graaff, J. (2008). Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods. *Coastal Engineering*, *55*(12), 1041–1051. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.04.003

Vila-Concejo, A., Hughes, M. G., Short, A. D., & Ranasinghe, R. (2010). Estuarine shoreline processes in a dynamic low-energy system. *Ocean Dynamics*, *60*(2), 285–298. https://doi.org/10.1007/s10236-010-0273-7

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18766

# Evolución de un sistema costero con alta presión antrópica: el caso de Sotogrande (San Roque, Cádiz)

*Evolution of a coastal system under high anthropogenic pressure: Sotogrande (San Roque, Cádiz)*

**Laura del Río[a], Juan Montes[a] y Javier Benavente[a]**
[a]Departamento de Ciencias de la Tierra e Instituto de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, laura.delrio@uca.es , juan.montes@uca.es , javier.benavente@uca.es

Del Río, L.; Montes, J. y Benavente, J. 2024. Evolución de un sistema costero con altas presiones antrópicas: el caso de Sotogrande (San Roque, Cádiz). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral,* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18766

***Abstract***

*This work analyzes the recent changes recorded on Sotogrande beach, located in a sandspit at the mouth of the Guadiaro River, on the Mediterranean coast of Cádiz province. Based on aerial photographs (1956-2022) and field topographic monitoring (2015-2019), results reveal a strong erosive trend, both in the short and medium term. The natural sector of the sandspit has retreated over the last decades at a rate of up to 3.6 m/year, and the impact of storm events extends over time, without a clear recovery of the beach profile. This trend is the result of the various anthropic interventions carried out in the area, with the construction of Sotogrande harbour, the canalization of the northern shore of the river mouth and the urbanization of the backbeach.*

***Keywords:*** *beach, coastal erosion, human pressure, Guadiaro river.*

***Resumen***

*En este trabajo se analizan los cambios recientes registrados en la playa de Sotogrande, situada en una flecha arenosa en la desembocadura del río Guadiaro, en el litoral mediterráneo de la provincia de Cádiz. A partir del estudio de fotografías aéreas (1956-2022) y de un seguimiento topográfico de campo (2015-2019) se ha cuantificado la fuerte tendencia erosiva de la playa, tanto a corto como a medio plazo. La zona natural de la flecha arenosa ha retrocedido en las últimas décadas a una tasa de hasta 3,6 m/año, y el impacto de los eventos de tormenta se prolonga en el tiempo, sin una recuperación clara del perfil de la playa. Esta tendencia es resultado de las diversas actuaciones antrópicas realizadas en el entorno, con la construcción del puerto de Sotogrande, la canalización de la orilla norte de la desembocadura y la urbanización de la trasplaya.*

***Palabras clave:*** *playa, erosión costera, presión antrópica, río Guadiaro.*

## 1. Introducción

Las playas arenosas son uno de los ambientes costeros de mayor relevancia para el ser humano en todo el mundo, desde el punto de vista tanto socioeconómico como ambiental. En España, las playas proporcionan una variedad de servicios ecosistémicos, fundamentalmente culturales (por su uso recreativo) y de regulación (por su papel de primera línea de defensa ante los temporales). El uso intensivo de las playas conlleva con frecuencia impactos asociados a las intervenciones antrópicas, que pueden ser muy negativos para el medio y para las actividades que se desarrollan en él. De aquí surge la necesidad de conocer sus tendencias evolutivas y determinar las causas de dichas tendencias, con el fin de adoptar las estrategias adecuadas de gestión. En la provincia de Cádiz existen

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

diversos tramos costeros erosivos, asociados a factores tanto de origen natural como antrópico (Del Río et al., 2013). Uno de ellos es la playa de Sotogrande (San Roque), donde se han realizado diversas intervenciones para intentar paliar la erosión (Roca, 2021). El objetivo de este trabajo se ha centrado en investigar la evolución reciente de la playa de Sotogrande, tanto a medio como a corto plazo, y establecer los factores responsables de dicha evolución, así como su posible tendencia futura.

## 2. Área de estudio

La playa de Sotogrande (San Roque) (Figura 1) está situada en el litoral mediterráneo de la provincia de Cádiz. Se sitúa en el entorno de una flecha arenosa de unos 950 m de largo que cierra parcialmente la desembocadura del río Guadiaro. La playa muestra una orientación NNE-SSO y presenta tres tramos bien diferenciados: i) el sector norte (en adelante, urbanización Norte o UN), encajado entre el espigón del puerto deportivo de Sotogrande y el espigón de la desembocadura; ii) el sector central (en adelante, flecha litoral o FL), ubicado sobre la propia flecha, de características semi-naturales; y iii) el sector sur (en adelante, urbanización Sur o US), respaldado por una escollera y una urbanización, y que presenta en la actualidad dos pequeños espigones. La playa se compone de arena gruesa (D50 = 0,67 mm) y es de carácter reflectivo, con una pendiente media (tan β) de 0,11 (Montes, 2021).

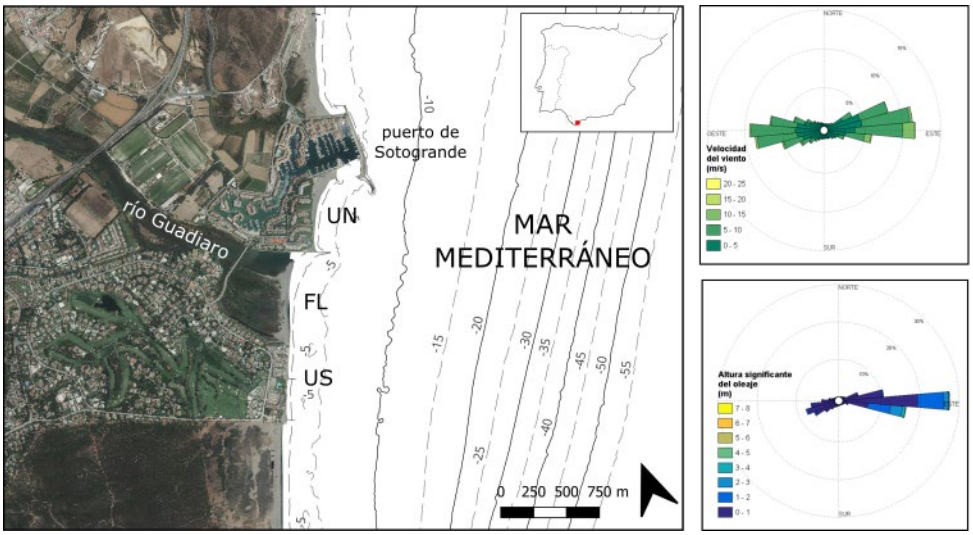



***Fig. 1*** *Localización de la playa de Sotogrande, con los tres tramos descritos en el texto (UN: urbanización Norte; FL: flecha litoral; US: urbanización Sur). Los paneles de la derecha muestran las rosas de vientos (arriba) y oleaje (abajo) en el punto SIMAR 2022074 (datos proporcionados por Puertos del Estado).*

La costa es de tipo micromareal, con un rango medio en mareas vivas de 0,82 m (Del Río et al., 2017). El oleaje presenta una altura media alrededor de 0,7 m, con una aproximación perpendicular a la costa procedente del Este, y el valor de $Hs_{12}$ puede sobrepasar los 5 m (Puertos del Estado, 2018). Las tormentas no muestran una clara estacionalidad, ya que el oleaje de alta energía se genera con fuertes vientos de Levante, asociados a altas presiones y que se pueden producir a lo largo de todo el año (Molina et al., 2019). Por este motivo, los eventos de elevada altura de ola no suelen estar acompañados de una marea meteorológica *(storm surge)* producida por el efecto del barómetro invertido (Del Río et al., 2017). La corriente de deriva litoral fluye en dirección SO, aunque en algunos puntos se observa, bajo ciertas condiciones, una corriente inversa (Muñoz-Pérez et al., 2000, 2010).

## 3. Metodología

La evolución de la playa de Sotogrande se ha establecido a dos escalas temporales diferentes. A medio plazo, se han empleado ortofotografías y fotografías aéreas de 15 vuelos comprendidos entre 1956 y 2022, obtenidos del portal de descargas del CNIG. Las escalas de las imágenes anteriores a 2001 oscilan entre 1:15.000 y 1:33.000, mientras que las posteriores (ortomosaicos digitales) presentan resoluciones entre 0,25 y 1 m/pixel. Para la digitalización de la línea de costa se ha utilizado como indicador la marca de agua. Este indicador, a pesar de que

 BY-NC-SA

puede introducir errores derivados de la marea, el oleaje y la forma del perfil de playa (Boak & Turner, 2005), se ha seleccionado por ser el único disponible en todos los vuelos para la totalidad del tramo analizado. Además, al tratarse de una zona micromareal y haber sido tomadas todas las fotografías en condiciones de buen tiempo, la variabilidad de la marca de agua es relativamente baja. Una vez digitalizadas las líneas de costa, para la cuantificación de las variaciones costeras se ha empleado la herramienta DSAS 5.1 *(Digital Shoreline Analysis System)* (Himmelstoss et al., 2021) para ArcGIS 10.6. Mediante dicha herramienta se han trazado transectos perpendiculares a las líneas de costa cada 50 m y se han determinado las distancias y tasas de cambio para el periodo de estudio, principalmente la tasa de regresión lineal (LRR).

A corto plazo, se ha realizado un seguimiento de los cambios topográficos registrados en la playa entre octubre de 2015 y abril de 2019. Para ello se han monitorizado 6 perfiles en el sector central (FL en la Fig. 1) mediante un RTK-DGPS Leica 900, con una periodicidad entre quincenal y mensual, sumando 45 campañas topográficas. Los perfiles se han realizado en condiciones de bajamares vivas para monitorizar la máxima superficie posible, cubriendo desde el límite superior de la playa hasta aproximadamente el cero hidrográfico. Por otro lado, para determinar el impacto de los temporales sobre la playa se han analizado los datos de oleaje correspondientes al periodo de seguimiento topográfico, procedentes del punto SIMAR 2022074 y proporcionados por Puertos del Estado. La identificación del umbral de tormenta se ha llevado a cabo mediante un análisis POT *(Peak Over Threshold)* de la serie de oleaje completa (1958-presente) (Montes, 2021). Para ello se ha utilizado el enfoque de Masselink y van Heteren (2014), que considera condiciones de tormenta cuando la altura de ola sobrepasa el percentil 95 de la serie analizada, estableciendo como duración mínima la de un ciclo mareal completo (12 horas) y un criterio de independencia meteorológica de 24 horas entre eventos consecutivos (Montes, 2021).

## 4. Resultados y discusión

El análisis de las fotografías aéreas revela los numerosos cambios ocurridos en Sotogrande a lo largo de las últimas décadas, asociados principalmente a las diversas intervenciones antrópicas que se han realizado. En los años 50, la zona era completamente natural, con amplios campos dunares y un sistema flecha-contraflecha cerrando la desembocadura del río Guadiaro, cuyo estuario presentaba dos canales principales en torno a una isla central (Figura 2 - 1956). En 1977 ya se había levantado gran parte de la US, destruyendo los sistemas dunares, y se había construido un espigón en la orilla norte del estuario, modificando por completo la doble flecha original (Figura 2 - 1977); aparece alguna edificación en la UN, y se construye el puente que conecta ambas urbanizaciones en la parte trasera del estuario. A partir de entonces, los cambios en la morfología de la flecha litoral son continuos.

Entre finales de los años 70 y principios de los años 80 aparecen las viviendas en primera línea de playa en la UN. A finales de los años 80 se urbaniza la primera línea de playa en la US y se construye el puerto deportivo de Sotogrande, que se inaugura en 1987 y experimenta sucesivas ampliaciones en su zona interior a lo largo de los años 90. En dicha década se colmata definitivamente el canal secundario del estuario, y el humedal de la isla central queda adosado a tierra, como consecuencia de un claro proceso de retrogradación *(roll-over)* de la flecha litoral (Figura 2 - 2001). Las imágenes de mediados de los años 2000 muestran en diversas ocasiones la desembocadura cerrada, como consecuencia de la existencia de una corriente de deriva litoral local inversa a la predominante (Muñoz-Pérez et al., 2000, 2010), requiriendo intervenciones para mantenerla abierta.

Entre 2004 y 2006 se construye una escollera al pie de las viviendas de primera línea en la US, acompañada de un pequeño espigón en el límite sur de dicha urbanización, con el fin de mitigar la erosión de la playa. En el año 2010, la playa frente a dicha escollera (en todo el sector de la US) ha desaparecido por completo, situación que se mantiene hasta el año 2016. En este año se construyen dos espigones frente a la US, uno de 90 m de largo en el límite sur de la misma, junto al preexistente, y otro de 60 m de largo en la zona central; al mismo tiempo se regenera la playa en dicho sector. Las regeneraciones se repiten en 2017 y 2018, empleando sedimento procedente del dragado de la desembocadura (Roca, 2021). En las imágenes de 2019 se observa un ensanchamiento de la playa frente a la US y un engrosamiento de la flecha litoral en su parte central, con un estrechamiento en el extremo libre. En el vuelo más reciente (Figura 2 - 2022) se mantiene la playa frente a la US, pero el sector de la flecha ha vuelto a retroceder notablemente.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València




***Fig. 2*** *Evolución de la zona de estudio en los últimos 65 años, con diversas intervenciones antrópicas y modificaciones en las playas, sistemas dunares y en la flecha de la desembocadura del río Guadiaro. Imágenes del PNOA (IGN).*

Las variaciones en la posición de la marca de agua a lo largo de las fechas mencionadas se muestran en la Figura 3. En ella se observa el severo retroceso de la línea de costa en toda la zona de estudio, con especial incidencia en la parte no urbanizada de la flecha, único tramo con espacio para migrar hacia el interior. En este sector, la erosión ha hecho retroceder la marca de agua más de 200 m desde su posición original, y el *roll-over* de la flecha está cubriendo de sedimento la vegetación del humedal situado en su parte trasera (Montes, 2021). Las tasas medias de cambio para la totalidad del periodo de estudio oscilan entre -1 y -1,6 m/año para el sector de la US, y entre -1,8 y -3,6 m/año para la zona natural de la flecha litoral (Figura 4). La playa situada al norte de la desembocadura (UN) también se ha erosionado, excepto en el extremo adosado al dique del puerto de Sotogrande (Figura 3). En este tramo las tasas de retroceso oscilan entre -0,6 y -1 m/año para la parte sur de la playa, mientras que el extremo norte ha avanzado a una tasa media de 0,7 m/año (Figura 4).

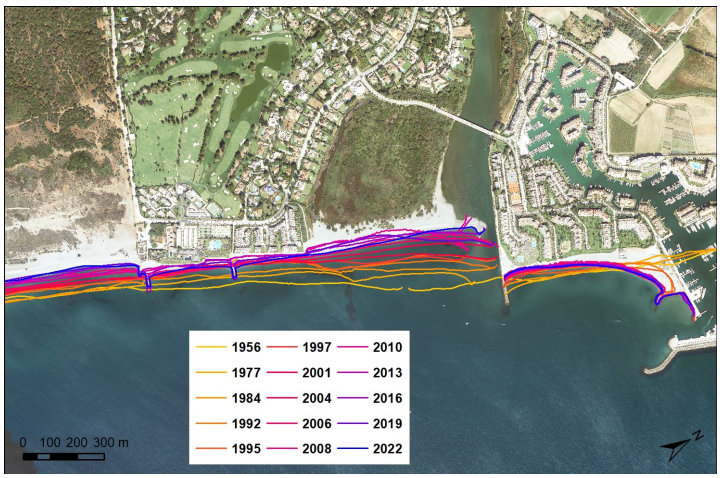



***Fig. 3*** *Cambios en la posición de la línea de costa (marca de agua) en la zona de estudio durante los últimos 65 años.*

Con el fin de determinar si los procesos dominantes en la zona permanecen constantes, se aceleran o se revierten, se ha calculado la tasa de cambio costero diferenciando dos periodos (Montes, 2021), 1956-1997 y 1997-2022. Se observa que en el sector US el retroceso fue muy superior en el primer periodo (Figura 5), dado el carácter rígido de la trasplaya, que impidió que progresara el retroceso una vez que la playa desapareció como consecuencia de

 BY-NC-SA

la falta de aporte sedimentario, con la construcción del puerto y la desaparición de las dunas. Posteriormente, las sucesivas regeneraciones y la construcción de los espigones favorecieron la acumulación de sedimento frente a la US. Por el contrario, en la zona natural de la flecha, con espacio para migrar hacia el interior, el retroceso se ha acelerado en el segundo periodo (Figura 5), asociado a las múltiples intervenciones antrópicas mencionadas; a ellas se añade, posiblemente, la reducción del aporte sedimentario a la costa procedente del río Guadiaro, a partir de la puesta en funcionamiento del trasvase Guadiaro-Majaceite en 1999 (López Geta et al., 2005).

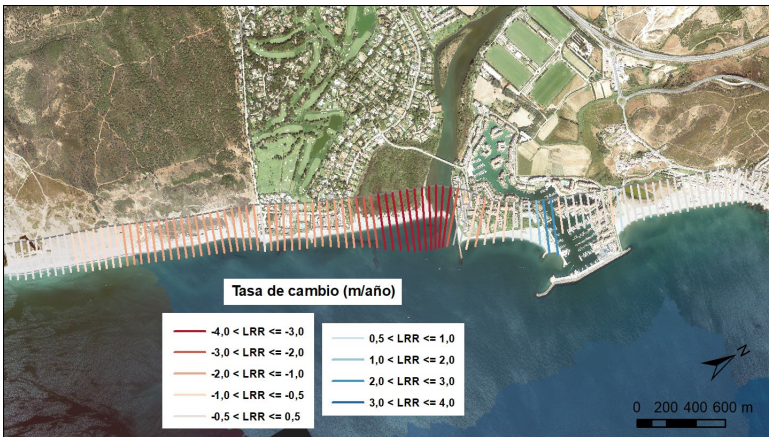



***Fig. 4*** *Tasas de cambio de la línea de costa (tasa de regresión lineal en m/año) a lo largo del periodo analizado.*

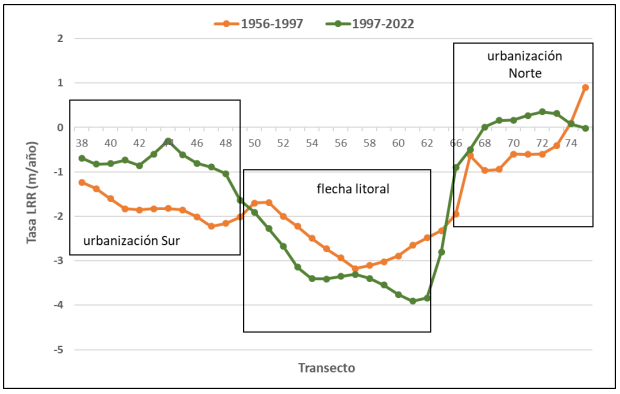



***Fig. 5*** *Tasas de cambio de la línea de costa en los periodos 1956-1997 y 1997-2022.*

En lo que respecta a los cambios a corto plazo, la evolución mensual de los perfiles de playa analizados (todos situados en el sector central, FL) muestra avances y retrocesos del perfil de gran magnitud, que superan en algunos casos los 30 m a lo largo del periodo de estudio (octubre 2015-abril 2019), y diferencias de altura de hasta 2 m en el mismo periodo. En este intervalo de seguimiento se identificaron 29 tormentas, que originaron una clara disminución de la anchura y de la altura de la playa (Figura 6), alternadas con pequeñas recuperaciones que nunca llegan a ser completas (Montes, 2021); se observa, por tanto, que el impacto de los periodos de temporal se prolonga en el tiempo.

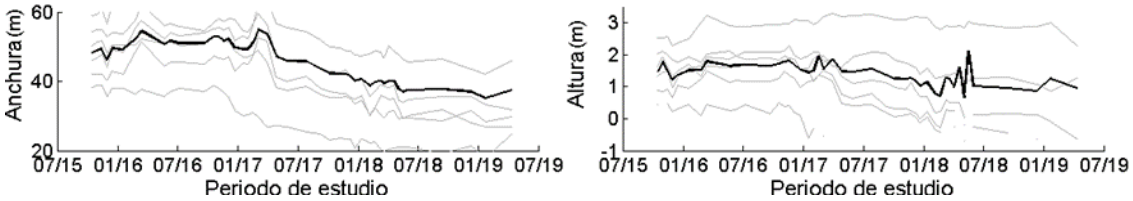



***Fig. 6*** *Evolución de la anchura y de la altura en la playa de Sotogrande durante el periodo de seguimiento topográfico. Las líneas grises corresponden a los diferentes perfiles, y las líneas negras a los valores medios.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 5. Conclusiones

La playa de Sotogrande presenta una fuerte tendencia erosiva, tanto a medio como a corto plazo. Las tasas de retroceso en las últimas décadas superan en algunos puntos los 3 m/año. La erosión se ha acelerado en los últimos 20 años en la parte no urbanizada de la flecha, la única con capacidad de migrar, donde las tasas de retroceso se han duplicado en este periodo. A corto plazo, la tendencia erosiva también es evidente, más marcada en condiciones de temporal, observándose de forma muy puntual pequeñas recuperaciones; no obstante, la dinámica general durante el periodo analizado ha sido la erosión, incluso durante periodos de calma. El fuerte deterioro sufrido por la flecha se asocia a la ocupación antrópica de la zona (construcción del puerto, urbanizaciones), de la que se han derivado diferentes actuaciones sobre la línea de costa. La erosión crónica de esta playa, situada en una zona altamente poblada y en continuo desarrollo urbanístico desde hace décadas, con constantes intervenciones de defensa costera para paliar el deterioro, la convierten en extremadamente vulnerable, sobre todo en eventos de alta energía. Esto implica un incremento en la vulnerabilidad en el marco del cambio climático, dadas las previsiones de aumento en la energía del oleaje esperadas para esta zona.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los proyectos ADACOSTA (CGL2014-53153-R) y CRISIS (PID2019-109143RB-I00). J.M. ha sido financiado por el contrato BES-2015-073218 y por un contrato postdoctoral Margarita Salas (Ministerio de Universidades y NextGenerationEU) en la UCA. Este trabajo es una contribución al grupo RNM-328 del PAI. Se agradece a Puertos del Estado por la cesión de los datos de oleaje, y al IGN-PNOA por el uso de las imágenes aéreas.

## 7. Referencias

Boak, E. H. & Turner, I.L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 214, 688-703.

Del Río, L., Gracia, F. J. & Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology* 196, 252-266.

Del Río, L., Montes, J.B., Plomaritis, T.A., Martinelli, A.B.M. & Benavente, J. (2017). Aplicación de modelos empíricos para el análisis de la inundación por temporales en playas con diferentes regímenes de marea y oleaje. *Geo-Temas* 17, 131-134.

Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G. & Farris, A.S. (2021). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide. *U.S. Geological Survey Report* 2021–1091, 104 p.

Masselink, G. & Van Heteren, S. (2014). Response of wave-dominated and mixed-energy barriers to storms. *Marine Geology*, 352, pp. 321-347.

Molina, R., Manno, G., Lo Re, C., Anfuso, G. & Ciraolo, G. (2019). Storm energy flux characterization along the mediterranean coast of Andalusia (Spain). *Water* (Switzerland), 11(3), 1-14.

Montes, J. (2021). *Vulnerabilidad costera ante los procesos de erosión e inundación en el marco del cambio climático en la Bahía de Cádiz y Bahía de Algeciras*. Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz.

Muñoz-Pérez, J.J., Caballero, I., Tejedor, B. & Gomez-Pina, G. (2010). Reversal in longshore sediment transport without variations in wave power direction. *Journal of Coastal Research*, 264, 780-786.

Muñoz-Pérez, J.J., de la Casa, Á., Gómez Pina, G. & Acha, A. (2000). Environmental restoration of the Guadiaro river estuary, Cadiz, Spain. *Periodicum Biologorum*, 102 (Suppl. 1), 333-338.

Puertos del Estado (2024). Página web del Organismo Público Puertos del Estado, Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. http://www.puertos.es

Roca, M. (2021). *Remote sensing, GIS and Governance: an integrated analysis of coastal management in the Guadiaro river mouth (Cadiz)*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Cádiz.

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18874

# Análisis preliminar de la edificación del litoral en Canarias (2022)

*The construction on the coastal area in the Canary Islands (2022): preliminary analysis*

**Emilio Medina-Lorenzo[a], Nicolás Ferrer-Valero[a], Emma Pérez-Chacón Espino[a] y Luis Hernández-Calvento[a]**

aGIR Geografía, Medio Ambiente y Tecnologías de la información Geográficas, Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, (, emilio.medina@ulpgc.es; , nicolas.fvg@ulpgc.es; , emma.perez-chacon@ulpgc.es y , luis.hernandez.calvento@ulpgc.es).

How to cite: Medina-Lorenzo, E.; Ferrer-Valero, N.; Pérez-Chacón Espino, E. y Hernández-Calvento, L. (2024). La edificación del litoral en Canarias (2023): análisis preliminar. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18874

***Abstract***

*The building occupation of the Canary Islands coastal area, largely linked to tourist activity, results in negative effects on the biodiversity, geodiversity and ecosystem services that take place on this strips. This work aims to quantify this littorization process taking as references the areas of influence and public easement of the Maritime-Terrestrial Public Domain for each island. It has been verified that, in the capital islands, the construction degree on the coast is greater compared to the peripheral islands. The accuracy of the official information source provided by the IGN to carry out this study is analyzed.*

***Keywords:*** *building, coasts, Canary Islands, littorization, Maritime-Terrestrial Public Domain, Geographic Information Systems.*

***Resumen***

*La ocupación edificatoria del litoral de Canarias, vinculada en buena medida a la actividad turística, deriva en efectos negativos en la biodiversidad, geodiversidad y los servicios ecosistémicos que tienen lugar en sus franjas costeras. El presente trabajo pretende cuantificar este proceso de litoralización tomando como referencias las zonas de influencia y de servidumbre pública del Dominio Público Marítimo Terrestre de manera diferenciada por cada una de las islas. Se ha comprobado como, en las islas capitalinas, el grado de edificación en el litoral es mayor con respecto a las islas periféricas. Se analiza la precisión de la fuente de información oficial proporcionada por el IGN para llevar a cabo este estudio.*

***Palabras clave:*** *edificación, costas, islas Canarias, litoralización, Dominio Público Marítimo Terrestre, Sistemas de Información Geográfica.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

La ocupación progresiva del litoral, vinculada al desarrollo urbano-turístico, caracteriza la evolución seguida en las costas españolas a partir de la década de 1960. Se estima que actualmente cerca del 40% de la población española se concentra en áreas litorales, fenómeno con tendencia creciente en la ultima década (MAPA, 2022). En el caso de las islas Canarias, el 90% de la población residía en municipios costeros en 2023, cifra a la que habría que sumar 95,6 millones de pernoctaciones turísticas (ISTAC, 2023). Greenpeace (2018, pág. 108) señala que el total de la franja costera canaria degradada representa el 11,9 %, considerando una franja de 10 km desde la línea de costa hacia el interior. Las consecuencias de este proceso en Canarias han centrado el interés científico (Pérez-Chacón et al. 2007, García Romero et al. 2016), y hoy existen certezas de los efectos que la alteración del litoral está teniendo en la biodiversidad (del Arco Aguilar, 2018), la geodiversidad (Ferrer-Valero et al., 2017) y en la pérdida de servicios ecosistémicos (Greenpeace, 2018), dándose la paradoja, en muchas zonas, de que su desarrollo turístico depende de la calidad de sus costas.

A todo ello se suma la inicidencia que, en las áreas litorales, tendrá la subida del nivel del mar, como consecuencia del calentamiento global (GRAFCAN, 2022). Desde el punto de vista de la gestión integrada de zonas litorales, existe un interés creciente por conocer el impacto de los riesgos costeros en las zonas turísticas (Yánez et al., 2021), asi como de las medidas que se podrían adoptar para mitigarlos. Entre los muchos indicadores, resulta fundamental cuantificar la edificación en el litoral. En el caso de Canarias se trata de un fenómeno para cuyo estudio no se contaba, hasta hace poco, con fuentes de detalle para el conjunto archipiélago. Por ello el objetivo general de esta comunicación consiste en determinar, como primera aproximación, la superficie edificada en Canarias dentro de los ámbitos que la Ley de Costas (BOE, 2014) establece como zona de influencia (500m), servidumbre de protección (100 m) y dominio público marítimo-terrestre.

## 2. Área de estudio

El archipiélago canario está formado por un conjunto de ocho islas y cuatro islotes originados por vulcanismo intraplaca frente a la costa noroccidental africana (Fig. 1). Las diferentes edades geológicas entre islas, así como entre los materiales que forman cada una, explican la gran diversidad de sus litorales. En ellos contrastan las zonas relativamente llanas, donde son frecuentes los procesos de sedimentación, especialmente en las islas más antiguas, con los litorales muy abruptos, característicos de las islas de formación más reciente.

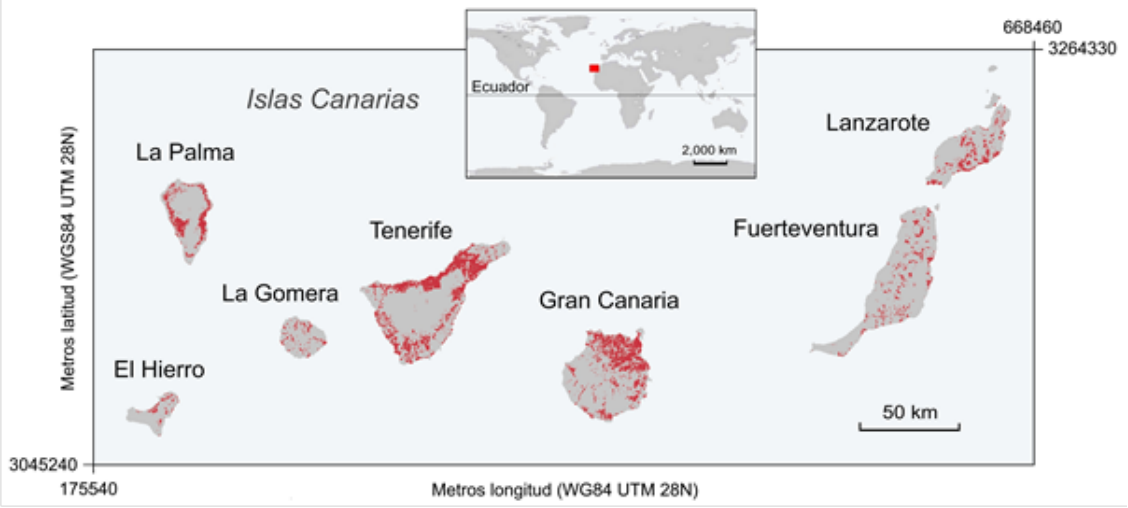



***Fig. 1.*** *Localizacion de las islas Canarias y superficie edificada en el archipiélago (en rojo). Fuente: IGN (2020)*

La costa de Canarias cuenta con aproximadamente 1,500 km de longitud. Si bien hasta etapas históricas recientes la población humana se ubicó sobre todo en el interior de las islas, donde estaban los principales recursos para una sociedad agraria (suelo, agua, etc.), la zona costera no estuvo exenta de usos tradicionales y asentamientos

 BY-NC-SA

vinculados a la actividad pesquera y portuaria. Sin embargo, el cambio drástico se produjo a partir de la mitad del siglo pasado, tras la incorporación del archipiélago al mercado turístico internacional, muy vinculado al binomio 'sol y playa'. Desde entonces se ha constatado un proceso exponencial de litorización, que se ha traducido en un gran desarrollo urbanístico para usos turísticos y residenciales, lo que ha conllevado una considerable artificialización del litoral.

## 3. Metodología

Para el análisis de la edificación del litoral de Canarias se han empleado los deslindes oficiales del Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT) de Canarias y sus límites de Servidumbre de Protección (Reglamento General de Costas, BOE 2014, artículos 53 y 59), en combinación con los conjuntos de datos relativos a los núcleos de población de Canarias.

La línea de deslinde del DPMT y de la Servidumbre de Protección (SP) fueron obtenidos del servicio abierto de descarga del MITERD (Gobierno de España), en formato shapefile, a escala 1:25.000 y actualizados a fecha de 31 de diciembre de 2023 (con independencia de si dichos límites se encuentran aprobados o pendientes de tramitación). A su vez, los núcleos de población de Canarias fueron obtenidos de la Información Geográfica de Referencia de Poblaciones (IGRP), del Centro Nacional de Descargas (IGN), en formato Geopackage. Estos datos se elaboran a partir de un compendio de fuentes y cuentan con una unidad mínima cartografiable de 1 $m^2$, escala 1:5.000 y actualización para 2023. Del IGRP se escogió el conjunto de datos “nucleo_s”, el cual excluye las áreas no edificadas.

El geoprocesamiento se realizó en un entorno SIG mediante el software ArcGIS-Pro. Primero se creó una capa de polígonos, tomando como referencia la línea de costa oficial (MITECO, 2023) y las polilíneas correspondientes a los deslindes del DPMT y SP, a modo de anillos concéntricos. Para la generación de las Zonas de Influencia (ZI), se calculó un área de influencia lineal, hacia el interior, de 500 metros a partir de dichos contornos (artículo 59.1 del Reglamento General de Costas). Los cálculos finales de área edificada se obtuvieron por operaciones de superposición entre la capa de nucleos del IGRP y las Zona de Influencia, la de Servidumbre de Protección, así como aquella superficie construida fuera del margen exterior del DPMT. Los cálculos han sido desagregados por islas y expresados en porcentajes para hacerlos comparables.

## 4. Resultados

### 4.1. Zona de influencia del DPMT

En el conjunto del archipiélago destacan, por sus mayores porcentajes de superficie construida en las zonas de influencia del DPMT, ambas islas capitalinas (Tenerife y Gran Canaria), con porcentajes de edificación de alrededor del 21% (Tabla 1). Entre las islas occidentales, así como en el total del conjunto, destaca El Hierro por el escaso porcentaje de superficie edificada en dicha área, con poco más del 1%. En el resto de islas occidentales hay escasa diferencia entre La Gomera y La Palma, con valores próximos al 6% para ambas islas. En lo que respecta a las islas orientales, tanto la superficie construida, como su relación con el total de sus zonas de influencia, son superiores en Lanzarote, donde se alcanza el 13,6%, frente a un 5,5% en Fuerteventura.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

***Tabla 1.*** *Relación de superficie construida en zona de influencia del DPMT por islas*

| Isla | Área de influencia del DPMT | Superficie construida en el área de influencia del DPMT | Porcentaje relativo |
|---|---|---|---|
| La Palma | 63,32 km$^2$ | 3,87 km$^2$ | 6,11% |
| El Hierro | 44,19 km$^2$ | 0,57 km$^2$ | 1,29% |
| La Gomera | 40,69 km$^2$ | 2,2 km$^2$ | 5,41% |
| Tenerife | 132,06 km$^2$ | 28,63 km$^2$ | 21,68% |
| Gran Canaria | 93,91 km$^2$ | 19,49 km$^2$ | 20,75% |
| Fuerteventura | 133,73 km$^2$ | 7,43 km$^2$ | 5,55% |
| Lanzarote (incluye La Graciosa) | 98,38 km$^2$ | 13,38 km$^2$ | 13,6% |

### 4.2. Zona de Servidumbre de Protección del DPMT

Atiendiendo al espacio correspondiente a la Servidumbre de Protección del DPMT, en las islas occidentales se observa una tendencia similar a la de la ocupación en las Zonas de Influencia. Mientras que en La Palma y La Gomera la superficie construida se encuentra en entorno a 3%, en El Hierro apenas se supera el 1%. Las islas capitalinas (Tenerife y Gran Canaria) son de nuevo las que presentan mayor porcentaje de edificación. En Tenerife, alcanza casi el 14% de su zona de Servidumbre de Protección, frente a casi el 9% de Gran Canaria. Los valores descienden en las islas orientales, con valores próximos al 3% y al 8% para Fuerteventura y Lanzarote, respectivamente (Tabla 2).

Respecto a la edificación exterior al deslinde del DPMT, en las islas orientales suponen menos de 200 m$^2$, mientras que en las islas occientales aproximadamente 500 m$^2$. Es de nuevo en las islas capitalinas donde se han identificado más superficies en la zona exterior del límite de ribera, con casi 1 km$^2$ y 3,8% en Gran Canaria. Al analizar de manera agregada la superficie edificada sobre la zona de Servidumbre de Protección del DPMT y la ubicada en la zona exterior del deslinde, Gran Canaria es la isla con mayor edificación, con más del 30%, seguida de Tenerife, con un 17,6%, Lanzarote, 11,2%, y Fuerteventura, 4,7%. En las islas occidentales se mantienen porcentajes similares para La Palma y La Gomera, con más del 4%, mientras que en El Hierro se alcanza un 1,4% (Tabla 2).

***Tabla 2.*** *Relación de superficie construida en la zona de Servidumbre de Protección del DPMT por islas*

| Isla | Zona de Servidumbre de Protección del DPMT | Superficie construida en la zona de Servidumbre de Protección del DPMT | Superficie construida en el exterior del deslinde del DPMT | Porcentaje relativo |
|---|---|---|---|---|
| La Palma | 2,92 km$^2$ | 2,92 km$^2$ | 0,18 km$^2$ | 4,2% |
| El Hierro | 1,06 km$^2$ | 1,06 km$^2$ | 0,03 km$^2$ | 1,38% |
| La Gomera | 3,66 km$^2$ | 3,66 km$^2$ | 0,09 km$^2$ | 4,62% |
| Tenerife | 13,83 km$^2$ | 13,83 km$^2$ | 0,98 km$^2$ | 17,59% |
| Gran Canaria | 8,45 km$^2$ | 8,45 km$^2$ | 3,82 km$^2$ | 30,87% |
| Fuerteventura | 2,94 km$^2$ | 2,94 km$^2$ | 0,49 km$^2$ | 4,67% |
| Lanzarote (incluye La Graciosa) | 7,94 km$^2$ | 7,94 km$^2$ | 0,65 km$^2$ | 11,62% |

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

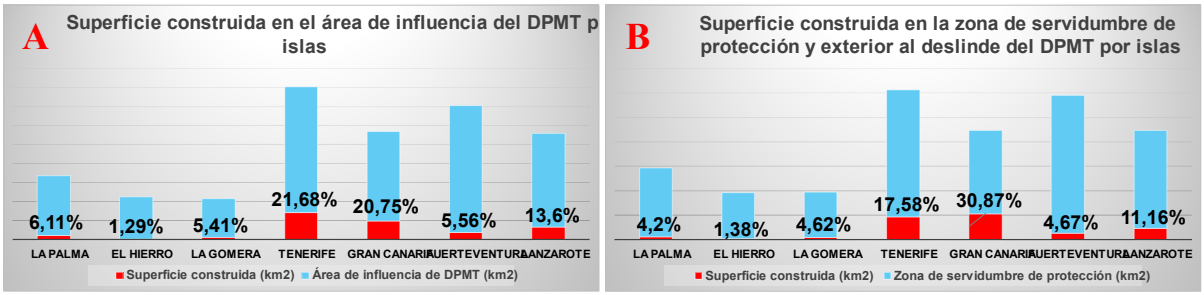



***Fig. 2.*** *Distribución porcentual de la superficie construida con respecto a la superficie total de las zonas de influencia (A) y de las zonas de servidumbre de protección (B) del DPMT.*

## 5. Discusión

Se aprecia una tendencia diferenciada entre el grado de ocupación del perímetro costero en las islas capitalinas y el identificado para las islas periféricas del archipiélago. El mayor número de residentes, el efecto de macrocefalia de ambas islas dentro del conjunto del archipiélago, así como un temprano y mayor desarrollo de sus sectores industriales y turísticos, en relación con las islas no capitalinas, serían los principales factores de dicho resultado. Por otra parte, los factores orográficos desempeñan un rol de importancia en el grado de ocupación, pues las islas occidentales, de formación más reciente, tienen perfiles costeros abruptos y, en muchos casos, escarpados, lo que dificulta su edificación. Tal tendencia se observa también dentro de las propias islas: por una parte, se identifican litorales relativamente llanos con un elevado grado de ocupación, frente a otros de orografía accidentada menos artificializados. Sin embargo, es de nuevo en las islas capitalinas, tras colmatar los espacios disponibles más llanos, donde se aprecia una mayor ocupación de zonas orográficamente menos aptas, con la transformación más profunda del territorio que ello implica. La misma tendencia es apreciable si se atiende a la franja considerada como zona de servidumbre de protección, especialmente en lo que respecta al espacio ocupado al exterior del deslinde del DPMT. En este sentido, destaca la superficie edificada en ese sector en la isla de Gran Canaria, que está ocupada tanto por infraestructuras portuarias, avenidas o playas artificiales, como por edificaciones hoteleras y residenciales que incumplen la legislación de aplicación para estas áreas.

Por lo que respecta a la base de datos de poblaciones suministrada por el CNIG, es de obligada mención el hecho de que, en la revisión de los resultados mediante fotointerpretación, se haya identificado un considerable número de polígonos con incorrecciones geométricas. Esta falta de precisión ha sido especialmente acusada en los datos obtenidos para Fuerteventura. En esta isla, se han identificado numerosas construcciones hoteleras, frecuentemente aisladas, que ocupan tanto la zona de servidumbre como el exterior del deslinde del DPMT, pero que no se identifican con ningún polígono, mientras que en otros complejos hoteleros los polígonos no abarcan la totalidad de las construcciones. Esta carencia podría explicarse por la propia metodología empleada para la generación de la base cartográfica de referencia, pues se han tomado datos catastrales en la elaboración de los núcleos envolventes relativos a las poblaciones y, presumiblemente, muchas de estas infraestructuras hoteleras se encuentren en una situación irregular.

Por otra parte, se considera preciso aplicar variaciones del enfoque de análisis, en el sentido de que las infraestucturas portuarias añaden el espacio ganado al mar al total de las superficies de referencia para establecer los cálculos porcentuales. Esta distorsión de los datos queda patente en el incremento de los valores obtenidos para Gran Canaria, con una importante número de puertos y dársenas, entre los que destaca el Puerto de La Luz y de Las Palmas, y en el caso de Lanzarote, isla que, pese a unas dimensiones más reducidas, presenta un elevado grado relativo de ocupación del frente litoral. De igual modo, se considera que los valores obtenidos para la isla de Fuerteventura se incrementarían considerablemente si no existiesen las incorrecciones de los datos detectadas, en cuyo caso podría establecerse una diferenciación de los grados de ocupación entre las islas occidentales y las orientales.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 6. Conclusiones

Se ha identificado una considerable edificación del litoral de las islas Canarias entre el DPMT y los 500 m., siendo ésta mayor en las islas de Gran Canaria y Tenerife, donde se alcanzan niveles de edificación en torno al 21%, frente a una media del 6% para el resto de las islas, si bien este porcentaje se dobla en el caso de la isla de Lanzarote. También es en las islas capitalinas donde se encuentra el mayor número de casos, así como de extensión, de superficie ocupada por edificaciones en la zona de servidumbre de protección del DPMT.

Si bien la base de datos Información Geográfica de Referencia de Poblaciones, suministrada por el IGN, aporta un recurso innovador, que permite una primera aproximación para el análisis de la superficie edificada de un territorio, se han identificado carencias de precisión y ausencia de polígonos para importantes espacios edificados, de modo que se estima precisa una revisión de la geometría suministrada por dicho recurso.

## 7. Agradecimientos

Esta publicación se ha realizado gracias al proyecto de I+D+i PID2021-124888OB-I00, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación/Agencia Estatal de Investigación/10.13039/501100011033 y por "FEDER Una manera de hacer Europa", así como del convenio de colaboración suscrito entre la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) y el Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria para el desarrollo de acciones y estudios en el litoral de la bahía del Confital- Las Canteras.

## 8. Referencias

BOE (2014). Real Decreto 876/2014 [Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente], de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento General de Costas. 11 de octubre de 2014 (pp. 83098-83216).

del Arco Aguilar, M. J., & Rodríguez Delgado, O. (2018). *Vegetation of the canary islands* (pp. 83-319). Springer International Publishing.

Ferrer-Valero, N., Hernández-Calvento, L., & Hernández-Cordero, A. I. (2017). Human impacts quantification on the coastal landforms of Gran Canaria Island (Canary Islands). *Geomorphology*, *286*, 58-67.

García-Romero, L.; Hernández-Cordero, A I.; Fernández-Cabrera, E.; Peña-Alonso, C.; Hernández-Calvento, L.; Pérez-Chacón, E. (2016). Urban-touristic impacts on the aeolian sedimentary systems of the Canary Islands: conflict between development and conservation. *Island Studies Journal*, Vol. 11, 1, pp. 91-112.

GRAFCAN (2022). Informe resumen de la evaluación del riesgo frente al cambio climático en las costas de Canarias. *Proyecto PIMA Adapta Costas (Canarias)*, Consejería de Transición Ecológica y Energía, Gobierno de Canarias. https://opendata.sitcan.es/upload/medio-ambiente/pima/20220531IP_ResumenPIMA.pdf

Greenpeace (2018). *A toda costa. Análisis de la evolución y estado de conservación de los bienes y servicios que proporcionan las costas.* Informe ampliado. https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/07/A-Toda-Costa-Informe-Ampliado-1.pdf (Consulta: 13/05/2024).

ISTAC (2023). Banco de Datos del Instituto Canario de Estadística, 2023, Gobierno de Canarias.

MAPA (2022). Demografía de la población costera. Análisis y Prospectiva – serie Pesca nº 5, Febrero 2022. Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Pérez-Chacón Espino E, Hernández Calvento L, Yanes Luque A (2007) L'impact des aménagements sur les littoraux canariens. In: *Etienne y Paris (coord): Les littoraux volcaniques: une approche environnementale*. Clermont-Ferrand (France), Ed. Presses Universitaires Blaise-Pascal, Coll. Volcaniques., 173-191 pp.

Yanes Luque, M. A.; Rodríguez-Báez, J.A.; Máyer Suárez, P.; Dorta Antequera, P.; López Díez, A.; Díaz Pacheco, J. y Pérez-Chacón Espino, E. (2021) Marine storms in coastal tourist areas of the Canary Islands. *Natural Hazards*, v. 109, p. 1297-1325. DOI: 10.1007/s11069-021-04879-3.

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18872

# Puesta en marcha de bases Coastsnap para el monitoreo de la evolución de la línea de costa de la playa de Las Canteras (Gran Canaria)

*Implementation of Coastsnap bases for monitoring the evolution of the coastline of Las Canteras beach (Gran Canaria)*

**Darío Nicolás Gómez Clemente[a], María José Sánchez-García[b], Abel Sanromualdo-Collado[c] y Rita González-Villanueva[d]**

[a]Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Las Palmas De Gran Canaria, dario.gomez102@alu.ulpgc.es; [b]Instituo de Oceanografía y Cambio Global, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, , mariajose.sanchez@ulpgc.es; [c]Instituto de Oceanografía y Cambio Global, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, , abel.sanromualdo@ulpgc.es y [d]Investigadora independiente, , rglezvill@gmail.com.

How to cite: Gómez-Clemente, D.; Sánchez-García, M. J.; Sanromualdo-Collado, A. y González-Villanueva, R. 2024. Puesta en marcha de bases Coastsnap para el monitoreo de la evolución de la línea de costa de la playa de Las Canteras (Gran Canaria). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18872

***Abstract***

*The beach of Las Canteras (Gran Canaria) is the main tourist and recreational attraction of the city of Las Palmas de Gran Canaria and is therefore of great socio-economic importance. For this reason, the sedimentary balance of the beach has been the subject of constant study in recent decades, documenting a tendency towards sediment accumulation in the northern arc and erosion towards the south. This work presents the setup of two citizen science coastal monitoring stations on Las Canteras beach, as part of the CoastSnap network. One station has been located in the central area, focused on the study of rocky outcrops and coastal erosion; while the second one has been placed in the southern arc, focused on the high dynamic of this area. Thus, this work shows the process used to determine the ideal location for the CoastSnap stations.*

***Keywords:*** *CoastSnap, Las Canteras Beach, Coastal monitoring, Coastal erosion, Rocky outcrops, Coastal dynamism, Environmental management, Citizen science.*

***Resumen***

*La playa de Las Canteras (Gran Canaria) es el principal reclamo turístico y de esparcimiento de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria, por lo que tiene gran importancia socio-económica. Por ello, el balance sedimentario de la playa ha sido objeto de estudio constante en las últimas décadas, documentándose una tendencia a la acumulación de sedimento en el arco norte y erosiva hacia el sur. Este trabajo presenta la puesta en marcha de dos bases de monitorización de la línea de costa mediante ciencia ciudadana en la playa de Las Canteras. Dentro de la red de CoastSnap, se localizó una estación en el arco centro, enfocada en el estudio de afloramientos rocosos y la erosión costera; y una segunda estación en el arco sur, centrada en el alto dinamismo de esta zona. Así, se muestra en este trabajo el proceso seguido para la determinación de los lugares idóneos para la instalación de las bases CoastSnap.*

***Palabras clave:*** *CoastSnap, Playa de Las Canteras, Monitorización costera, Erosión costera, Afloramientos rocosos, Dinamismo costero, Gestión ambiental, Ciencia Ciudadana.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

La Playa de Las Canteras, situada en Las Palmas de Gran Canaria, es un área de gran importancia ambiental y económica. Sin embargo, enfrenta constantemente los efectos de la erosión y acreción costera (Alonso, 1993), fenómenos que han motivado una intensa investigación para hallar soluciones efectivas. Los estudios convencionales, aunque fundamentales, implican un alto coste en recursos tanto técnicos como humanos, limitando su alcance espacial y temporal. Es aquí donde la ciencia ciudadana emerge como una herramienta útil. La participación ciudadana no solo reduce los costos, sino que también fomenta un sentido de pertenencia y responsabilidad hacia el cuidado de este recurso natural.

La iniciativa CoastSnap representa un avance en la monitorización de la costa mediante la participación activa de la comunidad. Utilizando la potencia de la ciencia ciudadana, CoastSnap emplea la fotografía como herramienta fundamental para estudiar y monitorear la variación de la línea de costa y los perfiles de la playa a lo largo del año. Su enfoque se basa en la idea de que los voluntarios tomen fotografías desde puntos de vista específicos en la playa, capturando la costa en diferentes momentos y condiciones (Harley et al., 2019). Esta metodología proporciona una valiosa fuente de datos que permite analizar cambios temporales en la playa, incluida la erosión, la sedimentación y el impacto de eventos climáticos extremos (González-Villanueva et al., 2023). Además, las bases de datos generadas podrían tener otras utilidades, como proporcionar información relevante sobre la afluencia de personas a la playa, los diferentes usos del espacio, los patrones de rompientes de ola y la identificación de arribazones de algas.

En este contexto, este trabajo se centra en detallar el proceso llevado a cabo para la instalación y puesta en funcionamiento de dos bases CoastSnap en la playa de Las Canteras: una en el área central y otra en el sur. El proceso abarca desde la determinación de las ubicaciones adecuadas hasta el diseño e instalación de las estructuras.

## 2. Área de estudio

El área de estudio se centra específicamente en dos puntos estratégicos de la playa de Las Canteras: el arco centro y el arco sur (Fig. 1). Estas zonas han sido seleccionadas por su relevancia en términos de dinámica costera y actividades humanas.

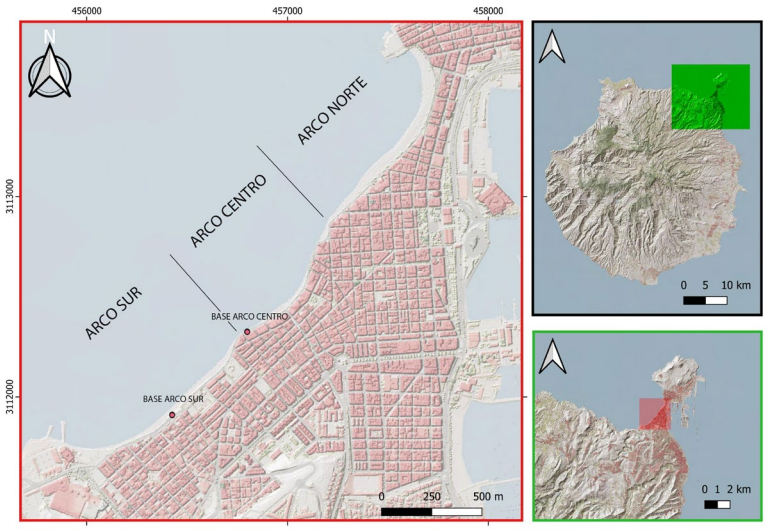



***Fig. 1.*** *Localización del área de estudio de las zonas propuestas para la ubicación de las bases CoastSnap.*

La playa se divide en tres amplios arcos con características morfológicas distintivas. La diferencia principal entre estos arcos se origina por la presencia de un arrecife rocoso llamado "la barra", ubicado a unos 200 metros de la línea de costa y que se extiende en paralelo a la playa. Este arrecife no es continuo, sino que presenta múltiples aperturas., lo que conlleva la formación de áreas con diferentes niveles de exposición al oleaje. Esta variabilidad

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

en la exposición al oleaje influye en la diversidad de usos por parte de los visitantes de la playa (Alonso et al., 2014). En el trabajo realizado por Alonso et al. (2014) se cuantifican tasas de avance de la playa en el arco norte de hasta 0,8 m/año, mientras que en el arco centro y parte N del arco sur se mantienen prácticamente constantes. No es así en el arco sur, registrándose tasas de retroceso de hasta 0,3 m/año. Los temporales, normalmente de componente NW, tienen un impacto directo sobre la playa, especialmente en el arco sur, donde la arena es transportada bien hacia el N o bien hacia zonas más profundas. Durante los periodos de calma, donde tenemos un oleaje constructivo, la dirección de aproximación del oleaje es NNE y apenas existen datos con componente W (Alonso et al., 2015).

## 3. Metodología

Se seleccionaron las zonas donde instalar las bases teniendo en cuenta dos aspectos fundamentales: la accesibilidad segura y frecuente de usuarios y una elevación adecuada que permita una buena visibilidad de la línea de costa. Además, se ha considerado la posición respecto a la trayectoria aparente del sol para evitar efectos de contraluz y sombras, y garantizar la presencia de elementos fijos en la imagen como puntos de control (Sánchez et al., 2022).

Considerando lo anterior, se realizaron visitas a la playa para capturar fotografías de todos los posibles puntos de interés, tomando nota de las coordenadas de cada uno para, una vez comparadas las perspectivas de la playa en cada fotografía, seleccionar los puntos que proporcionasen una mejor información sobre la línea de costa. Tras ello, se regresó a la playa para seleccionar los dos puntos finales para la ubicación de las bases.

El último paso fue el diseño y la instalación de las bases, que deben tanto cumplir las especificaciones dadas por CoastSnap para la captura de imágenes de la línea costera, como la normativa de diseño del Ayuntamiento para estar armonizadas con las infraestructuras del paseo.

## 4. Resultados

El Paseo de Las Canteras se identificó como una localización ideal para una base CoastSnap, ya que combina elementos estratégicos y funcionales esenciales: ofrece puntos elevados con buena visibilidad de la línea costera y evita efectos de contraluz; facilita la identificación de puntos fijos de control en las imágenes debido a su entorno urbano e infraestructuras; y es un enclave turístico y recreacional de fácil acceso y muy concurrido, lo que asegura la participación ciudadana.

Se decidió monitorizar las zonas de la playa en las que se habían documentado procesos erosivos, ya que son las zonas que pueden sufrir riesgos geológicos si no se gestionan adecuadamente con suficiente antelación. Con base en trabajos previos en la zona se descartó el arco norte debido a la tendencia a la acumulación de arena en dicha zona. Así, se seleccionaron el arco sur y el arco centro por su tendencia erosiva. Se evaluaron distintas alternativas de ubicación hasta seleccionar las idóneas y se diseñaron estructuras con soportes para teléfonos móviles, con posición y angulación predeterminadas, y paneles explicativos con instrucciones detalladas para tomar y compartir fotografías. La instalación de estas estaciones incluyó la señalización correspondiente y la toma de puntos de control con GPS diferencial para asegurar la transformación precisa de coordenadas entre el sistema de imagen y el terrestre (Harley et al., 2019; Sánchez et al., 2022). Las imágenes recibidas son procesadas por los responsables de la base, en este caso los autores del trabajo.

### 4.1 Base del arco centro

El objetivo seguido a la hora de instalar la base en el arco centro (Fig. 1) es el de monitorizar la erosión costera en esta sección de la playa y los afloramientos rocosos, que se observan en mayor o menor medida debido a los procesos de erosión y sedimentación.

El arco central de la playa de Las Canteras es una zona multifuncional que atrae a diferentes tipos de usuarios. Es popular para pasear y tomar el sol, y las áreas cercanas a la base son frecuentadas por bañistas. Esta zona de la playa también es ideal para la práctica de deportes acuáticos como la natación y el *paddle surf*. En esta zona de la

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

playa se observan rompientes tanto *spilling* como *plunging*, creando un entorno dinámico y variado que influye en la evolución morfodinámica de la playa, que también está influenciada por una de las aberturas de la barra de Las Canteras, lo que modula significativamente la influencia del oleaje, creando zonas de calma y áreas de más energía (Alonso et al., 2014).

Se decidió diseñar la base como un tótem simple orientado hacia el norte, desde donde se pueden capturar imágenes que incluyen parte el paseo, para tomar puntos de control, y los afloramientos rocosos (Fig. 2). Esta base se encuentra instalada desde mayo de 2023 y se está llevando a cabo el procesado de las imágenes actualmente.

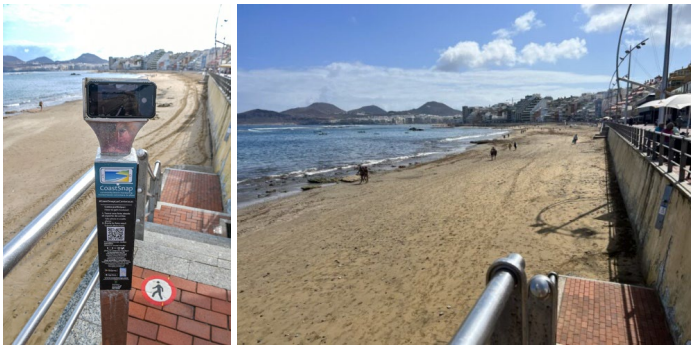


***Fig. 2.*** *Base del arco centro e imagen tomada desde este punto. Fuente: La provincia (2024).*

### 4.2 Base del arco sur

Se instaló la base en la posición señalada en la figura 1, ya que es la zona más dinámica de la playa. Se caracteriza por oleaje tipo *spilling*, procesos erosivos y un mayor transporte de sedimentos. Es un lugar estratégico en relación con la dinámica litoral del arco sur. Desde la posición elegida para la base (Fig. 3), se podrán monitorizar ambos comportamientos morfosedimentarios. Además, esta zona de la playa es muy concurrida, siendo popular tanto para pasear y disfrutar de las vistas al mar como para a las personas que practican surf y *bodyboard* en la playa de La Cicer. La afluencia de ciudadanos y turistas sugiere que habrá más oportunidades para que se detengan en la base y tomen fotos desde la misma.

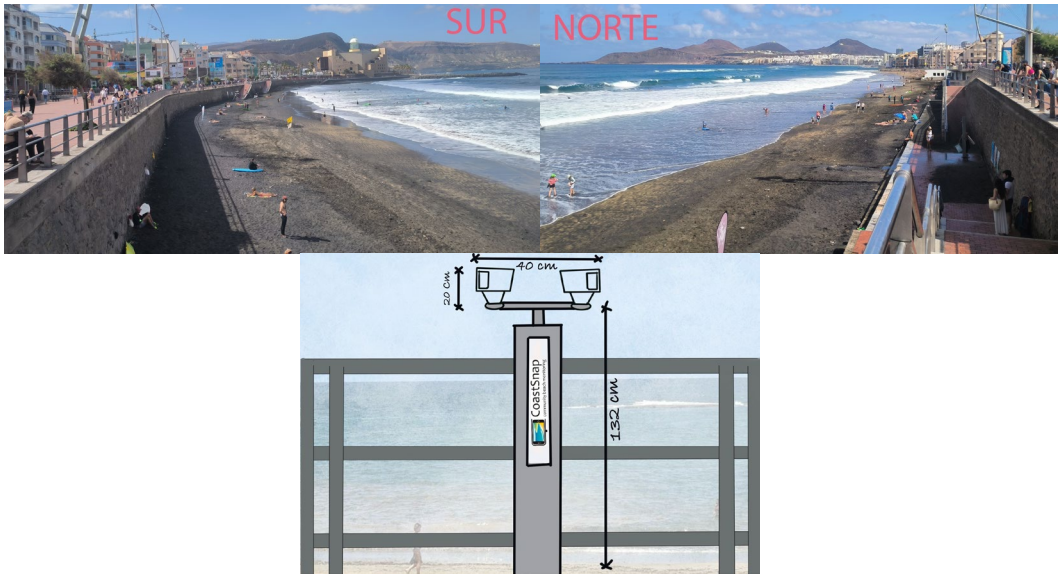



***Fig. 3.*** *Diseño de la base del arco sur (imagen inferior). Imágenes superiores: capturas de imagen orientadas al N y al S.*

En esta ubicación, se decidió instalar dos bases para teléfonos móviles con dos orientaciones: uno hacia el sur, donde la playa presenta mayor erosión, y otro hacia el norte, donde la playa es más estable. Esto permitirá capturar

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

una visión más completa de los cambios en la playa, considerando tanto las áreas con mayor erosión como las zonas más estables. Esta base se encuentra en proceso de instalación.

## 5. Discusión

El uso de la ciencia ciudadana está cada vez más extendido en diversos campos científicos (Fiorino, 1990; Callon, 1999; Dickinson, et al., 2010). Recientemente, la participación comunitaria en la investigación y gestión costera ha evolucionado a un compromiso proactivo, involucrando a las comunidades en la comprensión de los procesos costeros y la morfodinámica, y fomentando un sentido de pertenencia y responsabilidad hacia los ecosistemas costeros. Esta colaboración proporciona datos valiosos que los métodos tradicionales pueden tener dificultades para obtener debido a los costos y la capacitación necesarios. Además, ampliar la participación incrementa la cobertura de datos y mejora la comprensión de la dinámica costera en diferentes sitios, fomentando el intercambio de conocimientos y el aprendizaje mutuo entre científicos y comunidades (Conrad & Hilchey, 2011). Un proyecto ejemplar de ciencia ciudadana que demuestra la eficacia y escalabilidad de este enfoque es CoastSnap, iniciativa globalmente adoptada para la monitorización de la línea de costa (Harley & Kinsela, 2022). Si bien los puntos fijos de fotografías han sido utilizados durante mucho tiempo en la investigación (Zier & Baker, 2006; O'Connor & Bond, 2007; Scott et al., 2021), los algoritmos desarrollados en la iniciativa CoastSnap permiten extraer datos cuantitativos de estas imágenes, estableciendo un nuevo estándar en la monitorización de la línea costera a través de la ciencia ciudadana. Los datos obtenidos mediante las estaciones CoastSnap ofrecen grandes posibilidades de análisis a bajo coste. Sin embargo, se debe ser cuidadoso con la determinación de la ubicación de las estaciones, realizándose la instalación en lugares concretos que nos permitan observar la mayor longitud posible de línea de costa en la zona adecuada que se pretenda gestionar y monitorizar. Además, deben resultar seguras y atractivas de manera que garanticen la participación del mayor número de usuarios posible.

La información recopilada mediante el programa CoastSnap en la playa de Las Canteras puede ser utilizada para una variedad de fines. En términos de gestión costera, los datos ayudarán a desarrollar estrategias de adaptación y mitigación frente a los efectos de la erosión y protección de las infraestructuras costeras. Para la investigación científica, los datos permiten estudiar los patrones de cambio en la línea de costa y evaluar los impactos del cambio climático en las zonas costeras. Además, esta información puede ser valiosa para programas educativos y de concienciación, resaltando la importancia de la conservación de las playas y los ecosistemas marinos y contribuyendo a la alfabetización oceánica, incluidos en los objetivos de desarrollo sostenible 2030 de la ONU (ODS 4 y 14) y en el marco de la década de los océanos.

Es importante destacar que el proceso de instalación y funcionamiento no solo depende del trabajo técnico, sino que también está sujeto a la gestión administrativa a nivel local y autonómico y, por supuesto, a la participación de la sociedad. Así, es fundamental para el desarrollo de programas de ciencia ciudadana la creación de comunidades en las que estén presentes las administraciones, los científicos y colectivos sociales para garantizar la implicación en el proyecto, facilitando los procesos de instalación de las bases, de puesta en servicio y la captación recurrente de imágenes una vez puesta en marcha.

## 6. Conclusión

La aplicación del programa CoastSnap en la playa de Las Canteras contribuye de manera sencilla, económica y continua al monitoreo de la evolución de la línea de costa en un enclave fundamental para la socioeconomía de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria. La instalación de una estación en el arco centro permite un estudio detallado de los afloramientos rocosos y la erosión costera en esta sección de la playa. La elección de una estación doble en el arco sur permite estudiar la dinámica y actividad de esta área proporcionando una visión completa de los desafíos y oportunidades que presenta el arco sur de Las Canteras. Al combinar la ciencia ciudadana con tecnologías de vanguardia, se abre la puerta a nuevas oportunidades para comprender y proteger el ecosistema costero, contribuyendo a la toma de decisiones de gestión mejor informadas que aseguren su preservación para las generaciones futuras.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 7. Agradecimientos

Parte de este trabajo se ha financiado al amparo del Convenio de Colaboración entre el Ayuntamiento de Las Palmas y La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

## 8. Referencias

Alonso, I. (1993). *Procesos sedimentarios en la playa de Las Canteras.* [Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria]. accedaCRIS. http://hdl.handle.net/10553/2048

Alonso, I., Sanchez, M.J., Rodriguez, S., Casamayor, M. (2014). Estudio de caracterización del perfil ideal para la gestión sostenible y permanente de la playa de Las Canteras.

Alonso, I., Sanchez, M.J., Rodriguez, S., Casamayor, M. (2015). Estudio del cálculo del balance sedimentario en la playa de Las Canteras. accedaCRIS. https://accedacris.ulpgc.es/cris/project/pj01791/informacionnew.html

Callon, M. (1999). The role of lay people in the production and dissemination of scientific knowledge. *Science, Technology and Society, 4(1), pp.81-94*. https://doi.org/10.1177/09717218990040010.

Conrad, C., & Hilchey, K. (2011). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environ. Monit. Assess. 176*, *273–291*. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1582-5.

Dickinson, J.L., Zuckerberg, B., & Bonter, D.N. (2010). Citizen science as an ecological research tool: challenges and benefits. *Annual review of ecology, evolution, and systematics, 41, pp.149-172.* https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144636.

Fiorino, D. J. (1990). Citizen participation and environmental risk: A survey of institutional mechanisms. *Science, Technology, & Human Values, 15(2), pp. 226–243*. https://doi.org/10.1177/016224399001500204

González-Villanueva, R., Soriano-González, J., Alejo, I., Criado-Sudau, F., Plomaritis, T., Fernàndez-Mora, À., Benavente, J., Del Río, L., Nombela, M. Á., & Sánchez-García, E. (2023). SCShores: A comprehensive shoreline dataset of Spanish sandy beaches from a citizen-science monitoring program. *Earth System Science Data Discussions, 2023*, *1–25.* https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2023-230/.

Harley, M.D., Kinsela, M.A., Sánchez-García, E, & Vos, K. (2019). Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images Coast. *Eng., 150 (2019), pp. 175-189,* 10.1016/j.coastaleng.2019.04.003.

Harley, M.D. & Kinsela, M. (2022). CoastSnap: A global citizen science program to monitor changing coastlines, *Continental Shelf Research, 245, 104795*, https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104796

O'Connor, P.J., & Bond, A.J. (2007). Maximizing the effectiveness of photopoint monitoring for ecological management and restoration. *Ecological Management & Restoration, 8: 228-234*. https://doi.org/10.1111/j.1442-8903.2007.00373.x

Sánchez E., Soriano-González J., & González-Villanueva R. (2022). Manual para la puesta en marcha y explotación de las estaciones CoastSnap. Proyecto MONCOSTA Monitoreo satelital de la dinámica y evolución de la costa chilena.

Scott, S.L., Venter, Z.S., Petersen, H., Jack, S.L., Navarro, R.A., & Hoffman, M.T. (2021). Documenting changing landscapes with rePhotoSA: A repeat photography and citizen science project in southern Africa. *Ecological Informatics, 64, p.101390*. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101390.

Zier, J.L., & Baker, W.L. (2006). A century of vegetation changes in the San Juan Mountains, Colorado: an analysis using repeat photography. *Forest Ecology and Management, 228(1-3), pp.251-262.* https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.049.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18869

# Gestión de Dunas Costeras: Impacto de la Expansión Urbana y Estrategias de Restauración en Rio Grande do Sul, Brasil

*Coastal Dune Management: Impact of Urban Expansion and Restoration Strategies in RS, Brazil.*

**L. Portz[a], G.C. Rockett[b], S.C. Cristiano[c], A. Fontán-Bouzas[d] J. Alcántara-Carrió[a], R.P. Manzolli[a]**

[a]Departamento de Geología y Geoquimica, Universidad Autónoma de Madrid, , luana.portz@uam.es, , javier.alcantara@uam.es, , rogerio.manzolli@uam.es; [b]Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, , gabriela.rockett@ufrgs.br; [c]Universidade Federal de Santa Catarina, , samantaccristiano@gmail.com; [d]Centro de Investigación Marina, Geoma, Universidade de Vigo, , afontan@uvigo.es.

How to cite: Portz, L.P.; Rockett, G.C. L.; Cristiano S.C.; Fontán-Bouzas, A.; Alcántara-Carrió, J.; Manzolli, R.P. 2024. Gestión de Dunas Costeras: Impacto de la Expansión Urbana y Estrategias de Restauración en Rio Grande do Sul, Brasil. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, España, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18869

## *Abstract*

*Integrated coastal zone management in Rio Grande do Sul (RS, Brazil) is crucial to preserve ecosystems and combat erosion caused by natural and anthropogenic factors. Studies on changes in the coastal dune system in northern RS since the 1980s highlight the reduction of dune areas, restricting them to a narrow strip between the urbanised area and the sea. The objective of this study is to define the main changes that have occurred in the coastal dune system of the northern sector of Rio Grande do Sul since the mid-1980s, using remote sensing and MapBiomas data, as well as the evaluation of dune restoration projects that have already been carried out. Restoration projects in Xangri-lá and Osório (RS) have shown that the combination of physical restoration techniques and the delimitation of beach access are effective in the recovery and stabilisation of dunes. The sustainability of these projects must be adaptive, taking into account climate change and based on continuous monitoring. Public policies that promote resilient management practices are needed to protect coastal regions in the long term.*

***Keywords:*** *Coastal dunes, Erosión, Restoration, Climate change, Adaptive management*

## *Resumen*

*La gestión integrada de las zonas costeras de Rio Grande do Sul (RS, Brasil) es crucial para preservar los ecosistemas y combatir la erosión causada por factores naturales y antrópicos. Los estudios sobre los cambios en el sistema de dunas costeras en el norte de RS desde la década de 1980 ponen de relieve la reducción de las áreas de dunas, restringiéndolas a una pequeña franja comprimida entre la zona urbanizada y el mar. El objetivo de este estudio es definir los principales cambios ocurridos en el sistema de dunas costeras del sector norte del Rio Grande do Sul desde mediados de la década de 1980, mediante el uso de teledetección, y datos del programa MapBiomas, así como la evaluación de proyectos de restauración de dunas ya realizados. Los proyectos de restauración en Xangri-lá y Osório (RS) han demostrado que la combinación de técnicas de restauración física y la delimitación de accesos a la playa son eficaces en la recuperación y estabilización de las dunas. La sostenibilidad de estos proyectos debe ser adaptativa, teniendo en cuenta el cambio climático y basada en un seguimiento continuo. Se necesitan políticas públicas que promuevan prácticas de gestión resilientes para proteger las regiones costeras a largo plazo.*

***Palabras clave:*** *Dunas costeras, Erosión, Restauração, Cambios climáticos, Gestión adaptativa*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Uno de los principales objetivos de la gestión integrada de las zonas costeras es la conservación y recuperación de los ecosistemas adyacentes. Los procesos de erosión naturales y antrópicos provocan la reducción de las áreas de playa y dunas, afectando sus servicios ecosistémicos y generando problemas sociales principalmente para la comunidad local. Las dunas costeras desempeñan un papel crucial en la protección contra peligros naturales como la erosión y las inundaciones, actuando como barreras naturales que ayudan a disipar la energía de las olas y las tormentas (Hesp, 2000). Además, las dunas costeras son hábitats esenciales para diversas especies de plantas y animales, contribuyendo a la biodiversidad y salud de los ecosistemas costeros (Martinez Psuty, 2004). En el contexto mundial, de aumento del nivel medio del mar, las dunas costeras son aún más importantes, ya que contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático. La gestión adecuada de las dunas, mediante prácticas de conservación y restauración, es fundamental para garantizar su eficacia como barreras naturales. Acciones como la plantación de vegetación autóctona, la implantación de estructuras de retención de arena y la concienciación sobre la importancia de preservar estos ecosistemas son esenciales para reforzar la resiliencia de las zonas costeras ante los retos que plantea el cambio climático. El objetivo principal de este estudio es definir los principales cambios ocurridos en el sistema de dunas costeras del sector norte del Rio Grande do Sul desde mediados de la década de 1980, en términos de reducción de área de dunas y expansión del área urbana. El estudio también tiene como objetivo recopilar los resultados más relevantes de los programas de restauración de dunas exitosos en este sector.

## 2. Área de estudio

La costa del estado de Rio Grande do Sul (sur de Brasil) consiste en una extensa llanura costera de unos 620 km de largo y hasta 120 km de ancho, donde un sistema de barreras arenosas originó un gran sistema lagunar (laguna de Patos y lago Mirim). El ecosistema dunar está presente a lo largo de toda la costa. Este complejo sistema dunar costero contribuye a preservar el equilibrio sedimentario del sistema playa-duna frente a la acción de las marejadas y olas de tormenta (Tomazelli, 1994). Sin embargo, principalmente en las zonas urbanas, actualmente solo están presentes las dunas frontales, y muestran innumerables procesos de degradación; de hecho, en algunos tramos costeros ya no realizan sus funciones ecosistémicas (Portz et al., 2016).

## 3. Metodología

Se aplicaron técnicas de teledetección y procesamiento de imágenes para visualizar las variaciones temporales en la extensión de las dunas frontales. Estas imágenes fueron obtenidas de diversas fuentes entre los años (1985 – 2023). Los datos satelitales se complementaron con información del programa MapBiomas (https://brasil.mapbiomas.org/), una iniciativa brasileña que utiliza imágenes satelitales para mapear y monitorear la cobertura y el uso de la tierra en Brasil. MapBiomas ha proporcionado datos detallados sobre la ubicación y extensión de las dunas costeras en los últimos años. A escala local fue evaluada la eficiencia de los proyectos de restauración y conservación del sistema dunar realizados en los últimos 10 años. Para ello, se identificó el posicionamiento de la línea frontal del sistema dunar, trazando vizualmente utilizando imágenes satelitales (Google Earth PRO) para el periodo de otoño de los años 2005, 2018 y 2023; lo que permitió verificar la evolución de las dunas a lo largo del periodo de estudio. Además, se realizaron visitas sobre el terreno para validar los datos obtenidos por teledetección y obtener información adicional sobre la ejecución y resultados de los proyectos de gestión.

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Reducción del sistema dunar y aumento de la inestabilidad

El análisis de imágenes de satélite, complementado con datos de uso del suelo del programa MapBiomas, indica una reducción significativa de los campos de dunas en las últimas décadas. Estos cordones dunares se presentan

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

en un patrón discontinuo, segmentados por líneas de drenaje (localmente llamadas “sangradouros”). Las imágenes muestran que los sistemas de dunas han sido gradualmente degradados o convertidos a otros usos, dando lugar a que tan sólo se conserve una línea de dunas frontales cerca de la línea de costa (Fig 1 AB categoría *4.1 beach, dune*). La reducción de los campos de dunas internas también aumenta la vulnerabilidad de las regiones costeras a la erosión y las inundaciones, ya que las dunas frontales por sí solas pueden no ser suficientes para proporcionar una protección adecuada. La preservación de las dunas interiores es crucial, ya que actúan como una segunda línea de defensa, complementando la protección proporcionada por las dunas frontales.

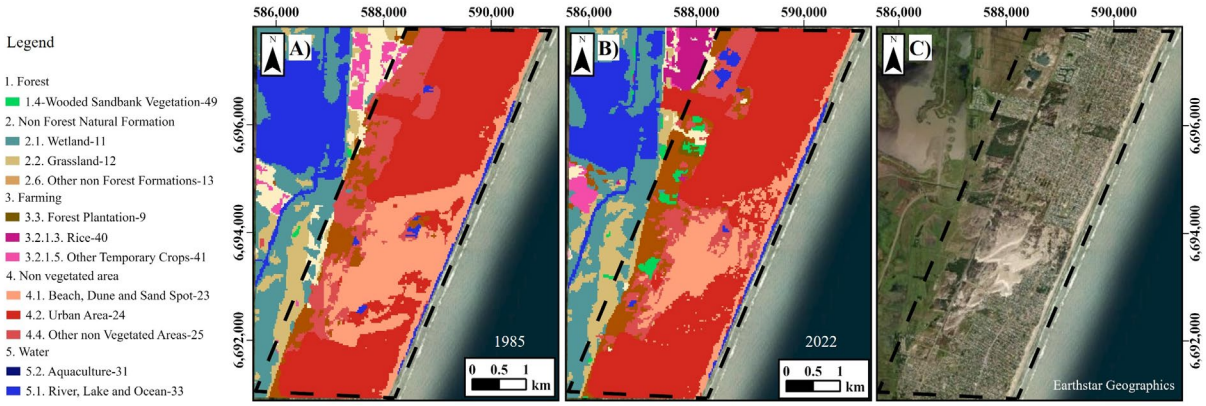



***Fig. 1.*** *Cambio en el sistema de dunas en un sector de RS, Brasil. A) y B) Clasificación del uso del suelo de 1985 y 2022, respectivamente (Fuente: Colección MapBiomas, https://brasil.mapbiomas.org/); and C) imagen satelital de 2022 (Fuente: Mapa base ArcGIS PRO).*

Para comprender mejor las consecuencias de esta reducción y las zonas de mayor riesgo, se utilizó un modelo digital de elevación del terreno para la zona de dunas frontales y se observó la cota de inundación en la área de las dunas frontales durante eventos de marea meteorológica (adaptado de Portz et al., 2014). Estas mareas pueden alcanzar hasta 1,6 m de amplitud (Parise et al., 2009) y son responsables por la erosión en la costa, ya que provocan una sobreelevación por encima del nivel de la marea astronómica (en esta región de 0,5 m). Los resultados de esta simulación proporcionan una analise de que los cauces de drenaje fluvial naturales (*sangradouros*) son áreas particularmente vulnerables a inundación (Fig. 2).

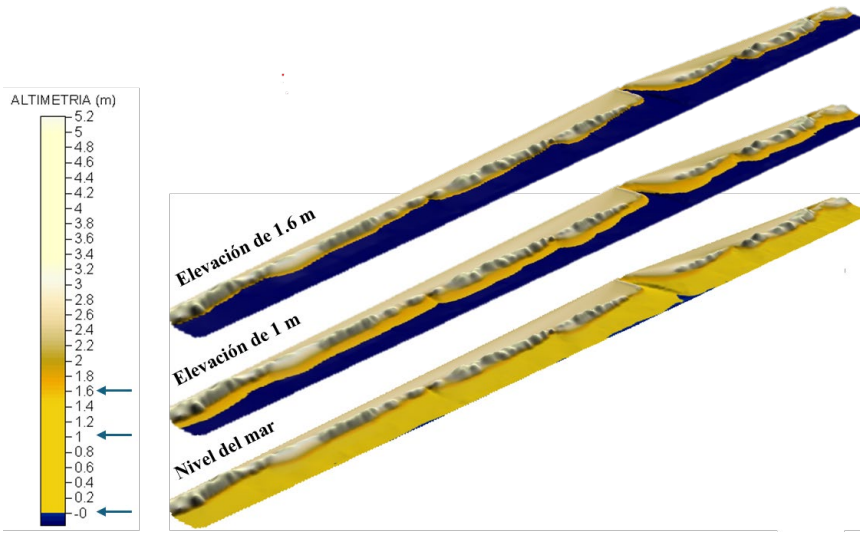



***Fig. 2.*** *Modelo digital de elevación de las dunas frontales de Capão da Canoa, RS, Brasil, con indicación del nivel del mar en períodos con marea meteorológica de 1 y 1.6 m. Fuente: adaptado de Portz (2014)*

La subida del nivel del mar, especialmente durante las tormentas, hace que estas áreas sean propensas a inundaciones significativas, comprometiendo la estabilidad de las dunas y la integridad de las áreas costeras adyacentes. Además de este riesgo, el aumento de la ocupación en las zonas del interior, cerca de las lagunas

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

costeras y de las zonas inundables, da lugar a la impermeabilización del suelo (Fig. 1). Esto puede aumentar los flujos de agua en los *sangradouros*, causando la desestabilización de las dunas frontales. Los resultados de las simulaciones ponen de manifiesto la necesidad de contar con estrategias específicas para el manejo de estos *sangradouros*, como la instalación de tubería de evacuación de aguas pluviales por debajo del sistema de dunas (Portz et al., 2015). De manera complementaria, medidas de adaptación, como la instalación de captadores pasivos de arena en las dunas o su restauración en zonas críticas, pueden ser necesarias para mitigar los efectos del aumento del nivel del mar. La conservación de las dunas frontales e interiores debe ser una prioridad para reducir la vulnerabilidad general de la costa.

### 4.2. Eficiencia de los proyectos de restauración/conservación

Una estrategia eficaz para aumentar la resiliencia de los sistemas de dunas y proteger la costa consiste en proyectos de restauración y conservación de dunas. En este contexto, analizamos dos proyectos en el municipio de Xangrilá (RS, Brasil) llevados a cabo por Tabajara & Weschenfelder (2011) y Portz et al. (2015) (Figura 3). Las medidas adoptadas de recuperación y estabilización de la duna frontal consistieron en la instalación de captadores pasivos de arena y repoblación con vegetación autóctona, así como la adecuación de accesos a playa (pasarela), evitando el pisoteo de la vegetación. Las dunas restauradas se han recuperado significativamente, con un aumento de la cubierta vegetal y la estabilización de la línea de costa. En los últimos 10 años, esta estabilidad se ha mantenido, como puede verse en la figura 3.




***Fig 3.*** *Gestión de dunas en el municipio de Xangri-lá. Fotografías del área de gestión en los años A) 2010, B) 2012 y C) 2018, mostrando la estabilización del sistema. D) Variación de la línea frontal de las dunas para los años 2005 (antes de la gestión de dunas), 2018 y 2023 (después), que muestra la estabilidad de la línea frontal de la duna a lo largo del tiempo (imagen base de ArcGIS Pro 3.2.2, coordenadas UTM-WGS84-Zone 22S). Fotografías: Luana Portz*

Además de la evaluación de estos proyectos, se analizó el efecto de una tormenta en 2016 sobre un proyecto (https://oeco.org.br/salada-verde/24801-praias-do-litoral-gaucho-preservam-dunas-costeiras-sp-493050605) de restauración en la zona urbana en Atlántida Sul (Municipio de Osório RS/Brasil). La Figura 4 muestra una panorámica de un sector en el que se reconstruyó el sistema dunar y otro contiguo en que se mantuvo una zona sin dunas, utilizada para actividades de ocio durante el verano. Después de la tormenta, en el sector con el sistema de dunas reconstruido se formó un escarpe erosivo ±1.3 m (Fig. 2), lo que provocó una reducción significativa de la superficie de dunas. Sin embargo, la zona sin dunas sufrió mayores daños, con la eliminación de una gran cantidad de arena, al no haber vegetación superficial. Este pequeño sector ilustra la importancia crucial del mantenimiento del sistema de dunas para la defensa de la zona costera y las infraestructuras urbanas.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

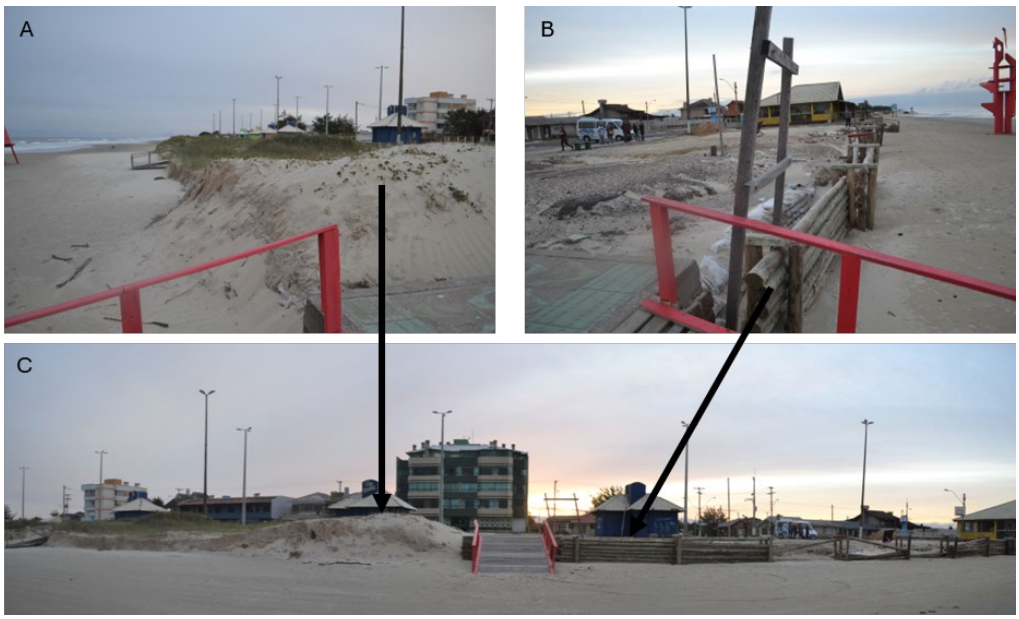



***Fig. 4.*** *Playa de Atlantida Sul, RS. A) Sector con restauracion de la duna frontal com presencia de uma escarpa. B) Sector sin manejo de dunas con daños a la infraestructura urbana. C) Panoramica de las dunas frontales pós tormentas (marea meteorologiaca. Fotografias: Luana Portz*

La eficacia de los proyectos de gestión depende de varios factores, como la técnica utilizada, las condiciones ambientales locales y el grado de participación de la comunidad. Los proyectos de mayor éxito fueron los que combinaron técnicas de restauración física con labores de revegetación y mantenimiento continuo. La aplicación de prácticas sostenibles y la adaptación a las condiciones específicas de cada lugar son esenciales para garantizar la persistencia de los resultados (Nordstrom & Jackson, 2021). Por ejemplo, las técnicas de restauración física, como la instalación de captadores pasivos de arena para el control de la erosión, son fundamentales para estabilizar las dunas a corto plazo. Sin embargo, estas técnicas deben complementarse con esfuerzos de revegetación que promuevan el crecimiento de especies autóctonas. La vegetación desempeña un papel crucial en la estabilización de las dunas, ya que sus raíces ayudan a mantener la arena en su sitio y la vegetación superficial reduce la velocidad del viento (Portz et al., 2015).

### 4.3. Sostenibilidad a largo plazo

La sostenibilidad de las estrategias de gestión de dunas debe considerarse en el contexto del cambio climático. Dado que se prevé que el nivel del mar siga subiendo y que las tormentas se intensifiquen, es esencial que los proyectos de restauración y conservación de dunas sean adaptativos y se basen en un seguimiento continuo.

Un aspecto crucial para la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos de gestión de dunas es la combinación de técnicas de restauración física con labores de revegetación y mantenimiento continuo. Además, el grado de implicación de la comunidad es un factor determinante para el éxito a largo plazo. Los proyectos que incluyen la participación activa de la comunidad local tienden a ser más sostenibles, ya que los residentes se convierten en guardianes de las zonas restauradas (Sánchez-Arcilla et al., 2022). Esta implicación ayuda a mantener y prevenir prácticas perjudiciales, como el pisoteo de la vegetación y el uso inadecuado de las zonas de dunas. La educación ambiental y la sensibilización de la comunidad son componentes clave para garantizar el apoyo local y la continuidad de los esfuerzos de conservación.

Las condiciones ambientales locales, como el clima, la frecuencia de las tormentas y la topografía, también influyen en la eficacia de los proyectos de gestión (Portz et al., 2015). En regiones con alta incidencia de tormentas, es crucial que las técnicas de gestión sean lo bastante robustas como para soportar fenómenos extremos. Los proyectos deben diseñarse de forma flexible, permitiendo ajustes y mejoras basados en datos de seguimiento continuo. El seguimiento continuo también es esencial para evaluar la eficacia de las intervenciones (Fontán-

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Bouzas et al., 2022) y realizar los ajustes necesarios. Sin un programa de seguimiento eficaz, es difícil medir el éxito de las técnicas empleadas e identificar las áreas que necesitan mejoras. El uso de tecnologías avanzadas, como la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), puede mejorar considerablemente la capacidad de seguimiento y gestión de los sistemas de dunas (Fabbri et al., 2021; Portz et al., 2014).

## 5. Conclusiones

El actual aumento del nivel del mar provocará un agravamiento de los procesos de erosión para muchos sectores de la costa de RS si los planes de mitigación o adaptación no se implementan progresivamente. Además, alteraciones del clima marítimo también aumentarán la frecuencia de las tormentas, lo que provocará inundaciones más frecuentes y severas en las zonas costeras, especialmente donde no cuentan con un sistema dunar consolidado que actúe como barrera protectora frente a estos procesos. Al conectar la importancia de las dunas con la vulnerabilidad de los cauces de drenaje fluvial naturales (*sangradouros* en Brasil), los resultados ponen de manifiesto la necesidad de una gestión costera integrada que contemple tanto la preservación de las dunas como la mitigación de los riesgos asociados a dichos cauces. Las medidas de adaptación, como la restauración de dunas en zonas críticas, pueden ser necesarias para mitigar los efectos de la erosión. Además, la preservación de las dunas frontales e interiores debe ser una prioridad para reducir la vulnerabilidad general de la costa. Las políticas públicas deben promover prácticas de gestión resilientes al cambio climático que garanticen la protección a largo plazo de las regiones costeras.

## 6. Referencias

Fabbri, S., Grottoli, E., Armaroli, C., & Ciavola, P. (2021). Using High-Spatial Resolution UAV-Derived Data to Evaluate Vegetation and Geomorphological Changes on a Dune Field Involved in a Restoration Endeavour. *Remote Sensing*, *13*(10), 1987. https://doi.org/10.3390/rs13101987

Fontán-Bouzas, Á., Andriolo, U., Silva, P. A., & Baptista, P. (2022). Wave Impact Analysis on a Beach-Dune System to Support Coastal Management and Nourishment Works: The Showcase of Mira, Portugal. *Frontiers in Marine Science*, *9*. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.861569

Hesp, P. A. (2000). *Coastal Dunes: Form and Function*. CDNV Technical Bulletin, n.4. Massey University.

Martinez L.L., & Psuty N.P. (2004). *Coastal Dunes, Ecology and Conservation. Ecological Studies.* (Vol. 171). Springer-Verlag.

Nordstrom, K. F., & Jackson, N. L. (2021). *Beach and Dune Restoration*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108866453

Parise, C. K., Calliari, L. J., & Krusche, N. (2009). EXTREME STORM SURGES IN THE SOUTH OF BRAZIL : ATMOSPHERIC CONDITIONS AND SHORE EROSION. *Brazilian Journal of Oceanography*, *57*(3), 175–188.

Portz, L., Jardim, J. P. M., Manzolli, R. P., & Gruber, N. S. (2016). Impacts on the dunes system: Natural dynamic versus anthropogenic interference. *Ambiente e Sociedade*, *19*(3). https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC140491V1932016

Portz, L., Manzolli, R. P., Hermanns, L., & Alcántara Carrió, J. (2015). Evaluation of the efficiency of dune reconstruction techniques in Xangri-lá (Rio Grande do Sul, Brazil). *Ocean and Coastal Management*, *104*, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.12.005

Portz, L., Rockett, G. C., Franchini, R. A. L., Manzolli, R. P., & Gruber, N. L. S. (2014). Gestão de dunas costeiras: o uso de sistema de informações geográficas (SIG) na implantação de planos de gestão no litoral do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, *14*(3), 517–534. https://doi.org/10.5894/rgci445

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Sánchez-Arcilla, A., Cáceres, I., Roux, X. Le, Hinkel, J., Schuerch, M., Nicholls, R. J., Otero, del M., Staneva, J., de Vries, M., Pernice, U., Briere, C., Caiola, N., Gracia, V., Ibáñez, C., & Torresan, S. (2022). Barriers and enablers for upscaling coastal restoration. *Nature-Based Solutions*, *2*, 100032. https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100032

Tabajara, L. L. C. A., & Weschenfelder, J. (2011). Recuperação de Dunas Frontais em Área Degradada por Sangradouro na Praia de Xangri-Lá/RS. *GRAVEL*, *9*(1), 69–85.

Tomazelli, L. (1994). Morfologia, Organização e Evolução do Campo Eólico Costeiro do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas Em Geociências*, *21*(1), 64. https://doi.org/10.22456/1807-9806.21252

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18653

# Evolución de campos dunares asturianos (oriente-centro) entre 2014 y 2023 y su relación con el cambio climático

*Evolution of Asturian dune fields (orient-central) between 2014 and 2023 and their relationship with climate change*

**Noa Pardo-Rivera[a], Germán Flor-Blanco[b], Manuel Gomez Lende[c] y José Juan de Sanjosé Blasco[d]**

[a]Departamento de Geología. Universidad de Oviedo, UO275753@uniovi.es, [b]Departamento de Geología. Universidad de Oviedo, UNESCO IGCP 725 Forecasting coastal change. GEOCANTABRICA FECYT GROUP; , florgerman@uniovi.es, [c]Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio, Universidad de Cantabria; , Manuel.gomezlende@unican.es, [d]Departamento de Expresión Gráfica, Universidad de of Extremadura; , jjblasco@unex.es

How to cite: Pardo-Rivera, N.; Flor-Blanco, G.; Gomez Lende, M. & Sanjosé Blasco, J.J. 2024. Evolución de campos dunares asturianos (oriente-centro) entre 2014 y 2023 y su relación con el cambio climático En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18653

***Abstract***

*The following research has been carried out mapping the evolution of dune fronts and surfaces from 2014 to 2023 in Xagó, Verdicio and Rodiles (N Asturias), aiming to observe the advancement or retrat in each sector. To achieve this, wave direction and maximum and minimum wave data were consulted, as well as the supervision of wave and wind roses provided by Puertos del Estado at the Cabo de Peñas buoy. Additionally, maximum and minimum tide data from the Gijón tide gauge were examined. Mappin of the sandy areas was conducted using historical and current orthophotos and data collected during a field trip with GPS in April 2023. With all of this, it is possible to advance that a significant progradation is taking place in all the dune fields studied, so that this may be conditioned by the gradual entry of sediments removed during past storms, in addition to occasional cordonings in some systems.*

***Keywords:*** *Dune systems, wave storms, GPS, progradation, Asturias*

***Resumen***

*En la siguiente investigación se ha llevado a cabo una cartografía entre 2014 y 2023 sobre la evolución de los frentes y superficies de los campos dunares correspondientes a Xagó, Verdicio, Rodiles (N Asturias) con el fin de observar el avance o retroceso en cada uno de los sectores. Para ello se han consultado las direcciones y los datos máximos y mínimos de oleajes, además de la supervisión de las rosas de oleajes y vientos proporcionada por Puertos del Estado en la boya de Cabo de Peña. También se han mirado los máximos y mínimos de mareas en el mareógrafo de Gijón. Se ha realizado la cartografía de los arenales usando las ortofotos históricas y actuales, y datos tomados en una salida de campo con un GPS en abril de 2023. Con todo ello, se puede avanzar que se está produciendo una progradación significativa en todos los campos dunares estudiados, de modo que, esto puede estar condicionado por la entrada paulatina de sedimentos retirados durante temporales pasados, además de acordonamientos puntuales en algunos sistemas.*

***Palabras clave:*** *Sistemas dunares, oleaje de tormentas, GPS, progradación, Asturias*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos tras la realización de un Trabajo Fin de Grado presentado en julio de 2023, se centra en el estudio de 3 sistemas costeros que han experimentado modificaciones significativas debido a factores naturales y humanos.

Esta investigación se enfoca en estudiar varios sistemas dunares ubicados en la comunidad autónoma de Asturias en el norte de la Península Ibérica, concretamente Xagó en la desembocadura del estuario de Avilés y Carniciega dentro del sistema de Verdicio, cuyas fuentes principales de aportes sedimentarios corresponden a la cuenca del río Nalón. Además, también el campo dunar de Rodiles, que forma parte de la barrera de cierre del estuario de Villaviciosa (Fig. 1).

El objetivo de este estudio es observar la evolución espacio-temporal de los campos dunares a partir de 2014, después de que las tormentas provocaran el retroceso o la desaparición de todos los campos dunares a lo largo de la costa cantábrica.

En cuanto al contexto geológico, los campos dunares estudiados están comprendidos entre materiales silíceos de edad Paleozoica (Juliver, et al., 1972) en el caso de Xagó y Verdicio y calcáreos de edad Mesozoica (Pignatelli, et al., 1972) en la zona de Rodiles.

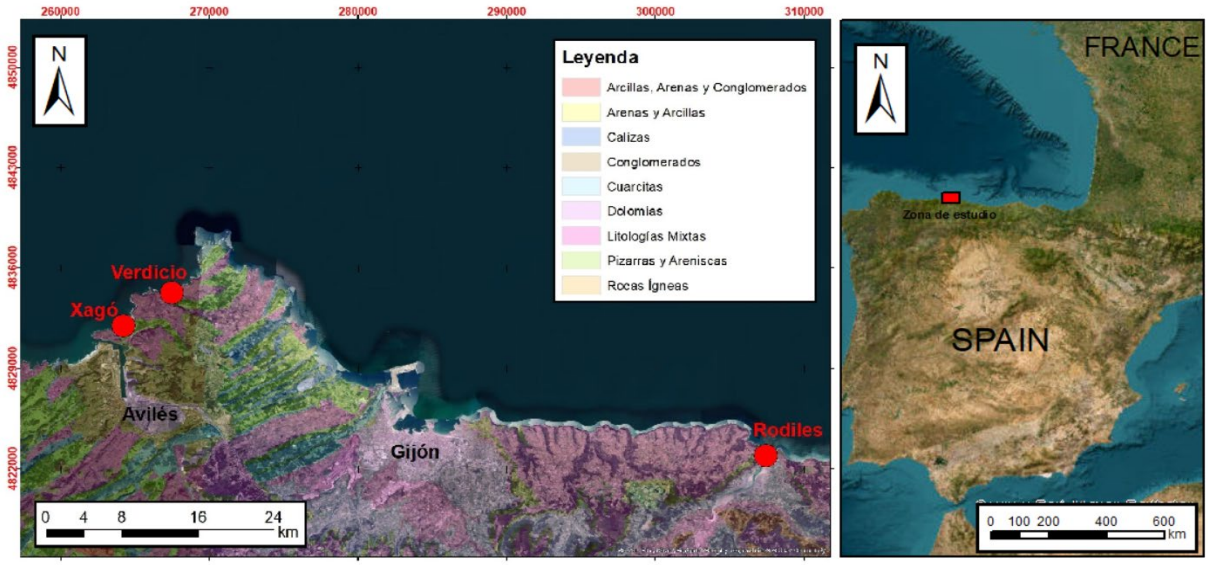



***Fig. 1**. Área de estudio, en la que se encuentran señalados los campos dunares estudiados en el trabajo*

### 1.1. Dinámica costera

Respecto a la formación de las dunas todos los estudiados están formados por vientos de componente del primer y cuarto cuadrante (Flor y Flor-Blanco, 2014), estando directamente relacionados con los oleajes dominantes en el Cantábrico proceden del cuarto cuadrante, mientras que los temporales de tormenta abarcan el primer y cuarto cuadrante (Puertos del Estado).
Las mareas son semidiurnas de tipo mesomareal, de modo que, entre los años del estudio se han registrado los máximos y mínimos de cada año y donde la marea más alta ha sido en marzo de 2014 de 5,26 m y la mínima en marzo de 2019 de 0,22m (mareógrafo de Gijón-Puertos de Estado, 2023).

## 2. Metodología

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de temas relacionados con los sistemas dunares y dinámica litoral, además de la evolución de los campos dunares en años anteriores. Se recopilaron datos diarios de máximo oleaje, clasificándose según la altura significativa del oleaje desde 2014 hasta 2022 a partir de la boya ubicada en el Cabo

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

de Peñas, mediante la consulta de la página web de Puertos del Estado. Además, también se obtuvo información sobre el nivel de base del mar, utilizando los datos de un mareógrafo situado en el puerto de Gijón, con los que se clasificaron los máximos y mínimos del nivel del mar en los años estudiados.

Para el trabajo de campo, se utilizó un GPS diferencial marca Leica para registrar las coordenadas precisas del frente dunar de 2023. La cartografía de los campos dunares se realizó mediante el uso de ortofotos históricas y de máxima actualidad del PNOA provenientes del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional. A partir del programa ArcGIS se realizaron perfiles para cada campo dunar y se midió el avance o retroceso del frente dunar a lo largo de los años estudiados.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Temporales registrados en el periodo 2014-2022

Después de analizar los datos recopilados en la boya del cabo de peñas (Puertos del Estado), se puede apreciar una leve tendencia a la disminución de grandes tormentas de más de 7m entre 2017 y 2020 en comparación con el período de 2014 a 2017 (Tabla 1). Además, se detecta un ligero aumento en el período de 2020 a 2022 respecto a los tres años anteriores, de modo que sigue constatándose una importante recurrencia de temporales mayores de 5 m, acorde a los datos publicados desde finales del siglo pasado (Flor-Blanco et al., 2021), pero nada que ver con los elevados registros de altura de ola de los temporales de 2009 y 2014 (Flor et al., 2014).

***Tabla 1.*** *Recopilación de valores de altura significante (Hs) entre 2014 y 2021 en los intervalos que van de <3m hasta >7m.*

| PERIODO ENTRE DATOS | Días recopilados | BOYA DEL CABO DE PEÑAS | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | <3m | 3m a 5m | 5m a 7m | >7m |
| **2014-2017** | 982 | 316 | 254 | 173 | 176 |
| **2017-2020** | 963 | 318 | 341 | 161 | 131 |
| **2020-2022** | 1034 | 341 | 335 | 196 | 151 |

### 3.2. Evolución dunar

Para ello se ha testeado la evolución del frente dunar entre los años 2014 y 2023, de 3 modelos diferenciados de campos dunares: Carniciega (Verdicio) (A) con una evolución natural, Xagó (B) afectada por vertidos del puerto de Avilés y extracción de sedimento durante gran parte del siglo pasado y Rodiles (C), que está confinado por un dique en la margen occidental. Estos sistemas, según los autores Flor-Blanco et al. (2021), mostraban una clara recesión de la costa tras el paso de los temporales de febrero y marzo de 2014.

#### *3.2.1. Verdicio*

Tras las tormentas de 2014 la superficie era de 15.834,37m², detectándose una pérdida de superficie en los años siguientes hasta 2020, donde empieza a repuntar. Durante la pandemia, debido a la menor actividad antrópica, se produjo un ligero avance del frente dunar, que finalmente se vio truncado al salir de la cuarentena, alcanzando una superficie de 15.836,1m² en abril de 2023. En los 2 perfiles marcados (Fig. 2), entre 2014 y 2017, la duna avanzó en el oeste, mientras que en el este el sistema retrocedió. Para el periodo 2017 y 2023 se ha experimentado progradación en todo el sistema. La recesión ocurrida en Carniciega durante el estudio se atribuye al levantamiento de las restricciones de cuarentena, que llevó a los usuarios a acudir a zonas con menor densidad urbana, abriendo corredores de acceso a la playa sin seguir los accesos históricos situados en los laterales, provocando erosión y perdida de la zona vegetada, además de la creación de una zona de deflación en la zona central del sistema dunar.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Se observa el inicio de la formación de una duna longitudinal en la parte trasera de esta zona de deflación, sobre el talud, junto con un pequeño avance en la franja delantera del talud.

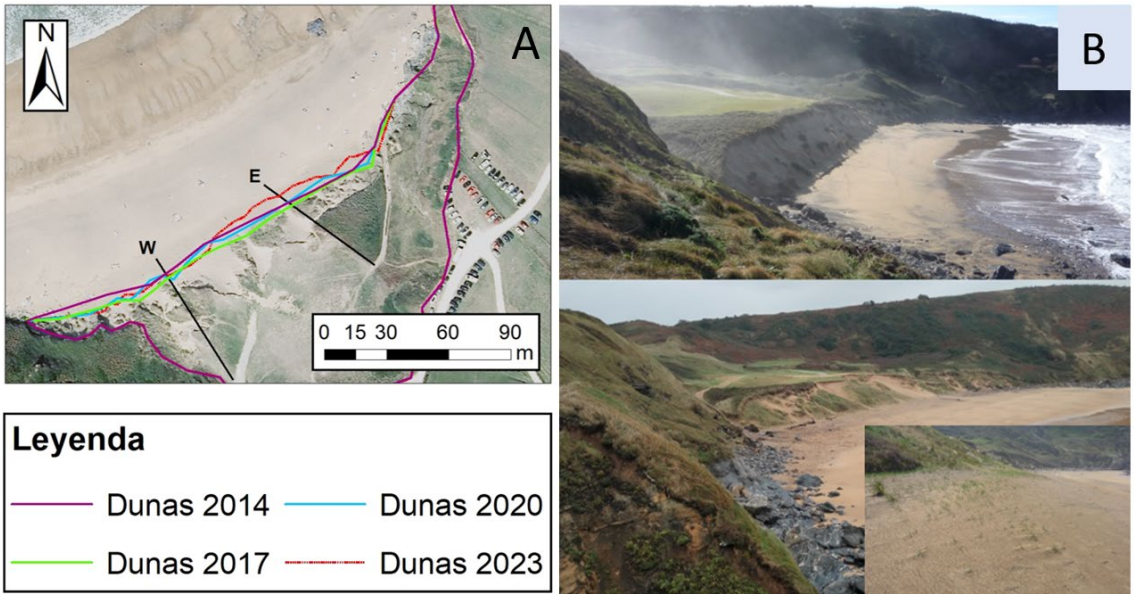



***Fig. 2.*** *A) Evolución de los frentes dunares de Carniciega; B) foto superior tras temporales de 2014 e inferior de 2023.*

*3.2.2. Xagó*

Desde mediados del siglo pasado, el campo dunar ha experimentado modificaciones debido a actividades humanas como la extracción de arena y los vertidos de dragado del puerto de Avilés (Flor-Blanco et al., 2013; Flores-Soriano, 2015; Flor et al., 2019). Actualmente, se observa en el sistema dos cordones dunares antiguos y un tercer cordón que fue erosionado en 2014 (Fig.3),

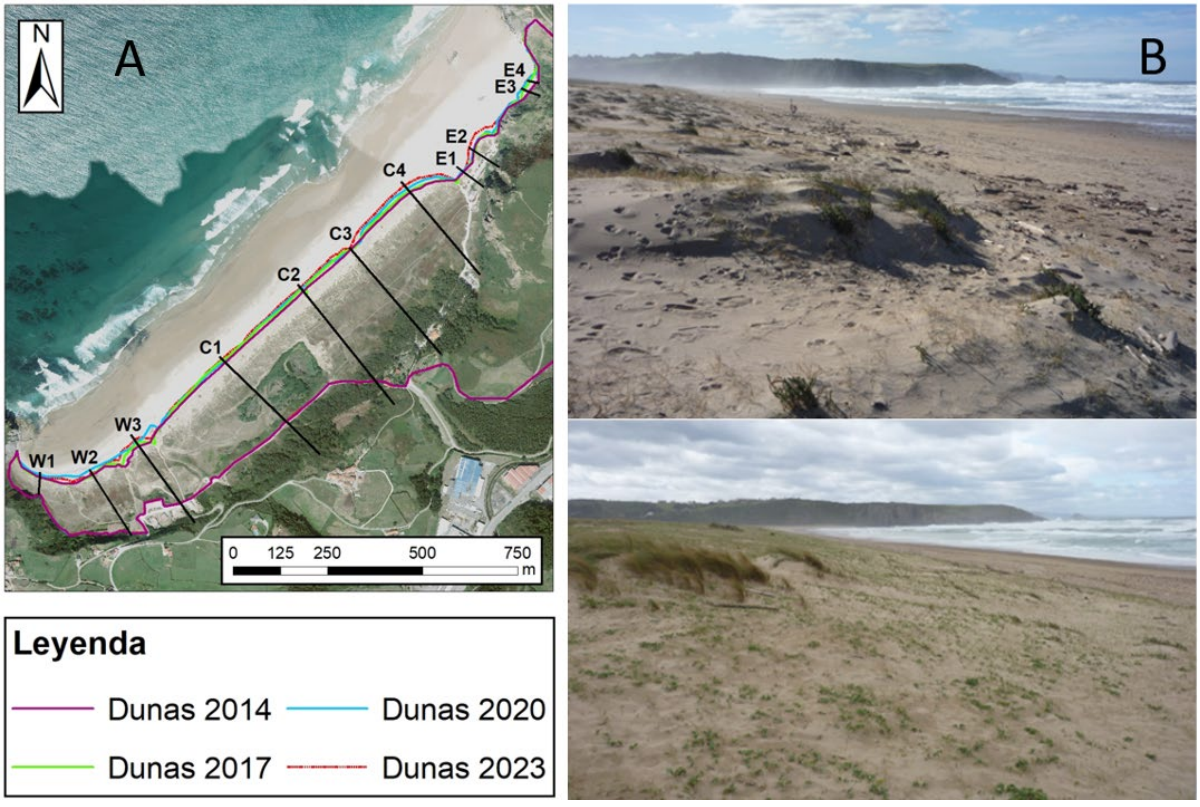



***Fig. 3.*** *A) Evolución de los frentes dunares de Xagó; B) foto superior tras temporales de 2014 e inferior de 2023.*


BY-NC-SA

Durante este estudio, 2014 y 2017, los temporales continuaron causando regresión en el frente dunar, con una pérdida de aproximadamente 3.482m² por año. Sin embargo, entre 2017 y 2020, el sistema experimentó un crecimiento significativo de aproximadamente 11.978m² por año, lo que resultó en un avance del frente dunar de 15255,55 m/año. Entre 2020 y 2023, el avance continuó, con un crecimiento adicional de aproximadamente 2.427m² por año. La comparativa de los perfiles entre 2020 y 2023 mostró un avance continuo en la mayoría de éstos, tanto en el lado oeste como en el centro, mientras que en el lado este se observó estabilidad en un perfil y avance en otro.

En resumen, el sistema dunar ha experimentado fluctuaciones naturales y antropogénicas en su morfología a lo largo del tiempo, con periodos de retroceso y avance, influenciados por factores como los temporales y las actividades humanas, pero actualmente, gran parte del frente erosionado en 2014 ha desarrollado dunas pioneras, lo que indica una progradación del sistema.

### *3.2.3. Rodiles*

El arenal y el sistema de dunas, sufrió una importante progradación a partir de 1925 debido a la construcción de dos diques en de desembocadura en el estuario de Villaviciosa (Flor-Blanco et al., 2015). Fue uno de los sistemas que mejor soportaron los temporales históricos de 2014, salvo en su margen oriental (Flor-Blanco et al., 2021). Utilizando los perfiles del trabajo citado previamente, se evidencia una tendencia general de avance del cordón dunar a lo largo de los años (Fig. 4), siendo más notable en el lado oeste y central del arenal. Entre 2014 y 2017, se observó un avance en el frente dunar en el oeste y el centro, mientras que en el este se produjo una erosión, esto supuso un aumento del campo dunar de 283,74 m/año. Entre 2017 y 2023, se registró un crecimiento del campo dunar en todos los perfiles, siendo el avance de la duna de 4166,01m/año. Se han formado nuevas dunas, incluyendo dunas tabulares con cierta pendiente y cordones dunares pioneros vegetados, así como dunas eco en la parte más oriental del área de estudio.

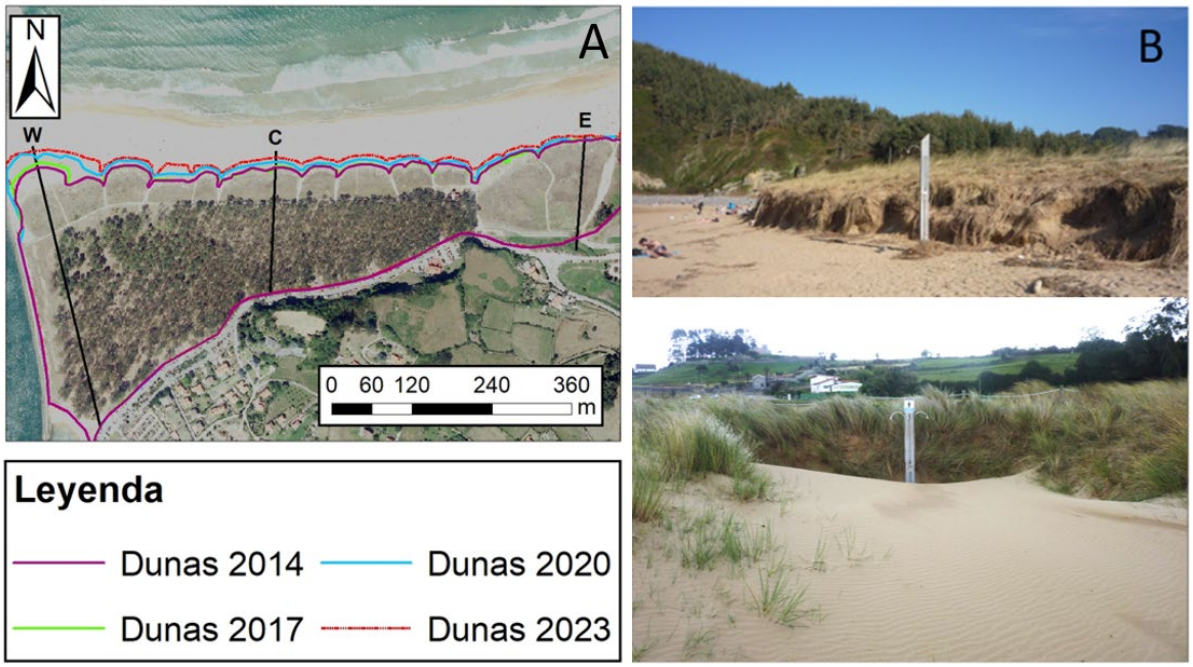



***Fig. 4.*** *A) Evolución de los frentes dunares de Rodiles; B) foto superior tras temporales de 2014 e inferior de 2023.*

## 4. Conclusiones

En primer lugar, los resultados analizados de altura máxima de los oleajes proporcionan una información sobre la intensidad de las tormentas. Se identifican los más altos en el trimestre entre 2014 a 2017 debido a los oleajes extraordinarios del año 2014. Entre 2017 y 2020 los temporales no causaron grandes oleajes y es por ello por lo

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

que los campos dunares se mantienen en general estables. De igual modo, se percibe un aumento entre 2020 y 2023 pero sin llegar los >7m a superar los detectados entre finales del siglo XX y 2014.

En la actualidad, la mayoría de los campos dunares estudiados están experimentando una progradación, relacionada con la recuperación del sedimento que previamente fue erosionado durante los temporales de 2014 y que se ha vuelto a depositar, en general, de forma natural en los sistemas, unido a las medidas de acordonamiento en algunos de ellos en el último año y a la nula acción de temporales tan intensos como los citados previamente.

Podemos dividir estos sistemas en dos, uno de ellos se encuentra muy influenciado por la gestión portuaria, Xagó, mientras que por otra parte se pueden distinguir a Verdicio y Rodiles, que a pesar de estar también antropizados, se puede decir que tienen actualmente un comportamiento más natural, aunque el primero ha sufrido mayor degradación por los usuarios después de la pandemia COVID-19, mientras que Rodiles está en franca progradación.

En definitiva, la tendencia evolutiva esperada en el actual escenario de cambio climático global debería conllevar una recesión generalizada de los campos dunares, sin embargo, este trabajo demuestra que la respuesta está tendiendo a una estabilización del sistema siempre y cuando el hombre no influya en gran medida y que los estudios de previsión propuestos por la administración requieren de otro tipo de factores no tenidos en cuenta como así dice el panel de cambio climático del Principado de Asturias.

## 5. Referencias

de Sanjosé Blasco, J., Gómez-Lende, M., Sánchez-Fernández, M. & Serrano-Cañadas, E. (2018). Monitoring Retreat of Coastal Sandy Systems Using Geomatics Techniques: Somo Beach (Cantabrian Coast, Spain, 1875–2017). *Remote Sensing*, 10(9), 1500. https://doi.org/10.3390/rs10091500.

Flor, G. & Flor-Blanco, G. (2014). Componentes de viento generadores de morfologías y campos de dunas costeras en Asturias (NO de España). Cuaternario y Geomorfología, 28, 7-26.

Flor-Blanco, G., Flor, G. & Pando, L. (2013). Evolution of the Salinas-El Espartal and Xagó beach/dune systems in north-western Spain over recent decades: evidence for responses to natural processes and anthropogenic interventions. *Geo-Marine Letters*, 33, 143-157. https://doi.org/10.1007/s00367-012-0301-3.

Flor-Blanco, G., Pando, L., Morales, J. A. & Flor, G. (2015). Evolution of beach–dune fields systems following the construction of jetties in estuarine mouths (Cantabrian coast, NW Spain). *Environmental Earth Sciences*, 73, 1317-1330. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3485-1

Flor-Blanco, G., Alcántara Carrió, J., W. T. Jackson, D., Flor, G. & Flores Soriano, C. (2021). Coastal erosion in NW Spain: Recent patterns under extreme storm wave events. *Geomorphology*. 387, 107767. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107767.

Flores Soriano, C. (2015). *Evolución de los campos dunares de Asturias desde mediados del siglo XX hasta 2014*. http://hdl.handle.net/10651/33787

Julivert, M., Truyols, J., Marcos, A. & Arboleya, Mª.L. (1972). Mapa geológico de la Hoja nº 13 (Avilés). *Mapa Geológico de España E. 1:50.000.* Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.

Pignatelli, R., Giannini, G., Ramírez del Pozo, J., Beroiz, C. & Barón, A. (1972). Mapa geológico de la Hoja nº 15 (Lastres). *Mapa Geológico de España E. 1:50.000.* Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME.

Puertos del Estado: https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx> [02/02/2023] [04/07/2023]

Sistema de información territorial e infraestructura de datos espaciales de Asturias (SITPA) (n.d.). *Centro de descargas* [online]. Disponible en: https://ideas.asturias.es/centro-de-descargas, [05/03/2023]

Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) (n.d.). *Centro de Descargas* [online]. Disponible en: https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp [09/03/2023].

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18613

# Enfrentando los riesgos del Cambio Climático desde la perspectiva de los ciudadanos: El caso del Delta del Ebro

*Facing Climate Change Risks from the Perspective of Local Stakeholders: The Case of the Ebro Delta*

**Macarena Tejada-Tejada [a]; Ana Genua-Olmedo [b]; Carles Alcaraz [c], Juan José Fernández-Muñoz [b], Nuria Navarro [b] e Inmaculada Rodríguez-Santalla [b]**

[a] Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, mtejtej@upo.es ; [b] Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, agenuaolmedo@gmail.com, juanjose.fernandez@urjc.es, nuria.navarro@urjc.es, inmaculada.rodriguez@urjc.es ; [c] Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias, La Rápita, carles.alcaraz@irta.cat.

How to cite: Tejada-Tejada, M.; Genua-Olmedo, A.; Alcaraz, C.; Fernández-Muñoz, J.J.; Navarro, N. y Rodríguez-Santalla, I. 2024. Enfrentando los riesgos del Cambio Climático desde la perspectiva de los ciudadanos: El caso del Delta del Ebro. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18613

***Abstract***

*Social vulnerability to climate change in coastal areas is a crucial issue. Citizens living in these areas are knowledgeable about the environment and directly experience the effects of climate change. Listening to their opinions and proposals should be a mandatory requirement in the implementation of integrated management policies. The research is carried out in the Ebro Delta and a mixed methodology has been applied. The study is aimed at two main groups: users and experts. Two working techniques were used: face-to-face participatory workshops and an online questionnaire. The shared knowledge has allowed the identification of the areas of greatest vulnerability in the Ebro Delta; both groups opt for actions oriented towards renaturalization, such as the contribution of sediments downstream of the dams for their distribution along the channel to the mouth. However, in other aspects, their opinions differ.*

***Keywords:*** *Climate Change, Governance, Social Participation, Coastal Management, Ebro Delta*

***Resumen***

*La vulnerabilidad social ante el cambio climático en el ámbito costero es un tema crucial. Los ciudadanos que viven en estas áreas son conocedores del medio y experimentan directamente los efectos del cambio climático. Escuchar sus opiniones y propuestas debería ser un requisito obligatorio en la puesta en marcha de políticas de gestión integral. La investigación se desarrolla en el Delta del Ebro y se ha aplicado una metodología de tipo mixto. El estudio se dirige a dos grupos principales: usuarios y expertos. Se utilizaron dos técnicas de trabajo: talleres participativos presenciales y cuestionario en línea. El conocimiento compartido ha permitido identificar las áreas de mayor vulnerabilidad en el Delta del Ebro; ambos grupos optan por acciones orientadas hacia la renaturalización, como la aportación de sedimentos aguas abajo de las presas para su distribución a lo largo del cauce hasta la desembocadura. Sin embargo, en otros aspectos, sus opiniones difieren.*

***Palabras clave:*** *Cambio Climático, Gobernanza, Participación social, Gestión costera, Delta del Ebro.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

La densidad de población en los municipios costeros es de 4,5 veces mayor que la del resto de municipios en España en 2020 (429,4 habitantes/km$^2$ frente a los 94 habitantes/km$^2$), por tanto, cualquier incidencia relacionada con el Cambio Climático (en adelante, CC), tendrá una mayor relevancia en las zonas costeras que en el resto del territorio nacional (Ministerio de Agricultura, 2020).

La vulnerabilidad social ante el CC en el ámbito costero es un tema crucial. Para abordarlo, es esencial incorporar la gobernanza, entendida como la participación ciudadana en la toma de decisiones políticas y administrativas (Barragán Muñoz, 2010; de Andrés et al., 2019). Esta participación activa de los ciudadanos es fundamental para mantener una sintonía entre el uso y la conservación de los espacios costeros. Los ciudadanos que viven en estos ámbitos son conocedores del medio y experimentan directamente los efectos del CC. Escuchar sus opiniones y propuestas debería ser un requisito obligatorio en la puesta en marcha de políticas de gestión integral. La retroalimentación de estos agentes sociales puede ayudar a diseñar estrategias más efectivas para la conservación y el uso adecuado de estos valiosos espacios.

La investigación desarrollada en el Delta del Ebro ha sido objeto de análisis en estudios anteriores, como los realizados por Fatoríc & Chelleri (2012) y Romagosa & Pons (2017). Ambos estudios concluyeron que es necesario incluir la opinión de los actores locales en la gestión de esta zona. A nivel de gestión, el Plan para la Protección del Delta del Ebro, publicado en 2021, continúa sin incorporar acciones que involucren directamente a estos actores en la toma de decisiones, en cambio, sí se centra en considerar las perspectivas de las universidades, expertos científicos y diversas administraciones vinculadas. Una situación muy contradictoria, ya que el mismo plan establece dos desafíos que no son abordados: (i) implicar activamente a todos los actores sociales y económicos mediante un proceso transparente y participativo que mejore las formas de gobernanza y (ii) conseguir un equilibrio y consenso entre diferentes intereses y visiones. Esto implica considerar las perspectivas de sectores productivos (como los arroceros y los pescadores/mariscadores) y sopesar los valores económicos con la protección de la biodiversidad. Es decir, conciliar entre las visiones productivistas y conservacionistas (CEDEX., 2021:402).

Este planteamiento ha conducido a la presente investigación cuya pretensión es tomar en consideración la opinión de los actores locales sobre la incidencia del CC en sus formas de vida; comprobar el conocimiento que tienen sobre las estrategias de adaptación y mitigación del CC; y su relación con las autoridades gubernamentales.

## 2. Área de estudio

El Delta del Ebro (NE de la Península Ibérica) con una superficie de unos 325 km$^2$ comprende una gran diversidad de hábitats, desde naturales hasta muy modificados, como playas de arena, duna, marismas, lagunas costeras, arrozales y zonas urbanas (Figura 1). Esta zona costera está asociada a actividades socioeconómicas de alto valor, como el turismo y la recreación, por ejemplo, la vela y el kitesurf; las actividades industriales, por ejemplo, la producción de sal; la actividad marítima portuaria, la pesca, la acuicultura, la caza y la agricultura del arroz, principal cultivo, con una extensión de unos 210 km$^2$ (Rodríguez-Santalla & Navarro, 2021).

El delta del Ebro, habitado por unas 62.000 personas, acoge a casi 442.000 turistas al año (Loizidou et al., 2024), y está protegido por varias denominaciones nacionales e internacionales, como Parque Natural, la Red Natura 2000, la Convención de Ramsar y el Programa sobre el Hombre y la Biosfera de la UNESCO. A pesar de estas medidas de protección, el Delta del Ebro se enfrenta a las amenazas asociadas al aumento del nivel del mar, la erosión costera y la intensificación de los temporales (Rodríguez-Santalla & Navarro, 2021).

## 3. Metodología

En el desarrollo de esta investigación se ha empleado una metodología de tipo mixto: (i) revisión bibliográfica de los trabajos realizados sobre cómo abordar la participación social en un contexto complejo, donde confluyen competencias de diferentes administraciones, usos diversos y contrapuestos y una visión dispar de lo que ocurre

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

entre los ciudadanos y los científicos; (ii) dos acciones participativas: talleres y encuestas; (iii) procesado de estos datos cuali-cuantitativos, mediante análisis de datos.

El estudio se dirige a dos grupos principales: usuarios y expertos. Los usuarios o agentes locales son personas que conviven a diario en el Delta del Ebro: agricultores y pescadores, empresarios de industria y turismo, administraciones y asociaciones locales; mientras que los expertos son personas que investigan en diferentes ámbitos del delta, universidades, centros de investigación y asociaciones medioambientales. El trabajo con los agentes locales se centró en talleres participativos presenciales y el de los expertos se realizó a través de un cuestionario en línea.

### 3.1. Taller participativo

El taller se realizó en dos días durante el mes de octubre de 2022 (Figura 1), garantizando el anonimato a los participantes. Las conversaciones y discusiones transcritas quedaron recogidas en el cuaderno de campo. Los agentes locales fueron invitados a expresar sus opiniones sobre tres bloques temáticos de preguntas: emocional, estrategias de adaptación y de gestión. El bloque emocional presentaba preguntas sobre los sentimientos que les genera el CC a los participantes y el impacto en su vida personal y profesional. Sobre las estrategias de adaptación y de gestión, se preguntó sobre la opinión de las nueve medidas esbozadas en el informe 'Plan para la protección del Delta del Ebro': 1- inyección de sedimentos desde las presas más cercanas al delta, 2- trasvase de arena , 3- regeneración de playas, 4- restauración de dunas, 5- infraestructuras costeras (espigones, diques), 6- mantenimiento de lagunas costeras, 7- cambio de uso de la tierra (por ejemplo, de uso agrícola a humedal), 8- desarrollo de variedades de arroz tolerantes a la sal, y 9- utilización de filtros verdes (CEDEX, 2021).

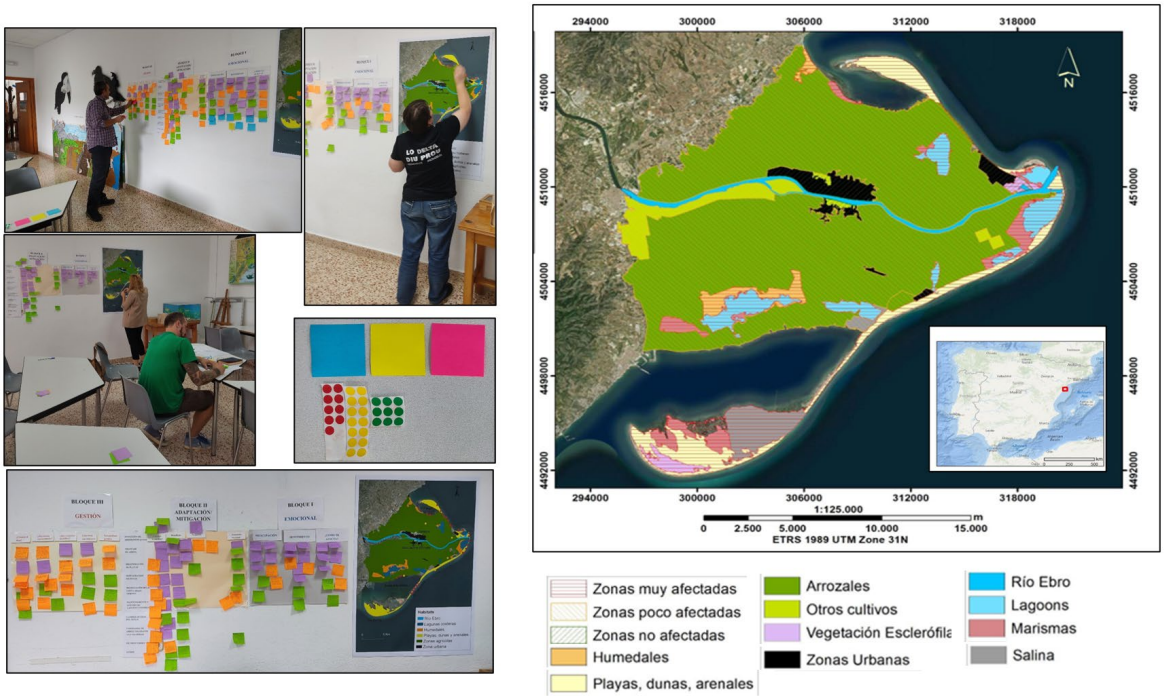



***Fig. 1*** *Talleres participativos (izquierda); Mapa de unidades de paisaje del Delta del Ebro (derecha)*

Entre las actividades del taller, los participantes identificaron sobre un mapa, las zonas del delta más afectadas por el CC. Los resultados fueron incorporados a un SIG elaborado con ArcGis Pro (Figura 1). De igual modo se les realizaron otras preguntas relacionadas, entre ellas si consideran conveniente aplicar una figura similar a la otorgada al Mar Menor en 2022, al Delta del Ebro, pasando a ser un objeto de protección jurídica con derechos (Vicente Giménez & Salazar Ortuño, 2024).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

### 3.2. Encuestas

Se enviaron por correo electrónico 100 cuestionarios a personas reconocidas como expertas durante abril de 2023, con un total de 19 preguntas. Para establecer comparaciones entre las respuestas de usuarios y expertos, el cuestionario se planteó siguiendo la misma estructura de tres bloques temáticos que la indicada para el taller del proceso participativo.

### 3.3. Procesado de los datos

Los datos obtenidos del proceso participativo y del cuestionario se preprocesaron con Excel y se analizaron con IBM SPSS Statistics 28.0 y con @ATLAS.ti. Esto permitió introducir citas, códigos, familias y redes semánticas mediante diferentes tipos de codificación: abierta, axial o teórica (Creswell & Poth, 2017).

## 4. Resultados y discusión

Ambos grupos expresaron **preocupación por los impactos del CC** en el Delta del Ebro, pero con enfoques diferentes. Los agentes locales identifican la erosión costera y la salinización del suelo como amenazas clave. Además, reconocen cómo el CC afecta a su identidad y a su estilo de vida, y se muestran preocupados por la falta de participación y la mala gestión de estos ámbitos. Los expertos consideran las afecciones del CC desde una perspectiva basada en su conocimiento especializado. Sus preocupaciones se centran en cómo el CC afectará en su trabajo, en la salud y en la disponibilidad de agua. Curiosamente, a pesar de reconocer los efectos adversos en la vida personal, un porcentaje notable de expertos cree que el CC en el Delta del Ebro podría generar oportunidades laborales.

Tanto los agentes locales como el grupo de expertos coincidieron **en identificar los hábitats más vulnerables en el Delta del Ebro,** como las playas, las lagunas costeras y las marismas. Sin embargo, difieren en otros hábitats. Por ejemplo, los expertos consideraban altamente vulnerables las zonas agrícolas, las zonas urbanas y el río Ebro. El reconocimiento de estos hábitats como vulnerables se alinea con numerosos estudios que los han identificado como en riesgo (Fatoríc & Chelleri, 2012, Romagosa & Pons, 2017).

De la misma manera coinciden en que **la aportación de sedimentos de los embalses** es positiva. Además, la regeneración de las playas fue especialmente reconocida por los agricultores debido a su carácter preventivo contra la erosión, lo que favorece la preservación de sus arrozales. Sin embargo, en otros aspectos, sus opiniones difieren. Por ejemplo, mientras que los agentes locales creen que la regeneración de las lagunas mejora los servicios ecosistémicos, los expertos tienen dudas y consideran que podría provocar erosión. Asimismo, no existe consenso sobre los beneficios de las infraestructuras costeras (como diques y espigones); mientras que los agentes locales ven beneficios en términos de estabilización del delta y protección ante temporales, los expertos consideran que no son adecuadas a largo plazo debido a su ineficacia. En esta línea, los agentes locales también valoran positivamente los filtros verdes, que apoyan la biodiversidad de agua dulce al filtrar contaminantes y mejorar la calidad del agua de los acuíferos, aunque los expertos señalan su alto coste económico.

Sobre las **propuestas personales** para mitigar el efecto del CC, ambos grupos coincidieron, especialmente con las adaptaciones basadas en la naturaleza, como el aumento del caudal ecológico del Ebro y la aplicación de medidas de gestión integral de la cuenca del río, incluyendo los aportes sedimentarios aguas abajo de los embalses, para contribuir al incremento del espesor en la llanura deltaica. Por su parte los usuarios también propusieron medidas administrativas, en este caso seguir las indicaciones de las entidades locales en lugar de las propuestas a nivel nacional o regional. Entre las sugerencias menos frecuentes se encontraban ideas como "abogar por una economía circular y un desarrollo más sostenible", "evitar medidas temporales", "implementar cambios legislativos", "crear una figura de referencia mundial sensible con el medio ambiente". Otros comentarios apuntaban a la desesperación como "es tarde para proponer medidas ya que no hay nada que hacer con el delta".

La mayoría de ellos han oído hablar del **'Plan de Protección de la Zona Costera del Delta del Ebro'** (CEDEX, 2021) pero no lo conocen en profundidad. Al evaluar la comunicación entre los usuarios y las administraciones

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

públicas en los diferentes niveles (local, autonómico y nacional), mayoritariamente opinan que la relación es mala o muy mala. Algo menos de la mitad consideran que sí existe consenso científico en relación con el delta.

Los expertos destacaron que las entidades ambientales fueron los actores más importantes en el proceso de toma de decisiones en el Delta del Ebro, seguidas de los científicos, los agricultores y las comunidades de regantes. Curiosamente, también le dieron poca importancia a la escala política local (Consejos comarcales) y a la escala nacional (Ministerios), opinión que contrasta con la dada por los agentes locales, quienes consideran que debe atenderse a las medidas propuestas a nivel local, por encima de la nacional o regional. En relación con el reconocimiento de personalidad jurídica al Delta del Ebro, en ambos casos tanto los agentes locales como los expertos consideraron que sería muy positivo poner en marcha este tipo de medidas.

Por otra parte, los usuarios destacaron la ausencia de consenso científico, calificando a la comunidad científica como la menos significativa en el proceso de toma de decisiones (Genua-Olmedo et al., 2024).

## 5. Conclusiones

Los hallazgos de este estudio destacan que **la opinión** de los agentes locales es igualmente relevante en los procesos de gobernanza en comparación con la opinión de los agentes expertos. Esto subraya la importancia de considerar las perspectivas y conocimientos locales al tomar decisiones relacionadas con la gestión y el desarrollo.

Tanto los expertos como los actores locales han expresado su conocimiento sobre el contenido del "Plan para la protección de Delta del Ebro" (CEDEX, 2021). Este conocimiento compartido les ha permitido identificar las áreas de mayor vulnerabilidad en el Delta del Ebro como, las playas, lagunas y marismas. En relación con las medidas de adaptación y sobre la base de las propuestas del documento, ambos grupos optan por acciones más orientadas hacia la renaturalización, como la aportación de sedimentos aguas abajo de las presas para su distribución a lo largo del cauce hasta la desembocadura. Sin embargo, surgen desacuerdos en relación con la efectividad de las infraestructuras costeras de mayor impacto, como los diques y espigones, resultando una opción favorable para los agentes locales frente al rechazo de los expertos.

Es cierto que la relación entre usuarios y administraciones a menudo puede ser tensa. En este contexto, la participación de los agentes locales en la toma de decisiones podría ser un paso positivo para mejorar la percepción y la confianza entre los gestores y los usuarios. Al involucrar a los actores locales, se lograría un empoderamiento y una representatividad, ya que pueden aportar conocimiento contextual y representar los intereses y necesidades de la comunidad. Esto les da una voz activa en las decisiones que les afecta a su entorno. Además, les proporciona una transparencia y legitimidad a las acciones gubernamentales, los usuarios se sienten más confiados cuando sus opiniones son consideradas; y, por último, los agentes locales comprenden mejor las dinámicas de su entono, los desafíos y las oportunidades, ya que su participación les permite diseñar soluciones más adecuadas y sostenibles.

Sin duda, las medidas sencillas como los talleres participativos y la retroalimentación de estos con las propuestas de gestión integrada de zonas costeras desempeñan un papel crucial en fortalecer la sostenibilidad y la capacidad de adaptación de los ámbitos costeros. En un contexto donde los riesgos del CC y la presión humana sobre estos espacios se intensifican, estas acciones contribuyen a una gestión más efectiva y a la protección de nuestros valiosos entornos costeros.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo de financiación de la Unión Europea a través del programa 'NextGenerationEU' (esquema de financiación "María Zambrano"). También por la Universidad Rey Juan Carlos (España), en el marco del proyecto "Análisis biogeomorfológico del sistema barrera laguna costera del delta del Ebro. Estudio de su función como ecosistema centinela del cambio global (LAGUNERO)". Un agradecimiento especial a los participantes en el proceso participativo y en el cuestionario por su entusiasmo y participación activa.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 7. Referencias

Barragán Muñoz, J. M. (2010). Coastal management and public policy in Spain. *Ocean and Coastal Management*, *53*, 209–217.

CEDEX. (2021). *Plan para la protección del Delta del Ebro*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/planparalaprotecciondeldeltadelebro_jmg_signedfe_tcm30-522381.pdf

Creswell, J. W. & Poth, C. N. (2017). *Qualitative Inquiry and Research Design Choosing Among Five Approaches* (4th ed., Vol. 1). SAGE.

de Andrés, M., Barragán, J. M., Arenas Granados, P., García Sanabria, J. & García Onetti, J. (2019). Coastal and Marine Zone Management in Spain. *Revista COSTAS*, 117–132. https://doi.org/10.26359/costas.e106

Fatoríc, S. & Chelleri, L. (2012). Vulnerability to the effects of climate change and adaptation: The case of the Spanish Ebro Delta. *Ocean & Coastal Management*, *60*, 1–10. http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.12.015

Genua-Olmedo, A., Rodriguez-Santalla, I., Tejada-Tejada, M., Alcaraz, C; Fernandez-Muñoz, J. J & Navarro, N (2024). Public perception of climate change and emotional attachment to coastal environments: perspectives from science and society. Manuscrito enviado para su publicación.

Ministerio de Agricultura, P. y A. (2020). *Análisis y Prospectiva-serie Pesca nº 5. Demografía de la población costera en España*. https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/aypseriepesca5_demografiapoblacioncostera2020_tcm30-617441.pdf

Rodríguez-Santalla, I. & Navarro, N. (2021). Main Threats in Mediterranean Coastal Wetlands. The Ebro Delta Case. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(11), 1190. https://doi.org/10.3390/jmse9111190

Romagosa, F. & Pons, J. (2017). Exploring local stakeholders' perceptions of vulnerability and adaptation to climate change in the Ebro delta. *Journal of Coastal Conservation*, *21*(1), 223–232. https://doi.org/10.1007/s11852-017-0493-9

Vicente Giménez, T. & Salazar Ortuño, E. (2024). An ecological citizenship's triumph from the popular legislative initiative to the rights granted for the Mar Menor. In J. García Ruales, K. Hovden, H. Kopnina, C. D. Robertson, & H. Schoukens (Eds.), *Rights of Nature in Europe* (1st ed., Vol. 1, pp. 1–396). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003318989

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18710

# A citizen initiative for the development and application of an empirical measure of soft protection against coastal erosion in the Colombian Caribbean

*Una iniciativa ciudadana para el desarrollo y aplicación de una medida empírica de protección blanda contra la erosión costera en el Caribe colombiano*

**Graciela Serna-Urrea[a], Javier Alcántara-Carrió[b], Alfredo Jaramillo-Vélez[c] & Ángela Fontán-Bouzas[d]**

[a]Investigadora independiente, Colombia gracia_262@hotmail.com, [b]Dept. Geology and Geochemistry, Universidad Autónoma de Madrid, Spain javier.alcantara@uam.es, [c]Joint Centre for Disaster Research, Massey University, Nueva Zelanda alfredo.jaramillovelez.1@uni.massey.ac.nz, [d] GEOMA, Centro de Investigación Marina, Universidad de Vigo, Spain afontan@uvigo.es

How to cite: Serna-Urrea, G.; Alcántara-Carrió, J.; Jaramillo-Vélez, A. & Fontán-Bouzas, A. 2024. A citizen initiative for the development and application of an empirical measure of soft protection against coastal erosion in the Colombian Caribbean. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024.
https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18710

## *Abstract*

*This work shows how observation, curiosity and perseverance in the face of a coastal erosion problem in the Colombian Caribbean can become a successful and replicable citizen initiative. This initiative, developed by one person from the local community and advised by experts, consists of the adaptation of a soft protection measure against coastal erosion. The methodology is based on two main aspects: smoothing the topographic profile of the beach and placing a barrier of sandbags on the shoreline, in a staggered order, with a curvilinear arrangement for wave breaking. A second additional sandbag barrier can be placed towards the shore. This paper presents three successful case studies, carried out on part of the coast of the municipalities of Arboletes, Los Córdobas and Santa Marta, even obtaining beach accretion results in the latter. This erosion mitigation strategy is low cost, easily replicable in other coastal environments, always with the advice of experts in the field and frequent maintenance of sandbag barriers.*

***Keywords:*** *Citizen initiative, soft protection measures, sandbags, coastal erosion mitigation.*

## *Resumen*

*Este trabajo muestra cómo la observación, curiosidad y perseverancia ante un problema de erosión costera en el Caribe colombiano pueden convertirse en una iniciativa ciudadana exitosa y replicable. Esta iniciativa, desarrollada por una persona de la comunidad local y asesorada por expertos, consiste en la adaptación de una medida blanda de mitigación de la erosión costera. La metodología se basa en dos aspectos principales: suavizar el perfil topográfico de la playa y colocar una barrera de sacos de arena en la línea de costa, en orden escalonado, con una disposición curvilínea para la rotura de las olas. Una segunda barrera adicional de sacos de arena puede colocarse hacia la orilla. Este trabajo presenta tres casos de estudio exitosos, realizados en pequeños sectores de la costa de los municipios de Arboletes, Los Córdobas y Santa Marta, obteniéndose incluso resultados de acreción de playa en este último. Esta estrategia de mitigación de la erosión es de bajo coste, fácilmente replicable en otros entornos costeros, siempre con el asesoramiento de expertos en la materia y el mantenimiento frecuente de las barreras de sacos de arena.*

***Palabras clave:*** *Ciencia ciudadana, medidas de defensa blandas, sacos de arena, mitigación de la erosión costera*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

The Colombian Caribbean coast experiences intense erosion processes, due to its geological characteristics, which include intense tecto-structural processes (faults, formation of diapirs and mud volcanoes, subsidence) and others associated with the tropical climate, sea level rise and local anthropic actions (Correa et al., 2005; Correa & Alcántara-Carrió, 2007; Posada Posada & Henao Pineda, 2008; Restrepo-Ángel et al., 2021). The vulnerability of the coast is related to socioeconomic, ecological and geomorphological aspects (García-Echavarría et al., 2022; Alcántara-Carrió et al., 2024). Anthropic actions have drastically changed the sediment load of rivers and the location of some river mouths (Restrepo & Kettner, 2012; Restrepo et al., 2015; Orejarena Rondón et al., 2015; Alcántara-Carrió et al. 2019), affecting ecosystems of high ecological value such as mangroves (Villate Daza et al., 2020) and dunes (Villate et al., 2020). The main measure taken against coastal erosion has been the construction of dikes, whose low long-term effectiveness makes new and costly actions necessary (Portz et al., 2024). Exceptionally, in the Archipelago of San Andrés, Providencia and Santa Catalina the construction of dikes to protect corals has been forbidden, while soft protection measures against coastal erosion have been implemented in some places of the continental Caribbean, as shown in this study.

This kind of citizen initiatives are quite useful to reduce the gap between science and society, combining the enthusiasm and curiosity of people in society with the knowledge of the professionals who accompany the initiatives. The aim of this work is to describe a method of soft defense against coastal erosion, whose design is the result of citizen initiative and is based on recovering the topographic profile of the beach, using several lines of sandbags with a specific distribution based on the empirical observation of coastal dynamics in each site. Recent results obtained in three beaches of the Colombian Caribbean are also presented.

## 2. Study area

The Colombian Caribbean has a microtidal regime with a maximum tidal range of 0.62 m (Torres et al., 2008) and significant wave heights between 2.3 and 3.1 m (Thomas et al., 2011). The influence of the Intertropical Convergence Zone defines three climatic epochs: the dry season (December to April), with accumulated precipitation between 26.7 and 75.3 mm, strong northeast trade winds and therefore strong swell; the transition season (May and June), with accumulated precipitation between 25 and 398 mm; and the wet season (July to November) when the peak of the cyclonic season occurs, with winds of lower intensity mainly from the south and precipitation between 98.9 and 411.7 mm (Hastenrath, 2002). This work has been implemented in three small sectors of beaches located in the Colombian Caribbean with intense erosion processes (Fig. 1):

- Salguero Beach is located southwest of the city of Santa Marta (Department of Magdalena), bounded to the south by Punta La Gloria hill and to the north by the mouth of the Gaira River, which forms an alluvial fan to the NE of the beach. The beach has a low and rectilinear morphology, with a coastal dune system highly affected by real estate development in the sector (Säenz-Reyes et al., 2017).

- Vereda Galilea (Los Córdobas Municipality, Department of Córdoba) is located in a rural area mainly composed of a system of cliffs less than 4 m high and pocket beaches in the bays of the order of 10 m in length. The area shows intense erosion and therefore a high instability of the terrain.

- Barrio El Volcán (Arboletes Municipality, Department of Antioquia) is a semi-urban coast with cliff terraces similar to the previous study area, characterized by a high incidence of mud diapirism due to its proximity to the Arboletes mud volcano, which is the main manifestation of mud diapirism in the area with a height of more than 20 m. The sediments produced by the erosion of these cliffs have a high content of clays and silts, with beach-forming sands being scarcer and coming mainly from nearby fluvial contributions.

The last two study areas are located in the San Jacinto stratigraphic unit, an emerged part of the Sinú Accretionary Wedge formed by volcanoclastic and silicoclastic sedimentary sequences deposited in marine environments during the Cretaceous - Paleocene (Duque-Caro, 1984; Vinnels et al., 2010).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

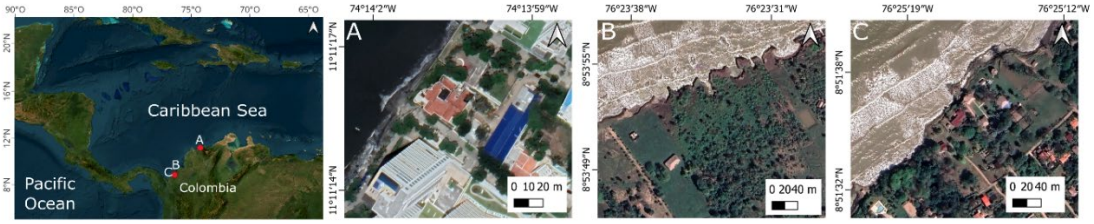



***Fig. 1**. Location of the three action zones on the Colombian Caribbean coast. A) Salguero Beach (Santa Marta), B) Vereda Galilea (Los Córdoba), C) Barrio El Volcán (Arboletes) (Source satellite images: Google Earth).*

## 3. Methodology

Based on the observation of erosion in Barrio el Volcán (Arboletes) since 2000 and after the malfunctioning of an initially constructed breakwater, different tests have led to define the following method of soft protection against coastal erosion:

1. First, the slope of the topographic profile of the emerged terrain must be softened, if it allow it, i.e. if there is no bedrock underneath or anthropic constructions that avoiding it, for instance.

2. Next, a first barrier consisting of several rows of sandbags in staggered order, each 0.80 m by 0.5 m in size and filled with approximately 40 kg of sand, should be placed in the surfaced area. This sandbag barrier should be located at one meter from the shore to prevent the wave from passing over it and continuing to erode the surfaced beach, with a curved plan shape to help dissipate wave energy. In case of strong waves, another sandbag barrier should be placed parallel and very close to the shore. The first barrier will dissipate the wave energy, so that the sediment is deposited, while the second one stops the wave action. In case the initial erosive escarpment of the beach is close to buildings, the upper part of the beach should be stabilized with staggered wooden trenches, or sandbags can be used again.

3. After erosion control has been achieved with the first placement of sandbags, this barrier should be moved towards the new shore in order to consolidate the reclaimed beach land in front of the sea.

4. At or near the base of the sandbag barrier, a second sandbag barrier or a small rocky barrier can be placed with blocks no larger than 1 m in diameter, which can also be moved when necessary.

5. Year-round monitoring and evaluation of results is essential. When waves move, sink or break the sacks, they should be replaced to avoid structural failures that can be enlarged by the waves.

The construction, monitoring and maintenance of the bag barriers requires between two and ten operators, depending on the size of each area and wave energy, sometimes supported by the use of bulldozers. This methodology has already been applied in several sites in the Colombian Caribbean, the first results having been described by Serna Urrea (2020). New results are presented below for the three study areas, each of which was monitored daily for the first two weeks, then weekly for a month and finally monthly for 6 months, recording this monitoring with field and drone photographs. These results were also corroborated with satellite images from Google Earth, a tool also used to determine erosion rates for the Galilea Beach.

## 4. Results

The methodology described above has successfully halted stop erosion and has even favored the accumulation of sand and beach progradation. At Salguero Beach (Santa Marta Municipality), excellent results were achieved between March and July 2022, recovering a 150-meter stretch of the beach. Unfortunately, an intervention with groynes was subsequently carried out in the same area, which led to the erosion of the entire beach area where this action was carried out, as it was located downstream of the groynes (Fig. 2).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València




***Fig. 2**. Intervention on Salguero Beach. A and B) Placement of the sandbags, C) beach accretion, and D) beach erosion*

Galilea Beach (Los Córdoba Municipality) had experienced high erosion (30 m from 2012 to 2018). Very good results were also obtained in a small stretch where this methodology was applied in 2018. The intervention managed to retain sand, forming a beach where previously it was a muddy environment due to high erosion. Unfortunately, the COVID pandemic made maintenance impossible leading to slight erosion again; reconstruction and continued maintenance of the sandbag barriers would be desirable. Nevertheless, the beach erosion has clearly been much more intense on both sides of the area where the action took place (Fig. 3).




***Fig. 3**. Intervention on Galilea Beach. A) previous situation, B) terrain profiling, C) placement of sandbags, D) accumulation of sand, and E) new low erosion in contrast to higher beach erosion in the contiguous zone.*

The most complex and prolonged action has been in Barrio el Volcán (Arboletes Municipality), which began in 2011. The upper area, stabilized with wooden trenches in that year, has remained practically stable and requires very little maintenance. In contrast, the situation has been drastically complicated on the shore since the construction in 2010 of a small spur on the neighboring property. The border adjacent to the spit, where sandbags were initially placed, needs to be intervened every year after the arrival of the trade winds, with the associated waves and tides, and it has even been necessary to place a barrier of blocks on the shore. The small beach downstream has been stabilized and sand has accumulated (Fig. 4).




***Fig. 4.** Intervention on Barrio el Volcán. A) upstream groin construction and initiation of erosion, B) intense erosion, C) construction of trenches, D and E) sandbagging, and F) beach reclamation.*

## 5. Discussion

This work serves as an example of how a citizen initiative arising from a problem such as coastal erosion, advised by professionals in the area, could become a Citizen Science approach to the study of new and practical forms of coastal protection within the reach of the local community, once the scientific rigor of the data collection

 BY-NC-SA

methodology is assured. The first author, Graciela Serna, an inhabitant of Arboletes, has been developing and implementing this methodology since 2011, for the benefit of different communities along the Colombian coast. This soft protection measure against coastal erosion often faces skepticism from proponents of hard measures, which frequently fail to deliver long term efficacy and may even exacerbate erosion in adjacent areas. On the contrary, this empirical design, based on the observation of coastal dynamics, trial and error, and the advice of experts in the area, has managed to stop erosion and even sediment recovery in different beaches, as is the case of the actions carried out in Barrio El Volcán (Arboletes Municipality), Vereda Galilea (Los Córdoba Municipality) and Salguero Beach (Santa Marta Municipality), confirmed in this last beach by preliminary studies (Ricaurte et al., 2022).

The mud volcano near the study area in Arboletes suffers intense erosion processes (Correa & Paniagua-Arroyabe, 2016; Paniagua et al., 2018). To cope with its erosion, both by waves and by rainfall and gravitational processes, the previous owner of the land built mud-filled terraces in 2015. However, after the water evaporated, cracks formed that favored the entry of rainwater and erosion of the slope. Subsequently, the Governor's Office of Antioquia installed a pair of breakwater dikes on the shore and implemented additional control and mitigation measures to prevent subaerial erosion of the mud volcano in 2020. These measures included the construction of staggered barriers with sandbags on the crest of the diapir, inspired by the methodology presented here (Fig. 5).




***Fig. 5.*** *Erosion defense actions in the Arboletes mud volcano. A) construction of terraces, B) dewatering of the terraces, C) construction of groynes, D) construction of a sandbag barrier.*

The use of geotextiles represents a soft protection measure against coastal erosion, not based on stiffening the coast and with numerous advantages (Heerten et al., 2000). Instead of building vertical walls with sandbags, as in other places, this methodology proposes smoothing the topographic profile of the beach and then building the barrier with sandbags, which allows the beach to remain useful for bathing. The curved layout, as opposed to rectilinear, enhances these barriers' resistance to wave impact. It is advisable that the methodology described here has the advice of experts, who can help diagnose the complexity of the site. In future actions, it would be advisable to use sacks of fique, so as not to generate contamination by plastics, as well as to generate less landscape impact.

## 6. Conclusions

The methodology shown in this work serves as a good example of an empirical method developed by a citizen, advised by experts, and successfully applied in different communities of the Colombian coast with clear erosion problems. The results demonstrate that this methodology can mitigate beach erosion and even lead to accretion trends. It is a cost-effective approach that can be implemented in communities with low economic resources, with active participation of the citizens themselves, and allows the maintenance of bathing on the beaches, unlike the construction of large breakwaters. Furthermore, it avoids creating currents induced by the wave reflection process and thus far no negative impacts on downstream beaches have been identified. The success of this intervention depends on the monitoring and maintenance of the bag barriers, and other aspects indicated in the methodology. This is a simple remediation action, not requiring prior complex studies, although it is always advisable to carry out prior studies to understand the causes of erosion.

## 7. Acknowledgements

This work is a tribute and eternal recognition to Professor Iván Darío Correa Arango, a great connoisseur of the coastal geology of Colombia and a great friend, who strongly supported this initiative and encouraged to disseminate it. Thanks also to all the people who have collaborated from the communities to implement this methodology, as well as to Professor Ronald Waterman for his enthusiastic initial support. Thanks to University of Cordoba, University of Norte, Universidad de Antioquia and Municipality of Arboletes for invite to disseminate this methodology and interventions in fieldtrips with students and forums.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

J.A.C. thanks the grant "Ayudas para la Recualificación del Sistema Universitario Español" ref. CA2/RSUE/2021-00418.

## 8. References

Alcántara-Carrió, J., Caicedo, A, Hernández, J.C., Jaramillo-Vélez, A. & Manzolli, R.P. (2019). Sediment bypassing from the new human-induced lobe to the ancient lobe of the Turbo Delta (Gulf of Urabá, Southern Caribbean Sea). *Journal of Coastal Research*, 35(1), 196-209. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00221.1

Alcántara-Carrió, J., García-Echavarría, L.M. & Jaramillo-Vélez, A. (2024). Is the coastal vulnerability index a suitable index? Review and proposal of alternative indices for coastal vulnerability to sea level rise. *Geo-Marine Letters* 44(2), 8. https://doi.org/10.1007/s00367-024-00770-9

Correa, I.D. & Alcántara-Carrió, J. (2007). Cartografía y sensores remotos aplicados al estudio de cambios históricos en la posición y configuración de la línea de costa del Caribe y Pacífico colombianos. In: Proceedings of the XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Mar del Plata (Argentina). 631-634.

Correa, I.D., Alcántara-Carrió, J. & González R, D.A. (2005). Historical and Recent Shore Erosion along the Colombian Caribbean Coast. *Journal of Coastal Research*, S.I. 49, 52-57. https://www.jstor.org/stable/25737404

Correa, I.D. & Paniagua-Arroyave, J.F. (2016). The Arboletes – Punta Rey littoral, Southern Caribbean Coast. In: M. Hermelin (ed.). Landscapes and Landforms of Colombia. Springer International Publishing Switzerland. 55-63. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-11800-0_4

Duque-Caro, H., (1984). Sinú-San Jacinto terrane. Southwestern Caribbean borderland. In: Bonini, W., Hargraves, R., & Sagham, R. (eds.), Caribbean Plate Boundary and Regional Tectonics. Boulder, Colorado: Geological Society of America, pp. 303–316.

García Echavarría, L.M., Alcántara-Carrió, J. & Jaramillo-Vélez, A. (2022). Coastal vulnerability to sea level rise in the southwestern Colombian Caribbean. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* INVEMAR 51(2), 9-28.

Hastenrath, S. (2002). The intertropical convergence zone of the eastern Pacific revisited. *International Journal of Climatology*, 22(3), 347–356. https://doi.org/10.1002/joc.739

Heerten, G., Jackson, A., Restall, S. & Stelljes, K. (2000). Environmental benefits of sand filled geotextile structures for coastal applications. In: International Society for Rock Mechanics International Symposium. Melbourne, Australia. Pag. 159.

Orejarena Rondón, A.F., Afanador Franco, F., Ramos de la Hoz, I., Conde Frías, M. & Restrepo López, J.C. (2015). Evolución morfológica de la espiga de Galerazamba, Caribe colombiano. *Boletín Científico* CIOH; 33, 123-144. https://doi.org/10.26640/01200542.33.123_144

Paniagua-Arroyave, J.F., Correa, I.D., Anfuso, G. & Adams, P.N. (2018). Soft-cliff retreat in a tropical coast: The Minuto de Dios sector, Caribbean coast of Colombia. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 81, 40–49. https://doi.org/10.2112/SI81-006.1

Portz, L.C., Villate-Daza, D., Bolivar-Anillo, H.J., Fontán-Bouzas, A., Alcántara-Carrió, J. & Manzolli, R.P. (2024). Impact of anthropogenic structures in long- and short-term shoreline evolution of Santa Marta Bay (Colombian Caribbean). *Geo-Marine Letters*, 44:4. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2821734/v1

Posada Posada, B. & Henao Pineda, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. *Serie de Publicaciones Especiales*, INVEMAR, 200 pp.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Restrepo, J.C., Schrottke, K., Traini, C., Ortíz, J.C., Orejarena, A., Otero, L., Higgins, A. & Marriaga, L. (2015). Sediment Transport Regime and Geomorphological Change in a High Discharge Tropical Delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a Period of Intense Change and Human Intervention (1990-2010). *Journal of Coastal Research*, 32(3), 575–589. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00263.1

Restrepo, J.D. & Kettner, A. (2012). Human induced discharge diversion in a tropical delta and its environmental implications: The Patia River, Colombia. *Journal of Hidrology*, 425, 124-142. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.037

Restrepo-Ángel, J.D., Mora-Paez, H., Díaz, F., Govorcin, M., Wdowinski, S., GiraldoLondono, L., et al., (2021). Coastal subsidence increases vulnerability to sea level rise over twenty-first century in Cartagena, Caribbean Colombia. *Scientific Reports*. 11(1), 1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-021-98428-4

Ricaurte, C., González, M., Torres, J., Parga, N., Macias, P.A., Mojica, J. & Morales D.F. (2022). Evolución morfodinámica de playa Salguero como aporte a la evaluación de alternativas ambientales frente a la erosión costera. Informe técnico final. BPIN. *Programa Geociencias Marinas y Costeras*. INVEMAR. Santa Marta. 54 pp.

Säenz-Reyes, J.A., Ríos-Reyes, C.A. & Castellanos-Alarcón, O.M. (2017). Itinerario geológico de la franja costera entre el Aeropuerto Internacional Simón Bolívar y la Bahía de Taganga, Provincia Geotectónica de Santa Marta. Boletín de Ciencias de la Tierra, 42, 5-24. https://doi.org/10.15446/rbct.n42.44920

Serna Urrea, G. (2020). Erosión costera. Memorias ilustradas. Edición bilingüe. Editorial Save. Medellín, Colombia. 139 pp.

Thomas, Y.F., Lerma, A.N., Durand, P., Posada, B., García-Valencia, C. & Andrade-Amaya, C.A. (2011) Altura significativa del oleaje en la Cuenca Colombiana del Caribe, datos de altimetría radar. Boletín Científico CIOH, 29, 27-45.

Torres Parra, R. R., Otero Díaz, L. J., Afanador Franco, F. & Marriaga Rocha, L. (2008). Comportamiento del nivel del mar en el litoral Caribe colombiano. Boletín Científico CIOH, 26, 8-21. https://doi.org/10.26640/01200542.26.8_21

Villate Daza, D.A., Moreno, H.S., Portz, L., Manzolli, R.P., Bolívar-Anillo, H.J. & Anfuso, G. (2020). Mangrove forests evolution and threats in the Caribbean Sea of Colombia. *Water*, 12(4), 1113. https://doi.org/10.3390/w12041113

Villate, D.A., Portz, L., Manzolli, L.P. & Alcántara-Carrió, J. (2020). Human disturbance of shoreline morphodynamics and dune ecosystem at the Puerto Velero spit (Colombian Caribbean). *Journal of Coastal Research*, S.I. 95, 711-716. https:/doi.org/10.2112/SI95-138.1

Vinnels, J.S.; Butler, R.W.H.; McCaffrey, W.D. & Paton, D.A., (2010). Depositional processes across the Sinú accretionary prism, offshore Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 794–809. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.12.008

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18620

# Clientes web interactivos (geovisores y dasboard) para la exploración y difusión web de datos masivos de riesgos costeros

*Interactive web clients (geoviewers and dasboard) for web exploration and dissemination of massive coastal risks data*

**José Ojeda-Zújar[a], Antonio Prieto-Campos[a], Esperanza Sánchez-Rodríguez[a] e Ismael Vallejo-Villalta[a]**

[a]Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, , zujar@us.es, pcampos@us.es, esanchez@us.es, ivallejo@us.es

How to cite: Ojeda-Zújar, J.; Prieto-Campos, A.; Sánchez-Rodríguez, E. y Vallejo-Villalta, I. 2024. Clientes web interactivos (geovisores y dasboard) para la exploración y difusión web de datos masivos de riesgos costeros. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.18620

***Abstract***

*Currently, there is a proliferation of studies and projects on coastal risks that generate a significant volume of data (big data, open data, data modeling, etc.), difficult to disseminate and interpret correctly due to its massive nature. Classical dissemination media (publications, cartography, etc.) therefore present many limitations and, in recent years, web geoviewers have been implemented for their dissemination that solve some of them (possibility of visualization at various scales, access to thematic information, etc.). On the other hand, the new client functionalities (html5, JavaScript libraries, openGL, Canvas, etc.) today, offer an excellent way for the correct dissemination and, even, the interactive exploration of this massive data. The objective of this communication is to present the results of two web clients on coastal risks (coastal erosion on exposed beaches - the entire coast of Andalusia - and inundation of the mean sea level rise - western coast of Huelva -). These clients make use of these new web resources in the form of geoviewers/dashboards where, to the classic geovisualization functionalities, new functionalities have been incorporated aimed at the interactive exploration of users with the original data, thus constituting not only a dissemination tool, but a work tool for specialists. For this, the CARTO cloud platform has been used.*

***Keywords:*** *coastal risks web clients, beach erosion rates, Andalusia, permanent inundation, mean sea level, western coast of Huelva.*

***Resumen***

*En la actualidad proliferan los estudios y análisis sobre riesgos costeros que generan un importante volumen de datos (big data, open data, modelización, etc.), difíciles de difundir e interpretar correctamente por su carácter masivo. Los medios de difusión clásicos (publicaciones, cartografía, etc) presentan por ello muchas limitaciones y en los últimos años se han ido implantando para su difusión geovisores web que solventan algunos de ellos (posibilidad de visualización a varias escalas, acceso a información temática, etc.). Por otra parte, las nuevas funcionalidades de los clientes (html5, librerías JavaScript, openGL, Canvas, etc.) ofrecen hoy una excelente vía para la correcta difusión e, incluso, la exploración interactiva de estos datos masivos. El objetivo de esta comunicación es presentar los resultados de dos clientes web sobre riesgos costeros (tasas de erosión en playas expuestas - toda la costa de Andalucía- e inundación del nivel medio del mar – costa occidental de Huelva-) haciendo uso de estos nuevos recursos web en la forma geovisores/dashboards donde, a las funcionalidades de geovisualización clásicas, se han incorporado nuevas funcionalidades orientadas a la exploración interactiva de los usuarios con los*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

*datos originales, constituyendo con ello no solo una herramienta de difusión, sino una herramienta de trabajo para especialistas. Para ello se ha utilizado la plataforma cloud de CARTO.*

***Palabras clave:*** *clientes web riesgos costeros, tasas erosion de playas, Andalucia, inundación permanente, nivel medio mar, costa occidental Huelva.*

## 1. Introducción y objetivos

En la actualidad, la facilidad de acceso a fuentes de información masiva y a los resultados de la modelización de procesos físicos (big data y open data), a la disponibilidad de software (open source) para su gestión y análisis, así como al incremento del interés de los estudios centrados en el análisis de riesgos costeros (erosión e inundación) previsiblemente incrementados en su intensidad o frecuencia en todos los escenarios futuros de cambio climático (IPCC 2019), han hecho proliferar los estudios y análisis de los mismos que generan un importante volumen de datos, difíciles de analizar, difundir e interpretar correctamente por su carácter masivo.

A ello, se une la dificultad de su adecuada difusión por medios clásicos (artículos, mapas, etc.) donde la posibilidad de incorporar toda la información necesaria para su interpretación es limitada. Por otra parte, la difusión científica a través de herramientas web como los geovisores, ha sido una excelente solución para solventar, en parte, el problema de acceso a la información de este tipo de datos (posibilidad de visualización a varias escalas, acceso a información temática, etc.). Estas funcionalidades de los geovisores web se están viendo incrementadas en la actualidad por las nuevas potencialidades de las bases de datos espaciales (SQL y NoSQL) y los servidores de servicios cartográficos en la parte servidora (backend) de las aplicaciones web y, sobre todo, con las nuevas funcionalidades de los clientes (html5, librerías JavaScript, openGL, Canvas, etc) que hoy ofrecen una excelente vía para el acceso a toda la información complementaria necesaria para la correcta difusión e interpretación de estos resultados.

El objetivo de esta comunicación es presentar los primeros resultados de la solución adoptada por el Grupo de investigación de la Universidad de Sevilla al que pertenecen los autores, haciendo uso de estos nuevos recursos web, integrados en dos clientes web desarrollados en la forma de geovisores/dashboards, pero dando un paso más donde, a las funcionalidades de geovisualización clásicas de los geovisores, se han incorporado a los clientes nuevas funcionalidades orientadas a la exploración interactiva de los usuarios con los datos originales, constituyendo con ello no solo una herramienta de difusión, sino una herramienta de trabajo para especialistas. Para ello se ha utilizado la plataforma cloud de CARTO.

## 2. Fuentes de datos y aplicación web

### 2.1. Fuentes de datos para los riesgos de erosión

Ligados a diferentes proyectos de investigación y tesis doctorales, el Grupo de investigación posee una amplia base de datos sobre las tasas de erosión a medio/largo plazo (1956-2019) de todas las playas de Andalucía. Para su elaboración se llevaron a cabo los siguientes procesos:

- Obtención de las ortofotos publicadas por la Administración para su descarga y/o acceso a través de servicios WMS. Las fechas de ortofotos seleccionadas fueron: 1956, 1979, 2001, 2009, 2011 y 2013, 2016 y 2019.
- Digitalización de la geometría de las líneas de costa utilizadas como *proxies*. Se seleccionaron los dos *proxies* más utilizados por la comunidad científica (Paris et al., 2013): i) contacto duna costera/límite playa alta (foredune/backshore); (ii) límite superior de la marca húmeda de la última pleamar.
- Información temática complementaria: a las líneas de costa digitalizadas se asoció un modelo de datos de la línea de costa (Fernandez-Nunez et al., 2015) para su incorporación a una base de datos espacial (PostgreSQL/PostGis) que contiene toda la información complementaria necesaria para su interpretación (tipología de costa, presencia y amplitud de dunas costeras, presencia de infraestructuras costeras, etc.).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

- Cálculo de tasas con la geometría de los dos proxies: se ha utilizado el programa DSAS (Digital Shoreline Analisys System) para calcular las tasas asociadas a transectos cada 50 metros de playa. Se calcularon las tasas para los dos proxies mencionados y también la amplitud de la playa alta (backshore width) derivada de los mismos. Las tasas se calcularon para los periodos: 1956-1977, 1977-2001, 2001-2011, 1956-2001, 1956-2011, 1956-2013, 1977-2011, 1977-2013 y 2001-2019. A cada cálculo se ha asociado su nivel de incertidumbre desde la perspectiva geométrica (error medio cuadrático, etc.).

### 2.2. Fuentes de riesgos inundación permanente del nivel medio del mar

El Grupo de investigación posee también una amplia base de datos sobre la peligrosidad de la inundación permanente ligada a la potencial subida del nivel medio del mar para la costa occidental de Huelva, así como un volumen muy importante de variables sociodemográficas y económicas necesarias para el cálculo de su exposición y de la vulnerabilidad:

- Peligrosidad para diferentes escenarios del IPCC 2019 -RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5- y el propuesto por Jevrejeva (2012). Para cada uno de estos escenarios, se han calculado superficies de inundación que utilizan los niveles del nivel medio del mar (SLR) de cada escenario con los umbrales de probabilidad del 5% y 50%, combinados con niveles de pleamar (PL) de la marea con coeficientes 07 -medio- y 1.18 - extremo o "king tide"-.
- Conjunto de variables socio-demográficas publicadas por los grandes registros públicos para Andalucía, asociadas e integradas espacialmente en los edificios de catastro –formato ATOM-, en algunos casos con el uso de complejas técnicas disimétricas: Población residente para 2020 del IECA, Rentas medias de hogares y personas del INE de 2019, Bienes inmuebles, Viviendas y usos de edificios de 2020 de Catastro –formato CAT- y Plazas turísticas regladas del Registro de Turismo de Andalucía para 2021.

### 2.3. Aplicación Web para generación de Clientes (geovisores y Dashboad): plataforma CARTO

#### *2.3.1. Backend: componentes básicos de parte servidora*

A nivel de almacenamiento y gestión de los datos originales y calculados de los riesgos costeros (líneas de costa, transectos, tasas erosión, edificios de Catastro, escenarios nivel medio del mar, etc.) se ha utilizado el gestor de bases de datos espacial PostgreSQL (versión 9.6.0) /PostGis (versión 2.3). Se ha utilizado la plataforma CARTO para la publicación y envío de los datos a los clientes, la cual se conecta directamente a la base de datos de riesgos costeros antes comentada (Figura 1).

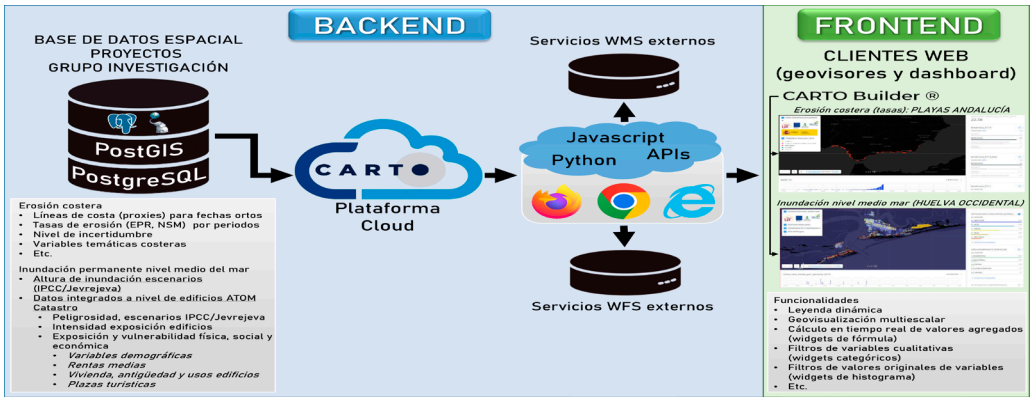



***Figura 1.*** *Esquema de la arquitectura y componentes de la aplicación de la aplicación web.*

#### *2.3.2. Frontend: clientes web (geovisores y dashboards)*

Una vez integrada la base datos de riesgos costeros en la plataforma de CARTO, la herramienta "*Builder*" permite numerosas posibilidades para la exploración interactiva (utilización de widgets categóricos, de histogramas, de fórmulas o de series temporales) y el análisis de los datos (Figura 1). Tras decidir cómo visualizar los datos

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

(semiología), el tipo de widgets (categóricos, de histograma, etc.) a utilizar para su exploración, agrupación y filtrado interactivo o el análisis a aplicar a los mismos, su publicación en internet a través de un cliente ligero es directa y automática, sin que se requiera el uso de código. En definitiva, se trata de clientes orientados a la exploración interna de los datos integrados espacialmente ofreciendo múltiples posibilidades para la geovisualización de los resultados a través de filtros y selecciones interactivas, pudiendo anidarse varias de ellas.

## 3. Resultados

Se has desarrollado dos clientes: uno sobre riesgos de erosión en playas expuestas de Andalucía (Figura 2A) y otro sobre el riesgo de inundación permanente por el nivel medio del mar en la costa occidental de Huelva (Figura 2B).

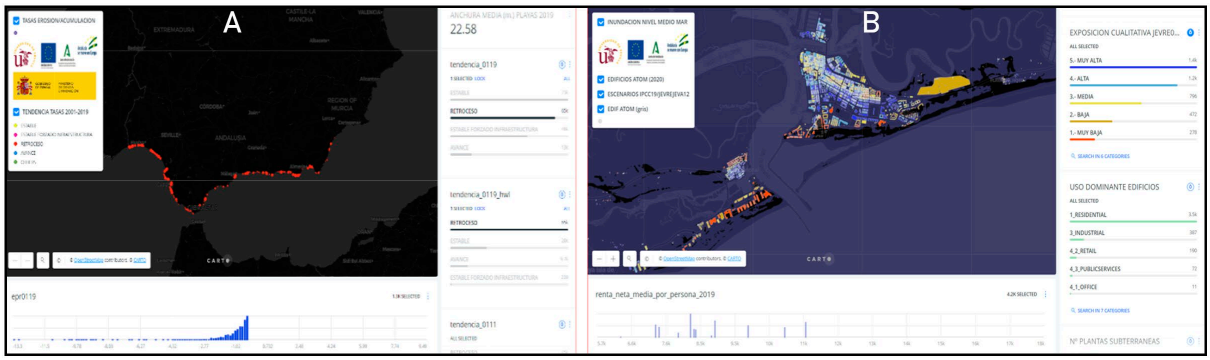



***Figura 2.*** *Interfaz de los clientes web sobre erosión costera (A) y riesgo de subida del nivel medio del mar(B)*

### 3.1. Cliente web (geovisor y dashboard): tasas de erosión costera en playas expuestas de Andalucia (2001-2019)

A diferencia del publicado para las tasas de erosión (Prieto y Ojeda, 2024) que solo incorporaba un proxy, en este cliente se ha incorporado una única capa que contiene todos los cálculos de tasas con los dos proxies más utilizados basados en líneas de costa: (i) contacto duna costera/limite interno playa alta (foredune/backshore); (ii) límite superior de la última marca húmeda de la marea para el periodo 2001-2019. Se han incluido también las tasas para dos subperiodos (2001-2011 y 2011-2019), en este caso solo para el indicador primero (foredune/backshore), el más sólido cuando el área de estudio integra playas asociadas a costas mesomareales (atlántica) y micromareales (mediterránea) y la expresión cuantitativa de la amplitud de la playa seca como resultado de las distancia en metros de los dos proxies para los años 2001 y 2019. Este último, es un dato muy interesante para los estudios de capacidad de carga física de las playas. Adicionalmente se han incorporado algunas de las variables temáticas presentes en la base de datos, de interés para la interpretación de los resultados (amplitud de las formaciones dunares conectadas con la línea de costa, espacio de acomodación, tipología geomorfológica jerarquica, etc). Se han incluido, entre las muchas posibilidades de las variables que ofrece la base de datos espacial una capa: ***Tendencias tasas 2001-2019*****,** que interacciona cuando se activa con las siguientes variables y widgets (Tabla 1):

***Tabla 1.*** *Estructura de contenidos del cliente web de tasas de erosión costera*

| CLIENTE WEB (GEOVISOR Y DASHBOARD): TASAS DE EROSIÓN PLAYAS ANDALUCÍA | |
|---|---|
| ***CAPA TENDENCIAS TASAS 2001-2019*** | Interacciona cuando se activa con las siguientes variables y widgets: |
| **Widgets de fórmula** (valores agregados): se recalculan en función del área de visualización y la elección de filtros con widgets de histograma o categóricos: | Longitud de playas afectadas (m) |
| | Media EPR (m/año) para el indicador límite interno playa seca |
| | Media EPR (m/año) para indicador marca húmeda |
| | Media NSM (m) para el indicador límite interno playa seca |
| | Media NSM (m) para el indicador marca húmeda |
| | Anchura media playa seca para 2001 |
| | Anchura media playa seca para 2019 |
| **Widgets categóricos**: filtran y seleccionan por tendencias, periodos e indicador (proxy), aplicado un nivel de incertidumbre de ±0.3 m/año | Tendencia 2001-2019 indicador limite interno backshore |
| | Tendencia 2001-2019 indicador marca húmeda |
| | Tendencia subperiodo 2001-2011 indicador limite interno backshore |
| | Tendencia subperiodo 20011-2019 indicador limite interno backshore |
| **Widgets categóricos**: filtran y seleccionan espacialmente el área de análisis por: | Fachada litoral (atlántica y mediterránea) |
| | Provincia |
| | Municipios |
| **Widgets categóricos**: filtran y seleccionan espacialmente por la tipología geomorfológica asociadas a las playas | Tipología jerarquica nivel 1 |
| | Tipología jerarquica nivel 2 |
| **Widgets de histograma**: filtran y seleccionan por el valor de las variables: | Espacio de acomodación 2019 disponible para la movilidad de la línea de costa |
| | Anchura de formaciones dunares en conexión actual con la línea de costa 2019 |

 BY-NC-SA

El enlace es: https://universidad-sevilla.carto.com/u/univ-sevilla-admin/builder/b1197a35-0c7a-418e-bf83-770fe6e5bb6d/embed

### 3.2. Cliente web (geovisor y dashboard): riesgos de inundación permanente ligados al nivelo medio del mar -costa occidental de Huelva-.

Este cliente web tiene como objetivo constituir una herramienta interactiva que permita visualizar y explorar interactivamente todas variables de peligrosidad y exposición que se han integrado espacialmente en cada uno de los edificios del Catastro (2020) descargados en formato "ATOM", junto a las variables sociodemográficas antes citadas también asociadas espacialmente a los edificios. Para el cálculo de la exposición se cruzan geométricamente la peligrosidad expresada como superficies de inundación (hazards) con los edificios "atom" en cada uno de los escenarios generados en el trabajo. Con ello, la intensidad de la exposición de cada edificio se calcula como el múltiplo del porcentaje inundado de cada edificio por la intensidad de la misma (altura de inundación media del edificio). Quedan expresadas como variables nuevas en cada edificio como "expo_escenario" -según el nombre dado al escenario del IPCC 2019 o Jevrejeva (2012) de la Tabla 2.

***Tabla 2.*** *Escenarios IPCC 2019 y Jevrejeva 2012 con su nomenclatura correspondiente*

| ESCENARIOS SLR | UMBRAL PROBABILIDAD | NIVEL DE MAREA | NOMBRE CAPA SUPERFICIE INUNDACIÓN |
|---|---|---|---|
| RCP2.6 IPCC 2019 | 50% | coeficiente 0,7 | rcp26_5007 |
| RCP2.6 IPCC 2019 | 50% | coeficiente 1.18 kt | rcp26_05kt |
| RCP2.6 IPCC 2019 | 5% | coeficiente 0,7 | rcp26_5007 |
| RCP2.6 IPCC 2019 | 5% | coeficiente 1.18 kt | rcp26_05kt |
| RCP4.5 IPCC 2019 | 50% | coeficiente 0,7 | rcp45_5007 |
| RCP4.5 IPCC 2019 | 50% | coeficiente 1.18 kt | rcp45_05kt |
| RCP4.5 IPCC 2019 | 5% | coeficiente 0,7 | rcp45_5007 |
| RCP4.5 IPCC 2019 | 5% | coeficiente 1.18 kt | rcp45_05kt |
| RCP8.5 IPCC 2019 | 50% | coeficiente 0,7 | rcp85_5007 |
| RCP8.5 IPCC 2019 | 50% | coeficiente 1.18 kt | rcp85_05kt |
| RCP8.5 IPCC 2019 | 5% | coeficiente 0,7 | rcp85_5007 |
| RCP8.5 IPCC 2019 | 5% | coeficiente 1.18 kt | rcp85_05kt |
| JEVREJEVA 2012 | 50% | coeficiente 0,7 | jevre_5007 |
| JEVREJEVA 2012 | 50% | coeficiente 1.18 kt | jevre_50kt |
| JEVREJEVA 2012 | 5% | coeficiente 0,7 | jevre_5007 |
| JEVREJEVA 2012 | 5% | coeficiente 1.18 kt | jevre_50kt |

También se han expresado con índices de exposición ("indi_escenario") segmentando el valor anteriormente calculado en cuantiles y se les ha asignado un valor de: *muy baja, baja, media, alta y muy alta*. Dado el elevadísimo número de variables finalmente asociadas a cada edificio, se ha optado por no realizar el cálculo de indicadores de vulnerabilidad integrados, sino aprovechar las posibilidades de exploración de los clientes web desarrollados para explorar en los mismos, junto a los indicadores de exposición, su efecto sobre una selección de las variables más frecuentes para su cálculo. En este sentido, se han incorporado las variables más utilizadas para la vulnerabilidad física del espacio edificado (edificios, su superficie afectada, plantas subterráneas, edad de construcción, etc.), para la vulnerabilidad social (población, nivel de renta, personas mayores, vivienda, etc.) y para la vulnerabilidad económica de los establecimientos y plazas turísticas (número de establecimientos, número de plazas, tipología de establecimientos, etc.). Se han incluido, entre las muchas posibilidades de las variables que ofrece la base de datos de edificios generada las siguientes capas, variables y widgets asociados (Tabla 3):

***Tabla 3.*** *Estructura de contenidos del cliente web de riesgo de inundación permanente del nivel medio del mar*

| CLIENTE WEB (GEOVISOR Y DASHBOARD): INUNDACIÓN NIVEL MEDIO DEL MAR HUELVA OCCIDENTAL | |
|---|---|
| ***CAPA EDIFICIOS ATOM (GRIS)*** | Se utiliza como complemento a la base cartográfica del cliente |
| ***CAPA PELIGROSIDAD ESCENARIOS IPCC/JEVREJEVA*** | Se activa un **widget categórico** que posibilita la visualización de las superficies de inundación de cada escenario IPCC 2019 y Jevrejeva 2012 |
| ***CAPA EDIFICIOS ATOM 2020*** | Interacciona cuando se activa con las siguientes variables y widgets: |
| **Widgets de fórmula** (valores agregados): se recalculan en función del área de visualización y la elección de filtros con widgets de histograma o categóricos: | Población estimada residente 2020 |
| | Población estimada potencial 2020 |
| | Población estimada mayor de 64 años |
| | Renta media neta personal 2019 |
| | Número de viviendas |
| | Número de plazas turísticas |
| **Widgets categóricos**: filtran y seleccionan espacialmente el área de análisis por: | Tipología de usos dominantes de edificios |
| | Área del municipio |
| | Índice cualitativo de exposición para el escenario "jevre05kt" |
| **Widgets de histograma**: filtran y seleccionan por el valor de las variables: | Renta media neta personal 2019 |
| | Fecha de alta edificio Catastro |
| | Número de plantas subterráneas |
| | Altura inundación escenario "expo_jevre05kt" |
| | Altura inundación escenario "expo_rcp8505kt" |

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

El enlace es: https://universidad-sevilla.carto.com/u/univ-sevilla-admin/builder/7a09fd24-cfb5-4c4c-b987-a1ffde04865d/embed . Es decir, se trata de un cliente que constituye una herramienta de trabajo que permite el análisis exploratorio preliminar de los datos antes de formular la expresión final del indicador de vulnerabilidad

## 4. Discusión y conclusiones

Los resultados de esta comunicación, es decir, la generación de clientes web interactivos para la exploración, difusión e interpretación de datos de riesgos costeros masivos (erosion e inundación por nivel medio del mar), creemos que suponen un salto cualitativo en relación a los clientes web utilizados comúnmente para su difusión (Prieto et al., 2018 o https://marine.usgs.gov/coastalchangehazardsportal/). Su mayor contribución es que, además de facilitar la geovisualización, permiten explorar interactivamente al máximo nivel de detalle espacial los datos originales y calculados, consituyendo una potente herramienta de trabajo para especialistas. En el caso del visor del cliente desarrollado para riesgos de erosión permite acceder a los datos y cálculos (EPR, NSM, amplitud playa y tendencia por periodos) de tres indicadores –*proxies*- (límite interno backshore, marca húmeda y amplitud de playas) para todas las playas andaluzas para el periodo 2001-2019 y filtrarlos por los valores originales de cualquier variable o por las tendencias de cada periodo, así como calcular sus valores medios agregados por areas de estudio (fachadas marítimas, provincias y municipios). En el caso del cliente sobre riesgos de inundación del nivel medio del mar en la costa occidental de Huelva, se presentan las superficies de inundación (peligrosidad) asociadas a los escenarios elegidos (IPCC 2019 y Jevrejeva 2012), pero su singularidad reside en utilizar los edificios de Catastro "atom" para integrar espacialmente toda la información de peligrosidad y exposición, así como mostrar sus efectos sobre un conjunto amplio de las variables más utilizadas para la generación de indicadores de vulnerabilidad física, social o económica (población, viviendas, usos edificios, rentas medias, plazas turísticas, etc.). Los valores agregados de estas variables pueden ser filtrados por la exposición de cualquier escenario, por los valores de las variables (por ejemplo, el número de plantas subterráneas o edad de edificios), así como presentar sus valores agregados filtrados por el area de los municipios de la zona de estudio.

## 5. Agradecimientos

Parte de los resultados de este trabajo se realizaron en el contexto de los siguientes proyectos: PID2019-106834RB-I00 (RIskMACLOUD -Risk Managenment Cloud-) Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades; P18-FR-2574 (CLOUDRISK_A) Junta de Andalucía (Consejería de Economía y Conocimiento)

## 6. Referencias

Fernandez-Nunez, M., Díaz-Cuevas, P., Ojeda, J., Prieto, A., & Sánchez-Carnero, N. (2015). Multipurpose line for mapping coastal information using a data model: the Andalusian coast (Spain). *Journal of coastal conservation*, 19, 461-474. https://doi.org/10.1007/s11852-015-0400-1

Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., & Weyer, N. M. (2019). The ocean and cryosphere in a changing climate. *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*, *1155*. https://doi.org/10.1017/9781009157964

Jevrejeva, S., Moore, J. C., & Grinsted, A. (2012). Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change, 80*, 14-20. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.09.006

Paris, P., Starek, M. J., Hardin, E., Kurum, O., Overton, M., y Mitasova, H. (2013). Lines in the Sand: Geomorphic and Geospatial Characterization and Interpretation of Sandy Shorelines and Beaches. *Geography Compass, 7(5)*, 315-343. https://doi.org/10.1111/gec3.12041

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Prieto-Campos A, Díaz-Cuevas, P., Fernandez-Nunez, M. & Ojeda-Zújar, J. (2018). Methodology for Improving the Analysis, Interpretation, and Geo-Visualisation of Erosion Rates in Coastal Beaches—Andalusia, Southern Spain. *Geosciences 2018, 8*, 335. https://doi.org/10.3390/geosciences8090335

Prieto Campos, A. & Ojeda Zújar, J. (2024). Methodology of data generation and calculation of erosion rates applied to littoral areas: Evolution of the Andalusian shoreline on exposed beaches during the 21st century (2001-2019). *Investigaciones Geográficas, (81)*, 9-31. https://doi.org/10.14198/INGEO.25242

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18391

# El papel a largo plazo de los usos del suelo y los incendios en una cuenca hidrográfica para producir y aportar sedimento a una playa urbana

*Long term role of land uses and wildfires as drivers of production and supply of sediments from a hidrographic basin to an urban beach*

**Néstor Marrero-Rodríguez[a] y Leví García-Romero[a]**

[a]Instituto de Oceanografía y Cambio Global, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, nestor.marrero@ulpgc.es; levi.garcia@ulpgc.es

How to cite: Marrero-Rodríguez, N. y García-Romero, L. 2024. El papel a largo plazo de los usos del suelo y los incendios en una cuenca hidrográfica para producir y aportar sedimento a una playa urbana. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18391

***Abstract***

*Land use changes have been a determining factor in the production and availability of sediments on beaches. The Tazacorte beach (adjacent to the watershed known as the "barranco de las Angustias"), the object of study in this work, has been regenerated due to undergoing erosion processes but also occasionally over-accumulation. The objective of this study is to investigate land uses that may be determining the sediment inputs occurring on this urban beach. The main results show that there has been a transition in land uses in the watershed from traditional uses that involved vegetation extraction to new uses (such as aggregate extraction or urbanization) and the abandonment of traditional ones. Therefore, land use changes emerge as one of the key factors in sediment input change; additionally, large wildfires have also been a factor to consider in watershed erosion and sediment input.*

***Keywords:*** *urban beach, land uses, ravine, wildfires, aggregate extraction, grazing, Tazacorte, La Palma, Canary islands.*

***Resumen***

*Los cambios de uso del suelo han sido un factor determinante en la producción y disponibilidad de sedimentos en las playas. La playa de Tazacorte (adyacente a la cuenca hidrográfica conocida como barranco de las Angustias), objeto de estudio en el presente trabajo, ha sido regenerada debido a que sufre procesos de erosión pero en ciertas ocasiones también de sobreacumulación. El objetivo del presente trabajo es estudiar los usos del suelo que pueden estar determinando los aportes de sedimentos que se producen a esta playa urbana. Los principales resultados muestran que en el barranco se ha producido una transición de usos tradicionales que extraían la vegetación a nuevos usos (extracción de áridos o urbanización) y el abandono de los tradicionales. Por tanto, los cambios de uso del suelo se muestran como una de las claves del cambio en el aporte de sedimento; por otra parte, los grandes incendios también han sido un elemento a tener en cuenta en la erosión de la cuenca y el aporte de sedimentos.*

***Palabras clave:*** *playa urbana, usos del suelo,barranco, wildfires, aggregate extraction, grazing, Tazacorte, La Palma, Canarias.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Los cambios de uso del suelo han mostrado ser un importante factor determinante en la producción y disponibilidad de sedimentos en las playas (Marrero-Rodríguez et al., 2020). Existen estudios que detectan un superavit de sedimentos en las playas asociadas a cuencas hidrográficas cuando los usos del suelo se basan en la extracción de la vegetación (pastoreo, obtención de combustible o material de construcción, roturación del terrano para el cultivo, etc.). Sin embargo el posterior abandono de las mismas supone la vuelta a las condiciones normales en el aporte de sedimentos, que se ve reducido junto a las geoformas formadas durante la etapa de superávit que produjo la explotación vegetal y, a partir de ese momento, también se pueden producir procesos de erosión (Guillén & Palanques, 1997; Marrero-Rodríguez et al., 2020). Existen otros factores que pueden incidir en la producción y disponibilidad de sedimento como son los incendios (Girona-García et al., 2021) o los cambios en el régimen de precipitaciones (Ranasinghe et al., 2019). En este contexto, en la desembocadura del área de estudio se encuentra la playa urbana de Tazacorte que depende directamente de los aportes sedimentarios producidos por el barranco de Las Angustias y en la que en los últimos años se ha constatado procesos de erosión (Marrero-Rodríguez et al., 2024). Por tanto, el objetivo del presente artículo es identificar los cambios recientes en el barranco de Las Angustias para conocer si los procesos de erosión de la playa están relacionados con los cambios acontecidos en la cuenca.

## 2. Área de estudio

La cuenca hidrográfica de las Angustias, conocida como barranco de las Angustias, está situada en la isla de La Palma (Islas Canarias, España) dividido entre cuatro municipios: El Paso, Los Llanos de Aridane, Tijarafe y Tazacorte (Fig. 1). Es una cuenca de orden 5 con una superficie de 55,55 km$^2$. Tiene una morfología en embudo que inicia a los 2426 m.s.n.m., con una cabeza ancha que se estrecha hacia la boca. En su desembocadura hasta los años 70 del siglo pasado existió una playa de cantos rodados y bloques, que desde el inicio de la construcción del puerto de Tazacorte comienza a acumular sedimentos finos procedentes de los aportes del barranco y la alimentación que realizó la Administración Pública. En referencia al clima, la cuenca de Las Angustias tiene su cabecera en las zonas altas de la isla, donde las precipitaciones pueden superar los 1000 mm/año y con registros que superaron los 200 mm en 24 horas (Máyer et al, 2016), produciendo fuertes escorrentías que llegan a su desembocadura. En la zona costera, la pluviometría de la estación de Tazacorte (100 m.s.n.m.) revela precipitaciones muy escasas durante todo el año, menos de 300 mm concentrados durante el invierno.

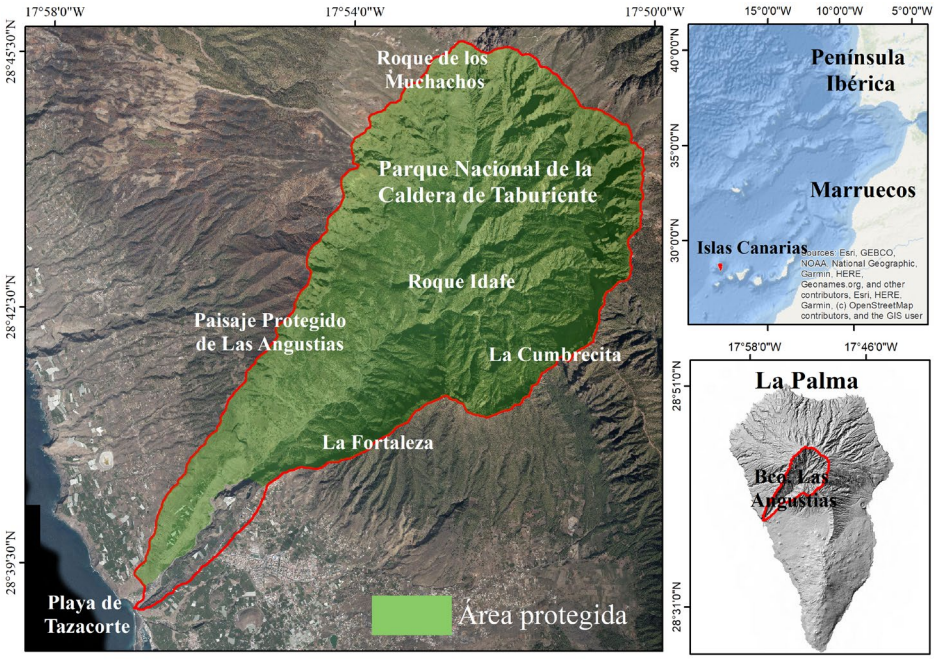



***Fig. 1.*** *Localización del área de estudio.*

 BY-NC-SA

## 3. Metodología

La metodología del presente trabajo se ha basado en la recopilación de documentos históricos procedentes de las siguiente fuentes: i) el archivo de boletínes del Parlamento de Canarias para las denuncias relacionadas con la extracción de datos; ii) fuentes orales y documentación bibliográfica para los usos basados en la extracción de la vegetación; iii) el mapa de cultivos de la IDECanarias (creado el 16/10/2011 y actualizado el 22/09/2023). Para la a reconstrucción de los incedios se realizó una consulta en la herramienta Jable de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria que contiene las noticias de prensa desde 1808 hasta la actualiad; así mismo, los guardias y los agentes forestales del Cabildo de La Palma facilitaron información complementaria.

## 4. Resultados y discusión

La evolución de los usos del suelo (Fig. 2) se ha dividido de acuerdo a sus consecuencias sobre el aporte de sedimentos desde la cuenca. Así, se interpreta que los usos que reducen la cobertura vegetal provocan un mayor aporte de sedimentos (apartado 4.1); mientras que, agrupados en el apartado 4.2., aquellos usos que consumen el agua de escorrentía, impermeabilizan y canalizan parte de la cuenca, disminuyen el sedimento.

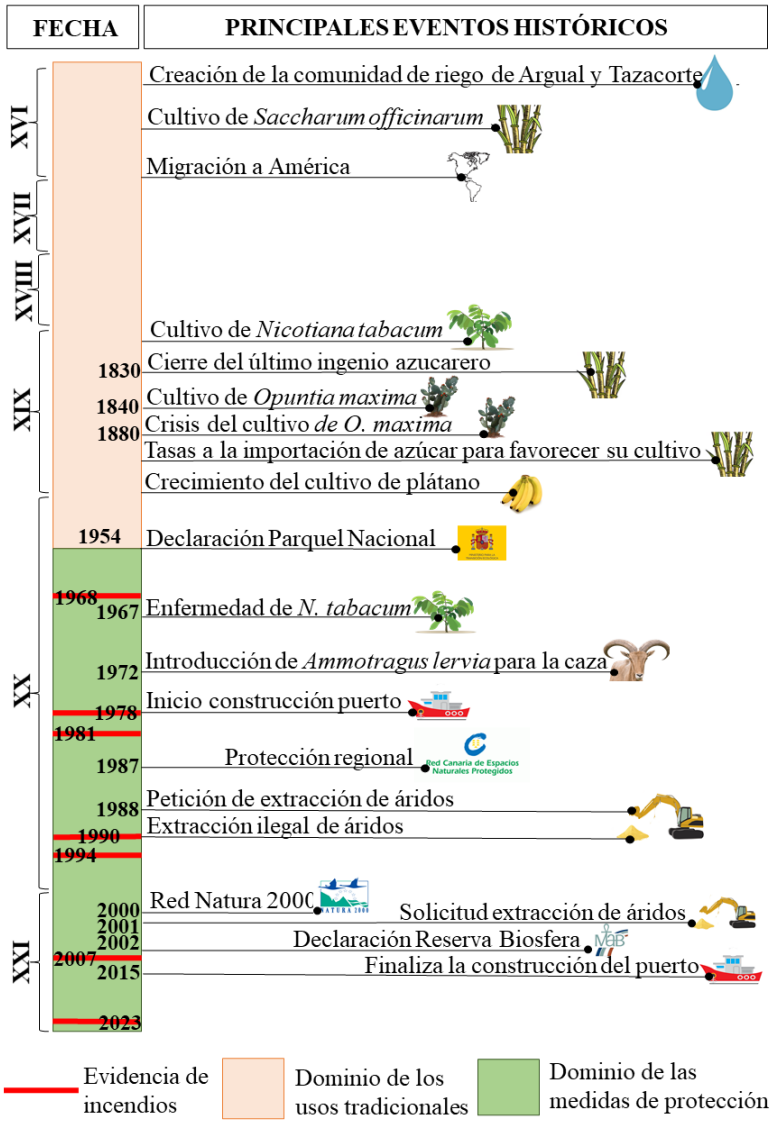



***Fig. 2.*** *Línea del tiempo con los principales eventos históricos en el barranco de Las Angustias.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

### 4.1. Usos del suelo que aumentan el aporte de sedimento

#### *4.1.1. Usos basados en la extracción de la vegetación*

El pastoreo ha sido uno de los usos más prolongados dentro del barranco de Las Angustias. Del análisis de las fuentes orales obtenidas a través de González-Díaz & Martín-Gómez (2017), se desprende que en la mayoría de los casos el ganado permanecía suelto en el interior del barranco con recogidas puntuales mediante caza. El ganado se movería libre descenciendo fuera de las zonas altas únicamente cuando las codiciones climáticas (nevadas y heladas) dificultaban su permanencia. En los años sesenta estos autores hablan de la práctica extinción del mismo en muchas zonas del barranco, y el ganado que quedaría se mantenía estabulado. Por otro lado, de acuerdo con las fuentes orales, el carboneo, la extracción de litter, la producción de resina y la extracción de individuos de *Pinus canariensis* enteros, debieron ser las principales explotaciones forestales dentro del área de estudio. De acuerdo con documentación histórica, los ingenios de Argual y Tazacorte consumían 1000 pinos anuales a lo que se suma lo que se exportaba y lo que se destinaba a otros usos (construcción, fabricación de barricas, etc.). Algunos elementos como la presencia de hornos tradicionales muestran que también hubo producción industrial que demandaría combustible para su funcionamiento. Estas industrias han suspuesto importantes procesos de deforestación en otros ecosistemas y al igual que en el resto de Canarias, decaen fruto de la importanción de productos sustitutivos de menor coste desde el exterior de las islas, reduciendose paralelamente la demanda de combustible. De acuerdo, con los guardas del parque, se ha observado en el terreno que uno de los principales problemas del parque actualmente es la recuperación de la vegetación tras diferentes procesos de alteración (desprendiemientos, deslizamientos, incendios, etc.) debido a la presencia de herbivoros asilvestrados. Por lo que el proceso de recuperación debió ser limitado debido a la presencia de un gran cantidad de herbivoros en el pasado. Sin embargo, la caza debió reducir de forma importante las poblaciones de ganado asilvestrado. A pesar de esta declaración se introducen en 1972 arruís (*Ammotragus lervia*) con el objetivo de fomentar la caza. A ellos se suman la presencia de otras especies introducidas como cabras (*Capra hircus*) (fruto del abandono del pastoreo) y conejo europeo (*Oryctolagus cuniculus*).

#### *4.1.2. Cultivos*

El desarrollo de los cultivos está ligado a las condiciones climáticas y la presencia de agua procedente del interior de la cuenca. Por otra parte, la escasez de terrenos llanos en el interior de la cuenca fuera del cauce generó la necesidad de roturar terrenos para cultivos creando terrazas que permitieran el desarrollo de la actividad agrícola. A mediados del siglo XIX ya dominan los cultivos de regadío como la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y el tabaco (*Nicotiana tabacum*), aunque estos se abandonan en favor del plátano gracias a la demanda europea. En la actualidad el cultivo dominante sigue siendo el plátano (0,8 $km^2$) por debajo de los 400 m. siendo este un cultivo que demanda una gran cantidad de agua; al igual que el cultivo del aguacate (0,50 $km^2$) que es el segundo que mayor superficie ocupa en la cuenca. Otros cultivos tienen un peso mucho menor en la cuenca como las flores, la papa, el tomate o la viña. En la cuenca, desde los años 60 se ha venido produciendo el abandono de la actividad agrícola desde que la economía del archipiélago comienza a sufrir una transformación paultina debida a la llegada del turismo de sol y playa. Así, se ha incrementado la superficie de cultivo abandonado recientemente en (0,03 $km^2$) alcanzando los 0,42 $km^2$ de acuerdo con la capa de cultivos de GRAFCAN S.A.; mientras que, los cultivos activos suponen 1,47 $km^2$ de la cuenca de Las Angustias.

### 4.2. Usos del suelo que disminuyen el aporte de sedimentos

#### *4.2.1. Extracción de áridos*

No suele existir un registro exhaustivo de las extracciones, este hecho es más acusado en espacios protegidos donde las extracciones, por lo general, carecen de autorizaciones legales (Marrero-Rodríguez et al., 2020). En el barranco de Las Angustias, fuentes orales y la prensa indican que diariamente se podían observar camiones de áridos y arena del lecho del barranco sacando material de extracción junto con palas mecánicas en el interior desde 1988. Legalmente, la cantera fue explotada entre 2004 y 2011, aunque existen referencias a extracciones en fuentes orales y prensa durante 2019. Hay referencias a solicitudes de extracción de áridos de 1.000 $m^3$, 7.000 $m^3$ y 12.000 $m^3$ de material desde 1988 en el Boletín Oficial del Gobierno de Canarias. Esto demuestra que históricamente el barranco fue probablemente una zona extractiva para la población local, aunque su protección genera ciertas reticencias a la libre extracción. En 1990 el barranco de Las Angustias se incluye en la lista elaborada por el

 BY-NC-SA

Gobierno de Canarias de barrancos donde se puede realizar la extracción de áridos bajo licencia. Otra referencia a la extracción de áridos es una solicitud realizada por el Ayuntamiento de Tazacorte en 2001 para extraer un volumen de 30.000 $m^3$ al año en una superficie de 61.500 $m^2$ con un plazo de extracción de 10 años. Los volúmenes de extracción se fijarían en función de los aportes existentes en el cauce y los aportes posteriores a la temporada de lluvias sin poder excavar por debajo de los tres metros de profundidad. Por tanto, se trata de una extracción superficial que resulta difícil de medir ya que varía en función de las aportaciones existentes. Durante el trabajo de campo, la superficie actual que parece estar afectada por la extracción realizada en el barranco es de aproximadamente 12.500 $m^2$.

*4.2.2. Urbanización*

En el área de estudio, la urbanización concentrada se ubica únicamente en la desembocadura de la cuenca, adentrándose en el barranco desde la playa aproximadamente un kilómetro. Sin embargo, en el interior de la cuenca existen algunas construcciones dispersas. El desarrollo urbanístico de la desembocadura del barranco provocó la necesidad de alterar el cauce del barranco y redujo el ancho de la bocana de 350 metros antes de 1964 a 45 metros en 2022.

*4.2.3. Extracción de agua*

La extracción de agua en La Caldera fue explotada de forma unipersonal hasta 1557, momento en el que se establece la comunidad de regantes, pactándose reglas para uso del agua y las acequias hasta 1613. Desde que se constituyó la Comunidad de Herencias de Haciendas de Argual y Tazacorte, propietaria de la extracción de agua de La Caldera, aproximadamente 1.800 participantes tienen acceso al agua. Los problemas extractivos se agudizaron en los siglos XVI y XIX por la expansión de los culitvos de regadío que demandaban una mayor cantidad de agua. Según el Plan Hidrológico Insular de la isla de La Palma, las precipitaciones que dan lugar a escorrentías tienen dos destinos: canalizarse a través de tomas para ser utilizadas en cultivos y, por otro lado, una parte acaba en el mar. Siendo la porción que va a parar al mar calculada en unos 6,5 $Hm^3$/año de los 10,9 $Hm^3$/año, que no son aprovechados por los recolectores. Los captados ascienden a 16,3 $Hm^3$/año de los cuales se distribuyen 14,5 $Hm^3$/año; mientras que el resto se pierde en el proceso.

### 4.3. Incendios

Solo se han producido dos grandes incendios en el interior de la cuenca, uno en 1978 (3075 ha.) y otro sen 1990 (1460 ha.). Las fuentes orales indican que las lluvias posterior al incendio de 1990, produjo un importante aporte de sedimento a la playa que paulatinamente se fue reduciendo. Cabría pensar que se produjo un hecho similar durante 1978 debido a la mayor magnitud y superficie afectada por el mismo (Tabla 1). Los incendios requieren ser estudiados en profundidad ya que las características del mismo influyen en el aporte de sedimento a la playa.

***Tabla 1.*** *Características de los incendios registrados*

| Fecha | Origen | Superficie afectada | % de la Cuenca afectada | Fuente |
|---|---|---|---|---|
| 19/07/1967 | Hoguera | 200 Ha. | 3,60 | Prensa |
| 14/09/1978 | Intencionado | 3075 Ha. | 55,36 | Cabildo |
| 21/11/1981 | Rayo | 500 Ha. | 9,00 | Prensa |
| 8/11/1986 | Desconocido | 85 Ha. | 1,53 | Prensa |
| 07/08/1990 | Intencionado | 1460 Has. | 26,28 | Cabildo |
| 09/03/2007 | Desconocido | 11,64 Has. | 0,21 | Prensa |
| 13/05/2023 | Desconocido | 1.4 Has. | 0,03 | Prensa |

## 5. Conclusiones

El presente trabajo permite concluir que la evolución de los usos del suelo han cambiado el aporte de sedimentos que llega a la desembocadura del barranco de Las Angustias y por tanto a la playa urbana de Tazacorte. La

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

transición de usos tradicionales que producían mayores sedimentos a nuevos usos, ha provocado un incremento de la vegetación que frena los procesos de erosión; la extracción de agua disminuye el caudal y por tanto la capacidad de transporte durante episodios de lluvia; así mismo, la extracción de áridos supone una reducción del sedimento a través del transporte fluvial. No obstante, los incendios como el acontecido en 1990 provocaron el aporte de una gran cantidad de sedimento a la playa de acuerdo con las fuentes estudiadas. Sin embargo, podemos concluir que la tendencia actual es a disminuir el aporte de sedimento a la playa debido a los numerosos cambios que la cuenca viene sufriendo en su historia reciente. Por tanto, se hace necesario continuar con un monitoreo temporal amplio que permita observar las tendencias de la misma.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen a Isidro Brito agente forestal del Cabildo de La Palma por facilitarnos información sobre los incendios acontecidos en el interior del Parque Nacional de Caldera de Taburiente. Néstor Marrero Rodríguez es un contratado Postdoctoral (programa Margarita Salas) financiado por el Ministerio de Universidades concedido por Orden UNI/501/2021 de 26 de mayo, así como financiado por los Fondos de la Unión Europea-Next Generation EU en el IOCAG de la ULPGC. Leví García-Romero es beneficiario del programa de contrato postdoctoral 'Catalina Ruiz 2022' del Gobierno de Canarias y el Fondo Social Europeo (APCR2022010005). Esta investigación pertenece al proyecto cofinanciado con fondos FEDER PID2021-124888OB-I00 (Plan Nacional de I+D, España).

## 7. Referencias

Girona-García, A., Vieira, D. C., Silva, J., Fernández, C., Robichaud, P. R., & Keizer, J. J. (2021). Effectiveness of post-fire soil erosion mitigation treatments: A systematic review and meta-analysis. *Earth-Science Reviews, 217,* 103611.

González-Díaz, A. J. & Martín-Gómez, D. (2017). *Del color de los riscos: el ganado salvaje de la isla de La Palma según las fuentes orales.* Cabildo de La Palma. 308 p.

Guillén, J., & Palanques, A. (1997). A historical perspective of the morphological evolution in the lower Ebro river. *Environmental Geology*, 30(3-4), 174-180.

Marrero-Rodriguez, N., Garcia-Romero, L., Sánchez-García, M. J., Hernandez-Calvento, L., & Espino, E. P. C. (2020). An historical ecological assessment of land-use evolution and observed landscape change in an arid aeolian sedimentary system. *Science of The Total Environment, 716*, 137087.

Marrero-Rodríguez, N., Alonso, I., & García-Romero, L. (2024). Using multi-scale spatio-temporal shoreline analysis of an urban beach adjacent to a basin system on an oceanic island for its integrated planning. Ocean & Coastal Management, 251, 107049.

Máyer Suárez, P., Marzol Jaén, M. V., Heriberto Lorenzo, J., Díez-Herreo, A., Génova Fuster, M., & Saz, M. A. (2016). Análisis de los episodios de lluvia torrencial en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma, Islas Canarias, España). En: J. Olcina Cantos, A. M. Rico Amorós, y E. Moltó Mantero (Eds.), *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio* (pp. 647-656). Instituot Interuniversitario de Geografía, Universidad de Alicante: Asociación Española de Climatología

Ranasinghe, R., Wu, C. S., Conallin, J., Duong, T. M., & Anthony, E. J. (2019). Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on fluvial sediment supply to the coast by the world's large rivers: Pearl River Basin, China. *Scientific Reports*, 9(1), 9236.

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18876

# Análisis de la distribución espacio-temporal de usuarios de playa mediante el uso de drones

*Studying the spatio-temporal distribution of beach visitors using UAVs*

**Emilia Guisado-Pintado[a] y Diego Lopez-Nieta[a]**

[a]Facultad de Geografía e Historia, Departamento. Geografía Física y Análisis Geográfico Regional , Universidad de Sevilla; , eguisado@us.es y , dlopezdelanieta@us.es.

How to cite: Guisado Pintado, E y Lopez-Nieta, D. 2024. Análisis de la distribución espacio-temporal de usuarios de playa mediante el uso de drones. En libro de actas: : *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 27-29 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18876

## *Abstract*

*Sandy beaches on Andalusia (southern Spain) embraced more than 14 million of tourists in 2023 traducing in 15.300 million € of income for the region. This important asset, however, if not well managed can lead to several impacts on coastal ecosystems as well as jeopardize the visitors' satisfaction. Quantification of beach users has been used for defining coastal management plans and beach carrying capacity. We present an automatic approach based on the use of RGB images captured by an UAV (Unmanned Aerial Vehicles) at two Andalusian coastal locations. Implementation of an ad-hoc algorithm allowed quantification of the total number of visitors per day and per time-frame (from 1.000 at 11:00h to more than 5.000 at midday), variations in beach occupation density (11% to 44.8% at peak hours) and the spatial distribution of visitors. We found that users' spatial distribution is driven by the presence of public infrastructure and services and local beach features. Results allow better understanding on location-specific coastal visitors' dynamics and could improve sustainable coastal management for these areas.*

***Keywords:*** *beach visitors, UAVs, geomorphology, beach carrying capacity, coastal management*

## *Resumen*

*Más de 14 millones de turistas visitaron la costa andaluza (sur de España) en 2023, lo que supuso 15.300 millones de euros de ingresos para la región. Sin embargo, este importante activo, si no se gestiona bien, puede provocar varios impactos en los ecosistemas costeros, así como poner en peligro la satisfacción de los visitantes. La cuantificación de usuarios de playas se ha utilizado para definir planes de gestión costera y la capacidad de carga de las playas. Se presenta una aproximación automática para el conteo de usuarios de playa basada en el uso de imágenes RGB capturadas por vuelos de un dron (Vehículos Aéreos No Tripulados) en dos localidades costeras andaluzas. La implementación de un algoritmo ad-hoc permitió cuantificar el número total de visitantes por día y por franja horaria (de 1.000 a las 11:00h a más de 5.000 al mediodía), las variaciones en la densidad de ocupación (del 11% al 44,8% en horas punta) y la distribución espacial de visitantes. Los resultados muestran que la distribución espacial de los usuarios está determinada por la presencia de infraestructura y servicios públicos, asi como las características específicas de la playa. Los resultados permiten una mejor comprensión de la dinámica de los usuarios de playas en lugares específicos y podrían orientar acciones estratégicas de gestión costera sostenible en estas áreas.*

***Palabras clave:*** *usuario de playas, UAVs, geomorfología, capacidad de carga, gestión costera.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

La costa andaluza, con una extensión de más de 1.100 Km, se caracteriza por la alternancia entre extensas playas arenosas en la vertiente atlántica y playas o calas de menor tamaño bordeadas de salientes rocosos típicas del mediterráneo andaluz. La diversidad de paisajes que componen el litoral andaluz da lugar a la existencia de 36 espacios protegidos incluidos en la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA), que suponen aproximadamente 35 Km de costa. La riqueza paisajística y natural, unida a la bonanza climática de sus costas, ha convertido la costa andaluza en uno de los principales destinos turísticos de sol y playa de Europa. Según Cumbrera y López-Lara (2010) más del 80% de los turistas que visitan Andalucía eligen la costa, si bien este supone el 9% del total del territorio concentra el 75% del total de las pernoctaciones hoteleras. Los últimos datos de ocupación indican que en 2023 fueron más de 17,6 millones de turistas los que visitaron la costa andaluza, lo que se traduce en aproximadamente 15.300 millones de euros de beneficios para la región (JA, 2023). Sin embargo, la excesiva demanda turística, la importante concentración de habitantes en los municipios costeros, así como las actividades económicas vinculadas a esta estrecha franja, provocan diversos impactos en los ecosistemas costeros (ej. deterioro de las dunas, contaminación del agua, fragmentación de hábitats, molestias a especies, etc.). Del mismo modo, esta ocupación generalizada de la franja costera pone en peligro la capacidad de carga de la misma, repercutiendo en la experiencia de los visitantes.

Son numerosos los estudios que, desde mediados del siglo XX, han abordado desde diferentes perspectivas la problemática de intensidad de uso de un espacio tan frágil como la costa. Este interés ha ido de la mano de los avances en las metodologías empleadas para su estudio, destacando los primeros estudios sobre el espacio disponible por visitante (capacidad de carga física) y la capacidad de carga social y ecológica (Hecock, 1983; Pereira da Silva, 2002), el uso de cámaras fijas y fotografía (Jiménez et al. 2007), hasta más recientemente el uso de videocámaras (Guillen et al., 2008). De hecho, en los últimos años la cuantificación de usuarios en la playa usando técnicas basadas en las cámaras se ha vuelto común por su bajo coste (Guillén et al. 2008), aunque si bien permite categorizar si la demanda es baja, media o alta, no permite identificar personas en el agua y, por tanto, la dimensión de los servicios necesarios (Provost et al., 2019). Recientemente, el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados, comúnmente conocidos como drones, han irrumpido como un método eficiente para analizar dinámica costera por su alta resolución de imágenes y tiempo de vuelo. Hasta la fecha destacan trabajos sobre cambios en la morfología costera (Guisado-Pintado et al., 2019), detección de basura en la costa (Martin et al., 2018), y más recientemente, cuantificación de diversidad de usos y actividades en playas Australianas (Provost et al., 2019).

Con métodos tradicionales o nuevas tecnologías, la cuantificación de visitantes a las playas se ha utilizado para definir planes de gestión costera, analizar la capacidad de carga de las playas (ej. Pereira da Silva, 2002) y, más recientemente, para implementar o analizar restricciones de uso durante la COVID-19 (Prieto and Díaz, 2021; Yepes, 2020). De hecho, entender el uso y demanda de las playas (patrones de uso y nº de visitantes, actividades que se realizan), junto con los aspectos físicos de las mismas (morfología, clima y dinámica litoral), es crucial para la gestión ecológica y económica sostenible de las playas. El objetivo de este artículo es doble, por una parte, investigar el potencial de una metodología de cuantificación de usuarios a través del uso de drones y, en segundo lugar, analizar las variables que condicionan los patrones de uso en dos playas de Andalucía.

## 2. Áreas de estudio

Dos playas en la costa Andaluza fueron objeto de la campaña, la playa atlántica de "Torre de la Higuera" en Matalascañas (Huelva), y la playa de "La Charca" en Salobreña (Granada) en la fachada mediterránea andaluza (Fig. 1). La playa de la Charca, también conocida como del Peñón por la existencia de un saliente rocoso, se localiza en la costa Tropical de la provincia de Granada en el municipio de Salobreña. Se trata de una playa de unos 1,8 Km de longitud y una anchura media de 64 m con arena oscura tipo grava y rango micromareal (<0,5m). La altura media de oleaje en verano es de Hs=0,6 m asociado a periodos de 3,6 s. El oleaje presenta alternancia entre el E y W dada la orientación NW-SE de la playa. La playa cuenta con varios accesos a pie que se estructuran a través de un paseo marítimo tras el que se asientan varias urbanizaciones y edificios asociados al turismo. Al ser una playa semi-urbana cuenta con aparcamientos, zona de duchas, chiringuitos, puesto de vigilancia y otros

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

servicios, lo que la hicieron ser galardonada en 2014 con la "Q" de Calidad Turística. Por su parte, la playa de Matalascañas, limítrofe con el Espacio Natural de Doñana, se localiza en la provincia de Huelva (TTMM de Almonte) y se caracteriza por ser una playa natural en su extremo occidental que pasa a ser una playa urbana con alto nivel de servicios hacia el SE. Presenta una extensión de 4,2 Km y una anchura media de 100 m de playa seca (hasta 150 m en la zona central) y está formada por arena blanca y fina, respaldada en su extremo más naturalizado por dunas incipientes. Con régimen mesomareal medio de 2 m (máximo 3,6), el oleaje en verano es de Hs=0,7 m con un periodo medio de 4 s, y una dirección predominante del W-SW. Galardonada en 2014 con la "Q" de Calidad Turística se caracteriza por contar con alto nivel de servicios entre los que destacan infraestructuras adaptadas, paseo marítimo peatonal (en el extremo SE) con rampas de acceso a la playa, chiringuitos y zonas de ducha.

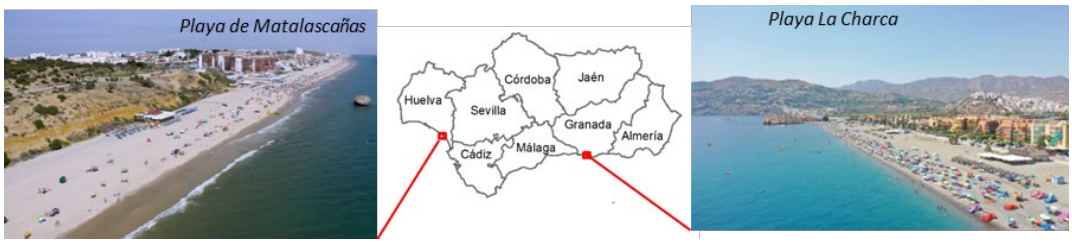



***Fig. 1*** *Casos de estudio en Andalucía en la costa de Huelva y Granada. Fuente: Elaboración propia.*

## 3. Metodología

Se llevaron a cabo dos campañas de vuelo simultáneas durante los días 22 y 23 de julio de 2023 en la playa de Matalascañas y 29 y 30 de julio de 2023 en la playa de La Charca. Los vuelos se realizaron con un dron DJI MAVIC 2 PRO, pequeño (907 gr), con una autonomía máxima de 31 minutos y equipado con una cámara RGB de alta resolución (resolución 5472 x 3648). Los vuelos se realizaron a una velocidad media de 40 Km/h, a 70 metros de altitud sobre el agua y a una distancia de entre 20-15 m de la playa en función de la marea. Además del piloto, se contó con un observador en campo y un analista de imágenes. Durante los vuelos, la cámara enfocaba a la playa para capturar a los usuarios en el espacio comprendido desde las dunas hasta los bañistas.




***Fig. 2*** *Zonas de cálculo y ejemplo de conteo a las 11:00h (arriba) y a las 19:00h (abajo) para Matalascañas (izq.) y La Charca (dcha.). Fuente: Elaboración propia*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Se realizaron 5 vuelos diarios (11:00h, 13:00h, 15:00h, 17:00h y 19:00h) para poder contrastar el flujo de personas durante todo el día, incluidas las horas punta. En ambos sitios de estudio, la duración de cada vuelo fue de 15 minutos para una extensión de 2 Km, si bien en el caso de Matalascañas se tomaron un total de 31 fotos por vuelo y en La Charca 27 fotos por vuelo. Las imágenes resultantes se procesaron con un algoritmo de CANON adaptado y entrenado a través de *machine learning* para contabilizar personas que están en la playa, tanto en la arena como en el agua. Para la validación del algoritmo se usaron numerosas fotografías tomadas con drones. El algoritmo se basa en el conteo de objetos (cabezas) con forma redondeada con contraste de tonalidad entre los puntos perimetrales y que ocupen 20 pixeles como mínimo. Los vuelos se realizan a una determinada altura fija y distancia de la playa para que los resultados sean los óptimos y minimizar errores en el conteo. Finalmente, las imágenes se revisan para detectar posibles fallos del algoritmo tanto por doble conteo como por ausencia del mismo. La aplicación del algoritmo de conteo obtuvo en la campaña un porcentaje de acierto de entorno al 90%, incluyendo la detección de los usuarios que se encontraban debajo de sombrillas por la oblicuidad del vuelo.

Para contabilizar el número de personas y calcular la densidad, se dividieron las playas en zonas (Fig. 2), en zonas de igual superficie y para cada tramo se contabilizaron los usuarios en arena seca y agua. Los datos sobre temperatura del aire (ºC), altura de ola (Hs), velocidad (m/s), dirección del viento (º), temperatura del agua (ºC) y marea (m) fueron facilitados por Puertos del Estado.

## 4. Resultados y discusión

En la playa de Matalascañas, el fin de semana del 22-23 julio de 2023, las condiciones climáticas reinantes el sábado fueron de vientos del norte (360º) y 6 m/s con Hs<0,3 m, y el domingo, vientos del oeste (270º) con 4 m/s velocidad. Ambos días se registró una temperatura media de 26ºC (31ºC máxima). El Nº total de visitantes al día en Matalascañas fue de 14.249, el sábado 22/07, y, significativamente menor, el domingo 23/07 (día de las elecciones generales) con 9.904 personas. El sábado, el máximo número de personas se alcanzó a las 13:00 con 5.022 personas con un 2,4% de ellas en el agua y el resto en playa seca. El mínimo, por el contrario, se obtuvo a las 11:00h con 1.273 personas, 2,2% ellas en el agua (Fig. 3). El domingo el flujo de usuarios en los tramos horarios fue similar, pero con menor número de usuarios (3.068), el máximo se alcanzó a la 13:00 (939 personas, 4% en el agua) en la zona 2 y el mínimo también a las 11:00 con apenas 700 personas. Atendiendo a la distribución espacial para ambos días, la zona 1 y la zona 2 (y en menor medida la zona 4 que coincide con dos hoteles) son las que registraron más usuarios (20-30% del total para cada franja horaria) al encontrarse en la parte central donde se localizan la mayoría de las urbanizaciones turísticas, el paseo marítimo (restaurantes y otros servicios), duchas y pasarelas de acceso. Por el contrario, la zona 0, sin urbanizaciones y con difícil acceso registró el menor número de visitas ambos días (2-3% de los usuarios).

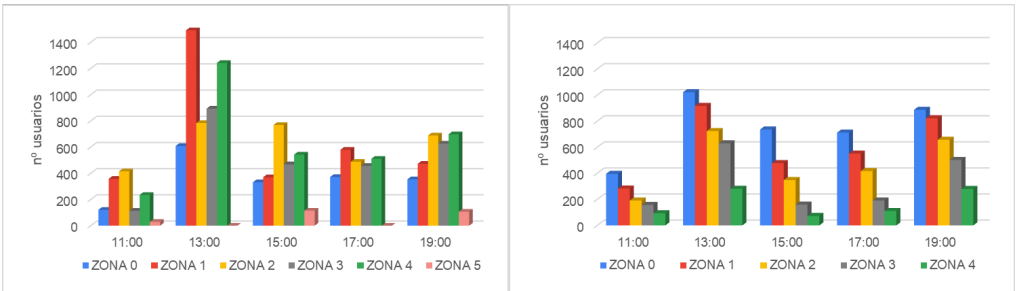



***Fig. 3*** *Resultados sobre Nº usuarios por franja horaria y zona, a la izquierda resultados para el sábado 22/07/2023 en Matalascañas y a la derecha para el sábado 29/07/2023 para La Charca. Fuente: Elaboración propia.*

En el caso de la playa de La Charca (Salobreña), el fin de semana del 29-30 de julio 2023 las condiciones meteorológicas se caracterizaron por una Tª media de 29ºC con máximas de 36ºC en las horas centrales. El oleaje fue moderado (Hs: 0,4-0,7m) y el viento sopló de componente W (283º) y a una velocidad media de 1,7 m/s, en la jornada del sábado, y a 3 m/s y con componente SE (180º), el domingo. Se registraron 11.618 usuarios el sábado, y 614 menos el domingo. Para ambos días el Nº mayor se alcanzó en el tramo de la 13:00 (3.574 y 3.794,

 BY-NC-SA

respectivamente) y en el de las 19:00 (3.148 y 2.429 usuarios). En ambos casos el Nº de bañistas estuvo en torno al 19% del total, significativamente mayor que en el caso de la playa Atlántica donde se sitúa entre el 2-4% para esa franja horaria a pesar de que la Tª del agua era más alta para esos días. La distribución espacial de los usuarios para ambos días se caracterizó por un gradiente NW-SE (desde el Peñón hasta el río), siendo las zonas 0, 1 y 2 las más concurridas (32-34%, 24-26% y 20% del total de usuarios) y la zona 4 la que registró menor número de usuarios (7% del total) (Fig. 3). Esto puede deberse a varios motivos, por un lado, una clara disminución de la densidad de viviendas turísticas hacia el SE, a la vez que lo hacen los servicios de playa (bares, heladerías) y los aparcamientos, al final del paseo marítimo (y accesos en pasarela), que coincide con el límite oriental de la zona 2 y, por último, también podría influir el atractivo del Peñón que al estar a cierta altura esuado por los más jóvenes como zona de salto al mar. El Nº bajo de usuarios en la zona 4 parece estar vinculado a la falta de accesos directos, así como de servicios y la proximidad a la desembocadura del río. Todo esto parece reafirmar la estrecha relación entre la accesibilidad, los servicios y los usuarios.

La densidad de uso del espacio se puede relacionar con la capacidad turística de las playas, entendida como superficie óptima de playa requerida por usuario ($m^2$/usuario) que garantice el disfrute de la playa (Pereira da Silva, 2002). Sin embargo, esta varía según los autores entre 4,5-5 $m^2$/usuario (Sridhar et al. 2016) hasta una superficie de 15 $m^2$/usuario (Roig, 2002) cuando se persigue evitar la saturación y garantizar un uso sostenible de la playa. Tomando como valor de referencia 6 $m^2$/usuario, encontramos que en Matalascañas, el sábado 22/07/2023 a las 13:00, en la zona 1, había un 69,3% de ocupación (con 8 $m^2$/usuario disponible), lo cual se considera alto (entre 60-84%), siendo el resto de la jornada normal (entre el 41,5-57,7%) o con un % de ocupación bajo <39%. Para el domingo, en todas las zonas el nivel de ocupación se mantuvo por debajo del 40% (baja ocupación, <16 $m^2$/persona), destacando una ocupación del 43,6% a las 13:00 en la zona 2 coincidiendo con el pico de usuarios y siendo la zona con mayor número de servicios de playas. Para los dos días, el periodo de máxima ocupación coincidió además con marea baja, mayor capacidad física de la playa (anchura >100 m) lo cual posibilitó el acomodamiento de más personas en condiciones de no saturación. Para la playa de La Charca, la situación analizada fue distinta, a lo largo de la jornada el porcentaje de ocupación fue muy alto para las zonas 0 y 1 (70,5 y 63,2%, respectivamente) en la franja de las 13:00, arrojando una superficie de 8,5 $m^2$/ usuario y 9,5 $m^2$/usuario respectivamente. A las 19:00 del mismo día, la zona 0 próxima al Peñon tenía una ocupación alta, (61,2 %) y del 50% (considerado normal) para el resto de las franjas (a excepción de las 11:00). El domingo 30, la situación se repitió con ocupación del 82,1% (7 $m^2$/usuario) y 62,4% en las zonas 0 y 1, respectivamente, y la zona 0 con ocupación >44% para el resto del día. Estos datos parecen apuntar que la tipología de la arena oscura y la inexistencia de mareas que "refresquen" la arena durante la pleamar da lugar a superficie de playa útil menor (ya que la arena quema y los usuarios no usan esa zona), lo cual se traduce en que en los momentos de mayor afluencia se generen situaciones de saturación en las zonas más populares (zona 0 y 1).

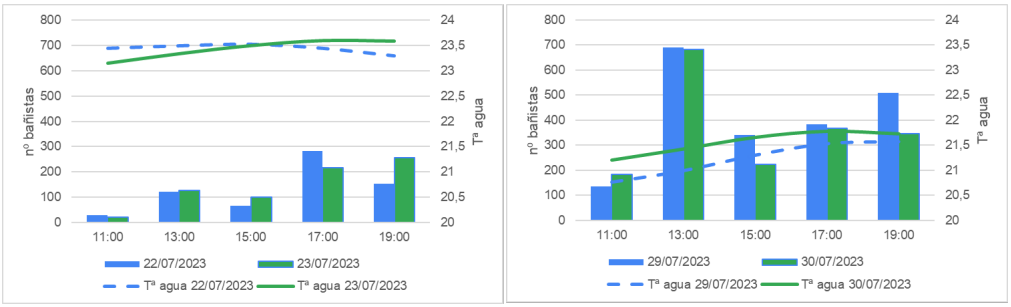



***Fig. 4*** *Resultados sobre el Nº de bañistas según el tramo horario y la temperatura del agua para Matalascañas (izq) y La Charca (dcha). Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, analizando las condiciones de baño destaca como en Matalascañas, a pesar de ser la Tª media del agua de 23ºC para ambos días (Fig. 4), el Nº máximo de bañistas se sitúa en torno a 275 a partir de las 17:00 y coincidiendo con la subida de la marea y la pleamar (19:00h), representando los bañistas únicamente el 5% del total de los usuarios. En el caso de La Charca, sin embargo, la Tª del mar se situó varios grados por debajo durante todo el fin de semana. En todos los tramos horarios el Nº de bañistas estuvo muy por encima de 200 (excepción

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

de las 11:00), llegando alcanzar casi los 700 bañistas a las 13:00h, lo cual supone más del 17% de los usuarios. Esto podría deberse tanto a la menor superficie disponible, que hace que los usuarios usen la zona intermareal, como a la sensación térmica y la humedad, mayor en el Mediterráneo que en el Atlántico.

## 5. Conclusiones

El uso de los drones ha permiteido cuantificar usuarios en playas con características diferentes y poder compararlos, con la ventaja sobre las cámaras de que no necesitan mantenimiento *in situ* y presentan más cobertura espacial. Los patrones de uso varían entre las playas, y dentro de ellas, durante los diferentes tramos horarios. Por un lado, la morfología de la playa (tipo de arena, anchura y marea) influyen en la distribución espacial de los usuarios, ya que, en playas con más de 200 m, como la de Matalascañas, no se supera la capacidad de carga (marea baja en horas centrales) siendo además el Nº de bañistas bajo. Por el contrario, en La Charca la menor extensión de la playa seca (arena oscura que se calienta más) y la concentración de servicios en un extremo provocan situaciones de saturación en las horas centrales, lo cual parece también estar relacionado con un mayor número de usuarios en el agua. En este sentido, en ambas playas se reafirma que las zonas con mejores accesos, cerca de las urbanizaciones y con servicios de playa son las más concurridas. Estos resultados sugieren que se necesitan estrategias adaptadas a cada área para dimensionar los servicios y proteger los ecosistemas y que, por tanto, las decisiones a escala local requieren de datos específicos. En este sentido, los drones parecen ser una herramienta adecuada y efectiva que podrían orientar acciones estratégicas de gestión costera sostenible.

## 6. Agradecimientos

Las campañas de campo se realizaron con el proyecto LifeWatchINDALO con la colaboración de Anunzzia S.L. Esta publicación ha sido financiada por la Unión Europea-NextGenerationEU y la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación (Junta de Andalucía), mediante el Plan de Recuperación de Transformación y Resiliencia y el Plan Complementario de "Ciencias Marinas", subproyecto C17.I01.P01.S22, Proyecto (PCM_00009), subvención pública.

## 7. Referencias

Garrido Cumbrera, M., López Lara, E. (2010) Consecuencias del turismo de masas en el litoral de Andalucía (España) Caderno *Virtual de Turismo*, vol. 10, núm. 1, pp. 125-135. Universidade Federal do Rio de Janeiro. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=115412537010

Guillén, J., García-Olivares, A., Ojeda, E., Osorio, A-, Chic, O., González, R. (2008). Long-term quantification of beach users using video monitoring. J *Coast Res* 246:1612–1619. https://doi.org/10.2112/07-0886.1

Guisado-Pintado, E., Jackson, D.W.T& Rogers, D. (2019). 3D mapping efficacy of a drone and terrestrial laser scanner over a temperate beach-dune zone, *Geomorphology*, 328, 157-172. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.013.

Hecok, R.D. (1983). Recreation Behaviour Patterns as Related to Site Characteristics of Beaches, *Journal of Leisure Research*, 15 , 37-250.

Jiménez, JA., Osorio, A., Marino-Tapia, I., Davidson, M., Medina, R., Kroon, A., Archetti, R., Ciavola, P., Aarnikhof, SGJ. (2007). Beach recreation planning using video-derived coastal state indicators. *Coast Eng* 54(6–7):507–521

Junta de Andalucía, (2023). https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/2023-11/ultimos-datos_sep23.pdf. Últimos datos turísticos en andalucía. Publicación Oficial de la Consejería de Turismo, Cultura y Deporte.

Martin, C, Parkes S, Zhang Q, Zhang X, McCabeMF, Duarte CM (2018). Use of unmanned aerial vehicles for Efficient Beach litter monitoring. *Mar Pollut Bull* 131(April):662–673. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.045

 BY-NC-SA

Pereira da Silva, C. (2002). Beach Carrying Capacity Assessment: How important is it? *Journal of Coastal Research*, 36(sp1), 190-197. https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.190

Prieto Campos, A., & Díaz Cuevas, P. (2021). Approaches to the beaches carrying capacity in times of COVID-19: the case of the Andalusian Atlantic coast. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (88). https://doi.org/10.21138/bage.3012

Provost, E., Butcher, P., Colefax, A., Coleman, M., Curley, B & Kelaher, B. (2019). Using drones to quantify beach users across a range of environmental conditions. *Journal of Coastal Conservation*. 23. 10.1007/s11852-019-00694-y.

Roig, F. X. (2003). Análisis de la relación entre capacidad de carga física y capacidad de carga perceptual en playas naturales de la Isla de Menorca. Investigaciones Geográficas. 31. 10.14198/INGEO2003.31.07.

Yepes, V. (2020). Método simplificado de cálculo del aforo de las playas en tiempos de coronavirus. Universitat Politècnica de València. Retrieved from https://victoryepes.blogs.upv.es/2020/06/04/metodo-simplificado-de-calculo-del-aforo-de-las-playas-en-tiempos-de-coronavirus/

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18846

# La fase final de la transgresión holocena en el NO Peninsular

*The final phase of the Holocene transition in the NW Iberian Peninsula*

**Daniel Cajade-Pascual[a], Ramón Blanco-Chao[a] y Manuela Costa-Casais[a]**

[a]Departamento de Xeografía, Universidade de Santiago de Compostela (USC). Grupo de estudios medioambientais aplicados ao patrimonio natural e cultural (GEMAP), , danielcajade.pascual@usc.es, , ramon.blanco@usc.es, ,manuela.costa@usc.es

How to cite: Cajade-Pascual, D.; Costa-Casais, M. y Blanco-Chao, R. 2023. La fase final de la trangrsión holocena en el NO Peninsular. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18846

***Abstract***

*The analysis of six edapho-sedimentary sequences obtained on the Areoso island (ría de Arousa) has allowed us to interpret the paleoenvironmental evolution of the sector and the changes in sea level since the Middle Holocene. In Areoso, a change from continental conditions towards coastal is identified between 6000 cal. BP and 4000 cal. BP, while the relative sea level would be at levels similar to the current ones between 3500 cal. BP and 3200 cal. BP. The results obtained have been compared with other studies carried out in the NW of the Iberian Peninsula, improving the interpretation of the final phase of the Holocene transgression a regional scale.*

***Keywords:*** *Sea level, Holocene, Areoso island, Arousa ria, edapho-sedimentary deposits, sedimentary facies.*

***Resumen***

*El análisis de seis secuencias edafo-sedimentarias obtenidas en el islote Areoso (ría de Arousa), ha permitido interpretar la evolución paleoambiental del sector y los cambios del nivel del mar desde el Holoceno Medio. En Areoso se identifica un cambio desde condiciones continentales hacia un ambiente costero entre 6000 cal. BP y 4000 cal. BP, mientras que el nivel del mar relativo alcanzaría cotas semejantes a las actuales entre 3500 cal. BP y 3200 cal. BP. Los resultados obtenidos se han comparado con otros estudios realizados en el NO de la Península Ibérica, mejorando la interpretación sobre la fase final de la transgresión holocena a escala regional.*

***Palabras clave:*** *Nivel del mar, Holoceno, islote Areoso, ría de Arousa, depósitos edafo-sedimentarios, facies sedimentarias.*

## 1. Introducción

En los estudios sobre reconstrucción paleoambiental en áreas costeras, las variaciones del nivel del mar son un factor fundamental para interpretar su evolución. Existe un gran número de curvas del nivel de mar, no obstante, los condicionantes locales y regionales (tectónicos, isostáticos, etc.) dificultan su empleabilidad para el estudio en detalle de los cambios ambientales. Esta limitación se evidencia en la interpretación de los rangos cronológicos de las últimas fases de la transgresión holocena, especialmente al fijar el momento donde el nivel del mar alcanzó una cota semejante a la actual, pues las cronologías varían significativamente según el área de estudio y los *proxies* analizados.

Las investigaciones realizadas en la costa atlántica y cantábrica de la Península Ibérica ilustran diferencias regionales, debido a movimientos corticales y factores locales. La actividad tectónica cuaternaria en el NO

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

peninsular es una cuestión muy discutida, especialmente en lo relativo al Holoceno. En este sentido se debe contraponer la presencia de actividad neotectónica en la costa portuguesa y en el sur de España (e.g. Carvalho et al., 2014) y la estabilidad tectónica de la costa galega desde, por lo menos, el último interglaciar (e.g. Blanco-Chao et al., 2002; Leorri et al., 2012a). En la costa cantábrica también se ha sugerido un levantamiento tectonoisostático posterior al MIS-5e (e.g. López-Fernández et al., 2020), mientras que Leorri et al. (2012b) consideran la costa vasca como tectonicamente estable durante lo Holoceno, aunque sí advierten el efecto del levantamiento isostático periférico. En el NO peninsular se han propuesto diferentes curvas del Nivel del Mar Relativo (en adelante, NMR) y rangos cronológicos para los últimos tramos de la transgresión holocena. En el norte de Portugal, Cearreta et al. (2007) señalan que un NMR semejante al presente se habría alcanzado en torno a 6000-5000 cal. BP. La curva del nivel del mar de Dias et al. (2000) situó el NMR entre 130 m y 140 m por debajo de las cotas actuales durante el Último Máximo Glacial (LGM), posteriormente se habría producido un rápido aumento hasta 8000 años BP, momento en el que el nivel del mar se acercaba a los -20 m y las tasas de subida comenzaron a desacelerarse, hasta alcanzar unas cotas parecidas a las actuales entorno a 3500 años BP. En la costa cantábrica, el estudio de tres estuarios (Bilbao, Deba y Urdaibai) permitió a Leorri et al. (2012b) diferenciar dos fases trangresivas. La primera se caracteriza por un rápido aumento del NMR desde aproximadamente -27 m en ~10000 cal. BP a -5 m hacia 7000 cal. BP. En la segunda fase se registra un aumento lento del NMR a partir de 7000 cal. BP. Entre 4000 cal. BP y 2000 cal. BP los datos muestran una caída y posterior aumento del NMR, que los autores aducen a procesos isostáticos o incluso a la actividad antrópica en la región. También en el estuario de Urdaibai, García-Artola et al. (2023) identifican un NMR de -2,7 ±1,2 m en 4900 cal. BP. Por su parte, Cearreta & Monge-Ganuzas (2013) sitúan la estabilización del NMR entorno a 3000 cal. BP.

Una de las curvas del NMR más detalladas es la realizada por Alonso y Pagés (2010), a partir de la comparación de numerosos depósitos del norte de Galicia y Asturias. Esta curva propone una transgresión rápida hasta 6800 cal. BP, seguido de un período de estabilización hasta 4200 cal. BP, en cotas de entre -7 m y -5 m por debajo de las actuales. De 4200 cal. BP a 3100 cal. BP se produciría una aceleración de las tasas de subida, hasta situarse en niveles ligeramente inferiores a los presentes. A partir de 2000 cal. BP el nivel del mar se situaría en una posición semejante al actual. González-Villanueva et al. (2015) emplean los resultados obtenidos en el sistema barrera-laguna de Louro (Muros, A Coruña) para estimar que el NMR apenas habría variado desde 3500 cal. BP, mientras que la influencia costera en la laguna de Cíes se constata a partir de 3600 cal. BP (Costas et al., 2009). El estudio de tres secuencias obtenidas en la margen meridional del estuario del río Miño permitieron a Leorri et al. (2012a) elaborar una curva del nivel del mar para la costa atlántica ibérica. Según este trabajo, el NMR habría aumentado rápidamente hasta 7000 cal. BP, cuando se situó a -5 m, mientras que las cotas actuales se habrían alcanzado después de 4000 cal. BP.

La estabilidad tectónica en la mayor parte de la costa galega, desde el Pleistoceno Final, la equipara a un eje pivotante (Blanco-Chao et al., 2002) entre los movimientos corticales de la costa portuguesa y cantábrica, convirtiéndola en un sector de elevado interés para el estudio de las variaciones del NMR. En este sentido, los resultados paleoambientales obtenidos en el islote Areoso (ría de Arousa, Pontevedra) (Cajade-Pascual, 2024; Cajade-Pascual et al., 2019, 2023), resultan de interés para la interpretación de la subida del nivel del mar en el NO penisular. El objetivo de este estudio es abordar la evolución paleoambiental de las secuencias edafo-sedimentarias obtenidas en Areoso y su comparación con los resultados de otros estudios realizados en el NO de la Península Ibérica, mejorando la interpretación sobre la fase final de la transgresión posglaciar desde el Holoceno Medio a escala regional.

## 2. Área de estudio

Areoso es un pequeño islote de 600 m de longitud y 8 ha de superficie situado en la parte interna de la ría de Arousa (Fig. 1), en la fachada atlántica gallega. Forma parte de un conjunto de pequeños islotes y bajos denominados *Os Gidoiros,* situados al oeste de la isla de Arousa, de la cual están separados por un canal de 1,5 km y 5-7 m de profundidad media. Hacia el norte y el oeste, la profundidad aumenta abruptamente hasta los 20-25 m. El islote se divide en dos sectores, el meridional es un afloramiento granítico cubierto por un manto eólico, y el

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

septentrional, una flecha sedimentaria tipo *trailing spit* con un elevado dinamismo (Blanco-Chao et al., 2020; Cajade-Pascual, 2024). Ambos sectores están unidos por un estrechamiento central, mientras que en el flanco occidental aflora un nivel orgánico intermareal. El islote presenta numerosas estructuras arqueológicas, destacando los cinco túmulos megalíticos del Neolítico, además de pequeñas estructuras cistoides de la Edad del Bronce y vestigios de una ocupación temporal durante la Edad del Hierro. Aunque no hay datos directos del oleaje en el interior de la ría, la caracterización del régimen de olas se puede estimar a partir de la información disponible en mar abierto. En el punto SIMAR-3011012, situado en la entrada de la ría, señala un 80% de olas de entre 1 y 2,5 m de altura significante y períodos de entre 8 y 10 s, acercándose el 80 % de las olas por el O y SSO. El rango mareal medio en mareas vivas es de 3,45 m.

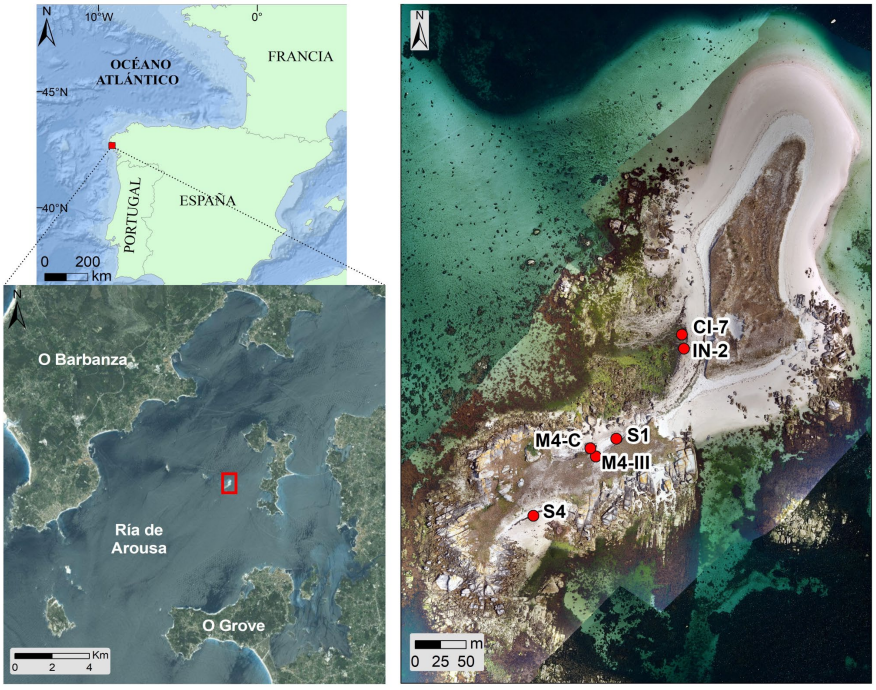



***Fig. 1.*** *Localización del área de estudio y posición de las secuencias edafo-sedimentarias obtenidas en Areoso.*

## 3. Materiales y métodos

Las seis secuencias edafo-sedimentarias analizadas (Fig. 1) se recogieron en el campo según los criterios establecidos en las *Directrices para la descripción de suelo* (FAO, 2009). Se tomaron dos secuencias (S1 y S4) bajo la playa actual durante la realización de dos catas arqueológicas, una en cada flanco del sector meridional. En el sector intermareal, situado en flanco occidental de islote, se tomaron dos secuencias, una (CI-7) durante la excavación de una cista de la Edad del Bronce y otra (IN-2) mediante una barrena helicoidal. Por último, durante la excavación de la Mámoa 4, se muestrearon dos secuencias en el interior del sistema dunar meridional (M4-III y M4-C). Las cotas se obtuvieron mediante un receptor GNSS RTK centimétrico. Las muestras fueron descritas (color, estructura, consistencia, plasticidad y adhesividad) en el laboratorio de acuerdo a las *Directrices para la descripción de suelos* (FAO, 2009). Posteriormente fueron secadas al aire y tamizadas para separar la fracción gruesa (> 2 mm) de la tierra fina (< 2 mm). La fracción tierra fina fue empleada para la granulometría, morfometría, la perdida de materia orgánica por ignición (LOI), contenido en material carbonatado biogénico mediante ataque con HCl al 10 %, pH, análisis elemental y mineralógico. Se realizaron 18 dataciones radiocarbónicas para enmarcar la evolución del sector en un marco cronológico.

## 4. Resultados y discusión

El estudio de las secuencias obtenidas en Areoso (S1, S4, M4-III, M4-C, IN-2 y CI-7) permitió diferenciar cuatro ambientes edafo-sedimentarios (continental, intermareal, playa-duna y eólico) representativos de los cambios en

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

las condición ambientales acontecidos desde el Holoceno Medio (Cajade-Pascual, 2024; Cajade-Pascual et al., 2019, 2023). La presencia de niveles continentales, compuestos por un sedimento coluvial inmaduro, y la actividad Neolítica registrada, son indicativos de unas condiciones continentales dominantes en torno a 6000 cal. BP (Cajade-Pascual, 2024), momento en el que el NMR se situaría unos 5-7 m por debajo del actual (Alonso & Pagés, 2010; Bao et al., 2007; Leorri et al., 2012a, 2012b). La primera evidencia costera se corresponde con el desarrollo de niveles intermareales en el flanco occidental del islote en el 4000 cal. BP, con un NMR ligeramente inferior al actual. Están compuestos por sedimentos orgánicos cohesivos, que fueron erosionados y fosilizados por niveles de playa, de la misma forma que se ha detectado en otros sectores de la costa gallega (e.g. Santos & Vidal-Romaní, 1993). Su erosión y el comienzo de una sedimentación playa-duna sobre los niveles continentales entre el 3500-3200 cal. BP, señalan el momento donde el NMR habría alcanzado cotas semejantes a las presentes (Cajade-Pascual, 2024).

Los resultados obtenidos en el islote Areoso se ajustan cronológicamente a los propuestos por otros estudios del NO peninsular (Fig. 2), que sitúan la estabilización del NMR en niveles próximos a los actuales entre 3500 y 3000 cal. BP (Cearreta & Monge-Ganuzas, 2013; Costas et al., 2009; Dias et al., 2000; González-Villanueva et al., 2015; Leorri et al., 2012a, 2012b). La variación entre estudios y sectores puede vincularse, en parte, a los procesos tectonoisostáticos recientes descritos en la costa cantábrica (e.g. Leorri et al., 2012a; López-Fernández et al., 2020) o a la actividad neotectónica identificada en la costa portuguesa (e.g. Carvalho et al., 2014), mientras que la fachada atlántica gallega se considera tectonicamente estable desde el último interglaciar (Blanco-Chao et al., 2002: Leorri et al., 2012a). Para interpretar las señales paleoambientales indicativas de cambios en el NMR hay que tener en cuenta la naturaleza del área de estudio. Los realizados en estuario (Alonso & Pagés, 2010; Cearreta & Monge-Ganuzas, 2013; García-Artola et al., 2023; Leorri et al., 2012a, 2012b) presentan importantes diferencias interpretativas, incluso en sectores próximos, cuya causa puede derivar de los procesos de compactación sedimentaria o a un balance sedimentario estrechamente relacionado con los aportes continentales (e.g Granja et al., 2022). Los sistemas barrera-laguna (*barrier-lagoon*) son ambientes costeros ampliamente empleados para realizar estudios paleoambientales por la elevada resolución que ofrecen, no obstante, son sistemas cerrados o semicerrados, donde los aportes de material continental (coluvial y aluvial) dificultan la interpretación de los cambios del nivel del mar. Estos sistemas, tradicionalmente gestionados por las sociedades que habitaban en sus cercanías, presentan cambios vinculados directamente con la actividad antrópica (Bao et al., 2007; González-Villanueva et al., 2015). En los estudios realizados en lagunas colgadas, la presencia de cierres rocosos no permiten precisar con exactitud los cambios en el NMR, por lo que la topografía previa resulta un factor de control clave en su evolución (Bao et al., 2007; Costas et al., 2009). No obstante, los datos obtenidos en Areoso y en otros sectores de la fachada atlántica gallega (Costas et al., 2009; González-Villanueva et al., 2015; Santos & Vidal- Romaní, 1993) apenas difieren cronológicamente. La curva del nivel del mar propuesta por Dias et al. (2000), basada principalmente en datos obtenidos en la plataforma continental portuguesa, se ajustan mejor a los resultados obtenidos en la costa gallega, aunque, según Bao et al. (2007), carece de un número suficiente de puntos índices precisos para el Holoceno.

El conjunto de secuencias de Areoso permiten definir la transición entre las condiciones continentales y las costeras en las últimas fases transgresivas. Una vez que el NMR alcanza cotas semejantes a las actuales se mantiene relativamente estable, con tasas de variación muy limitadas, hasta el aumento detectado a partir del siglo XX. Con la estabilización del NMR, los principales factores de cambio en los sistemas costeros son la actividad antrópica, los eventos extremos y la variabilidad de los patrones atmosféricos y oceánicos. La desconexión del islote a nivel sedimentario impide la llegada de material externo, por lo que el origen del sedimento se restringe a la erosión de los depósitos continentales del islote y a la incorporación de material biogénico carbonatado. La limitada aportación de material externo, supone una ventaja frente a los estudios realizados en sistemas barrera-laguna, sedimentos de fondo marino o estuarios, cuyo balance sedimentario está influenciado por los aportes de material continental y/o fluvial externos, pudiendo dificultar su interpretación. Aunque el período cronológico abarcado es limitado, las secuencias edafo-sedimentarias de Areoso permiten reconstruir la evolución de un sector de la costa gallega durante la fase final de la transgresión holocena y determinar el momento donde el NMR habría alcanzado unas cotas semejantes a las actuales (3500-3200 cal. BP).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

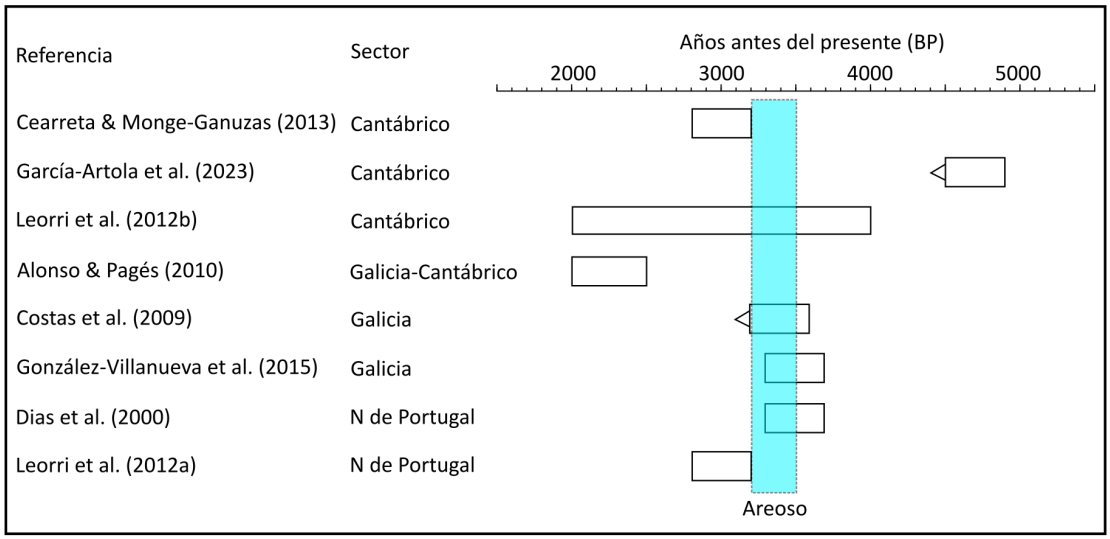



***Fig. 2.*** *Comparación entre los resultados obtenidos en Areoso y otros estudios del NO peninsular sobre la cronología en la que el NMR habría alcanzado cotas próximas a las actuales. Los intervalos representados en la figura derivan de rangos vinculados a curvas de subida del nivel del mar (Alonso & Pagés, 2010; Leorri et al., 2012la); de edades centrales aproximadas, a las que se le aplica un intervalo de ±200 años: 3000 cal. BP (Cearreta & Monge- Ganuzas, 2013; Leorri et al., 2012b), 3500 cal. BP (Dias et al., 2000; González-Villanueva et al., 2015); y a rangos mínimos: posterior al 3600 cal. BP (Costas et al., 2009), posterior al 4900 cal. BP (García-Artola et al., 2023).*

## 5. Conclusiones

El estudio de seis secuencias edafo-sedimentarias en el islote Areoso permitió diferenciar cuatro ambientes edafosedimentarios, con facies tipo continental, intermareal, playa-duna y eólica, representativas de los cambios en las condición ambientales acontecidos desde lo Holoceno Medio. La configuración del islote restringe la llegada de material sedimentario externo, lo que supone una ventaja frente a los estudios realizados en sistemas barrera-laguna, sedimentos de fondo marino o medios estuarinos, cuyo balance sedimentario está influenciado por aportes externos. Los resultados obtenidos en Areoso han permitido definir el momento donde el NMR habría alcanzado unas cotas similares a las presentes (3500-3200 cal. BP), cuyo rango cronológico es coincidente con otros estudios realizados en el NO peninsular.

## 6. Referencias

Alonso, A. & Pagés, J. L. (2010). Evolución del nivel del mar durante el Holoceno en el Noroeste de la Península Ibérica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 23(3-4), 157-167.

Bao, R., Alonso, A., Delgado, C. & Pagés, J. L. (2007). Identification of the main driving mechanisms in the evolution of a small coastal wetland (Traba, Galicia, NW Spain) since its origin 5700 cal yr BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247(3-4), 296-312. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.10.019

Blanco-Chao, R., Cajade-Pascual, D. & Costa-Casais, M. (2020). Rotation, sedimentary deficit and erosion of a trailing spit inside ria of Arousa (NW Spain). *Science of The Total Environment*, 749, 141480. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141480

Blanco-Chao, R., Costa-Casais, M., Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A. & Vázquez-Paz, M. (2002). Holocene evolution on Galician coast (NW Spain): an example of paraglacial dynamics. *Quaternary International*, 93, 149-159. https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00013-7

Cajade-Pascual, D. (2024). *Morfodinámica, Reconstrución paleoambiental e Xestión do Illote Areoso (Ría de Arousa)* [Tesis Doctoral. Universidade de Santiago de Compostela]. http://hdl.handle.net/10347/33042

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Cajade-Pascual, D., Costa-Casais, M. & Blanco-Chao, R. (2019). Ascenso del nivel del mar y cambios ambientales costeros durante el Holoceno Final. Islote Areoso, Ría de Arousa. En R. Durán, L. Guillén, G. Simarro (Eds.), *X Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 261-264). CSIC-Institut de Ciències del Mar. http://hdl.handle.net/10347/23262

Cajade-Pascual, D., Costa-Casais, M., Blanco-Chao, R. & Taboada, T. (2023). Sea-level change and human occupation over 6000 years on Areoso Island (Ría de Arousa, NW Iberian Peninsula). *Environmental Earth Sciences*, 82(11), 1-12. https://doi.org/10.1007/s12665-023-10955-7

Carvalho, J., Rabeh, T., Dias, R., Dias, R., Pinto, C., Oliveira, T., Cunha, T. & Borges, J. (2014). Tectonic and neotectonic implications of a new basement map of the Lower Tagus Valley, Portugal. *Tectonophysics*, 617, 88-100. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.01.017

Cearreta, A., Alday, M., Freitas, M. D. C. & Andrade, C. (2007). Postglacial foraminifera and paleoenvironments of the Melides lagoon (SW Portugal): towards a regional model of coastal evolution. *The Journal of Foraminiferal Research*, 37(2), 125-135. https://doi.org/10.2113/gsjfr.37.2.125

Cearreta, A. & Monge-Ganuzas, M. (2013). Evolución paleoambiental del estuario del Oka (Reserva de la Biosfera de Urdaibai, Vizcaya): respuesta al ascenso del nivel marino durante el Holoceno. *Geotemas*, 14, 163-166.

Costas, S., Muñoz Sobrino, C., Alejo, I. & Pérez-Arlucea, M. (2009). Holocene evolution of a rock-bounded barrier-lagoon system, Cíes Islands, northwest Iberia. Earth Surface Processes and Landforms, 34(11), 1575-1586. https://doi.org/10.1002/esp.1849

Dias, J. M. A., Boski, T., Rodrigues, A. & Magalhães, F. (2000). Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present—a synthesis. *Marine Geology*, 170(1-2), 177-186. https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00073-6

FAO (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación.

García-Artola, A., Cearreta, A., Monge-Ganuzas, M., Nikitina, D., Li, T. & Horton, B. P. (2023). Holocene environmental evolution and relative sea-level change in the Oka estuary (Urdaibai Biosphere Reserve, northern Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 286, 108310. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108310

García-Artola, A., Stéphan, P., Cearreta, A., Kopp, R. E., Khan, N. S., & Horton, B. P. (2018). Holocene sea level database from the Atlantic coast of Europe. *Quaternary Science Reviews*, 196, 177-192. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.031

González-Villanueva, R., Pérez-Arlucea, M., Costas, S., Bao, R., Otero, X. L., & Goble, R. (2015). 8000 years of environmental evolution of barrier–lagoon systems emplaced in coastal embayments (NW Iberia). *The Holocene*, 25(11), 1786-1801. https://doi.org/10.1177/0959683615591351

Granja, H. M., Gómez-Orellana, L., Costa, A. L., Morais, R., Oliveira, C., Ramil-Rego, P. & Pinho, J. L. (2022). Holocene evolution of the Cávado estuary (NW Portugal). *Quaternary International*, 622, 36-50. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.02.032

Leorri, E., Fatela, F., Drago, T., Bradley, S. L., Moreno, J. & Cearreta, A. (2012a). Lateglacial and Holocene coastal evolution in the Minho estuary (N Portugal): Implications for understanding sea-level changes in Atlantic Iberia. *The Holocene*, 23(3), 353-363. https://doi.org/10.1177/0959683612460786

Leorri, E., Cearreta, A. & Milne, G. (2012b). Field observations and modelling of Holocene sea-level changes in the southern Bay of Biscay: implication for understanding current rates of relative sea-level change and vertical land motion along the Atlantic coast of SW Europe. *Quaternary Science Reviews*, 42, 59- 73. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.03.014

López-Fernández, C., Llana-Fúnez, S., Fernández-Viejo, G., Domínguez-Cuesta, M. J. & Díaz-Díaz, L. M. (2020). Comprehensive characterization of elevated coastal platforms in the north Iberian margin: A new template to quantify uplift rates and tectonic patterns. *Geomorphology*, 364, 107242. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107242

Santos, L. & Vidal Romaní, J. R. (1993). El lagoon de Seselle: Un episodio de la transgresión Holocena en la Ria de Ares (A Coruña, Galicia, España). Datos geomorfológicos, sedimentarios y paleoecológicos. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe,* 18, 163-174. http://hdl.handle.net/2183/6158

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18689

# Riesgos en el litoral de Catalunya: Evaluación de los peligros de inundación, erosión y movimientos de ladera para la gestión costera

*Coastal Risks in Catalonia: Assessment of flooding, erosion, and landslide hazards for coastal management*

**Jordi Pinyol[a], Rosa Carles[b], Fus Micheo[c] y Marta González[d]**

[a]Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Barcelona, Jordi.Pinyol@icgc.cat; [b]ICGC, Rosa.Carles@icgc.cat; [c]ICGC, , fus.micheo@icgc.cat; [d]ICGC, , Marta.Gonzalez@icgc.cat.

How to cite: Pinyol, J.; Carles, R.; Micheo, F. y González, M. Riesgos en el litoral de Catalunya: Evaluación de los peligros de inundación, erosion y movimientos de ladera para la gestion costera. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18689

***Abstract***

*The Catalan coastline is a space undergoing continuous geomorphological changes. Apart from being home to half of Catalonia's resident population, disregarding the tourism sector, it also hosts a significant portion of the region's economic activity. These characteristics make it a highly vulnerable strip exposed to the of coastal dynamics and mass movements hazards.*

*Since 2022, the Catalan Cartographic and Geological Institute (ICGC) has been developing the Coastal Dynamics Information Service (SIDL) project. Its aim is to gather, process, and provide geolocated information and knowledge about the Catalan coast to administrations, citizens, and businesses, considering the current climate emergency. This initiative aims to address coastal vulnerabilities and ensure its sustainability. In this contribution, we present 5 sets of geomorphological information for the SIDL project, focusing on flood hazards, erosion, and mass movements along the Catalan coastline.*

***Keywords:*** *coastal dynamics, geoinformation, climate change, flooding, erosion, sea storm, landslide, rockfall*

***Resumen***

*El litoral catalán es un espacio que experimenta cambios geomorfológicos continuos, que sin tener en cuenta el sector turístico, concentra a la mitad de la población residente en Catalunya, y en el que se desarrolla gran parte de la actividad económica de la región. Estas características lo convierten en una franja altamente vulnerable expuesta a los peligros de la dinámica litoral y de ladera.*

*Desde 2022, el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) desarrolla el proyecto Servicio de Información de la Dinámica Litoral (SIDL), que tiene como objetivo recoger, elaborar y poner a disposición de las administraciones, ciudadanía y empresas, la información geolocalizada y el conocimiento sobre la costa catalana, teniendo en cuenta la presente situación de emergencia climática, para hacer frente a las vulnerabilidades de la costa y asegurar su sostenibilidad. En esta contribución presentamos 5 conjuntos de información geomorfológica elaborada para el proyecto SIDL, centrados en los peligros de inundación, erosión y movimientos de ladera en el litoral catalán.*

***Palabras clave:*** *dinámica litoral, geoinformación, cambio climático, inundación, erosión, temporal marítimo, deslizamiento, desprendimiento*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

El litoral catalán es un espacio que, sin tener en cuenta el sector turístico y las segundas residencias, concentra la mitad de la población residente de Catalunya, y en el que se desarrolla gran parte de la actividad económica de la región. Estas características lo convierten en una franja altamente vulnerable que experimenta cambios geomorfológicos continuos y está expuesta a los peligros generados por la dinámica litoral, como la erosión y la inundación. Un ejemplo de su alta vulnerabilidad es el impacto en las playas catalanas provocado por temporales como el Gloria o de *Santa Agnès* en 2020 (González et al., 2020) o, más recientemente, el Nelson, de marzo de 2024 (ICGC, 2024a). A la dinámica natural se le superpone la acción humana, que ha alterado el funcionamiento natural de las playas debido a la intensa urbanización y a la construcción de infraestructuras como puertos, diques, espigones y vías de comunicación. Sin olvidar que, en estas zonas es donde se prevé que los impactos del cambio climático sean más importantes, especialmente en zonas topográficamente bajas, como el delta de l'Ebre.

El proyecto Servicio de Información de la Dinámica Litoral (SIDL) tiene como objetivo recoger, elaborar y poner a disposición de las administraciones, ciudadanía y empresas, la información geolocalizada y el conocimiento sobre la costa catalana, teniendo en cuenta la presente situación de emergencia climática, para hacer frente a las vulnerabilidades de la costa y asegurar su sostenibilidad. Para ello, el proyecto se ha concebido como un sistema de información geográfica con una interfaz de visor de mapas que aglutina y centraliza datos de observación de la costa, proyecciones climáticas y análisis del riesgo. Actualmente, la interfaz de visor de mapas se encuentra en un estado preliminar (ICGC, 2024b).

Los trabajos que presentamos en este artículo recogen el testigo del proyecto PIMA (MITECO, 2020), al que se le suma la experiencia adquirida por el *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC) en los campos de la observación del territorio (ICGC, 2024c) y del análisis de su dinámica (Rodriguez et al., 2018; Sánchez-Artús et al., 2023). De los diferentes trabajos que desarrolla el ICGC en el marco del SIDL, en este artículo, destacamos 5 conjuntos de información geomorfológica, muy diferentes entre sí, pero que tienen en común el análisis de los peligros naturales en el litoral referentes a la inundación, la erosión y los movimientos de ladera.

El proyecto SIDL está liderado por el ICGC, impulsado por el *Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural*, financiado por el *Fons Climàtic* (GENCAT, 2022), con la supervisión de la *Comisió Interdepartamental del Canvi Climàtic* y con la asistencia técnica de la *Comissió de Fons Climàtic.* El proyecto se inició a mediados de 2022 y se ha planificado hasta 2026.

## 2. Características del área de estudio

El proyecto SIDL tiene como área de estudio la totalidad del litoral catalán, motivo por el cual cada una de las capas de información que se generan es homogénea para todo el ámbito considerado.

La costa catalana se extiende desde cap Falcó al norte hasta el riu de la Sènia al sur con una longitud de 911 km (a escala 1:5.000). Desde una perspectiva demográfica, el 43% de la población (3,37 millones de habitantes) reside en los 70 municipios costeros (IDESCAT, 2023). Estos municipios son el 7,4% del total de municipios de Catalunya y corresponden al 6,7% de la superficie total, hecho que demuestra su densidad demográfica. Además, el 58% de los 31,4 millones de turistas (49,4% internacionales) que visitaron Catalunya en 2023, se alojaron en las 3 marcas turísticas del litoral: Costa Brava, Costa de Barcelona y Costa Daurada (GENCAT, 2023). Incluyendo la marca Barcelona, este porcentaje aumenta hasta el 86,4%. A esta presión de visitantes, se le suma una elevada antropización, ya que el 59% del litoral está urbanizado en sus primeros 100 metros, valor que llega al 91% si se descuenta el cap de Creus y el delta del Ebro (GENCAT, 2021). Otro dato relevante de esta franja es la existencia de 47 puertos, que equivale a un puerto cada 20 km.

Cabe mencionar que esta importante antropización destaca al comparar la costa de 1956 y de 2019 (ICGC, 2021). Siendo la longitud de la costa de 739,4 km para 1956 y de 911,1 km para 2019, se obtiene un incremento de longitud de 171,7 km, atribuido a la actividad antrópica, en especial a la construcción de estructuras portuarias. En 1956, la línea de costa modificada por el hombre era de 56,5 km y en 2019, de 262 km, casi 4 veces más.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

## 3. Trabajos realizados

Los trabajos realizados tienen como objetivo principal proporcionar información y conocimiento sobre los riesgos costeros para la toma de decisiones en la gestión del territorio. Otros objetivos más específicos son: a) inmediatamente después de un temporal marítimo, dar una visión global mediante la recopilación de sus efectos en la franja costera; b) mostrar la distribución espacial de los procesos sucedidos; c) evaluar la peligrosidad y el impacto de los procesos potencialmente peligrosos; d) obtener datos de calidad para calibrar los modelos numéricos que los simulan y e) generar escenarios futuros teniendo en cuenta las previsiones del cambio climático.

A continuación, presentamos 5 conjuntos de información (Fig. 1) que se han realizado desde la Unidad de Procesos Activos y Sistema de Información de Riesgos Geológicos del ICGC. Algunos de los trabajos se pueden consultar en sus correspondientes visores web y se espera que en breve se integren bajo la interfaz de visor de mapas del SIDL (ICGC, 2024b).

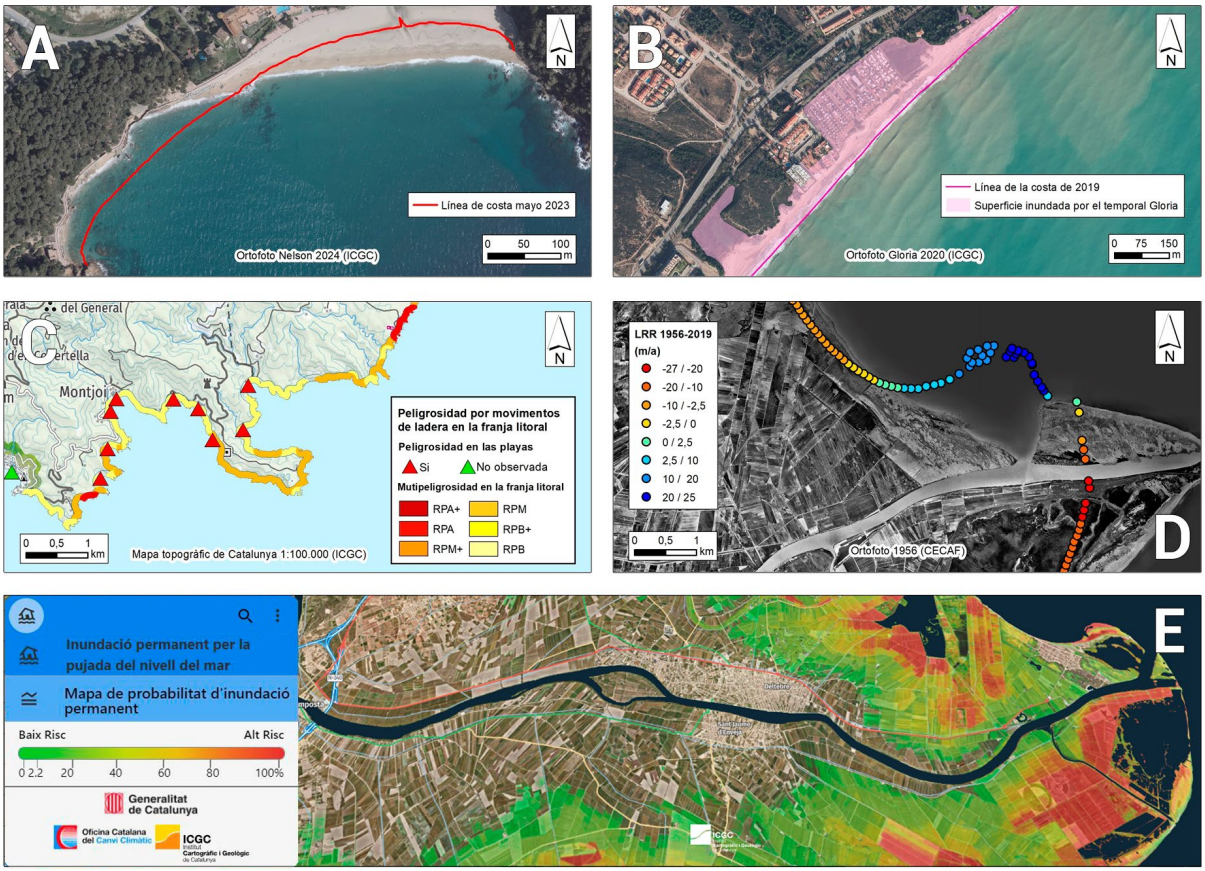



***Fig. 1.*** *Ejemplos de los trabajos presentados. A: Ortofoto del Nelson (marzo 2024) con la línea de costa de 2023 en la playa de Fenals (Lloret de Mar). B: Superficie inundada por el temporal Gloria (enero de 2020) en Mont-roig del Camp. C: Peligrosidad por movimientos de ladera en un sector del Cap de Creus. D: Linear Regression Rate (1956-2019) en la desembocadura del Ebre. E: Fragmento del mapa de probabilidad de inundación permanente (MPIP) consultable desde el visor de inundación permanente por la subida del nivel del mar (ICGC, 2024d).*

### 3.1. Análisis de los efectos sobre el territorio recogidos durante la activación del Servicio de respuesta rápida frente a temporales litorales.

Frente a un temporal marítimo, identificado por los avisos de Situación Meteorológica de Peligro (SMP) del *Servei Meteorològic de Catalunya* (SMC), el ICGC inicia el seguimiento del estado del mar y hace una valoración preliminar de sus efectos a través de la recogida de la información disponible en prensa y redes sociales, y realiza la petición de información a los ayuntamientos mediante el cuestionario web ¿Ha observado un temporal de mar? (ICGC, 2024e). Según los efectos que haya generado sobre el territorio se realizan visitas de campo para recoger

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

in situ sus consecuencias, y se obtienen fotos aéreas y de satélite de las zonas afectadas. El compromiso del ICGC es tener un informe preliminar de su impacto 15 días después del temporal.

Desde 2023, el Servicio de respuesta rápida frente a temporales marítimos se ha activado en 4 ocasiones: Isaack 6-7/2/2023, la DANA 2-3/9/2023, el conjunto de los temporales Aline, Bernard, Ciaran y Domingos 19/10/2023-2/11/2023; y el Nelson 26/03-01/04/2024. Resumidamente, en 2023 se han documentado 284 afectaciones en 44 municipios (ICGC, 2024f). A continuación, a modo de ejemplo, destacamos los resultados del temporal Nelson.

### *3.1.1. Ejemplo de servicio de respuesta rápida, el temporal Nelson*

Catalunya, entre el 26 de marzo y 1 de abril de 2024, recibió el impacto de la borrasca Nelson con consecuencias importantes sobre su litoral. Según los datos de la boya de Begur (Puertos del Estado, 2024), el temporal tuvo una duración de 164 horas, de las que 53 tuvieron una altura de ola significativa superior a los dos metros. Durante gran parte del episodio, el estado del mar fue entre fuerte marejada y gruesa, grados 4 y 5 en la escala de Douglas.

Mediante el servicio de respuesta rápida, se documentaron 215 afectaciones en 33 municipios a partir de la información proveniente de la prensa, de las redes sociales y de los Ayuntamientos. Ante el impacto del temporal, el ICGC capturó imágenes aéreas del litoral de 10 cm el 3, 5 y 6 de abril. La zona capturada se extiende desde el Cap Trencat a Roses hasta la playa de Port Olivet en l'Ametlla de Mar, en total 771 km de costa. Estas imágenes están disponibles en el visor de evolución de la costa y en el geoservicio WMS Costa (ICGC, 2024c).

A partir de estas imágenes se ha analizado, de forma preliminar, la evolución de las playas (192 km de línea de costa) entre dicho vuelo y la ortofoto del ICGC de 2023. Antes de exponer los resultados, cabe decir que éstos no reflejan únicamente la respuesta de la costa al temporal Nelson, ya que entre la ortofoto de 2023 y las imágenes aéreas posteriores al temporal Nelson, la costa se ha visto afectada por los temporales de finales de 2023 (ICGC, 2024f) y el Monica en 2024, todos de componente sur. De dicho análisis se ha obtenido que en el 48,8% de la longitud de playas se ha producido regresión, en el 29% acreción y la línea de costa no ha variado significativamente en el 22,2%.

Este análisis se ha completado con un inventario de los principales efectos geomorfológicos y de los daños en las infraestructuras antrópicas. Se visitaron, de norte a sur, las siguientes poblaciones o sectores de costa: Sant Antoni de Calonge, Platja d'Aro, sector de Malgrat de Mar, Vilassar de Mar, sector Montgat-Badalona, Vilanova i la Geltrú, el sector Cunit-Roc de Sant Gaietà, Torredembarra, norte de Tarragona y el sector Salou-Cambrils, constatando una pérdida importante de las playas en un momento muy cercano al periodo turístico. Durante las campañas de campo se han observado más afectaciones en los sectores suroeste de las playas, dando lugar a la aparición de escarpes de temporal, que en algunos casos han superado los 2 metros de altura, generando considerables daños en elementos antrópicos como paseos marítimos.

## 3.2. Mapa de la superficie máxima inundada por temporales marítimos (2017-2024)

Desde 2017, el ICGC ha obtenido ortofotos de la costa inmediatamente después de 10 temporales marítimos con las que se ha elaborado una cartografía geomorfológica a escala 1:5.000 con el objetivo, entre otros, de obtener una envolvente de la superficie máxima inundada por temporales marítimos e identificar las zonas más expuestas a este fenómeno. Se trata de una capa cartográfica determinista que incluye el temporal Gloria de 2020 como el *Worst Scenario Ever* del cual se tiene fotografías aéreas y engloba otros nueve temporales distintos. La metodología, basada en fotointerpretación y en evidencias documentales, se puede consultar en Carles et al, 2023.

Los resultados obtenidos deberían ser tenidos en cuenta en el desarrollo de cualquier plan de protección del litoral, prestando especial atención en las zonas urbanizadas y en las áreas de gran valor natural y paisajístico.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

### 3.3. Caracterización de la evolución de la línea de costa en playas (1956 y 2019)

De manera preliminar, se ha realizado el análisis de la evolución de la línea de costa entre 1956 y 2019 en 597 playas, calas y otras zonas de baño. A partir de las 4 líneas de costa de los años 1956, 2004, 2010 y 2019; cartografiadas a escala 1:5.000 mediante fotointerpretación de ortofotos y el software *Digital Shoreline Analysis System*, *DSAS* (USGS, 2022) se pretende establecer tendencias generales de la evolución de las playas.

A grandes rasgos, para el periodo de 1956-2019, el 65% de las 493 playas de las que se disponen de datos ha sufrido regresión. Este resultado es una primera aproximación que debe ser ampliada mediante el análisis de más líneas de costa, y playa a playa. Actualmente, se está realizando el análisis posterior a 2019 y se están digitalizando nuevas líneas de costa para incluirlas en el análisis, comprendidas en el periodo 1956-2004.

### 3.4. Peligrosidad por movimientos de ladera en la franja litoral catalana

Desgraciadamente, en la playas y calas catalanas debemos lamentar 5 personas heridas y 3 víctimas mortales en 5 accidentes (Tabla 1) por movimientos de ladera. Como medida de prevención, se ha determinado la peligrosidad por desprendimientos y deslizamientos para todo el litoral poniendo especial interés en las zonas de baño.

***Tabla 1.*** *Accidentes recientes en las playas catalanas por movimientos de ladera*

| Año | Localización | Daños |
|---|---|---|
| 2003 | Cala del Senyor Ramon (Santa Cristina d'Aro) | 2 víctimas mortales y 1 persona herida |
| 2014 | Cadaqués | 1 víctima mortal y 1 persona herida |
| 2016 | Tossa de Mar | 1 persona herida |
| 2019 | Palamós | 1 persona herida |
| 2023 | El Golfet (Palafrugell) | 1 persona herida |

La cartografía se ha realizado utilizando la metodología desarrollada en el proyecto Mapa para la prevención de los riesgos geológicos a escala 1:25.000 (González et al, 2016). Esta se basa en la elaboración de una cartografía geomorfológica de fenómenos y de indicios de actividad relacionados con los movimientos de ladera para que, a partir de la aplicación de matrices magnitud/frecuencia, delimitar cartográficamente la peligrosidad asociada.

Se ha identificado peligrosidad por movimientos de ladera en el 46% de las playas, mientras que en el otro 54% no se ha observado peligrosidad. Los resultados desglosados muestran que los desprendimientos son el principal fenómeno. Se ha diagnosticado peligrosidad baja por desprendimientos en el 30% de las playas, media en el 15% y alta en el 1% de los casos. Sólo en el 3% de las playas se ha evaluado peligrosidad por deslizamientos.

### 3.5. Modelo de inundación permanente por la subida del nivel del mar, mapa de probabilidad de inundación permanente (MPIP) y visor web

Motivado por el actual aumento del nivel del mar (C3S, 2024) se ha generado el Modelo de inundación permanente por la subida del nivel del mar según las proyecciones del sexto informe del IPCC (NASA, 2022) y un visor para su consulta (ICGC, 2024d). Mediante un modelo bañera de inundación, se han aplicado dichas proyecciones sobre Modelos Digitales del Terreno (2x2m y 1x1m) y se ha obtenido la superficie inundada por el aumento del nivel del mar, los calados y el mapa de probabilidad de inundación permanente (MPIP). Esta última cartografía, muestra la probabilidad de inundación de 45 escenarios considerados en el sexto informe para cada celda ráster, mediante una escala de color semafórica. La superficie calculada con cualquier probabilidad de inundación permanente por ascenso del nivel del mar es de 173 $km^2$, que equivale al 8% de la superficie de los municipios litorales.

## 4. Conclusiones

Los trabajos presentados en este artículo sobre los peligros de inundación, erosión y movimientos de ladera realizados en 2023 demuestran la importancia que tienen estos fenómenos en el litoral de Catalunya. Estos estudios

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

tienen continuidad en el tiempo, ya sea ampliándolos, actualizando la información y los visores, o generado nuevos análisis en el marco del proyecto SIDL. Así, el SIDL es una herramienta de conocimiento imprescindible para la realización de los estudios que permiten afrontar los retos presentes y las futuras amenazas climáticas y medioambientales. La información que incluye permite planificar, priorizar, reaccionar y actuar.

## 5. Referencias

Carles, R., González, M., Pinyol, J., Sánchez, E. & Micheo M.J. (2023). Cartografia de la superficie inundada por la borrasca Gloria (19-23 de enero de 2020) en la franja litoral catalana. En Desir, G., Nadal, E. y Regües, D. (Eds.), *Libro de actas de la XVI Reunión Nacional de Geomorfología* (pp. 110-111). SEG. http://doi.org/10.20350/DIGITALCSIC/12496

C3S. 2024. The Copernicus Climate Change Service. *Climate indicators*. https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-level

GENCAT. (2021). *Un litoral al límit. Recomanacions per a una gestió integrada de la costa catalana. Informe 1/2021*. Generalitat de Catalunya. https://cads.gencat.cat/web/.content/Documents/Informes/2021/informe-Un-Litoral-al-Limit.pdf

GENCAT. (2022, septiembre). *El Fondo Climático*. https://canviclimatic.gencat.cat/es/ambits/Llei_canvi_climatic/el-fons-climatic/index.html

GENCAT. (2023). *Dades d'afluència als allotjaments turístics. 2023*. https://empresa.gencat.cat/ca/treb_ambits_actuacio/turisme/coneixement_planificacio/estadistiques-turistiques/

González, M. Pinyol, J. & P. Oller. (2016). The geological multi-hazard map of Catalonia. A user-friendly tool for land use planning and management risk. En Aversa et al. (Eds.), *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* (pp. 999-1002). AGI.

González, M., Pinyol, J., Micheo, M. J., Carles, R., Pi, E., Vilà, M., Soldevila, E., Picart, J., Subiela, G., Peña, J., Reixach, J., & Sánchez, E. (2020). *El temporal Gloria (19-23/1/2020): Els efectes dels processos geològics sobre el territori. Monografia 8*. ICGC.

ICGC. (2021). *Informe de riesgos de la costa catalana frente al cambio climático (proyecto PIMA Adapta Costas)*. ICGC.AP-0044/21. https://canviclimatic.gencat.cat/es/oficina/publicacions/estudis_adaptacio/index.html

ICGC. (2024a). *Informe de resposta ràpida de la Borrasca Nelson: Anàlisi dels efectes sobre el litoral.* ICGC.RN-0010/2024. Informe interno.

ICGC. (2024b). *Visor general web del proyecto SIDL*. https://visors.icgc.cat/sidl/

ICGC. (2024c). *Visor de l'evolució de la costa*. https://visors.icgc.cat/costa/

ICGC. (2024d). *Visor Inundació permanent per la pujada del nivell del mar*. https://visors.icgc.cat/inundacio-permanent/

ICGC. (2024e). *¿Ha observado un temporal de mar?* https://www.icgc.cat/es/El-ICGC/Contacto/Buzones-especificos/

ICGC. (2024f). *Inventari d'afectacions per temporals de mar durant l'any 2023*. ICGC.RN-0009/24. Informe interno.

IDESCAT. (2023). *Población. Municipios. 2023*. https://www.idescat.cat/indicadors/?id=aec&n=15903&lang=es

MITECO. (2020). *PIMA Adapta. Conocimiento y acción frente a los riesgos derivados del cambio climático.* O.E.C.C. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

NASA. (2022*). Sea Level Projection Tool*. https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool.

Puertos del Estado. (2024). *Visor Portus*. https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx.

Rodriguez, X., Vilà, M., Pi, R., Mora, O., Pérez-Aragüés, F. & Marturià, J. (2018). *Subsidence Susceptibility of the Ebro Delta Plain.* Project Ebro ADMICLIM, European Commission LIFE Programme: LIFE13 ENV/ES/001182.

Sánchez-Artús, X., Gracia, V., Espino, M., Sierra, J.P., Pinyol, J., & Sánchez-Arcilla, A. (2023) *Present and future flooding and erosion along the NW Spanish Mediterranean Coast.* Front. Mar. Sci. 10:1125138. doi: https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1125138

USGS. (2022, diciembre). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*. https://www.usgs.gov/centers/whcmsc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18692

# Análisis preliminar de la cartografía geomorfológica de las superficies inundadas por temporales recientes en la franja litoral catalana

*Preliminary analysis of the geomorphological mapping of the surfaces flooded by recent storms in the Catalan coastal strip*

**Rosa Carles[a], Fus Micheo[b], Jordi Pinyol[c], y Marta González[d]**

[a]ICGC, Rosa.Carles@icgc.cat Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Barcelona; [b]ICGC, , fus.micheo@icgc.cat; [c]ICGC, , Jordi.Pinyol@icgc.cat; [d]ICGC, , Marta.Gonzalez@icgc.cat.

How to cite: Carles, R.; Micheo, F.; Pinyol, J. y González, M. 2024. Análisis preliminar de la cartografía geomorfológica de las superficies inundadas por temporales recientes en la franja litoral catalana. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18692

***Abstract***

*The current climatic emergency situation we are facing, where a greater frequency and intensity of sea storms affecting the Mediterranean coast is expected, and consequently, an increase in the coast vulnerability, knowledge of the current state of the coastline must be increased. Thus, it is essential to know the effects of coastal dynamics on the territory in high-energy episodes, such as those generated by sea storms.*

*With this aim, the Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) has carried out a geomorphological mapping of flooded surfaces by recent storms and has analyzed their effects. In this work we present a first qualitative analysis of this study, taking as a reference the geomorphological effects triggered by Gloria storm, the most important and catastrophic sea storm of the last decade. This analysis will provide new data and knowledge on how coastal dynamics transforms the coastline, a key point for governments to promote and implement effective strategies to mitigate the storms impact, reducing damage and increasing the resilience of the coast.*

***Keywords:*** *coastal dynamics, sea storm, erosion, geomorphological mapping*

***Resumen***

*Ante la actual situación de emergencia climática a la que nos enfrentamos, donde se prevé una mayor frecuencia e intensidad de los temporales marítimos que afectan el litoral mediterráneo debemos incrementar el conocimiento sobre el estado actual en que éste se encuentra. Para ello, es fundamental conocer los efectos que ocasiona la dinámica litoral sobre la franja costera durante episodios de alta energía, como son los generados por los temporales marítimos.*

*Con este objetivo desde el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC, en adelante) se han realizado las cartografías geomorfológicas de las superficies inundadas generadas por los temporales de los que se dispone de imágenes aéreas y satelitales obtenidas inmediatamente después del temporal, y se han analizado sus efectos. En este artículo se presenta un primer análisis de este estudio tomando como referencia los efectos geomorfológicos desencadenados por la borrasca Gloria, por ser el temporal marítimo más importante y catastrófico de la última década. Este análisis aporta nuevos datos y conocimiento sobre cómo la dinámica litoral transforma la línea de costa en Catalunya, punto clave para que las administraciones puedan impulsar y ejecutar estrategias eficaces que mitiguen el impacto de los temporales, reduciendo sus efectos e incrementando la resiliencia del litoral.*

***Palabras clave:*** *dinámica litoral, temporales marítimos, erosión, cartografía geomorfológica*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

En el actual contexto de cambio climático al que nos enfrentamos, de acuerdo con las proyecciones climáticas, los temporales marítimos altamente energéticos podrían aumentar su frecuencia e intensidad. Si, además, tenemos en cuenta la alta antropización y ocupación de la franja costera, el resultado es una mayor exposición a los riesgos litorales. El litoral catalán en las últimas décadas ha sufrido una gran transformación y presión debido a la actividad antrópica, tanto por el aumento de la población como por el gran desarrollo del sector turístico e industrial. Esta presión queda reflejada en el hecho que la franja costera se encuentra urbanizada en un 59 % en los 100 primeros metros, cifra que aumenta al 81 % si no se tiene en cuenta el Cap de Creus y el Delta de l'Ebre (GENCAT, 2024). Por otra parte, según los datos publicados en el Sexto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2023), si nos fijamos en las proyecciones climáticas, se prevé una mayor frecuencia e intensidad de los temporales marítimos en el Mediterráneo y una subida significativa del nivel del mar. Por consiguiente, nos encontramos con un litoral altamente antropizado que debe hacer frente a los efectos de los temporales marítimos. Teniendo en cuenta este contexto, si se quieren mitigar los efectos del cambio climático y reducir los riesgos a los que está expuesta la franja litoral es necesario que las administraciones afronten la gestión del litoral con la máxima información posible.

Con este propósito, en el año 2022, el departamento d'Acció Climática, Alimentació i Agenda Rural de Catalunya impulsó el Servicio de Información de la Dinámica Litoral (SIDL), financiado por el Fons Climàtic (GENCAT, 2022), con la supervisión de la Comisió Interdepartamental del Canvi Climàtic y con la asistencia técnica de la Comissió de Fons Climàtic. El SIDL pretende ser un instrumento que aglutine el conocimiento sobre la franja litoral y que promueva sinergias entre organismos públicos, centros de investigación, empresas y ciudadanía en general, todo ello con el objetivo final de que el SIDL sea la herramienta que reúna todo el conocimiento del litoral en una misma interfaz de visor de mapas. El ICGC es el organismo responsable de liderar y coordinar el proyecto SIDL y, en este marco, está llevando a cabo diversos trabajos entre los que se encuentra el presente estudio.

Las cartografías geomorfológicas de los efectos desencadenados por temporales recientes que presentamos en este trabajo son de gran utilidad para comprender la dinámica litoral, evaluar el impacto sobre el territorio, validar los escenarios de peligrosidad actuales y generar escenarios futuros teniendo en cuenta las previsiones del cambio climático. Con este trabajo se obtendrá un registro de la evolución morfodinámica del litoral después de episodios altamente energéticos. Como antecedentes a estas cartografías están los trabajos que realizó el ICGC después de las graves afectaciones que causó la borrasca Gloria en toda la península y, en especial, en Catalunya, de los que destacan: *El temporal Gloria (19-23/1/2020): Els efectes dels processos geològics sobre el territori* (González et al. 2020) y la *Cartografía de la superficie inundada por la borrasca Gloria (19-23 de enero de 2020) en la franja litoral catalana* (Carles et al. 2023), encargada por el Pla de protecció i ordenació del litoral (PPOL, 2020). Los resultados y el análisis de estos trabajos pusieron de manifiesto la necesidad de disponer de un registro de los efectos causados. El posterior análisis de estos conjuntos de datos es clave para identificar los tramos de costa más expuestos al impacto de los temporales, ya que permite analizar su evolución desde un punto de vista morfodinámico y es el punto de partida para la evaluación de los riesgos litorales de inundación y erosión.

## 2. Área de estudio y su contexto geomorfológico

El ámbito de estudio abarca todo el litoral de Catalunya, situado al NE de la Península Ibérica, desde Cap Falcó (Girona) hasta el río la Sènia (Tarragona). La extensión analizada es de 911 km de costa a escala 1:5.000 (ICGC, 2021) entre los que se incluyen más de 621 playas, 70 municipios costeros y 47 puertos (IDESCAT, 2023).

En función de la configuración geológica y del grado de actividad antrópica de la franja costera, se pueden distinguir 6 tipos de costa en el litoral catalán: costa rocosa y abrupta, costa baja rocosa, costa deposicional, costa de llanura litoral, costa deltaica y costa modificada antrópicamente (ICGC, 2024a). Desde un punto de vista geomorfológico, los tramos de costa más expuestos a los riesgos litorales son los deltas, los sistemas playa-dunas y las zonas antropizadas. Ejemplo de ello son los últimos informes realizados por el ICGC, según los cuales, aproximadamente el 60 % de las casi 600 playas estudiadas presenta una clara tendencia regresiva de la línea costa

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

desde los años 60 (ICGC, 2024b). En el mismo sentido, otros estudios estiman que, en el último siglo, el 61 % de las playas se han visto afectadas por la desaparición de las dunas, el 29 % han disminuido su extensión y tan solo el 10 % no presentan cambios significativos (Garcia-Lozano et al. 2017). En este trabajo nos centraremos en identificar aquellos tramos de costa que sufren mayor impacto de los temporales recientes, a la vez que, analizaremos su respuesta ante episodios altamente energéticos.

## 3. Temporales marítimos estudiados

Una herramienta indispensable para poder realizar la cartografía geomorfológica es disponer de imágenes aéreas de alta resolución inmediatamente después de cada temporal. Desde 2017, el ICGC realiza vuelos fotogramétricos de la costa tras episodios significativos de los que se obtienen imágenes con resoluciones que varían entre 10 a 25 cm/píxel. En total, se cuenta con imágenes aéreas de 9 temporales, a las que hay que sumar las imágenes satelitales del Pléiades Neo del temporal Isaack, con una resolución de 30 cm\píxel, ya que para este temporal no se realizó el vuelo fotogramétrico. Las últimas imágenes incorporadas al estudio corresponden al temporal Nelson, el cual impactó sobre la costa catalana entre el día 26 de marzo y 1 de abril de 2024. Cabe destacar que el ICGC pone a disposición de los usuarios todas las imágenes adquiridas a través del *Visor de l'evolució de costa* y del Geoservicio WMS de Costa, ambos disponibles en la web del instituto (ICGC, 2024c). En la fig. 1 se presentan las imágenes de las coberturas de los vuelos de cada uno de los temporales estudiados, indicando la fecha de inicio del temporal y el porcentaje de extensión de cada vuelo respecto a la extensión total de la costa catalana.

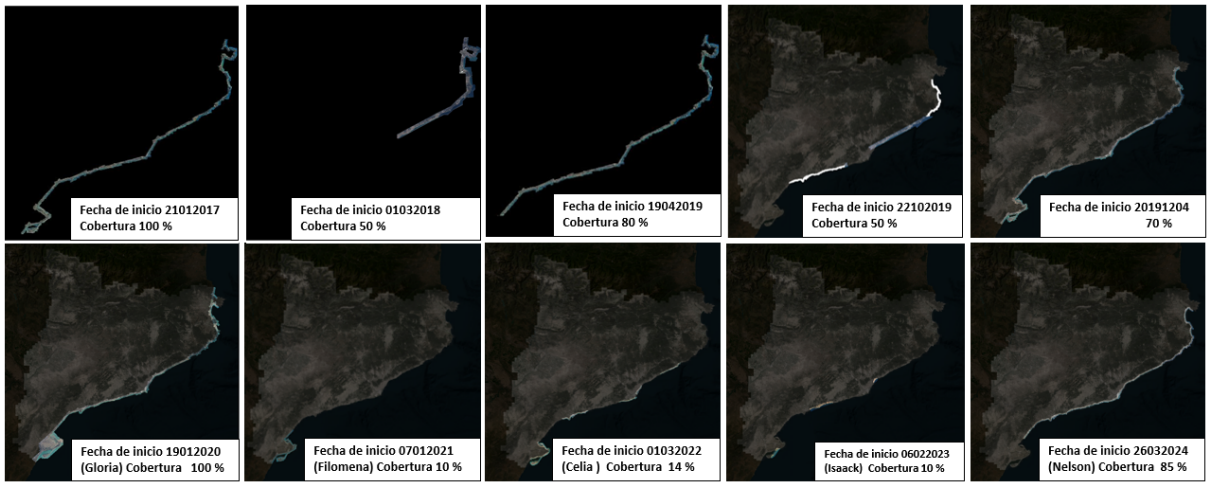



***Fig. 1.*** *Imágenes con la cobertura de los vuelos realizados por el ICGC después de cada temporal, extraídas del visor de costa de l'ICGC, indicándose el día de inicio del temporal y el % de cobertura del vuelo respecto el total de la costa.*

## 4. Metodología

Con el objetivo de realizar cartografías homogéneas para todos los temporales se han elaborado las correspondientes especificaciones técnicas (ICGC, 2024d) que marcan los criterios cartográficos a seguir. La metodología llevada a cabo para la realización de la cartografía geomorfológica, a escala 1:5.000, consta de 2 fases, una primera de recopilación y análisis de información bibliográfica y gráfica; y una segunda, de fotointerpretación de las imágenes aéreas.

### 4.1. Recopilación y análisis de información bibliográfica y gráfica multimedia

En la primera fase se realiza la recopilación y análisis de bibliografía, de artículos científicos y de informes técnicos sobre los temporales disponibles. En esta fase, también se lleva a cabo la búsqueda exhaustiva de noticias publicadas tanto en la prensa como en las redes sociales. El objetivo es obtener imágenes multimedia de las zonas afectadas mientras transcurría el temporal y en los momentos inmediatamente posteriores. Queremos destacar el

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

gran valor que aportan estos datos ya que recogen información sobre los efectos más efímeros producidos por los temporales y, a la vez, son clave para cartografiar la máxima extensión de la inundación tierra adentro.

### 4.2. Fotointerpretación de las imágenes de los vuelos fotogramétricos

Durante la segunda fase se realiza la cartografía de los efectos desencadenados por los temporales y la delimitación de la superficie de máxima inundación mediante fotointerpretación de las imágenes aéreas de los vuelos fotogramétricos, realizados por el ICGC inmediatamente después del temporal, y su comparación con la ortofoto anterior. En las cartografías se han identificado los efectos geomorfológicos relacionados con las dinámicas litoral, fluvial y de ladera. Los rasgos geomorfológicos cartografiados han sido, los escarpes de erosión litoral, la identificación de sectores con erosión o acreción en playas, la formación de depósitos y abanicos de desbordamiento, los cauces fluviales funcionales durante el temporal, la acumulación de flotantes y de basuras marinas, los daños en infraestructuras antrópicas, así como la superficie de máxima inundación. En la fig. 2 se representan los efectos geomorfológicos generados por el temporal Gloria en la desembocadura del río Ebre.

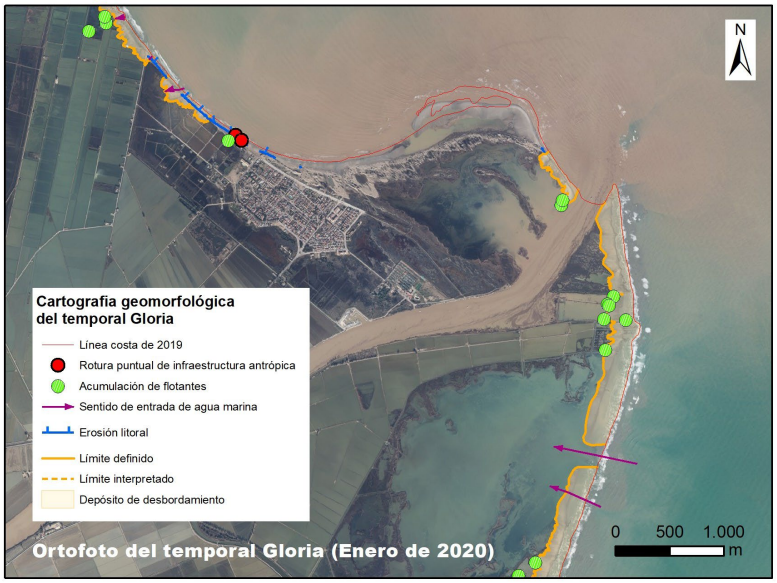



***Fig. 2**. Detalle de la cartografía geomorfológica de la desembocadura del río Ebre, de la que destaca la erosión en los sistemas playa-duna, la formación de extensos depósitos de desbordamiento y la inundación por agua marina.*

## 5. Resultados y análisis

La cartografía geomorfológica obtenida en este trabajo es homogénea y continua a lo largo de toda la costa, lo que permite realizar un análisis cualitativo de los efectos de los temporales y un análisis de la respuesta del litoral ante episodios altamente energéticos.

En el momento de redactar este artículo se ha validado la cartografía de 6 de los 10 temporales incluidos en el estudio, que corresponde a unos de 3.500 km de costa analizada a escala 1:5000. De todos ellos, el temporal generado por la borrasca Gloria ha sido, con diferencia, el que más impacto y daños ha causado, por lo que debe considerarse como el temporal de referencia para la modelización de escenarios futuros. De este se ha obtenido una cartografía geomorfológica de las superficies inundadas y de sus efectos que abarcan una extensión de más de 300 $km^2$ a lo largo de todo el litoral catalán, calculada a partir de la línea de costa anual del 2019.

Del análisis preliminar de dichas cartografías se han identificado diversos sectores afectados de manera recurrente por los temporales analizados. En conjunto, estos sectores suponen casi el 48 % del litoral y, en todos ellos, se ha constatado que los efectos que provocan una mayor transformación de la línea de costa y que provocan más daños son la erosión litoral, la formación de depósitos de desbordamiento y la inundación marina. Los tramos más destacables en cuanto a extensión y continuidad de la afectación son los correspondientes a: los deltas de la

 BY-NC-SA

Tordera, del Llobregat y de l'Ebre, los sistemas fluvio-deltaicos del Fluvià-Muga y del Ter, un sector de la costa del Maresme (desde Santa Susanna hasta Montgat) y dos sectores de la costa Daurada (uno desde Cunit a Tarragona y el otro de Salou a l'Hospitalet de l'Infant). A ellos, se les tiene que sumar algunos tramos de costa, de menor extensión, pero con una gran presión antrópica, que también sufren de manera recurrente el impacto de los temporales. Nos estamos refiriendo a los tramos de costa entre Vilanova i la Geltrú y Cubelles, del litoral de la ciudad de Barcelona y de Badalona, además de poblaciones costeras como l'Escala, Palamós, Sant Antoni de Calonge, Tossa de Mar y Lloret de Mar, entre otras.

Si bien los tramos de costa que sufren reiteradamente el embate de los temporales marítimos se distribuyen a lo largo del litoral catalán, si se tienen en cuenta la tipología de costa, estos se concentran principalmente en tramos de costa deltaica y tramos de costa modificada antrópicamente, lo que suponen un 16 % y un 16,5 % del total de la costa, respectivamente. En menor medida, se localizan en tramos de costa baja deposicional (8,5 %), en tramos de costa baja rocosa (3,5 %) y en tramos de costa de llanura aluvial litoral (3,5 %). En cambio, en el 52 % restante de costa, los efectos de los temporales marítimos son de menor impacto y no causan modificaciones importantes en la línea de costa. Como era de esperar, la mayoría de estos corresponde a tramos de costa rocosa y abrupta (34 %), puesto que, en estos tramos, debido a su configuración geomorfológica, suelen generar pocos efectos relacionados con la inundación y erosión, y más con la dinámica de ladera, desprendimientos y deslizamientos. El resto corresponde a tramos modificados antrópicamente (11 %), a tramos de costa baja rocosa (4,1 %) y a tramos de costa baja deposicional (2,9 %).

En la fig. 3, se muestran dos ejemplos de los efectos causados por los temporales marítimos que se han producido de manera reiterada en dos localidades de la Costa Daurada, situados en tramos de costa baja deposicional, como son la formación de depósitos de desbordamiento en Torredembarra y la inundación por la entrada de agua en el municipio de Mont-Roig del Camp.




***Fig. 3**. La entrada de agua marina favorece la formación de depósitos de desbordamientos y provoca fuertes inundaciones. En la izquierda, imagen de Torredembarra donde se muestra un depósito de desbordamiento que se ha formado hasta en tres ocasiones por diferentes temporales. En la imagen de la derecha, se representa el alcance máximo de la superficie inundada en Mont-Roig del Camp en distintos episodios.*

## 6. Conclusiones

La evaluación del impacto de los temporales mediante la realización de cartografías geomorfológicas y su posterior análisis aportan información relevante sobre la capacidad de recuperación del litoral ante este tipo de eventos, información necesaria para aplicar planes de protección, restauración y naturalización del litoral.

El requisito indispensable para la realización de estas cartografías es disponer de imágenes de alta resolución inmediatamente después del episodio que se quiera analizar.

De todos los efectos geomorfológicos desencadenados por los temporales estudiados, los que implican un mayor impacto y modifican más la línea de costa son: la erosión de los sistemas playa-duna, la formación de depósitos de desbordamiento y la inundación marina. Todos ellos repercuten negativamente sobre todo el litoral, pero, en

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

especial, sobre los sistemas playa-duna, los cuales actúan como primera barrera para mitigar el impacto de los temporales y que actualmente se ven amenazadas por la antropización y por la mayor frecuencia de episodios altamente energéticos. Por ello, conocer la distribución y evolución reciente de estos sistemas playa-duna es clave para desarrollar estrategias de protección y conservación del litoral.

Por otra parte, disponer de las líneas de costa digitalizadas para cada uno de los temporales, permitirá obtener datos cuantitativos de las superficies inundadas y del retroceso, acreción o estabilidad de la línea de costa.

Es necesario insistir que, con todos los datos y conocimiento aportados con este tipo de estudios, los gobiernos deberían impulsar y llevar a cabo estrategias sostenibles de protección y mitigación de los riesgos a los que se enfrenta el litoral catalán. En este sentido, el conocimiento sobre el litoral que estamos elaborando en el ICGC se está utilizando como información de base para las propuestas de gestión que implemente el PPOL.

## 7. Referencias

Carles, R., González, M., Pinyol, J., Sánchez, E. & Micheo M.J. (2023). Cartografia de la superficie inundada por la borrasca Gloria (19-23 de enero de 2020) en la franja litoral catalana. En Desir, G., Nadal, E. y Regües, D. (Eds.), *Libro de actas de la XVI Reunión Nacional de Geomorfología* (pp. 110-111). SEG. http://doi.org/10.20350/DIGITALCSIC/12496

Garcia-Lozano, C, Pintó, J. y Daunis-i-Estalleda, J. *Retroceso de las dunas costeras en el litoral catalán a lo largo del último siglo*. Libro de actas de IX Jornadas de Geomorfología Litoral (Menorca, 2017), (pp. 123-126). Geo-temas ISSN 1576-5172.

GENCAT. (2022, septiembre). *El Fondo Climático*. https://canviclimatic.gencat.cat/es/ambits/Llei_canvi_climatic/el-fons-climatic/index.html

GENCAT. (2024). *Configuració del litoral Catalá.* https://territori.gencat.cat/ca/06_territori_i_urbanisme/costes_i_muntanya/la_costa_catalana/la_costa_catalana/index.html

González, M., Pinyol, J., Micheo, M. J., Carles, R., Pi, E., Vilà, M., Soldevila, E., Picart, J., Subiela, G., Peña, J., Reixach, J., & Sánchez, E. (2020). *El temporal Gloria (19-23/1/2020): Els efectes dels processos geològics sobre el territori. Monografia 8*. ICGC.

ICGC. (2021). *Informe de riesgos de la costa catalana frente al cambio climático (proyecto PIMA Adapta Costas)*. ICGC.AP-0044/21. https://canviclimatic.gencat.cat/es/oficina/publicacions/estudis_adaptacio/index.html

ICGC. (2024a). *Caracterització geomorfològica de la costa catalana.* ICGC.RN-0012/2024. Informe interno.

ICGC. (2024b). *Evolución de la línea de costa en playas (1956 y 2019).* ICGC.AP-0009/23. Informe interno.

ICGC. (2024c). WMS Costa y visor evolución de la costa. https://www.icgc.cat/es/Datos-y-productos/Servicios-en-linea-Geoservicios/WMS-Ortoimatges/WMS-Costa

ICGC. (2024d). *Especificacions per a la realització de la cartografia de les superfícies inundades i dels efectes geomorfològics desencadenats per temporals marítims a la franja litoral catalana*. RN-0011/24.

IDESCAT. (2023). *Población. Municipios. 2023*. https://www.idescat.cat/indicadors/?id=aec&n=15903&lang=es

IPCC. (2023). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/

PPOL. (2020) Pla de protecció i ordenació del litoral (Llei 8/2020, del 30 de juliol de protecció i ordenació del litoral) https://participa.gencat.cat/processes/ppol

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18712

# Análisis de la percepción social de las estrategias de acomodación y las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) en el frente litoral catalán

*Analysis of the social perception of accommodation strategies and Nature Based Solutions (NBS) on the Catalan coastline*

**Montse Badia, Elsa Giffard, Míriam Villares, Elisabet Roca**
[a]Instituto en Ciencia y Tecnología de la Sostenibilidad. Universitat Politècnica de Catatalunya (UPC, Barcelona-Tech), montse.badia.puyol@upc.edu, elsa.giffard@upc.edu, miriam.villares@upc.edu, Elisabet.roca@upc.edu

How to cite: Badia, M.; Giffard, E.; Villares, M. y Roca, E. 2024. Análisis de la percepción social de las estrategias de acomodación y las NBS en el frente litoral catalán. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18712

***Abstract***

*The Mediterranean coastal zone faces a significant increase in coastal risks due to climate change. Traditional adaptation strategies are no longer sufficient and more disruptive solutions are needed, such as Nature-Based Solutions (NBS) and the setback of seawalls. However, the implementation of these measures must consider the potential social conflicts that may arise. This study analyzes the social perception of NBS and the setback of seawalls in the Catalan coastal zone, both regionally and in three specific case studies in the province of Tarragona. Preliminary results show an openness to these measures, but there are also concerns about their social impacts. It is expected that the research will continue to better understand social perception, identify the barriers and opportunities of these measures, and propose a list of effective and socially acceptable coastal adaptation strategies.*

***Keywords:*** *Adaptation to climate change, coastal management, Nature Based Solutions (NBS) or dune regeneration, seafront setbacks, social perception, etc.*

***Resumen***

*La zona costera mediterránea se enfrenta a un aumento significativo de los riesgos costeros debido al cambio climático. Las estrategias de adaptación tradicionales ya no son suficientes y se necesitan soluciones más disruptivas, como las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) y el retranqueo de paseos marítimos. Sin embargo, la implementación de estas medidas debe considerar los posibles conflictos sociales que puedan surgir. Este estudio analiza la percepción social de las SBN y el retranqueo de paseos marítimos en la zona costera catalana, tanto a nivel regional como en tres casos de estudio específicos de la provincia de Tarragona. Los resultados preliminares muestran una apertura a estas medidas, pero también existen preocupaciones sobre sus impactos sociales. Se espera que la investigación continúe para comprender mejor la percepción social, identificar las barreras y oportunidades de estas medidas y proponer un listado de estrategias de adaptación costera efectivas y socialmente aceptables.*

***Palabras clave:*** *Adaptación al cambio climático, gestión costera, Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), retranqueo de paseos marítimos, percepción social*

## 1. Introducción

El objetivo de esta comunicación es divulgar los resultados preliminares de la investigación desarrollada en el marco del proyecto "CoastSpace: A la búsqueda de espacio de acomodación para la adaptación de la zona costera a los riesgos presentes y futuros"

La zona costera es una de las áreas más expuestas a riesgos de la Tierra debido a la concentración de amenazas naturales derivadas del cambio climático y la acumulación de infraestructuras. En este sentido, la costa

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

mediterránea es un punto crítico debido a su gran desarrollo urbano, su economía orientada al turismo de playa y el hecho de que las mareas bajas hayan propiciado la construcción y el establecimiento de poblaciones muy cerca de la playa (MedECC, 2020). En el caso del litoral catalán, durante las últimas décadas se ha producido un aumento significativo de los daños asociados a las inundaciones y los peligros de la erosión (Jimenez et al, 2012). Esto se ha relacionado con un aumento de la exposición y la vulnerabilidad debido a la erosión progresiva de la costa, que reduce la protección que se brinda al territorio.

En las condiciones actuales, la costa mediterránea española ya presenta puntos críticos de exposición extrema a los riesgos costeros y daños recurrentes, además, en algunas zonas, la falta de espacio disponible para la adaptación natural a las nuevas condiciones -debido a la sobre artificialización y urbanización del litoral- puede provocar la erosión completa del terreno (Jiménez et al, 2017). Algunos entornos costeros que se enfrentan a los riesgos del cambio climático están empezando a gestionarse con Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS). Las estrategias basadas en la rehabilitación de infraestructuras verdes en municipios costeros, como la renaturalización y/o deconstrucción de los paseos marítimos, la renaturalización de las playas con ecosistemas dunares, se consideran adaptativas a los efectos del cambio climático ofreciendo estrategias prometedoras para mitigar los riesgos de inundación, combatir la erosión costera y hacer frente a los rentos que plantea la subida del nivel del mar (IPCC, 2022; C. García-Lozano, 2019). Aun así, pueden causar malentendidos que podrían provocar conflictos sociales entre el sector turístico del territorio (I. Sauer et al, 2022) y este hecho destaca la importancia de abordar dicha problemática con políticas bien orientadas que integren distintos organismos y actores (Siders, 2019), entre ellos, la ciudadanía misma.

Este estudio quiere analizar, mediante el lanzamiento de una encuesta a nivel de toda Cataluña, las percepciones de los usuarios del frente litoral catalán sobre los efectos del cambio climático, las preferencias por estrategias de adaptación y la evaluación de proyectos de reconstrucción de dunas. De esta manera, poder identificar las principales barreras y motores que pueden influir en la aceptación/rechazo social de la restauración de ecosistemas y la deconstrucción de infraestructuras como estrategia de adaptación. Recientemente, se ha constatado que hay usuarios que perciben este tipo de soluciones como una oportunidad para mejorar la calidad del medio ambiente, el paisaje y la capacidad de adaptación, frente a las opciones de ingeniería convencionales (I.Sauer et al, 2022) .

## 2. Área de estudio

Este trabajo quiere analizar dichas percepciones de los usuarios, en primer lugar, a nivel de toda Catalunya, y, en segundo lugar, se ha querido hacer el foco en tres casos de estudio diferentes de la provincia de Tarragona donde, o bien se están llevando a cabo, o bien se acaban de aprobar diferentes proyectos de regeneración y renaturalización de dunas y deconstrucción de paseos marítimos.

Los tres casos de estudio seleccionados para este trabajo se ubican dentro de la Costa Daurada, una de las principales atracciones turísticas de Catalunya, reconocida por su fuerte oferta de turismo de sol y playa. En las playas de los tres casos estudiados, el aumento de la erosión y el retroceso de la línea de costa son los problemas más urgentes para una gestión responsable de las playas. Cada uno de ellos responde a unas singularidades concretas que se definen en la siguiente tabla de manera titular:

***Tabla 1**. Descripción de los 3 municipios de estudio elegidos, Fuente: propia*

| Municipio | Nombre playa | Descripción |
|---|---|---|
| **Calafell** | Platja de Calafell | Playa urbana con dunas restauradas recientemente y con medidas de restauración en proceso de implementación |
| **Ampolla** | Platja de s'Arenal | Playa urbana con negocios/viviendas en primera línea de mar y muy pocos espacios destinados a la restauración dunar. |
| **Roda de Barà** | Platja llarga | Playa urbana con campings donde no se implementan medidas de gestión enfocadas a la restauración dunar y que la erosión compromete los límites actuales del camping. |

El objetivo principal de dichos proyectos es recuperar las funciones y servicios ecosistémicos como medida de protección del litoral costero para hacer frente a los diferentes riesgos. Las intervenciones forman parte de proyectos financiados con fondos públicos.

 BY-NC-SA

## 3. Metodología

Se propone hacer un sondeo de percepción social a través del método de la encuesta. Este es un cuestionario piloto, que nos ha de servir para testear el funcionamiento de las diferentes preguntas enunciadas y posteriormente poder crear un modelo de encuesta que pueda ser replicable de cara al futuro en otros contextos similares.

La encuesta se ha administrado de manera masiva al universo de usuarios potenciales del frente litoral catalán para obtener una muestra representativa de respuestas. La recolección de datos se realiza a través de un cuestionario online compuesto por 19 preguntas cerradas cuantitativas y una última pregunta abierta. El tratamiento de los resultados será analizado con Microsoft Excel. El diseño de la encuesta responde a los objetivos perseguidos y se estructura en cinco partes.

En primer lugar, se preguntan datos referentes al perfil sociodemográfico del encuestado (edad, sexo, nivel educativo, estado laboral, etc) y se le hace escoger una población del litoral catalán a analizar. Seguidamente, el segundo bloque hace referencia al análisis del nivel de conocimiento y la comprensión que tienen los encuestados sobre los diferentes riesgos costeros que sufre el litoral del municipio seleccionado y de la necesidad de su gestión. En la tercera parte se expone un listado de diferentes posibles soluciones para combatir y adaptarnos a dichos riesgos y se pretende evaluar la aceptación o el rechazo de cada estrategia de adaptación por parte del encuestado. Estas estrategias incluyen: la aportación frecuente de arena en las playas, la renaturalización de dunas como SBN, la construcción de obra rígida como diques, espigones, la deconstrucción de estructuras existentes y la des urbanización. Además, se analizan los factores que influyen en la aceptación o rechazo de las diferentes estrategias. La cuarta parte se propone evaluar el nivel de confianza que les ofrecen los diferentes actores involucrados en la gestión costera y, finalmente, la quinta parte está formada por preguntas que identifican la visión de los encuestados sobre el futuro del litoral catalán en el contexto del cambio climático y las diferentes amenazas que sufre la costa.

## 4. Resultados y discusión

En este apartado se presentan algunos resultados preliminares de la encuesta lanzada el conjunto de Catalunya en el marco del proyecto de investigación. La idea es que en un futuro se ofrecerá un análisis estadístico completo y detallado y, a la vez, se focalizará en los tres casos de estudio seleccionados y de toda Catalunya ya que la muestra de respuestas se buscará más elevada y, por lo tanto, más significativa.

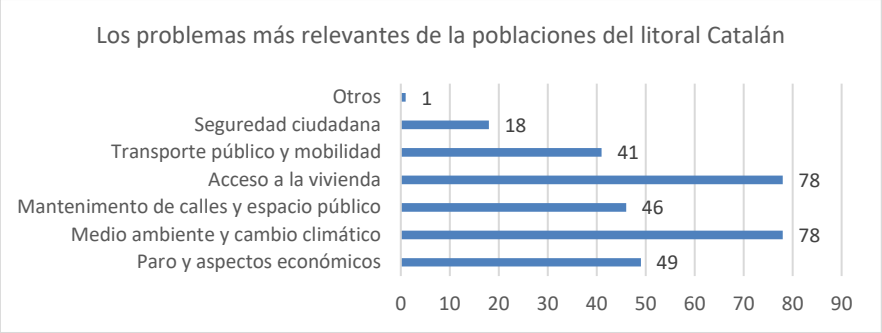



***Fig. 1**. Nº total de respuestas referentes a la valoración de los problemas más relevantes de las poblaciones del litoral catalán. Fuente: propia*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

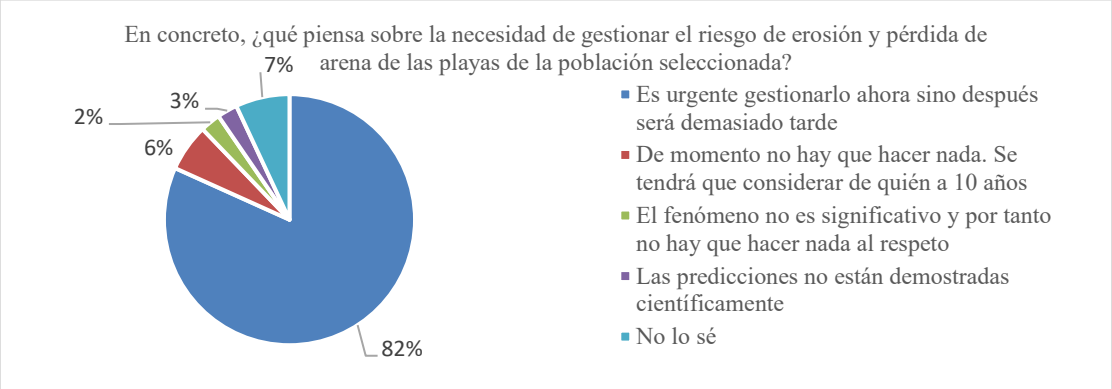



***Fig. 2**. Valoración en % de la necesidad de gestionar el riesgo de erosión y la pérdida de arena de las playas de la población seleccionada. Fuente: propia*

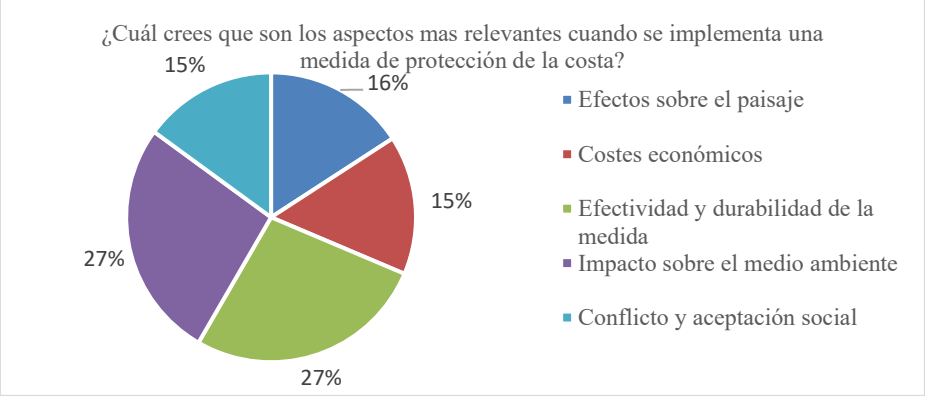
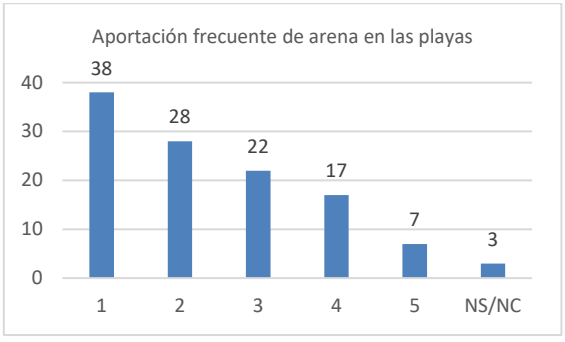
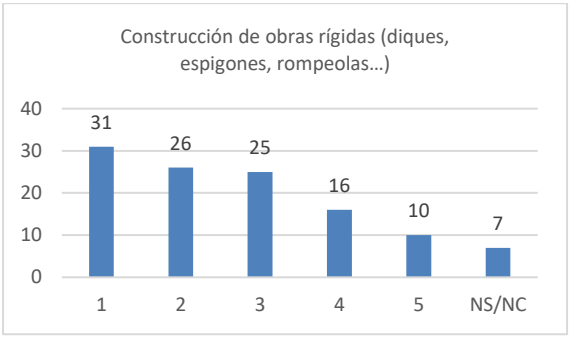
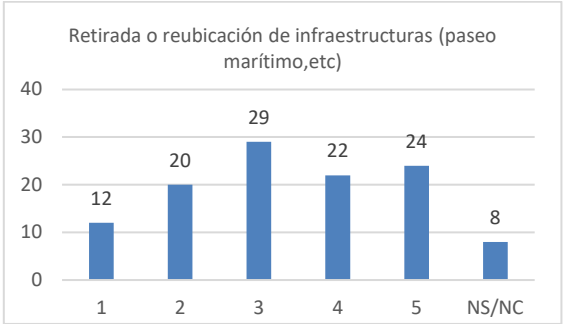
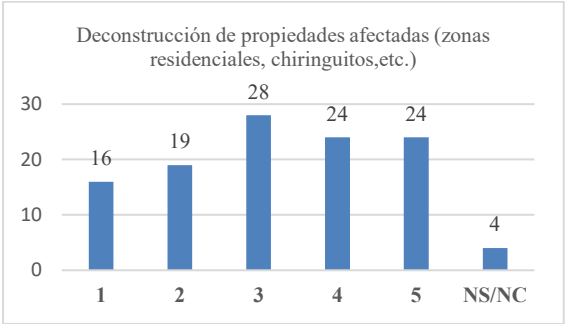



***Fig. 4**. Relevancia ( %) de los aspectos a tener en cuenta en una medida de adaptación de protección de la costa. Fuente: propia, 2024*





BY-NC-SA

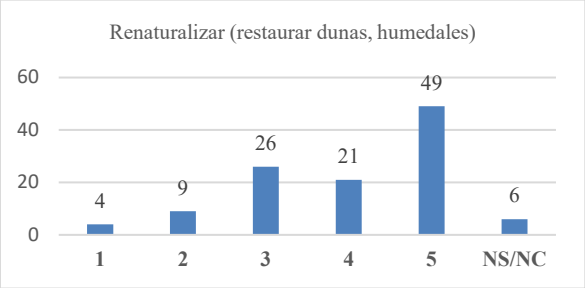



***Fig. 3***. *Nº total de respuestas referentes a la valoración de las siguientes medidas de actuación para hacer frente a los riesgos costeros de la población seleccionada. Fuente: propia, 2024*

En la fig. 1, se muestran los resultados de 4 de las 19 preguntas que tiene la encuesta. Los encuestados creen que los principales problemas que afectan al litoral de la población seleccionada son el acceso a la vivienda y el medio ambiente y cambio climático en igual proporción. En segundo lugar, se encuentran problemas del tipo económico. Ligada a esta pregunta, en la fig. 2 se constata que un 82% reconoce que es urgente gestionar los riesgos costeros ahora, antes de que sea demasiado tarde. Pero es cuando se pregunta por la forma de actuar cuando aparecen algunas divergencias. Aun así, se identifica bastante soporte a las medidas basadas en re naturalizar les frentes litorales (fig. 3), seguido de deconstrucción de propiedades afectadas o retirada i/o reubicación de infraestructuras. En cambio, hay una puntuación más baja referente a las medidas de aportación frecuente de arena en las playas y a la construcción de obras rígidas (diques, espigones, rompeolas, etc). Además, dichos encuestados creen que el impacto sobre el medio ambiente y los efectos sobre el paisaje son uno de los factores más relevantes para tener en cuenta a la hora de implementar una medida de protección de la costa (fig. 4). La efectividad y la durabilidad de la medida son, en segundo lugar, los factores más importantes a considerar en este tipo de gestiones costeras. Es necesario remarcar que este análisis preliminar está basado solamente en 110 respuestas y que un 51% de los encuestados tienen entre 16 y 35 años. Es decir, se identifica una tendencia juvenil en la muestra poblacional sesgada. Esto significa que los resultados pueden variar en los próximos meses cuando la muestra sea más representativa e idealmente más heterogenia.

La propuesta metodológica es hacer un análisis de perfiles de personalidades e identificar los diferentes grupos sociales con percepciones y tendencias comunes basados en la edad, el nivel de estudios, la ubicación de residencia, etc, y caracterizar su punto de vista. Esto nos va a permitir identificar los patrones de los diferentes grupos de la población que pueden ser relevantes para diseñar propuestas de gestión y sensibilización de los riesgos costeros y obtener más aceptación social por parte de la ciudadanía.

La difusión de la encuesta, a su vez, es una manera de aumentar la sensibilización y pedagogía sobre qué son las soluciones basadas en la naturaleza y pretende ayudar a eliminar las barreras para su implementación y permitir un cambio de paradigma desde estrategias protectoras “hold-the-line” hacia estrategias adaptativas de relocalización y renaturalización.

Además, la comparación de los resultados a nivel catalán con los de los tres casos de estudio seleccionados permitirá hacer una comparación entre los 3 y comprender mejor las dinámicas específicas que operan en cada contexto local, tomando en cuenta las variables políticas y sociales que inciden en la implementación de los proyectos relacionados con la gestión de los riesgos costeros.

## 5. Conclusiones

La zona costera mediterránea, altamente vulnerable al cambio climático, requiere estrategias de adaptación disruptivas que vayan más allá de la protección costera tradicional. Actualmente, se ofrecen alternativas prometedoras, pero su implementación debe considerar los posibles conflictos sociales. En este estudio se analiza la percepción social de estas medidas en el ámbito del litoral catalán y hace una aproximación focal en tres casos específicos de playas en Tarragona,

Los resultados preliminares muestran una apertura a las NBS, pero también preocupaciones sobre sus impactos sociales. Se verá cómo evoluciona dicha percepción cuando se tenga más respuestas de la encuesta y se analizará, con más detalle los tres casos seleccionados, territorios altamente vulnerables a los riesgos costeros y caracterizados por vivir, principalmente del turismo de sol y playa.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Los resultados del análisis preliminar revelan que el acceso a la vivienda y el medio ambiente y cambio climático son los tres aspectos que más preocupan a los encuestados, seguidos de los problemas económicos. A pesar de la urgencia percibida por la mayoría de respuestas para actuar frente a los riesgos costeros, las preferencias en cuanto a las medidas de gestión son diversas. Se observa un fuerte apoyo a las medidas de renaturalización del frente litoral, seguidas de la deconstrucción de propiedades afectadas o la retirada y/o reubicación de infraestructuras. Las medidas menos populares son la aportación frecuente de arena en las playas y la construcción de obras rígidas. Es importante destacar que los resultados se basan en una muestra preliminar con un sesgo hacia la población joven (15-35 años). Por lo tanto, se considera necesario ampliar la muestra y diversificar la población objetivo para obtener resultados representativos para el conjunto catalán.

Se propone, también, realizar un análisis de perfiles de personalidad para identificar grupos sociales con percepciones y tendencias comunes sobre la gestión costera. Esta información permitirá diseñar propuestas de gestión y sensibilización más específicas y efectivas, con el objetivo de obtener una mayor aceptación social por parte de la ciudadanía. La encuesta también quiere servir como herramienta para aumentar la sensibilización sobre las soluciones basadas en la naturaleza para la gestión costera. Se espera que los resultados del estudio contribuyan a eliminar las barreras para la implementación de estas soluciones y a promover un cambio de paradigma en la gestión costera, desde estrategias de "mantener la línea" hacia estrategias adaptativas de relocalización y renaturalización.

Finalmente, la comparación de los resultados a nivel catalán con los de otros casos de estudio permitirá comprender mejor las dinámicas locales y las variables políticas y sociales que inciden en la implementación de proyectos de gestión de riesgos costeros e identificar buenas prácticas y áreas de mejora en la implementación de políticas públicas relacionadas con la gestión costera.

## 6. Agradecimientos

Esta investigación forma parte de los resultados del proyecto CoastSpace del Plan Estatal de Recuperación, Transformación y Resiliencia TED2021-130001B-C21.

## 7. Referencias

García-Lozano, C. (2019). Els sistemes dunars de la costa catalana. Evolució històrica, estat actual i potencial de restauració (Tesis doctoral). Universitat de Girona. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/338549423_Els_sistemes_dunars_de_la_costa_catalana_Evolucio_historica_estat_actual_i_potencial_de_restauracio [Consulta: 10 de junio de 2023].

Hilmi, N., Ali E, Cols, J.C., Cramer, W., Georgopoulou, E., Le Cozannet & G., Tirado, C., (2022). IPCC AR6 WGII Cross-Chapter Paper, vol 4. Mediterranean Region, *Copernicus Meetings*

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2022). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1st ed. *Cambridge University Press*. https://doi.org/10.1017/9781009157964

Jiménez, J.A., Sancho, A., Bosom, E., Valdemoro, H.I. & Guillén, J., (2012). Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008. *Geomorphology*, 143-144, 24-33. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.034

MedECC. (2020). Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current

Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report. Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP.

Sauer, I., Roca, E., & Villares, M. (2022). Beach users' perceptions of coastal regeneration projects as an adaptation strategy in the western Mediterranean. *Journal of Hospitality & Tourism Research*, 46(3), 418-441. https://doi.org/10.1177/1096348019889112

Siders, A. R. (2019). Managed retreat in the United States. *One Earth*, 1(2), 216-225. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.09.008

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18886

# Coastal changes and anthropogenic structures: An analysis of the beaches of the Gulf of Roses (NW Mediterranean Sea, Spain)

*Cambios costeros y estructuras antropogénicas: un análisis de las playas del Golfo de Roses (Mediterráneo NO, España)*

**Manel Salvador[a], Marta Guinau[b], José L. Casamor[a], and Antoni Calafat[a]**

[a]GRC in Marine Geosciences, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain, (manelsalvadorlopez@ub.edu, , jlcasamor@ub.edu, , antonicalafat@ub.edu). [b]GRC RISKNAT. Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain, , mguinau@ub.edu.

How to cite: Salvador, M.; Guinau, M.; Casamor, J.L. & Calafat, A. 2024. Coastal changes and anthropogenic structures: An analysis of the beaches of the Gulf of Roses (NW Mediterranean Sea, Spain). En libro de actas: XII Jornadas de Geomorfología Litoral. Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18886

## *Abstract*

*The main goal of this work is to assess the mid-short term (2004 to 2020) spatial and temporal width variations and sedimentological behaviour of the northern beaches of the Gulf of Roses (NW Mediterranean, Spain). The study zone covers 10 km at the northern part of the gulf. Two GIS methodologies were employed to quantify coastal changes by transects and by areas. Sediment samples were collected from both the dry beach and swash areas for each transect. Profile-based analysis shows an average annual rate of -0.11 m•y$^{-1}$ (ranging between 0.53 and -0.55 m•y$^{-1}$), while areal-based results indicate a total loss of -20810 m2 (-1300 m$^2$•y$^{-1}$). Sediment grain size decreases northward (from 745 to 264 µm in the swash zone). Changes in beach width and grain size illustrate the impact of anthropogenic structures on morphodynamic behavior. These structures preferentially deposit specific grain sizes and impede sediment transport, leading to increased beach width and sediment grain sizes upstream and a reverse process downstream, generating distinct morphodynamic behavior.*

***Keywords:*** *coastal evolution; beach width; grain-size trend; coastal anthropization; Gulf of Roses; NW Mediterranean*

## *Resumen*

*El principal objetivo de este trabajo es evaluar las variaciones espaciales y temporales de anchura y el comportamiento sedimentológico a medio-corto plazo (2004 a 2020) de las playas del norte del Golfo de Roses (NO Mediterráneo, España). La zona de estudio cubre 10 km en la parte norte del golfo. Se emplearon dos metodologías SIG para cuantificar los cambios costeros por transectos y por áreas. Se recolectaron muestras de sedimento tanto de la playa seca como de las áreas de lavado para cada transecto. El análisis basado en perfiles muestra una tasa anual promedio de -0,11 m•y-1 (que oscila entre 0,53 y -0,55 m•y-1), mientras que los resultados regionales indican una pérdida total de -20810 m2 ( -1300 m2•año-1). El tamaño del grano de sedimento disminuye hacia el norte (de 745 a 264 µm en la zona de balanceo). Los cambios en el ancho de la playa y el tamaño del grano ilustran el impacto de las estructuras antropogénicas en el comportamiento morfodinámico. Estas estructuras depositan preferentemente tamaños de grano específicos e impiden el transporte de sedimentos, lo que lleva a un aumento del ancho de la playa y del tamaño de los granos de sedimento aguas arriba y un proceso inverso aguas abajo, generando un comportamiento morfodinámico distinto.*

***Palabras clave:*** *evolución costera; ancho de playa; tamaño de grano; antropización costera; Golfo de Rosas; Noroeste del Mediterráneo.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

The central concept of coastal morphodynamics revolves around the interplay between morphology and sedimentology (Wright & Thom, 1977). This interaction involves both positive and negative feedback loops, ultimately striving for an equilibrium that is seldom attained, driving changes across diverse temporal and spatial scales. Despite their susceptibility to natural and anthropogenic influences, coastal environments possess significant resilience, owing in part to transitional areas like wetlands and dune systems. However, disturbances like storms or human activities related to climate change and coastal planning respectively, can lead to sediment loss and beach erosion. Given that 37% of the global population depends on coastal resources (UN, 2017), coastal erosion has emerged as a critical issue in territorial planning and monitoring becomes imperative, especially in urbanized coastlines with substantial tourist activity, Understanding, defining, and evaluating coastal processes are then essential to mitigate the adverse impacts of coastal anthropization.

This study focuses on describing morpho-sedimentological changes along the beaches of the northern sector of the Gulf of Roses, where anthropogenic interventions exhibit progressive intensification from south to north. To achieve this goal, a morphological analysis employing GIS tools was conducted to identify short to medium-term variations in the coast between 2004 and 2020. The year 2004 has been selected as the initial date of the analysis because the last analysis prepared by the LVCC (GC, 2010) was for the period 1997-2004. In addition, a sedimentological analysis was performed to discern trends in grain size distribution across the study area.

## 2. Area of study

The Gulf of Roses is the largest and most extensive bay in the northeast of the Iberian Peninsula (Fig. 1). This gulf has a total coastline length of 25 km and is bounded by two rocky promontories, Cap de Creus to the north and the Montgrí massif to the south. The gulf is part of the Empordà basin located at the North Catalan Margin, an environment with a preferential deposition of alluvial materials from the main rivers: the Fluvià and the Muga rivers.

The study area focuses on the northern sector of the Gulf of Roses (Figure 1), covering a length of 10 km, bounded to the south by the mouth of the Fluvià River and to the north by the breakwater of the Port of Roses. They comprise natural beaches in the south and urban beaches in the north. The beaches are listed in Table 1 following their spatial order, from south to north: (1) Can Comes, (2) Empuriabrava, (3) La Rovina, (4) Santa Margarida, (5) El Salatar, (6) El Rastrell, (7) La Nova, and (8) La Punta. Table 1 outlines the main morphological characteristics of the different beaches studied.

The study area's location and the presence of Cap de Creus and Montgrí Massif promontories (Figure 1) mean that the ENE-SSE component (70º-160º) significantly impacts the coastal drift of the examined beaches. Statistical analysis of wave conditions in the region reveals that significant wave height (Hs) is below 1 m 76% of the time, with a peak period (Tp) ranging between 5 and 6 seconds. The highest recorded Hs was 7.0 meters in January 2020 during the Gloria storm. Longitudinal sediment transport, especially from waves originating in the second quadrant, mobilizes sediments from south to north along the coastline. According to the LVCC (GC, 2010), the net rates of longitudinal transport estimated using the CERC model for the Gulf of Roses exhibit rates from 81,900 $m^3 \cdot y^{-1}$ in the central area to 64,200 $m^3 \cdot y^{-1}$ in the southern zone and, only 3,700 $m^3 \cdot y^{-1}$ in the northern zone.

## 3. Materials and methods

The quantitative analysis of the variations of the coastline has been carried out using a Geographic Information System (GIS). The analysis has been made by two methodologies: (1) the calculation by transects of the rates of variation of the width of the beaches based on the DSAS 4.0 extension (Digital Shoreline Analysis System) developed by the USGS (Thieler et al. 2009) within ArcGis ® software; and (2) the calculation by areas, forward and backward with the free software QGIS.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA




***Fig. 1**. Location of the study area. Beaches studied and sampling stations (red dots) used for the sedimentological analysis.*

***Table 1**. Length, direction, and width of the differentiated beaches in the study area, see figure 1 for their location. The number of transects studied and the sediment sampling stations on the beaches studied are also indicated.*

| Beach | Length (km) | Direction (º to N) | Width (m) | Number of DSAS transects | Sediment Sampling Stations |
|---|---|---|---|---|---|
| Can Comes | 3.94 | 18 | 87.05 | 38 | 25-36 |
| Empuriabrava | 1.30 | 35 | 95.74 | 13 | 21-24 |
| La Rovina | 1.79 | 44 | 73.21 | 18 | 15-20 |
| Sta. Margarida | 0.61 | 58 | 42.16 | 6 | 12-14 |
| El Salatar | 0.46 | 68 | 29.04 | 4 | 10-11 |
| El Rastrell | 0.46 | 94 | 36.54 | 5 | 7-9 |
| La Nova | 0.80 | 143 | 26.30 | 8 | 4-6 |
| La Punta | 0.50 | 134 | 56.59 | 8 | 1-3 |
| **TOTAL** | **9,86** | | | **110** | |

The DSAS allows to calculate the rates of variation and distances between different shorelines from transects. Statistically, there are mainly three parameters that measure the evolution of the coastline: the NSM (Net Shoreline Movement in m); the EPR (End Point Rate in $m \cdot y^{-1}$), and the LRR (Linear Regression Rate in $m \cdot y^{-1}$). The digitization of the coastlineusing QGIS makes it possible to know what the rates of advance or retreats are based on the calculation of areas. From the data on the accretion and erosion surfaces, two parameters like those

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

obtained in the analysis by transects have been calculated: (1) the Areal End Point Rate (EPRa) as the relationship between the total balance and the number of years between the dates considered in $m^2 \cdot y^{-1}$, and (2) the Normalized Areal End Point Rate (EPRna) that consists of the EPRa normalized concerning the length of the considered beach in $m^2 \cdot y^{-1} \cdot m^{-1}$. Orthophotos from the "Cartographic and Geological Institute of Catalonia-ICGC" (years 2004, 2008, 2012, 2016 and 2020), with a resolution of 0.25 $m \cdot pixel^{-1}$, have been used for the digitization of the coastline.

For grain size analysis, 36 sampling stations were established, distributed along the 10 km of the study area. Sampling planning and station location were carried out with the help of GIS tools. The stations were located about 200 meters apart. For each station, 2 samples were taken; one in the area closest to the berm, classified as a dry area; and another closer to the coast, classified as a wetland. The grain size was analysed using Coulter LS 230 particle analyser and mechanical sieving for samples with grain size greater than 2 mm. The statistical treatment and the different granulometric parameters have been obtained by the moment's method from the program Gradistat v9.1 (Blott, S.J. & Pye, K., 2001).

***Table 2**. Summary of Net Shoreline Movement (NSM), End Point Rate (EPR), Linear Regression Rate (LRR), Surfaces of accretion and erosion, the Areal End Point Rate (EPRa) and the Normalized Areal End Point Rate (EPRna) of the studied beaches*

| Beach | NSM (m) | EPR ($m \cdot y^{-1}$) | LRR ($m \cdot y^{-1}$) | Accretion Surface ($m^2$) | Erosion Surface ($m^2$) | Total Balance ($m^2$) | EPRa ($m^2 \cdot y^{-1}$) | EPRna ($m \cdot y^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Can Comes | 2.94 | 0.18 | 0.40 | 22,821 | -23,242 | -421 | -26.31 | -0.006 |
| Empuriabrava | 7.61 | 0.48 | 0.53 | 10,099 | -3,951 | 6,148 | 384.25 | 0.30 |
| La Rovina | -4.73 | -0.30 | -0.35 | 431 | -12.400 | -11.969 | -746.19 | -0.42 |
| Sta. Margarida | -2.06 | -0,13 | -0.15 | 225 | -3.338 | -3.113 | -194.56 | -0.32 |
| El Salatar | -1.58 | -0.10 | -0.06 | 0 | -1.095 | -1.095 | -68.44 | -0.15 |
| El Rastrell | -5.04 | -0.32 | -0.21 | 0 | -2.376 | -2.376 | -171.00 | -0.37 |
| La Nova | -3.04 | -0.19 | -0.13 | 49 | -3.610 | -3.560 | -222.50 | -0.28 |
| La Punta | -9.21 | -0.58 | -0.43 | 203 | -4.627 | -4.424 | -276.50 | -0.55 |
| | | | | **33,828** | **54,638** | **-20,810** | | |

## 4. Results

The results of the different morphological analysis carried out by trancsects NSM, EPR and LRR, using ArcGIS-DSAS, and by Surfaces of Accretion and Erosion, the Areal End Point Rate (EPRa) and the Normalized Areal End Point Rate (EPRna), using QGis, are presented in Table 2.

The sediments of the dry beach broadly exhibit higher mean and standard deviation (SD) values compared to those of the wet beach (Table 3). Conversely, La Punta beach exhibits the lowest mean and SD values for both dry and wet locations. When examining the spatial evolution of the samples analyzed for each beach at the two sampling stations (wet beach and dry beach), a general decrease in grain size due to sediment transport toward the north is noted. However, the beaches of Empuriabrava and La Rovina, situated in the central zone between kilometers 4 and 7, exhibit different behaviors.

## 5. Discussion

For the transects study, EPR (End Point Rate) and LRR (Linear Regression Rate) parameters exhibited very similar values, this suggest that these two parameters indicates that they both reflect the same processes influencing the evolution of the coastline. Empuriabrava Beach exhibited the highest values for EPR and LRR, measuring 0.48 and 0.53 $m \cdot y^{-1}$, respectively. These maximum values can be attributed to the presence of the jetties of the marina habours, which serve as boundaries for the beach. Conversely, the lowest values for EPR and LRR coincide in the northern portion of the study area, specifically at La Punta Beach, with measurements of -0.58 and -0.43 $m \cdot y^{-1}$, respectively.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

***Table 3.*** *Values of the grain size parameters of studied beaches. N= number of sampled profiles; Mean (μm); SD: Standard Deviation; CV: Coefficient of Variation.*

| | | WET BEACH | | | DRY BEACH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Beach** | **N** | **Mean** | **SD** | **CV** | **Mean** | **SD** | **CV** |
| Can Comes | 12 | 421,25 | 155,27 | 0,37 | 505,50 | 235,75 | 0,47 |
| Empuriabrava | 4 | 745,25 | 473,75 | 0,64 | 985,50 | 768,00 | 0,78 |
| La Rovina | 6 | 497,17 | 322,33 | 0,65 | 1171,50 | 1027,67 | 0,88 |
| Sta. Margarida | 3 | 446,00 | 233,67 | 0,52 | 519,00 | 321,67 | 0,62 |
| El Salatar | 1 | 476,00 | 260,00 | 0,55 | 479,00 | 425,00 | 0,89 |
| El Rastrell | 2 | 338,00 | 125,50 | 0,37 | 441,00 | 279,00 | 0,63 |
| La Nova | 5 | 307,60 | 111,04 | 0,36 | 358,20 | 221,60 | 0,62 |
| La Punta | 3 | 264,00 | 106,83 | 0,40 | 237,00 | 110,50 | 0,47 |

The areal study experienced an overall net loss of -20,810 $m^2$, with a gain of 33,828 $m^2$ in surface area and a loss of 54,638 $m^2$. Only Empuriabrava Beach showed a net gain in surface area of 6,148 $m^2$ and a EPRa of 0.30 $m^2 \cdot y^{-1}$. Can Comes each had a net balance closest to 0, with a net loss of -421 $m^2$ that results in a EPRan of -0.006 $m \cdot y^{-1}$. The remaining beaches exhibited a negative net area balance. La Rovina Beach suffered the most significant surface area loss of approximately 12,000 $m^2$ (EPRan of -0.42 $m \cdot y^{-1}$) between 2004-20 (Table 2).

The grain size distribution, shows a decrease in grain size as distance increases from the Fluvià river mouth, mainly in samples obtained from the wet zone. The relationship between the standard deviation (SD) and the mean of the samples from the wet zone, the lower means are associated with lower standar deviation values, which suggests that sediments that have undergone extensive transportation are more well-sorted and classified. This transport occurs through different accretion bulges or sediment waves, that are observable in the beaches of Can Comes and Empuriabrava. Similar processes have been described in natural areas such as the Ebro River Delta (Guillén & Jiménez, 1995) or in areas affected by artificial nourishment projects (Guillén & Hoekstra, 1997; Huisman et al., 2016).

The Empuriabrava Beach has the highest accretion rates and the largest grain sizes in the study area. This can be attributed to a combination of factors, including its proximity to sediment contributions from the Muga River, the northern direction of sediment drift, and the presence of a jetty located at its northern boundary, which acts as the first barrier in the study area, initiating the fragmentation of the coastal drift. It is responsible for the accumulation of coarse sediments and the subsequent increase in accretion on the Empuriabrava Beach. The Rovina Beach, has experienced the highest rates of erosion. The presence of two jetties enclosing the beach may worsen the retreat of the coastline. There is a reduction in grain size between Empuriabrava and La Rovina. This decrease is attributed to the location of the jetties, which encourage the deposition of coarser material and disrupt the coastal drift. As an example of the impact of anthropogenic structures on grain size evolution, the grain size between the south side and the north side of the structures shows an increase (gap) in grain size reduction. The beaches near the urban area of Roses are all receding, with La Punta, La Nova, and Rastrell being the most severely impacted by coastal erosion. These beaches have fine grain sizes due to their distance from the primary sediment entry points in the region and the presence of breakwaters that impede the transportation of coarser material. They are the beaches in the study area with the finest and most well-classified sediment. In La Punta Beach, anthropization and fine grain size can exacerbate its vulnerability to erosion.

## 6. Conclusions

Changes in beach width and granulometric properties reflect the impact of various man-made structures on the morphodynamic behaviour of each beach segment. The jetties at the entrance to the Marina of Empuriabrava, between the beaches of Empuriabrava and La Rovina, is the starting point for the interruption of the littoral drift and sediment transport restriction. This results in the accumulation and preferential deposition of coarse-grained sediments on the Empuriabrava Beach, while erosion and a decrease in grain size occur on the La Rovina Beach

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

to the north of the breakwater. This process of increasing grain size is also observed along the Rovina Beach. Changes in grain size towards the north can have implications for overall beach stability.

## 7. Acknowledgements

AC worked in the framework of the MOLLY (PID2021-124272OB-C21) research project funded by the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities.

## 8. References

Blott, S.J. and Pye, K. (2001) Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes andLandforms* 26, 1237-1248

GC_Generalitat de Catalunya (2010). *Llibre verd de l'Estat de la zona costanera a Catalunya (LVCC) -in catalan-*. Barcelona. https://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Serveis/Riscos-geologics/Dinamica-de-la-costa/Llibre-verd-de-l-Estat-de-la-zona-costanera-a-Catalunya-2010

Guillén, J. and Jiménez, J. (1995) Process behind the Longshore Variation of the Sediment Grain Size in the Ebro Delta Coast. *Journal of Coastal Research*, 11(1), 205-218. ISSN 0749-0208

Guillén, J., and Hoekstra, P. (1997). Sediment distribution in the nearshore zone: grain size evolution in response to shoreface nourishment (Island of Terschelling, The Netherlands). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 45, 639–652. https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0218

Huisman, B.J.A., M.A. de Schipper, B.G. Ruessink (2016). "Sediment sorting at the Sand Motor at storm and annual time scales." *Marine Geology* 381, 209–226.

Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan, 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

United Nations (2017). Ocean Conference: Factsheet: People and Oceans. https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2017/05/Ocean-fact-sheet-package.pdf

Wright, L.D., Thom, B.G., 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Progress in Physical Geography* 1, 412–459.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

GEOLIT

# SESIÓN 2



XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18646

# Frequency distribution of emerged beach area based on daily shorelines over decades (2001-2022)

*Distribución de frecuencias de la superficie de la playa emergida basada en datos diarios durante décadas (2001-2022)*

**Jorge Guillén[a] & Gonzalo Simarro[a]**

[a]Institut de Ciències del Mar, CSIC Passeig Marítim de la Barceloneta 37, Barcelona 08003, , jorge@icm.csic.es, simarro@icm.csic.es,

How to cite: Guillén, J. y Simarro, G. 2024. Distribución de frecuencias de la superficie de la playa emergida basada en datos diarios durante décadas (2001-2022). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18646

***Abstract***

*The position of a shoreline is a dynamic phenomenon, shaped by various mechanisms operating over different time scales. This study proposes that the frequency distribution of shoreline position, or the emerged area of a beach, tends to display a Gaussian-like distribution and varies according the configuration of the beach and its long-term evolution—whether stable, eroding or prograding. To test this hypothesis, we analyze extensive data on shoreline position from hourly video images spanning the years 2001 to 2022, collected at two beaches in Barcelona. Our findings reveal distinct patterns: during periods of shoreline stability, the frequency distribution tends to approximate a normal or Gaussian distribution. Conversely, periods of beach erosion exhibit a negatively skewed distribution. Additionally, interventions such as beach protection structures, sand nourishments, or the impacts of major storms can induce shifts in the Gaussian distribution's location. We thoroughly discuss these observed changes and underscore the benefits of employing a range to represent shoreline position in medium-term studies.*

***Keywords:*** *shoreline changes, Gaussian distribution, decadal evolution, big data, urban beaches*

***Resumen***

*La posición de la línea de costa es altamente dinámica y responde a mecanismos que actúan bajo diferentes escalas temporales. En este trabajo se hipotetiza que la distribución de frecuencias de la posición de la línea de costa (o el área emergida) de una playa tenderá a tener una distribución nor mal o Gaussiana y será diferente en función de la configuración de la playa y de su evolución a largo plazo (estable, erosión o progradación). Para verificar esta hipótesis se utilizan datos masivos de la posición de la línea de costa en dos playas de la ciudad de Barcelona obtenidos a partir de imágenes horarias durante el período 2001-2022. Los resultados indican que en períodos en los que la línea de costa es relativamente estable la distribución de frecuencias se aproxima a una distribución normal o Gaussiana. En períodos con una tendencia erosiva la distribución tiene una asimetría negativa, mientras que los cambios en las estructuras de protección de la playa, las regeneraciones artificiales o los efectos de los grandes temporales provocan saltos en la distribución de frecuencias. Se discuten todos estos cambios y se destacan las ventajas de utilizar en los estudios a medio largo plazo un rango para representar la posición de la línea de costa.*

***Palabras clave:*** *cambios línea de costa, distribución Gaussiana, evolución durante décadas, datos masivos, playas urbanas.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

The use of Big Data Approaches (BDAs) in environmental research and management is an emerging discipline that provides new opportunities for a better understanding of global processes. The development of automated algorithms for shoreline detection from video images (i.e. Ribas et al., 2020) delivers the possibility to obtain reliable almost hourly shorelines and, given that several stations are recording data for more than two decades (Holman and Stanley, 2007; Pianca et al., 2015), tens of thousands of shoreline records would be available in different beaches around the world. Clearly, this massive long-term information can allow better estimation of general trends in beach variability (including sea-level rise effects) but it also offers the opportunity to decipher poorly understood high-resolution morphodynamic processes and is a valuable complement to model calibration and verification.

To analyse the massive shoreline data in a different perspective, we show the frequency distribution of the daily beach area. We assume that the frequency distribution of an "equilibrium" shoreline would show a Gaussian or normal distribution, incorporating noise, storms or seasonal variability but, probably, no long-term trend. Different "equilibrium" distributions would correspond to changes in beach configuration caused by new protective structures or sand nourishments. If the beach shows a long-term trend (erosion/progradation), then the skewness of the distribution will increase (positively/negatively). In this work, we analyse the frequency distribution of daily emerged beach area for more than 22 years to unravel patterns of beach position behaviour in response to long-term shoreline trends, storm events impacts and the effects of beach nourishments and protection works.

## 2. Study site and methods

The Barcelona beaches were built in 1992 following the transformation of an industrial and environmentally degraded area and their maintenance has required frequent protective actions such as artificial beach nourishment and the construction of new breakwaters. Since their construction in 1992, about 1.2 $x10^6$ $m^3$ of sand have been supplied to these beaches, the most relevant being in 2002, 2006-2007 and 2009-2010. The main new protection structures were a detached breakwater at Barceloneta beach (2006-2007) and a continuous submerged detached breakwater at Bogatell beach (2009-2010) (Figure 1).

The Barcelona coastal video monitoring system has been in operation since November 2001, previously as an ARGUS Station (Holman and Stanley, 2007) and subsequently using the open source software SIRENA (Nieto et al., 2010) and ULISES (Simarro et al., 2017). Hourly shorelines were automatically extracted from images following a revisited version of the scheme proposed by Ribas et al. (2020). For the estimation of the emerged area, beach boundaries were defined as the boundary between the sand and the promenade (inner boundary) and a fixed distance (typically 20 m) to the groins located at both ends of the beach. In this work we use massive shoreline data extracted from video images at two beaches in the city of Barcelona for almost 22 years (7670 daily shorelines): Sant Sebastià and Bogatell (Fig. 1). Sant Sebastià became an individualized beach in 2006-2007, when a T-shaped groin was built separating Barceloneta and Sant Sebastià beaches. Finally, Bogatell was affected by the construction of a continuous submerged detached groin in 2009-2010.

## 3. Results and discussion

The evolution of the shoreline during the study period shows a very different pattern in both studied beaches. Sant Sebastià shows a stable emerged beach area until 2006-2007 and, afterwards a clear decreasing trend (Fig. 1b). Bogatell shows two very different behaviours before and after the period 2009-2010, the second one with a larger emerged beach area caused by the new protection works and the sand nourishment (Fig. 1c). The 'beach mobility', defined according to Dolan et al. (1978) as the standard deviation of the shoreline position, is highly variable over time, but tends to increase with longer time periods in both beaches.

The beaches of Sant Sebatià and Bogatell show two almost-normal frequency distributions for each of the two periods considered, i.e., before and after the structural modifications made to these beaches (Fig. 2). In Sant

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Sebastià, the new groin prevents (at least partially) the transfer of coastal sediments to this stretch of beach from the Barceloneta beach and there is a progressive loss of the emerged beach surface which is reflected in the frequency histogram. On the contrary, the new detached breakwater built in the Bogatell beach increased the protection of the beach and the maintenance of an emerged area higher than the previous one, with two almost Gaussian distributions during the study period (Fig. 2). Therefore, it is reasonable to accept that for each beach configuration there is a Gaussian frequency distribution of the emerged beach area, which includes the mobility of the beach caused by storms, small human actuations on the beach and the trend of the period considered.

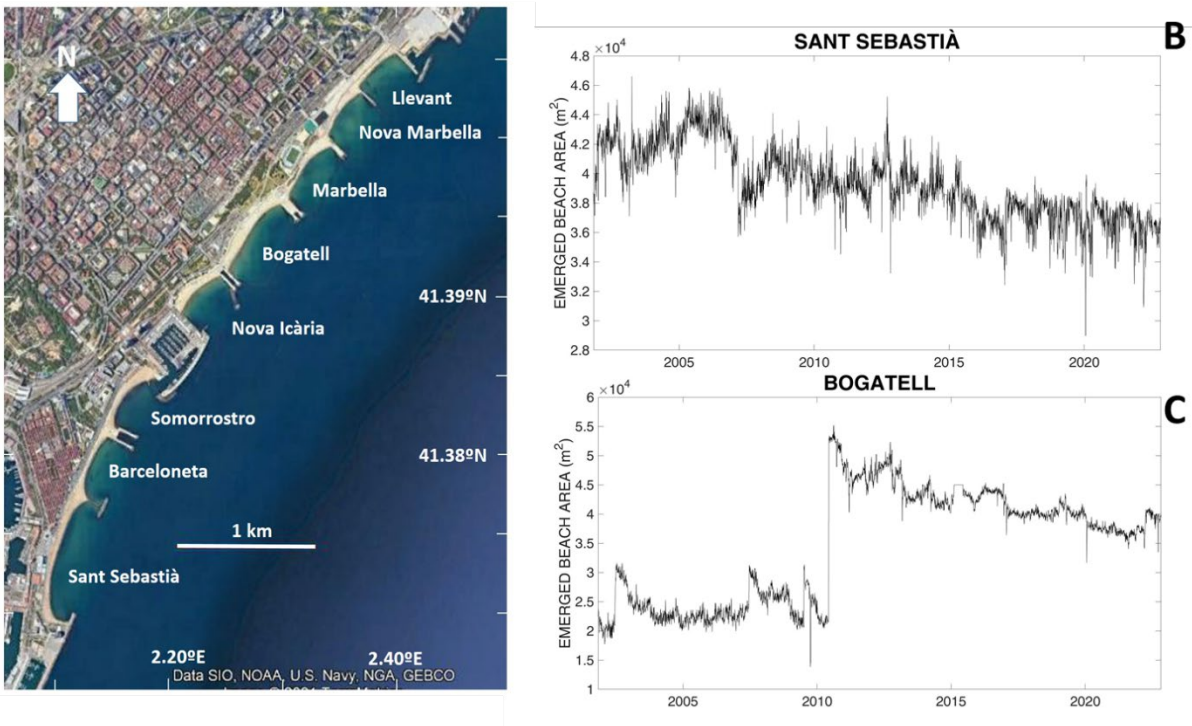



***Fig. 1.*** *Study site (A) and evolution of the emerged area in Sant Sebastià (B) and Bogatell (C) beaches.*

For example, at Bogatell, the frequency distribution before the construction of the detached breakwater shows a positive skewness probably related to the beach progradation caused by small beach nourishments. In detail, the frequency distribution after the nourishment is almost the same as before, suggesting that this was the frequency distribution characteristic (equilibrium?) of this beach configuration (Fig. 3).

The frequency distribution in Bogatell during the 2010-2022 period (after the construction of the detached breakwater and the large nourishment) also mimics a Gaussian distribution. In fact, there is a superposition of five Gaussian distributions with a temporal succession, from the period immediately after the nourishment (distribution around the maximum emerged area) to consecutive periods with a progressive smaller emerged beach area (Fig. 3). Breaking the frequency distribution down into periods of about 5 years clearly shows the temporal succession of the progressively smaller beach area, but always drawing an almost Gaussian shape and suggesting jumps from one normal distribution to the next one, probably caused by the strongest storms and/or the rapid losses of emerged beach area immediately after the nourishment (Fig. 3). In Sant Sebastià, the detailed frequency distribution shows a fairly continuous succession of Gaussian distribution, related with the weak long-term beach erosion.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

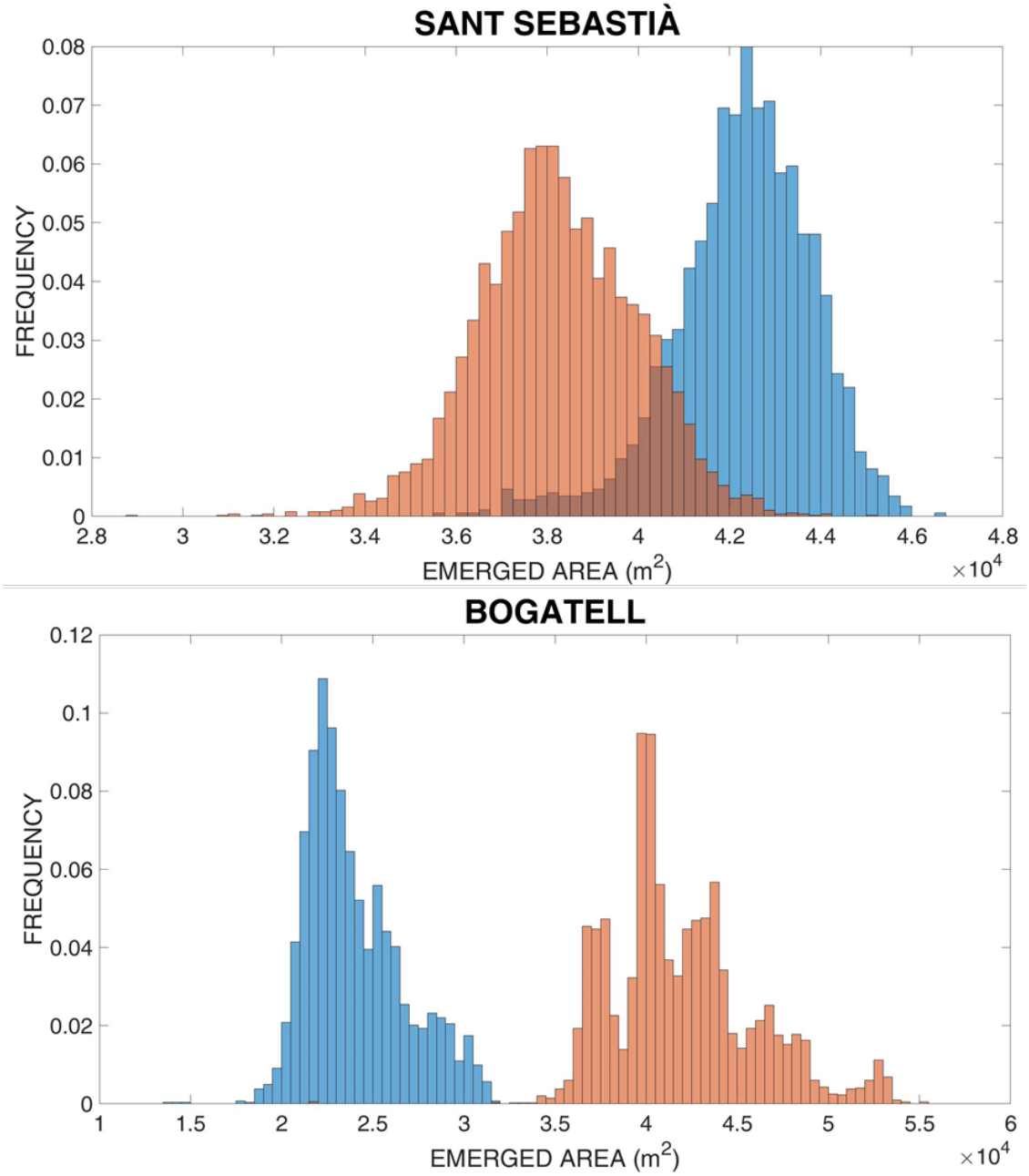



***Fig. 2*** *Frequency distribution of the emerged area in Sant Sebastià (above, blue= 2002-2007) and Bogatell (blue= 2002-2010) beaches.*

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

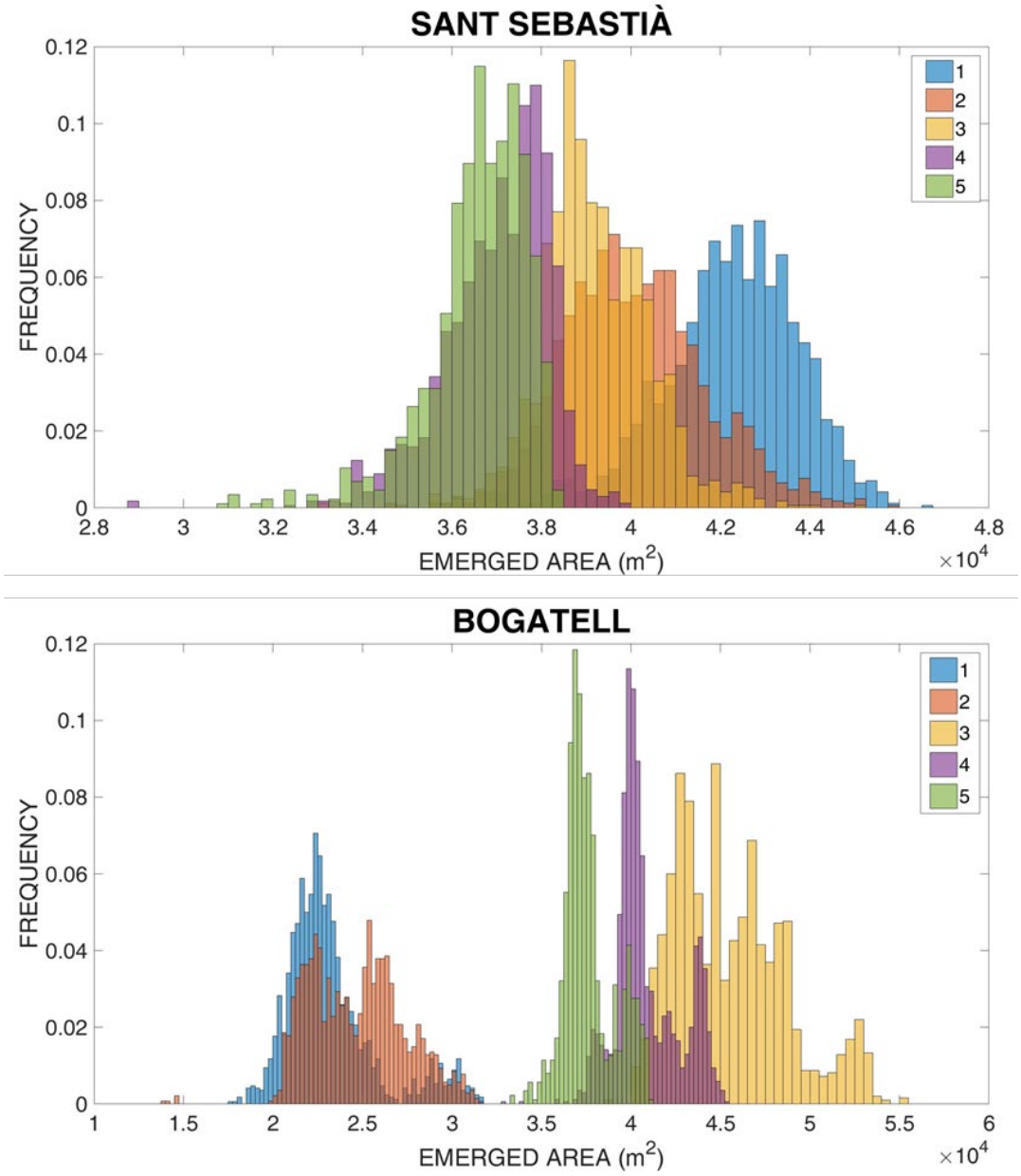



***Fig. 3*** *Detailed frequency distribution of the emerged area in Sant Sebastià (above) and Bogatell beaches (each color represent approximately 5 years, from 2001 to 2022).*

## 4. Conclusions

The massive data from the Barcelona beaches shows that the shoreline position fits well to a Gaussian distribution for each beach configuration, suggesting some "equilibrium" position that incorporates seasonal and lower frequency oscillations as well as storms impacts and small human interventions. This apparently stable distribution can shift in response to changes in beach configuration, long-term shoreline trends or by the impact of strong storms without beach recovery. Therefore, the position of the shoreline would be better represented by statistics parameters to incorporate the description of the time-varying beach mobility. Instantaneous shorelines obtained

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

with low-frequency can translate misunderstanding of beach displacements, as changes caused by short or long-term processes cannot be well-discriminated.

## 5. Acknowledgements

The Barcelona Municipality (Direcció de Platges) has supported the video monitoring since 2015. This work has been carried out in the framework of the MOLLY (PID2021-124272OB-C21/C22) research project funded by the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities – National Research Agency. We are indebted to Òscar Chic for his continuous efforts in the operation of the video monitoring system.

## 6. References

Dolan, R., Hayden, B.P. & Heywood, J. (1978). Analysis of coastal erosion and storm surge hazards. *Coast. Eng*., 2, pp. 41-53.

Holman, R.A. & Stanley, J. (2007). The History and Technical Capabilities of Argus. *Coastal Engineering* 54, 477–491. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.01.003

Nieto, M. A., Garau, B., Balle, S., Simarro, G., Zarruk, G. A., Ortiz, A., ... & Orfila, A. (2010). An open source, low cost video-based coastal monitoring system. *Earth Surface Processes and Landforms, 35*(14), 1712-1719.

Pianca, C., R. Holman & E. Siegle. (2015). Shoreline variability from days to decades: Results of long-term video imaging, J. *Geophys. Res. Oceans, 120*. https://doi.org/10.1002/2014JC010329

Ribas, F., Simarro, G., Arriaga, J. & Luque, P. (2020). Automatic shoreline detection from video images by combining information from different methods. *Remote Sensing*. https://doi.org/10.3390/rs12223717

Simarro, G., Ribas, F., Álvarez, A., Guillén, J., Chic, O. & Orfila, A. (2017). ULISES: An Open Source Code for Extrinsic Calibrations and Planview Generations in Coastal Video Monitoring Systems. *J. of Coastal Research, 33*(5):1217-1227. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00022.1

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18081

# Monitorización tridimensional del sistema playa-duna en el segmento Gandia-Dénia (2017-2022) mediante técnicas fotogramétricas

*Beach-dune system three-dimensional monitoring over the Gandia-Dénia segment (2017-2022) using photogrammetric techniques*

**Jaime Almonacid-Caballer[a], Josep E. Pardo-Pascual[a], Denys Gorkovchuk[a], Carlos Cabezas-Rabadán[a] y Jesús Palomar-Vázquez[a]**

[a]Grupo de Cartografía Geoambiental y Teledetección, Dept. Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, jaialca@upv.edu.es, jepardo@cgf.upv.es; dgorkov1@cgf.upv.es; carcara4@upv.edu.es; jpalomav@upvnet.upv.es.

How to cite: Almonacid-Caballer, J.; Pardo-Pascual, J.E.; Gorkovchuk, D.; Cabezas-Rabadán, C. y Palomar-Vázquez, J. 2024. Monitorización tridimensional del sistema playa-duna en el segmento Gandia-Dénia (2017-2022) mediante técnicas fotogramétricas. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18081

## *Abstract*

*Quantifying volumetric changes in beach and dune systems is essential for a deep understanding of sediment displacement processes and beach evolution. Photogrammetry techniques allow for the creation of Digital Surface Models from aerial photographs with accuracies comparable to LiDAR flights. The application of these techniques on aerial images over the Gandía-Denia sector has enabled a 3D analysis of the changes experienced by the dune system and the emergent beach over six years (2017-2022). Results highlight the strong erosive impact caused by Storm Gloria, which generated significant sediment losses from which many beach segments do not appear to recover.*

***Keywords:*** *Foredune, three-dimensional monitoring, coastal storms, erosion, photogrammetry, Storm Gloria*

## *Resumen*

*La cuantificación de los cambios volumétricos en los sistemas de playa y duna es esencial para comprender en profundidad los procesos de desplazamiento del sedimento y la evolución de las playas. Las técnicas de fotogrametría actuales permiten obtener Modelos Digitales de Superficie a partir de fotografías aéreas con precisiones comparables a los vuelos LiDAR. La aplicación de estas técnicas sobre fotografías del Instituto Cartográfico Valenciano en el sector Gandía-Denia (Golfo de Valencia) ha permitido analizar tridimensionalmente los cambios experimentados en el sistema dunar y la playa emergida a lo largo de 6 años (2017-2022). Los resultados evidencian el fuerte impacto erosivo causado por el temporal Gloria, el cual generó pérdidas sedimentarias bastante elevadas de las cuales muchos segmentos de playa no parecen llegar a recuperarse.*

***Palabras clave:*** *Frente dunar, monitorización tridimensional, temporales costeros, erosión, fotogrametría, temporal Gloria*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Las playas y dunas modifican su morfología a consecuencia de las condiciones hidrodinámicas a las que se ven expuestas. El transporte sedimentario en la costa se puede dar tanto longitudinal como transversalmente, y los temporales costeros son un factor clave en la redistribución del sedimento (Castelle y Harley, 2020). Recientemente, la teledetección ha facilitado el estudio de los efectos de estos procesos mediante la posición de la línea de costa obtenida a partir de imágenes de satélite (Vos et al., 2023). Estas técnicas permiten caracterizar la respuesta de las playas ante eventos disruptivos (Cabezas-Rabadán et al., 2024) y su tendencia a largo plazo. Sin embargo, el estudio de las líneas de costa no es capaz de cuantificar los cambios volumétricos, los cuales son cruciales para cuantificar las entradas, salidas y distribución de sedimento del sistema playa-duna.

Los modelos digitales de superficie (MDS) derivados de datos LiDAR constituyen una técnica precisa para caracterizar tridimensionalmente los espacios costeros. Pese a la existencia de los vuelos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), la frecuencia de adquisición de estos datos es insuficiente para analizar fenómenos costeros en escalas de días o meses. Sin embargo, organismos nacionales como el Instituto Geográfico Nacional (IGN) o el Institut Cartogràfic Valencià (ICV) disponen también de series anuales de fotografías aéreas. Aunque inicialmente fueron empleadas para la obtención de ortofotografías, estas fotografías representan una fuente de información de alto potencial ya que pueden, a través de las técnicas fotogramétricas actuales, ser reaprovechadas para la creación de modelos digitales de superficie (MDS) con unas precisiones potencialmente similares a las alcanzadas en los datos LiDAR (Almonacid-Caballer et al., 2024).

El objetivo de este trabajo esutilizar de los MDS fotogramétricos antes mencionados para caracterizar los cambios tridimensionales del frente costero entre Gandia y Dénia ocurridos entre 2017 y 2020.

## 2. Metodología

Diferenciaremos dos fases en el desarrollo metodológico de este estudio: (i) la creación de unos Modelos Digitales de Superficies (MDS) y su evaluación y, en segundo lugar (ii), la definición de un protocolo para cuantificar, cartografiar y caracterizar los cambios producidos en el frente costero, tanto en la playa emergida y en el cordón dunar.

### 2.1. Generación de los diferentes MDS anuales y calibración de su precisión

Este proceso se desarrollará en tres fases: (1) la obtención de un MDS provisional mediante técnicas fotogramétricas, (2) el refinamiento local del MDS y (3) estimación de la precisión.

Para disponer de una superficie de referencia que cubra todo el territorio con un grado de exactitud aceptable, se ha empleado el segundo vuelo LiDAR (año 2015) asociado al PNOA. A partir de éste, se ha obtenido un MDS de 1m de resolución.

Por otro lado, el Institut Cartogràfic Valencià (ICV) ha aportado las fotografías aéreas originales y los datos auxiliares (calibración y orientación externa) disponibles para cada una de las fotografías aéreas anuales del territorio valenciano (2017-2022). Si bien en este trabajo centramos nuestro interés en el tramo costero entre Gandia y Dénia, el proyecto general en que se integra este estudio cubre la totalidad de la costa valenciana, así como los valles de ciertos cursos fluviales. Para los seis años estudiados se han utilizado 13.997 fotogramas con una resolución espacial de 25 cm y un solape mínimo del 60%. Los MDS fotogramétricos se han generado con Metashape Agisoft. Además de los datos auxiliares de cada vuelo, ha sido necesario seleccionar algunos centenares de puntos de control (GCPs, *Ground Control Points*) repartidos homogéneamente por todo el territorio. Dichos GCPs se han localizado siempre en lugares claramente identificables a lo largo del tiempo y en zonas planas para evitar errores altimétricos. La cota de los 476 GCPs ha sido obtenida sobre el MDS de referencia (2015). Estos GCPs forman parte del ajuste fotogramétrico realizado independientemente para el vuelo de cada año, entre 2017 y 2022. Tras el ajuste fotogramétrico se obtiene 6 conjuntos de residuos en los GCPs lo que sirve para estimarla

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

precisión del ajuste. La precisión planimétrica ha quedado cercana al propio tamaño de píxel (0.25m), mientras que, en altimetría, dichos residuos se acercan a los 40 cm sin llegar a superarlos.

Estos residuos evidencian que los MDS fotogramétricos consiguen resultados prometedores para su uso posterior, por ejemplo, en el cálculo de volúmenes de arena. Sin embargo, un segundo control de calidad se ha realizado localmente y con una filosofía distinta. A partir de los ejes de viales y carreteras (tomados de la cartografía 1/5000 del ICV), y sólo para el sector estudiado, se ha podido obtener 77034 puntos invariantes entre 2015 y 2022. La diferencia de cada uno de los MDS fotogramétricos frente al MDS LiDAR de referencia aporta una medida de error independiente al ajuste fotogramétrico y con el potencial de cartografiar su distribución a lo largo de la zona de estudio. En el peor de los casos, el MDS de 2017, se alcanza una desviación típica de 45 cm aunque, en el resto de los años dicha desviación queda por debajo de 25 cm. No obstante, los mapas de errores permiten dar un paso más. En ellos (Fig. 1a) se observa que hay zonas con errores positivos o negativos que siguen una distribución geográfica no aleatoria. Así pues, eliminar esa componente geográfica permitirá obtener, a priori, un resultado más preciso. Para ello se ha desarrollado un refinamiento local que pretende corregir esos sesgos geográficos en los MDS preliminares.

***Tabla 1**. Estadísticos básicos del error (m) medido sobre 77.034 puntos invariables de la zona de estudio a) antes y b) después de realizar la corrección local.*

| MDS | Año | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a) Pre-corrección | Media | 0.069 | 0.024 | 0.043 | -0.013 | 0.072 | 0.094 |
| | Desviación estándar | 0.453 | 0.236 | 0.208 | 0.182 | 0.183 | 0.215 |
| | RMSE | 0.458 | 0.237 | 0.213 | 0.182 | 0.196 | 0.235 |
| b) Post-corrección | Media | -0.007 | 0.001 | 0.000 | -0.001 | 0.001 | 0.001 |
| | Desviación estándar | 0.179 | 0.148 | 0.144 | 0.145 | 0.155 | 0.150 |
| | RMSE | 0.179 | 0.148 | 0.144 | 0.145 | 0.155 | 0.150 |

La diferencia entre cada modelo fotogramétrico y el MDS de referencia en los 77034 puntos distribuidos en toda la zona, ha servido para generar -mediante kriging ordinario- un modelo continuo de 1 m de resolución que se ha sumado a cada MDS fotogramétrico provisional. El resultado de esta corrección provoca que se elimine el comportamiento geográfico del error (Fig. 1b) y lleve a la aleatoriedad esperable en un estudio de residuos. Los estadísticos globales de los errores disminuyen sustancialmente (tabla 1). Como se puede observar, los errores promedio alcanzan valores inferiores al centímetro cuando antes de la corrección se acercaban ocasionalmente a los 10cm. A su vez, las desviaciones típicas se reducen hasta valores inferiores a los 20 cm cuando en origen, como se indicó anteriormente, rondaban los 23 y 45 cm. Dicha desviación típica no sólo indicaba la aleatoriedad de los errores, sino que absorbía los errores no aleatorios y vinculados a la geografía que, tras la corrección propuesta, quedan minimizados. Además, estas precisiones alcanzan así una magnitud equiparable a la esperable en datos LiDAR.

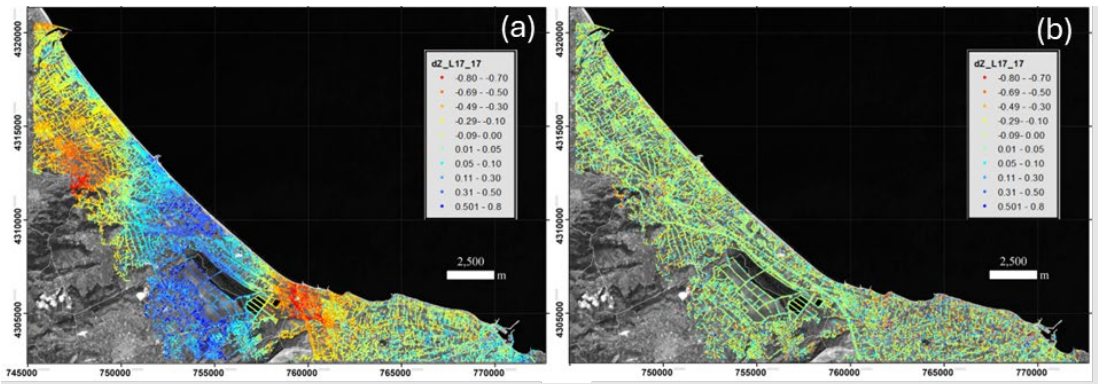



***Fig. 1**. Distribución de los errores altimétricos (a) antes y (b) después de realizar el ajuste local en el MDS de 2017. Los modelos de los otros años presentan un patrón similar.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

### 2.2. Procedimiento para cuantificar, cartografiar y caracterizar los cambios tridimensionales

Antes de poder realizar análisis volumétricos es necesario enmascarar la zona acuática. La fotogrametría se basa en la estabilidad de los puntos triangulados desde las distintas fotografías. La zona acuática es inherentemente móvil y, por tanto, el resultado de los MDS fotogramétricos en dichas zonas no es realista (Fig. 2B). Por ello se ha fotointerpretado la posición de la orilla en cada MDS fotogramétrico y se ha enmascarado la zona marina asignándole una cota fija de 0 m. (Fig. 2C). Seguidamente, para caracterizar los cambios volumétricos a lo largo de los seis años, se ha dividido el sistema playa-duna en tramos de unos 100 m de longitud. A su vez, tomando únicamente el MDS de 2017, se ha divido el espacio en dos ambientes, playa emergida y duna, (Fig. 2A) y se ha mantenido fijo para todos los años estudiados. Finalmente, para cada uno de estos polígonos, se ha calculado la superficie, el volumen y la altitud media de la parte de la playa y de la duna.

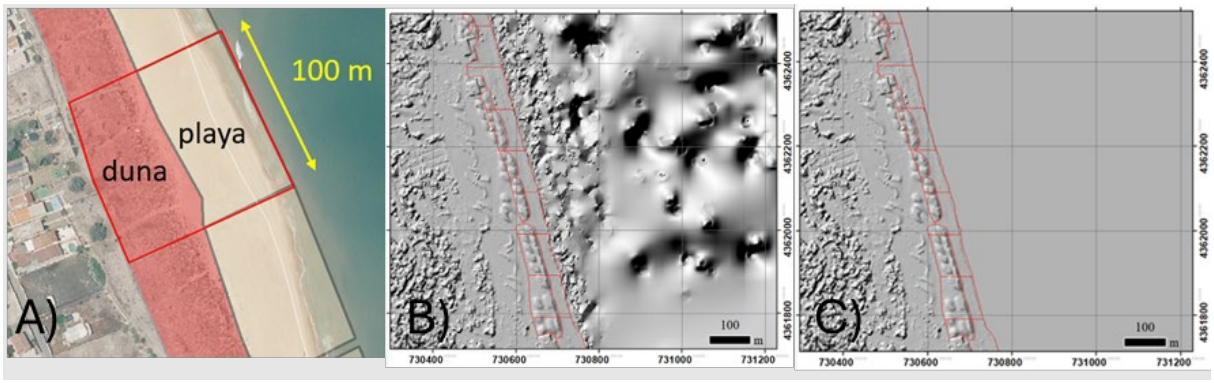



***Fig. 2.*** *Polígonos de análisis. A) Cada polígono es analizado en función del ambiente existente: playa, duna o playa-duna. B) parte de un fragmento del MDS sombreado en el que se aprecian que los errores generados en las áreas de mar. C) muestra ese mismo fragmento en el que se ha enmascarado el mar asignándole una misma cota de 0 m.*

## 3. Resultados y discusión

A partir de la cota media de cada polígono, se calcularon los cambios registrados entre los MDS de 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022 respecto a 2017, tanto sobre el conjunto del sistema playa-duna como diferenciando sendos ambientes (playa y duna) (Fig. 3). A partir de estos análisis de detectó que los cambios más fuertes se produjeron en las dunas donde hubo fuertes pérdidas a partir del temporal Gloria. Este mismo hecho se aprecia en el mapa de la figura 4, donde destacan los principales procesos erosivos producidos en las dunas de la playa de Aigua Blanca, Rabdells (de Oliva) y sobre todo en la de Les Deveses de Dénia. Del análisis de estas figuras es llamativo reconocer que antes del temporal Gloria los cambios fueron mínimos (véase líneas azules, comparación respecto a 2018 y 2019). Sin embargo, después del gran cambio de 2020 (inmediatamente después del temporal) se detecta un suave, pero claro, proceso de recuperación perceptibles en los años 2021 y 2022 si bien todavía resta mucho para que se recupera el volumen de arenas previo al temporal Gloria. También es muy llamativo detectar las importantes diferencias en la magnitud del impacto que se reconoce en el mapa mostrado.

Las condiciones oceanográficas extraordinarias registradas durante el temporal Gloria en el Mediterráneo occidental (Berdalet et al., 2020) parecen haberse traducido pues en importantes procesos erosivos sobre el sector Gandia-Dénia, con una pérdida de sedimento significativa de la cual las playas aún no se habían recuperado meses después del evento. Esta idea coincide con los análisis del impacto del Gloria realizado en otros puntos del Mediterráneo occidental, tanto sobre la geomorfología costera como sobre infraestructuras (e.g., Berdalet et al., 2020; Cabezas-Rabadán et al., 2024). Como consecuencia del evento, se dieron importantes cambios morfológicos lo largo de las playas del Golfo de Valencia, como ha sido corroborado en análisis realizados empleando otras técnicas como líneas de costa derivadas de imágenes satelitales (Pardo-Pascual et al., 2022), mediciones tridimensionales sustentadas en datos LiDAR (Pardo-Pascual et al., 2021) o técnicas fotogramétricas como la aquí presentada (Almonacid-Caballer et al., 2024).

 BY-NC-SA

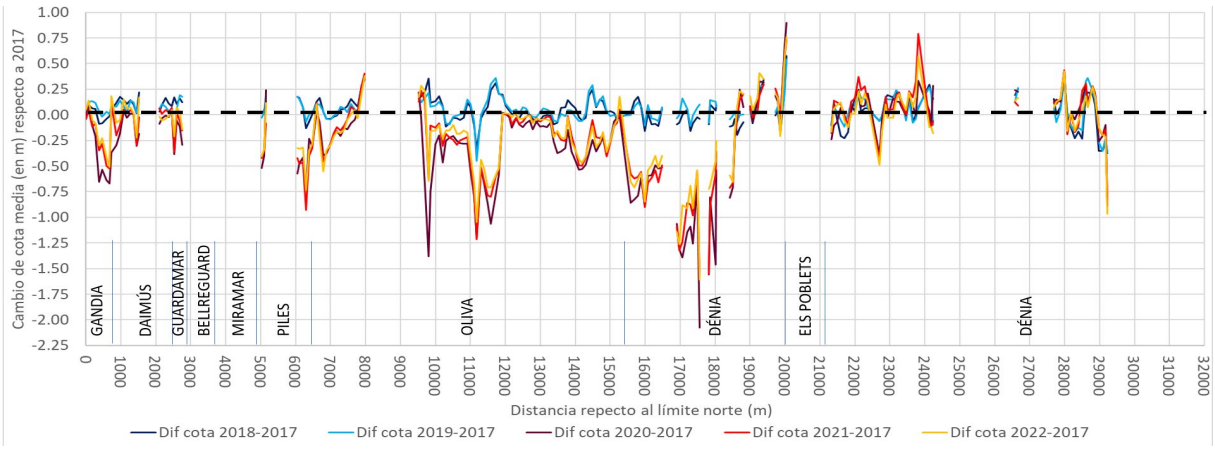



***Fig. 3.*** *Diferencias de cota media de las dunas medidas en los distintos MDS (2017-2022).*

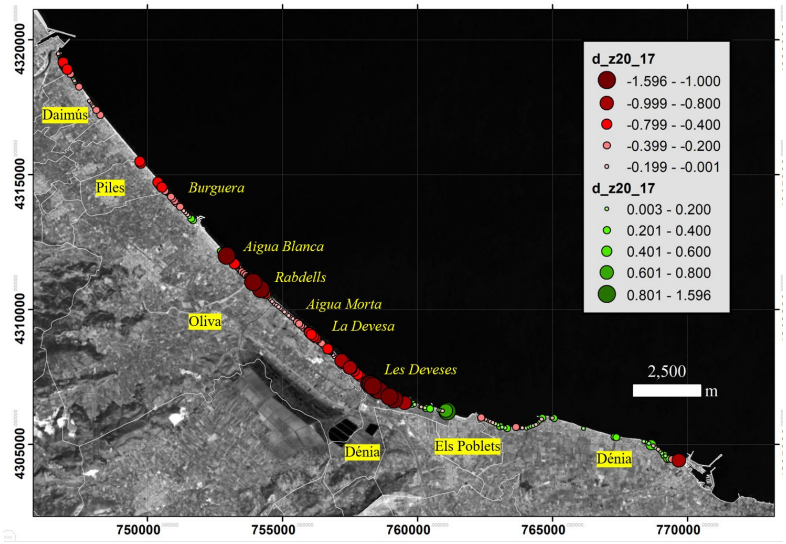



***Fig. 4.*** *Mapa de cambios en las dunas del sector Gandia-Dénia en 2020 respecto a 2017*

Cabezas-Rabadán et al. (2019a), basándose en los cambios en las líneas de costa detectadas desde se satélite, mostró que, para el sector Gandia-Dénia, los temporales de mayor magnitud de las últimas décadas producían daños erosivos delos que ciertas playas podían tardar años en recuperarse. En este sector, los procesos erosivos mantenidos en el tiempo pueden tener una importante repercusión social, ya que se trata de una zona con una gran presión antrópica en que el uso recreativo de las playas constituye uno de los principales atractivos de la industria turística, y en los que la alteración morfológica de la playa puede traducirse en dificultades para el mantenimiento de sus funciones recreativas (Cabezas-Rabadán et al., 2019b). Por ello, la aplicación de técnicas de monitorización tridimensional, como la presentada en este trabajo, puede ser clave para apoyar estudios de cambio morfológico de las playas. Ello permitiría identificar zonas problemáticas, analizar su evolución y su capacidad de recuperación frente a eventos desestabilizadores como los temporales o incluso, en consecuencia, podría servir de orientación para las actuaciones de los gestores costeros.

## 4. Conclusiones

Los resultados mostrados evidencian la utilidad de esta nueva fuente de información altitudinal que aquí se propone y la adecuación del método de análisis de los cambios. Las series de fotografías aéreas pueden proporcionar datos rigurosos para cuantificar y monitorizar la situación sedimentaria de las playas, así como el efecto de los temporales costeros de mayor magnitud. El impacto del temporal Gloria se evidencia especialmente en la parte sur del sector Gandia -Dénia, donde se observa una importante pérdida de sedimentos en algunos segmentos costeros. El análisis de la situación en años venideros permitirá determinar si las playas han sido capaces de recuperarse y

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

alcanzar una situación similar a la presentada antes de 2020 o si, por el contrario, la gran magnitud del temporal dio lugar a un cambio del que este sector costero no es capaz de reponerse.

## 5. Agradecimientos

Este estudio se ha financiado con el proyecto SIMONPLA del programa Thinkinazul apoyado por el MCIN con fondos de la Unión Europea Next GenerationEU (PRTR-C17.I1) y la Generalitat Valenciana; el contrato de M. Salas (Programa de Re-cualificación) de CCR del Ministerio de Universidades financiado UE - NextGenerationEU y su ayuda Primeros Proyectos de Invest. (PAID-06-22) del Vicerrectorado de Invest. de la UPV. Agradecemos al ICV por las fotografías aéreas y datos auxiliares con las que se han obtenido los MDS.

## 6. Referencias

Almonacid-Caballer, J., Gorkovchuk, D., Palomar-Vázquez, J., Cabezas-Rabadán, C., & Pardo-Pascual, J. E. Monitorización tridimensional del sistema playa-duna del norte de Cullera (Valencia) mediante fotografías aéreas. Congreso AET, Cádiz.

Berdalet, E., Marrasé, C., & Pelegrí, J. L. (2020). Resumen sobre la Formación y Consecuencias de la Borrasca Gloria (19-24 enero 2020). http://doi.org/10.20350/DIGITALCSIC/12496

Castelle, B., Harley, M. (2020). Extreme events: impact and recovery. *Sandy beach morphodynamics* (pp. 533-556). https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00022-9

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., Roch-Talens, A., & Guillén, J. (2024). Satellite observations of storm erosion and recovery of the Ebro Delta coastline, NE Spain. *Coastal Engineering*, 188, 104451. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104451

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer., Palomar-Vázquez, J., & Fernández-Sarría, A. (2019a). Monitorizando la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (23), 119-139.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., & Rodilla, M. (2019b). Detecting problematic beach widths for the recreational function along the Gulf of Valencia (Spain) from Landsat 8 subpixel shorelines. *Applied Geography*, *110*, 102047. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102047

Vos, K., Splinter, K. D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., ... & Vitousek, S. (2023). Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 345. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01001-2

Pardo-Pascual, J. E., Cabezas-Rabadán, C., Palomar-Vázquez, J. (2021). Anàlisi dels canvis morfològics del cordó dunar i les platges de la Devesa del Saler a conseqüència del temporal Gloria. In: A Vicenç M. Rosselló, geògraf, als seus 90 anys. *Publicacions de la Universitat de València*. 30, pp. 393-418. ISBN:978-84-9133-428-6.

Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., Cabezas-Rabadán, C. (2022). Estudio de los cambios de posición de la línea de costa en las playas del segmento València – Cullera (1984-2020) a partir de imágenes de satélite de resolución media de libre acceso. *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*, 108, pp. 79 – 104. 2022. https://doi.org/10.7203/CGUV.108-9.23828

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18668

# Aproximación a la segmentación y clasificación semiautomática de dunas costeras

*Automatic segmentation algorithm and classification for coastal dunes delimitation*

**Diego Lopez-Nieta[a], Emilia Guisado-Pintado[a] y Victor F. Rodriguez-Galiano[a]**

[a] Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, 41004 Sevilla, España.

dlopezdelanieta@us.es, eguisado@us.es y vrodriguez8@us.es

How to cite: López-Nieta, D.; Guisado-Pintado, E. y Rodríguez-Galiano, V.F. Aproximación a la segmentación y clasificación semiautomática de dunas costeras. En el libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 27-29 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18668

***Abstract***

*This contribution focuses on coastal dunes, which play a crucial role as natural barriers against oceanic processes such as storms. However, severe anthropogenic impacts have disrupted these ecosystems. Recently, there has been a growing interest in understanding the importance and transformations of coastal dunes using new techniques such the use of satellite imagery and machine learning. In this contribution, an automatic methodology is developed to delineate and semi-automatically classify the eco-environments comprising the coastal dunes of the southern Iberian Peninsula. Six and five classes were established for the two studied study areas, Cabo de Trafalgar and Cabopino, respectively. The classification that appears to better fit reality in both systems is one that combines seasonal NDVI and the SWIR band. This allows for the identification of different eco-environments such as coastal dunes with sparse vegetation, herbaceous, mixed, shrubland, and coastal dune forest. Additionally, for Cabo de Trafalgar sixth class representing an interdunal wetland environment is added. Validation highlights the significant role of the SWIR band in distinguishing wet areas. Ultimately, these results represent a first step towards supervised classification, underscoring the potential of Sentinel-2 given both the high spatial resolution and frequency (5 days).*

***Keywords:*** *Coastal ecosystem, spectral indexes, K-means, Multiresolution Segmentation, Sentinel2*

***Resumen***

*Esta contribución se enfoca en las dunas costeras, las cuales juegan un papel fundamental como barreras protectoras naturales frente a las tormentas. No obstante, los graves impactos antrópicos han perturbado estos ecosistemas. Recientemente, ha surgido un interés en comprender la importancia y transformaciones de las dunas costeras, con avances en el uso de imágenes de satélite y aprendizaje automático. Para ello, en este estudio se emplea una metodología automática para delimitar y semiautomática para clasificar los eco-ambientes que conforman las dunas costeras del sur de la Península Ibérica. Se establecieron 6 y 5 clases para los dos casos de estudio, Cabo de Trafalgar y Cabopino. La clasificación que más parece ajustarse a la realidad en ambos sistemas es la que combina el NDVI estacional y la banda SWIR. Con esto se pueden establecer diferentes eco-ambientes como duna costera con vegetación escasa, herbácea-pastizal, mixta, matorral y bosque dunar costero. Cabe destacar la diferencia en Cabo de Trafalgar, donde se agrega una clase más correspondiente a humedales interdunares. La validación destaca como la banda SWIR juega un gran papel para diferenciar estas zonas húmedas. En definitiva, estos resultados son una primera aproximación a una clasificación supervisada, destacando el potencial de Sentinel-2 debido tanto a su alta resolución espacial como temporal (5 días).*

***Palabras clave:*** *Ecosistemas costeros, índices espectrales, K-means, segmentación multirresolución, Sentinel-2*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Las dunas costeras juegan un papel fundamental en el mantenimiento de la salud y la estabilidad de los entornos costeros a nivel mundial (García-Romero et al., 2019). Estos ecosistemas son proveedores de servicios ecosistémicos esenciales, al actuar como barreras protectoras naturales frente a la erosión y las inundaciones resultantes del aumento del nivel del mar y las tormentas (Guisado-Pintado et al., 2016). Sin embargo, el aumento de la presión antrópica (ej. cambios en el uso del suelo) ha generado importantes perturbaciones en estos ecosistemas como la fragmentación e incluso su desaparición (García-Romero et al., 2019). En este sentido, existe un creciente interés científico en comprender la ecología, distribución y las transformaciones que han experimentado las dunas costeras en las últimas décadas (Brownett y Mills, 2017). Por otro lado, los avances en el uso de teledetección y el *machine learning* se han convertido en una valiosa herramienta para optimizar el rendimiento en la delimitación (segmentación) y el cartografiado (clasificación) de dunas costeras, sobre todo a partir de imágenes aéreas (p.e. Agrillo et al., 2023). Este trabajo tiene como objetivo utilizar un procedimiento automático para delimitar (segmentar) y semiautomático basado en *machine learning* para clasificar los diferentes eco-ambientes que componen las dunas costeras del sur de la Península Ibérica a través de la combinación del uso de índices calculados a partir imágenes de satélite.

## 2. Área de estudio

El área de estudio se centra en las dunas costeras de Cabo de Trafalgar y Cabopino (Figura 1). Ambos sistemas se localizan al sur de la Península Ibérica, el primero en la fachada atlántica y el segundo en la fachada mediterránea.

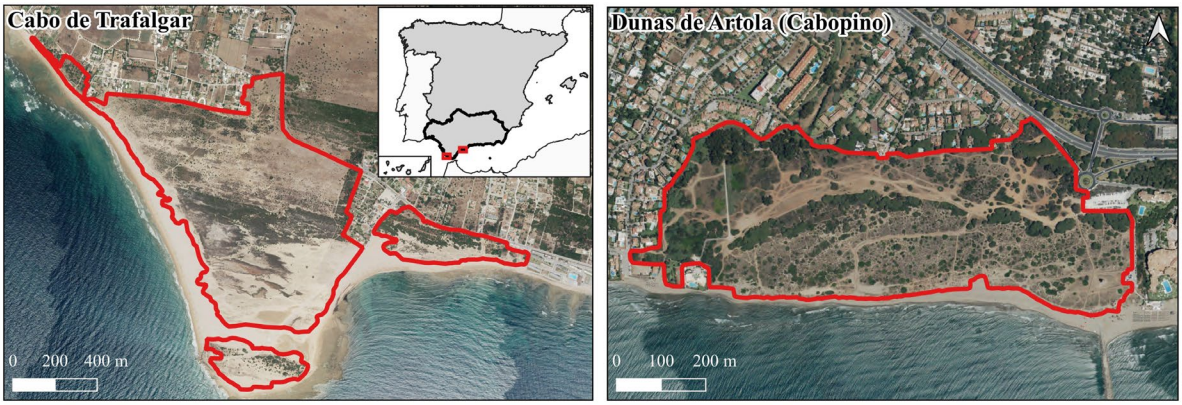



***Figura 1.*** *Área de estudio. A la izquierda, las dunas costeras de Cabo de Trafalgar, a la derecha, las dunas de Artola (Cabopino). Fuente: elaboración propia a partir de los datos del CNIG y REDIAM.*

El Cabo de Trafalgar (Barbate, Cádiz) integra uno de los complejos con mayor abundancia y diversidad morfológica de dunas de la costa gaditana. Se trata de un Monumento Natural de la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA) compuesto de un doble tómbolo que conecta un afloramiento rocoso con el continente (Sanjaume y Gracia, 2011). El clima de esta área es de tipo Mediterráneo-Atlántico con vientos predominantes del SO y del SE, siendo los primeros de mayor intensidad. La altura significante (Hs) del régimen de oleaje es de 0.5-1 m con un periodo de ola de 4 a 12 s y un rango de marea meso-mareal (entre 1 y 4 m) (Ortega-Sánchez et al., 2008). La extensión de este sistema dunar es de aproximadamente 1500 m de longitud por 2500 m de ancho. La vegetación de este sistema destaca por la presencia de formaciones de *Ammophila arenaria* por toda la duna y de *Juniperus oxycedrus*, *Juniperus sabina* subsp. t*urbinata* y fragmentos de *Pinus pinea* por las zonas más antiguas. En la zona intermedia se puede encontrar un complejo palustre en el que se incluyen varias charcas (Sanjaume y Gracia, 2011).

El área de estudio de Cabopino en Marbella (Málaga) alberga una de las dunas costeras mediterráneas mejor conservadas (Dunas de Artola) del sur de la Península Ibérica. Este sistema, ha sido designado Monumento Natural de la RENPA y pertenece a la Red Natura 2000. El clima es típicamente mediterráneo con vientos predominantes son del O en verano y del E el resto del año. El régimen de oleaje se caracteriza por una altura significante (Hs)

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

promedio <1 m con periodos de olas de 4-5 s, siendo un sistema de tipo micro-mareal (<0.2-0.4 m) (Malvarez et al., 2022). Este campo de dunas abarca una superficie de 19.27 ha, llegando a tener aproximadamente 950 m de longitud y más de 200 m de ancho. La vegetación dunar costera mediterránea se estructura en tres estratos: un pinar de *Pinus pinea* en la parte interna del campo de dunas, una franja de matorral en sectores intermedios y un área donde una diversidad de especies anuales como *Ammophila arenaria* colonizan la duna primaria o embrioduna.

## 3. Metodología

La metodología se articula en tres fases: (1) el desarrollo de un algoritmo para la descarga y procesado de las imágenes de satélite y las variables a analizar, (2) segmentación automática de las dunas costeras y (3) clasificación semiautomática de los resultados de la segmentación.

### 3.1. Adquisición de datos y segmentación

El área de estudio se digitalizó con el software ArcGIS 10.8.2 a partir de técnicas de fotointerpretación basadas en la ortofoto de alta resolución del PNOA (0,25 m) y un compuesto de verano de las imágenes multiespectrales del sensor Sentinel 2 nivel 2 armonizado (10 m), ambos para el año 2017. Posteriormente, se diseñó y aplicó un algoritmo en la plataforma *Google Earth Engine* para la adquisición de las imágenes aplicando una máscara de nubes, cirros y sombras. Se calcularon diferentes índices que se usaron posteriormente en la segmentación y clasificación (Tabla 1). Para ello se calculó el valor mediano dando lugar a compuestos anuales y estacionales de Sentinel 2 MSI.

***Tabla 1.*** *Conjunto de variables utilizadas. Fuente: Elaboración propia.*

| Método | Variable | Compuesto | Fórmula | Resolución espacial |
|---|---|---|---|---|
| Segmentación | RGB y NIR | 2017 | | 10 m |
| | SWIR | 2017 | | 20 m |
| Clasificación | NDVI | Estacional (4 x 3 meses) | (NIR-RED)/(NIR+RED) | 10 m |
| | NDWI | 2017 | (NIR-GREEN)/(NIR+GREEN) | 10 m |
| | NDSI | 2017 | (SWIR1-SWIR2)/(SWIR1+SWIR2) | 20 m |

Se aplicó el algoritmo de segmentación multirresolución (MRS, por sus siglas en inglés) del software eCognition 10.3. Este método minimiza la heterogeneidad promedio de los objetos o píxeles de una imagen a una resolución específica para generar nuevos objetos a otra resolución diferente (Baatz y Schäpe, 2000). Los parámetros de escala (SP, por sus siglas en inglés), forma/color y compacidad/suavidad se ajustaron a partir del algoritmo *Estimated Scale Parameter 2* (ESP2) desarrollado por Drăguţ et al. (2014). Esto permitió evaluar la homogeneidad de la segmentación a través de la escala óptima, aplicación del índice de varianza local y la tasa de cambio, considerando varias iteraciones (Drăguţ et al., 2014). Los datos que se usaron para segmentar las dunas costeras de Cabo de Trafalgar y Cabopino (Tabla 1) fueron los compuestos multiespectrales de Sentinel-2: las bandas con resolución espacial a 10 m, azul (B), verde (G), rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR), y una a 20 m, el infrarrojo de onda corta (SWIR), que fue remuestreada a 10 m.

### 3.2. Clasificación

Los resultados de la segmentación fueron agrupados por ambientes costeros (eco-ambientes) a partir del algoritmo de clasificación no supervisado *Kmeans* (Hartigan y Wong, 1979), usando el paquete *mlr de Rstudio.* Este algoritmo se fundamenta en la especificación inicial del número de grupos establecidos por el usuario (k) y en la generación de semillas para dividir los datos. Una vez identificadas las semillas, se asignaron los grupos de la semilla más cercana utilizando la distancia euclídea. Se usó el método de Elbow (Thorndike, 1953) para conocer el número de grupos o *cluster* (k) óptimo (muestra la suma de las diferencias cuadradas al considerar distintos números de k grupos), considerando grupos entre 2 y 15. Finalmente, el algoritmo *Kmeans* calculó nuevas coordenadas para el centroide de cada grupo obteniendo la media, lo que permitió reagrupar los datos según su proximidad a la semilla de referencia, desplazándose gradualmente hacia el centro de cada *cluster*. Estos pasos se

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

iteraron hasta que los datos que cambiaron entre los grupos asignados de una iteración a otra fueron mínimos, indicando un resultado robusto (Rodríguez-Galiano et al., 2022). Los resultados se validaron cuantitativamente empleando matrices de confusión, enfrentando la clasificación que presente mayor concordancia con la realidad (mapa de referencia) con el resto (mapa predicho). Se utilizó el índice Kappa para determinar qué relación de clasificaciones presentaron mayor porcentaje de acuerdo. La información utilizada en este algoritmo de clasificación fueron los segmentos de las dunas costeras obtenidos en el paso anterior. Lo resultaros se calcularon utilizando el valor medio del compuesto de NDVI por estación, la unión de este con cada compuesto del resto de índices espectrales, con el compuesto de la banda del SWIR (Tabla 1), y la combinación de todos.

## 4. Resultados y discusión

Los resultados del algoritmo ESP2 mostraron que los parámetros óptimos de SP en Cabo de Trafalgar y Cabopino fueron de 28 y 32, respectivamente. El parámetro de forma/color de ambos sistemas se estableció en 0.1 porque se priorizó la forma frente al color. La compacidad/suavidad se fijó en un valor intermedio de heterogeneidad, 0.5, en ambas áreas. El número de segmentos resultantes para Cabo de Trafalgar fue de 548 y 106 para Cabopino (Fig. 2A y 2B).

El método Elbow determinó que el número de clases (k) óptimo fue igual a 6, para Cabo de Trafalgar, y 5, para Cabopino. Los resultados del algoritmo *K-means* se foto-interpretó a partir la ortofoto de 2016. El mapa obtenido de los NDVI estacionales con el SWIR fue la clasificación que mostró mejor acuerdo con el paisaje en ambos sistemas dunares (Fig. 2C y 2D). A partir de esta se establecieron los siguientes eco-ambientes: duna costera con vegetación escasa (DCVE), duna costera con vegetación herbácea o pastizal (DCVH), duna costera con vegetación mixta, pastizal con matorral (DCVM), duna costera con matorral (DCM) y bosque dunar costero (BDC). No obstante, Cabo de Trafalgar presentó una clase más, pudiéndose catalogar como humedal dunar costero (HDC).

Los resultados mostraron como la clasificación de los NDVI estacionales y la banda SWIR se aproxima más a la realidad observada, lo cual puede deberse, entre otros motivos, a la resolución espacial de los compuestos, adquiriendo mayor peso el "verdor" de la vegetación y la humedad del suelo. En este sentido, se observa como la clasificación se ajusta a los eco-ambientes presentes en la sucesión ecológica de las dunas costeras (Hesp and Walker, 2013), sobre todo en los primeros estadios. La clase DCVE se localiza en ambos sistemas dunares en las zonas cercanas a la línea de costa, lo cual se corresponde con las embriodunas o dunas incipientes. Sin embargo, en Cabopino, esta clase apareció representada también en la parte más alejada de la línea de costa, donde el modelo parece asociar la escasa vegetación del suelo debido al pisoteo y la presión antrópica con la presencia de esta clase. Las clases DCVH, DCVM y DCM ocupan casi la totalidad del área de ambos complejos dunares en mayor o menor proporción. Estos ambientes pudieran ser el estadio de transición entre la embrioduna y la duna fija con vegetación, es decir, las áreas dunares que están estabilizadas y en las que la vegetación comienza a tomar mayor protagonismo. La clase BDC se corresponde con aquellos ambientes donde la vegetación presenta porte arbóreo, localizándose en las zonas más interiores de ambos sistemas dunares costeros y correspondiéndose con *Pinus pinea*. No obstante, fruto de la presión antrópica fueron sustituyéndose por clases o ambientes como DCVH, DCVM y DCM, viéndose reducidas a manchas con menor importancia (Fig. 2C y 2 D) y donde conviven con vegetación de porte arbustivo como algunas especies del género *Junniperus*. Cabe destacar que las dunas costeras de Cabo de Trafalgar presentaron una diferencia con respecto a las de Cabopino, existiendo un ambiente que corresponde con humedales interdunares. En este sentido, parece cobrar importancia el uso de la banda del SWIR, la cual permitió diferenciar la humedad del suelo y por tanto clasificó estas zonas como ambientes diferentes.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

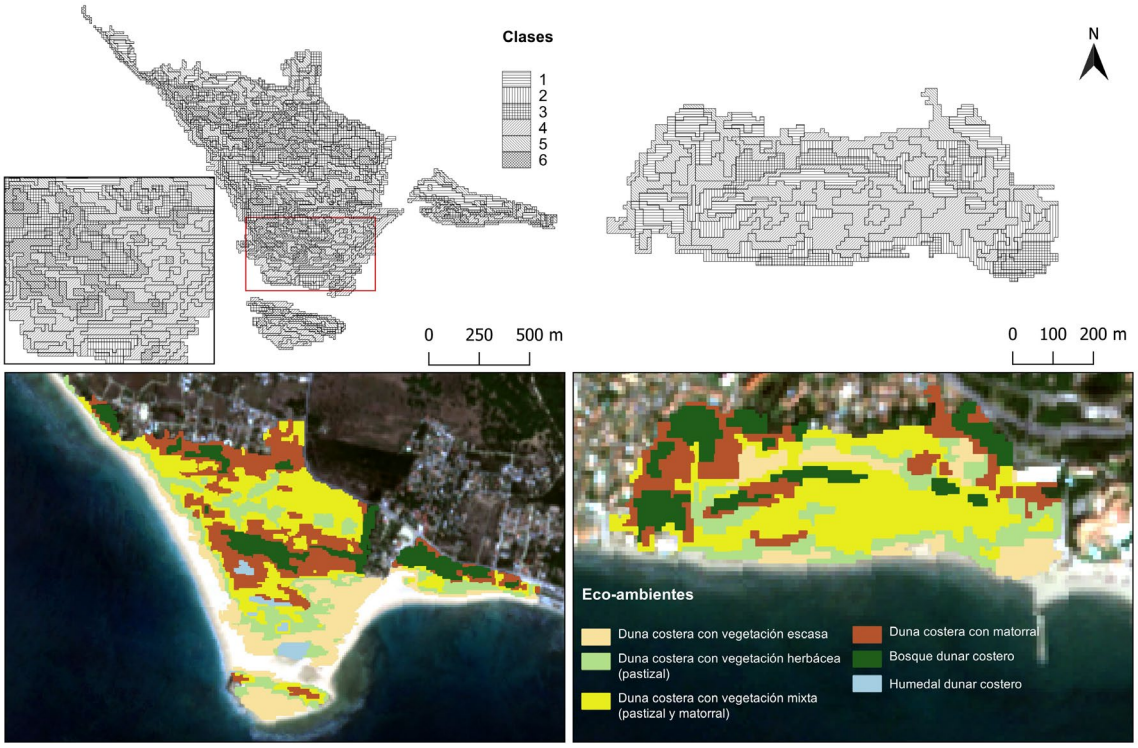



***Figura 2.*** *Representación espacial de la segmentación (A y B) y de las clases (B y C) de las dunas costeras de Cabo de Trafalgar (C) y Cabopino (D). Fuente: Elaboración propia.*

La Tabla 2 muestra las matrices de confusión con mayor coeficiente Kappa en los dos sistemas dunares, mostrando una concordancia moderada: 0.63 y 0.65, respectivamente. En Cabo de Trafalgar se cruzó el mapa de referencia con la combinación de todas las variables (Tabla 1). En Cabopino se cruzó el mapa de referencia con el NDVI por estación.

***Tabla 2****. Matriz de confusión del algoritmo K-means. Fuente: Elaboración propia*

| Cabo de Trafalgar | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | HDC | DCVM | DCVH | BDC | DCM | DCVE | Total | E. Comsión |
| HDC | 10 | 36 | 50 | 0 | 0 | 0 | 96 | 89.58 |
| DCVM | 4 | 112 | 3 | 0 | 17 | 0 | 136 | 17.65 |
| DCVH | 0 | 3 | 63 | 0 | 0 | 23 | 89 | 29.21 |
| BDC | 0 | 0 | 0 | 44 | 13 | 0 | 57 | 22.81 |
| DCM | 4 | 4 | 0 | 3 | 77 | 0 | 88 | 12.50 |
| DCVE | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 76 | 82 | 7.32 |
| Total | 18 | 155 | 122 | 47 | 107 | 99 | 548 | |
| E. Omisión | 44.44 | 27.74 | 48.36 | 6.38 | 28.04 | 23.23 | | |
| Kappa | | | | 0.63 | | | | |

| Cabopino | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BDC | DCM | DCVE | DCVH | DCVM | Total | E. Comsión |
| BDC | 19 | 8 | 0 | 0 | 0 | 27 | 29.63 |
| DCM | 0 | 15 | 0 | 0 | 4 | 19 | 21.05 |
| DCVE | 0 | 0 | 6 | 3 | 0 | 9 | 33.33 |
| DCVH | 0 | 0 | 6 | 13 | 5 | 24 | 45.83 |
| DCVM | 0 | 1 | 0 | 2 | 24 | 27 | 11.11 |
| Total | 19 | 24 | 12 | 18 | 33 | 106 | |
| E. OmisiÓn | 0 | 37.5 | 50 | 27.78 | 27.27 | | |
| Kappa | | | | 0.65 | | | |

*Nota: La referencia en ambos sistemas, NDVI por estación y SWIR, aparece en las columnas, mientras que la clasificación predicha, todas las variables (Cabo de Trafalgar, izquierda) y NDVI por estación (Cabopino, derecha), aparece en las filas. El acuerdo entre ambas clasificaciones se resala en gris. Los errores de comisión y omisión indican qué porcentaje de segmentos clasificados se sobreestiman o infraestiman, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.*

En Cabo de Trafalgar, la máxima diferencia se observó en la clase HDC con una sobreestimación del 89.58% y en la clase DCVH con una subestimación del 48.36%. La mayor parte de estos valores corresponden a 50 segmentos que varían entre ambas clases. Esto pudo deberse a que al incluir todas las variables (Tabla 1), el color de algunos segmentos de DCVH pudo confundirse con zonas húmedas (HDC). En Cabopino, la clase DCVH fue la que presentó mayor sobreestimación (48.83%), mientras que DCVE fue la más subestimada (50%). Del mismo modo, estas estimaciones se relacionan entre sí debido a que existen 6 segmentos incluidos en la clase DCVH que se clasificaron como DCVE en la clasificación predicha. Esta diferencia puede observarse en la parte norte de la duna, zona que presenta un alto impacto antrópico, impidiendo el desarrollo de la vegetación. Integrar la banda del SWIR posibilitó que esos segmentos pertenecieran a la clase DCVE en la clasificación que más se ajusta a la realidad. El resto de los errores de comisión y omisión observados no se consideraron relevantes por lo que el algoritmo K-means logró clasificar correctamente 382 de 548 (69.7%), en Cabo de Trafalgar, y 77 de 106 (72.6%), en Cabopino.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 5. Conclusiones

Estos resultados muestran el potencial de Sentinel-2 para determinar los diferentes eco-ambientes de las dunas costeras del sur de la Península Ibérica utilizando un procedimiento automático para delimitar y semiautomático para clasificar. La información proporcionada de los NDVI estacionales combinada con la banda del SWIR superó a otras combinaciones de bandas e índices en lo que respecta a los eco-ambientes observados, describiendo mejor la presencia de distintos tipos de vegetación y la humedad del suelo. La validación a partir de matrices de confusión mostró como existen segmentos que podrían corresponder a otras clases y que el algoritmo confunde por su semejanza. Además, cabe destacar la importancia de la banda SWIR para diferenciar zonas húmedas y mejorar la clasificación en el caso de Cabo Trafalgar. En conclusión, la metodología propuesta permite realizar una primera aproximación para delimitar eco-ambientes dunares costeros. Asimismo, los resultados obtenidos allanan el camino para una futura clasificación supervisada

## 6. Agradecimientos

El primer autor es becario FPU financiado por el Ministerio de Universidades (Referencia FPU21/01033). Esta publicación ha sido financiada por la Unión Europea-NextGenerationEU y la Consejería de Universidad, Investigación e Innovación, de la Junta de Andalucía, mediante el Plan de Recuperación de Transformación y Resiliencia (PRTR) y el Plan Complementario de "Ciencias Marinas", subproyecto C17.I01.P01.S22, Proyecto (PCM_00009), subvención pública. Componente 17 "Reforma institucional y fortalecimiento de las capacidades del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación", Inversión I1 "Planes Complementarios con las Comunidades Autónomas". Asimismo, la participación en el congreso se financia también con el Programa de Ayudas para Asistencia y Participación en Congresos Científicos de Carácter Internacional de la Universidad de Sevilla.

## 7. Referencias

Agrillo, E., Filipponi, F., Salvati, R., Pezzarossa, A., & Casella, L. (2023). Modeling approach for coastal dune habitat detection on coastal ecosystems combining very high-resolution UAV imagery and field survey. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 9(2), 251-267. https://doi.org/10.1002/rse2.308

Baatz, M. a. S., A. (2000). Multiresolution Segmentation: An Optimization Approach for High Quality Multi-Scale Image Segmentation.

Brownett, J., & Mills, R. (2017). The development and application of remote sensing to monitor sand dune habitats. Journal of Coastal Conservation, 21(5), 643-656. https://doi.org/10.1007/s11852-017-0504-x

Drăguţ, L., Csillik, O., Eisank, C., & Tiede, D. (2014). Automated parameterisation for multi-scale image segmentation on multiple layers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 88, 119-127. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.018

García-Romero, L., Delgado-Fernandez, I., Hesp, P. A., Hernandez-Calvento, L., Hernandez-Cordero, A. I., & Viera-Perez, M. (2019). Biogeomorphological processes in an arid transgressive dunefield as indicators of human impact by urbanization. Sci Total Environ, 650(Pt 1), 73-86. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.429

Guisado-Pintado, E., Navas, F., & Malvárez, G. (2016). Ecosystem Services and Their Benefits as Coastal Protection in Highly Urbanised Environments. Journal of Coastal Research, 75(sp1), 1097-1101. https://doi.org/10.2112/si75-220.1

Hartigan, J. A., & Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), 28(1), 100–108. https://doi.org/10.2307/2346830

Malvarez, G., Navas, F., & del Rio, J. L. (2022). Assessment and projections of sediment budget resilience in Marbella, Spain. Frontiers in Marine Science, 9. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.933994

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Ortega-Sánchez, M., Fachin, S., Sancho, F., & Losada, M. A. (2008). Relation between beachface morphology and wave climate at Trafalgar beach (Cádiz, Spain). Geomorphology, 99(1), 171-185. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.10.013

Rodriguez-Galiano, V., Guisado-Pintado, E., Prieto-Campos, A., & Ojeda-Zujar, J. (2022). A machine-learning hybrid-classification method for stratification of multidecadal beach dynamics. Geocarto International, 37(27), 16534-16558. https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2110616

Sanjaume, E. & García, F.J. (2011). Las dunas en España. Sociedad Española de Geomorfología.

Thorndike, R. L. (1953). Who belongs in the family? Psychometrika, 18(4), 267-276. https://doi.org/10.1007/BF02289263

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.17045

# Validación espacio-temporal de modelos batimétricos derivados de satélite

*Spatiotemporal validation of satellite-derived bathymetric models*

**Ausiàs Roch-Talens[a], Jaime Almonacid-Caballer[a], Carlos Cabezas-Rabadán[a], Jesús Palomar-Vázquez[a] y Josep Eliseu Pardo-Pascual[a]**

[a]Grupo de Cartografía Geoambiental y Teledetección, Dpt. Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, aurocta@ upvnet.upv.es, jaialca@upv.edu.es, carcara4@upv.edu.es, jpalomav@upvnet.upv.es, jepardo@cgf.upv.es

How to cite: Roch-Talens, A.; Almonacid-Caballer, J.; Cabezas-Rabadán, C.; Palomar-Vázquez, J. y Pardo-Pascual, J.E. 2024. Validación espacio-temporal de modelos batimétricos derivados por satélite. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.17045

## Abstract

*This study assesses the spatiotemporal interoperability of bathymetric models derived from Sentinel-2 satellite images, focusing on El Saler Beach (2024) and the coastal areas of Sagunt and Canet d'En Berenguer (2020). Results demonstrate that the use of temporal median compositions for image processing enhances model accuracy, yielding a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.39-0.40 meters and a coefficient of determination ($R^2$) of 0.95 for Saler. When applied to Sagunt and Canet d'En Berenguer coastal segments, the model's performance remained satisfactory with an $R^2$ of 0.80 and an RMSE of 0.59 meters. These outcomes indicate a reasonable level of interoperability between the different coastal regions. Visual comparisons and residual analysis identified challenges such as "false-shoaling" due to water turbidity, particularly in shallow areas and depths greater than four meters. Overall, the findings underscore the potential of Sentinel-2 images for deriving accurate coastal bathymetry and highlight the importance of refined calibration and validation techniques to enhance precision across varied geographic and temporal contexts.*

***Keywords:*** *satellite-derived bathymetry, coastal monitoring, remote sensing, Stumpf method.*

## Resumen

*Este estudio evalúa la interoperabilidad espaciotemporal de los modelos batimétricos derivados de imágenes satelitales Sentinel-2, centrado en la playa del Saler (2024) y las áreas costeras de Sagunt y Canet d'En Berenguer (2020). Los resultados demuestran que el uso de composiciones temporales de mediana para el procesamiento de imágenes mejora la precisión del modelo, con un error cuadrático medio (RMSE) de 0,39-0,40 metros y un coeficiente de determinación ($R^2$) de 0,95 para el Saler. Al aplicarse a Sagunt y Canet d'En Berenguer, el rendimiento del modelo se mantuvo satisfactorio con un $R^2$ de 0,80 y un RMSE de 0,59 metros. Estos resultados indican un nivel razonable de interoperabilidad entre las diferentes regiones costeras. Comparaciones visuales y análisis de residuos identificaron desafíos como el "false-shoaling" debido a la turbidez del agua, particularmente en áreas someras y profundidades mayores a cuatro metros. En general, los hallazgos subrayan el potencial de las imágenes Sentinel-2 para derivar una batimetría costera precisa y destacan la importancia de técnicas refinadas de calibración y validación para mejorar la precisión en diversos contextos geográficos y temporales.*

***Palabras clave:*** *Batimetría derivada por satélite, monitorización de la costa, teledetección, método de Stumpf.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Obtener la batimetría de los fondos costeros es clave para avanzar en la comprensión de los cambios morfodinámicos de estos espacios, especialmente en las playas. Por ello, es crucial poder obtener dichas batimetrías a partir de imágenes satelitales de forma robusta y precisa, con particular potencial si se obtiene a partir de imágenes de libre acceso como Sentinel 2 (S2). En los últimos años han surgido múltiples propuestas y ensayos que distintos autores han tratado de sintetizar en revisiones del estado del arte (como Kutser et al., 2020).

Las metodologías más extendidas se basan en estimar la profundidad del agua en un lugar concreto a partir de la atenuación de la respuesta espectral cuando la radiación electromagnética, la luz, atraviesa el agua. Esta relación entre profundidad y la respuesta registrada en la imagen requiere ser calibrada y, por tanto, se necesita de datos batimétricos reales de la zona. Dicha necesidad de datos batimétricos reales puede ser entendida como una limitación metodológica, pues lo idóneo sería que un modelo, entrenado en un momento y lugar, sea extrapolable a otro tiempo y espacio. Este modelo debería ser capaz de relacionar la señal radiométrica de las imágenes satelitales y la profundidad de manera robusta, es decir, con capacidad para ser extrapolable. Para ello es necesaria una metodología precisa de calibración y validación.

Cuando se habla de atenuación de la luz cabe tener presente que no todas las regiones del espectro electromagnético siguen la misma forma de atenuación. De hecho, solo las bandas del espectro visible pueden atravesar el agua, alcanzar cierta profundidad y, finalmente, reflejarse en el fondo. Pero también, estas mismas bandas son las que se ven más afectadas por los componentes atmosféricos, lo que obliga a que, previo a cualquier análisis, se deba eliminar o minimizar el efecto de la atmósfera y así obtener valores de reflectancia en la superficie terrestre (*bottom of atmosphere,* BOA). Actualmente, en los archivos de la Agencia Espacial Europea se dispone de las imágenes S2 BOA pero estas imágenes no son utilizables porque su procesamiento está pensado para aplicaciones de teledetección terrestre. Esta corrección aplicada no funciona adecuadamente en aplicaciones de teledetección marina, la cual, está afectada por otros fenómenos (reflejo solar u aerosoles) y deben ser tratados de un modo particular. Es por ello por lo que se propone el empleo de ACOLITE, un software específico para las correcciones atmosféricas en zonas acuáticas desarrollado por el Real Instituto Belga de Ciencias Naturales (Vanhellemont, et al., 2016). A priori, las imágenes BOA tratadas con ACOLITE pueden ser ya utilizadas para, a partir de una batimetría de referencia, calibrar un modelo con que poder derivar batimetrías a partir de imágenes satelitales. El siguiente paso y objetivo de este trabajo es, por tanto, evaluar la interoperabilidad espacial y temporal de dichos modelos. Es decir, evaluar la precisión esperable al aplicar un modelo entrenado en un determinado lugar y fecha en otro espacio y/o fecha.

## 2. Materiales y métodos

El estudio implica dos batimetrías de zonas adquiridas en dos fechas distintas. Se requiere dos conjuntos de datos de entrada: una imagen satelital y una batimetría por cada zona/fecha. Aunque las batimetrías sí han sido adquiridas para cada zona/fecha específica, las imágenes satelitales pueden presentar defectos (reflejos solares, oleaje, …) que se corrigen haciendo uso de una combinación de varias escenas cercanas en el tiempo. Para este trabajo, se han combinado 4 imágenes cercanas en el tiempo a cada una de las dos batimetrías.

Para la evaluación se generará un modelo para estimar la batimetría partiendo de unas imágenes adquiridas en las playas de Saler en mayo de 2024 y se aplicarán a un tramo costero de las playas de Sagunt y Canet d'En Berenguer en 2020. En ambos casos se dispone de batimetrías adquiridas con metodologías estándar que ha de servir para evaluar la corrección del modelo aplicado.

### 2.1. Batimetrías empleadas

Las dos batimetrías que han de servir de entrenamiento y validación han sido obtenidas por metodologías estándar. Un primer levantamiento batimétrico fue llevado a cabo en una pequeña zona (5 ha) de la playa del Saler. Este levantamiento se llevó a cabo utilizando un sonar Ping2 monohaz de 115 kHz, ancho de haz de 25º y 2 pulsos por segundo instalado sobre un dron acuático BlueBoat (BlueRobotics). Dicha información se ha generado un modelo batimétrico ráster de 1m de resolución (fig. 1, derecha). El segundo levantamiento batimétrico procede de los

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

trabajos por la empresa Batitop para el Ministerio de Transición Ecológica como parte del *Proyecto de regeneración de las playas de Canet, Corinto y Malvarrosa en los TTMM de Canet d'En Berenguer y Sagunto* y se realizaron con una sonda multihaz entre el 23 y 27 de mayo de 2020. Este levantamiento cubría una zona de 710 ha que abarca profundidades entre 1 y 14,6 metros. La malla de puntos ha sido rasterizada a 10 m de resolución.

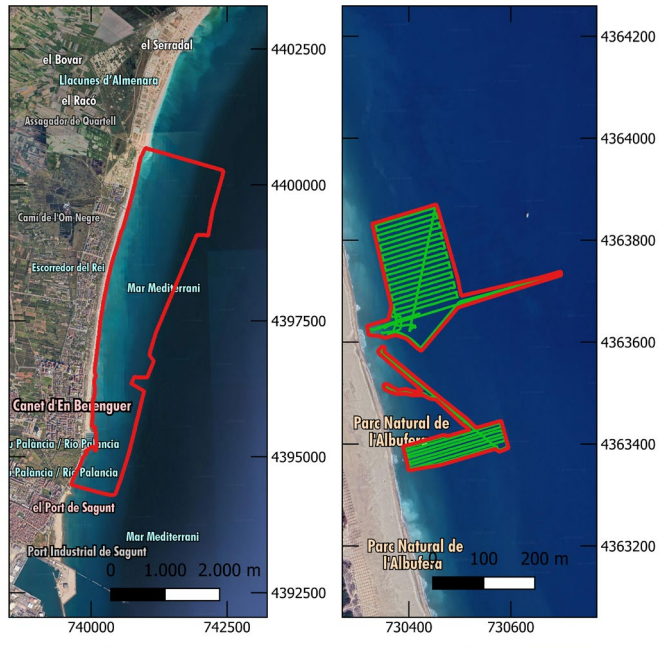



***Fig. 1.*** *Izquierda: Extensión de la batimetría de Sagunt-Canet. Derecha: Extensión de la batimetría del Saler con los puntos de las mediciones en verde. Obsérvese que la escala de ambos mapas es radicalmente distinta: la zona del Saler es mucho más detallada que la de Canet-Sagunt.*

### 2.2. Pretratamiento de las imágenes

Se han utilizado los canales azul, verde y rojo de varias escenas Sentinel 2 tratadas con ACOLITE puesto que, como se detallará posteriormente, requerimos varias imágenes para cada batimetría que derivamos.

Para cada una de las dos batimetrías, se ha seleccionado 4 escenas Sentinel 2 cercanas en el tiempo e interpretadas por el usuario como útiles. Se ha dado por válida aquella imagen que tiene un nivel tolerable de efectos tales como: la desigual turbidez de las aguas, los reflejos solares, el oleaje o la existencia de embarcaciones. Estas embarcaciones pueden inutilizar los píxeles en que se encuentran, así como los circundantes debido a la estela que forman. Caballero y Stumpf (2020a, 2020b) proponen resolver este problema creando composiciones temporales, es decir, componiendo una imagen con píxeles de imágenes adquiridas en diferentes fechas. Según su criterio, se seleccionan aquellos píxeles que representen el valor mínimo en una misma posición. En este trabajo, además de aplicar dicho criterio, se ha creado otra composición utilizando la mediana del conjunto de imágenes con que se crea la composición.

### 2.3. Método para obtener batimetrías derivadas de imágenes satelitales (SDB)

La lógica para la obtención de las batimetrías a partir de las imágenes se basa en la linealización de dos bandas utilizando el logaritmo de éstas (Stumpf et al., 2003):

$$SDB = m \cdot \frac{ln(1000 \cdot R_i)}{ln(1000 \cdot R_j)} + n \quad (1)$$

Dicha ratio, entre $R_i$ que suele ser la banda azul y $R_j$ las bandas roja o verde, se denomina pseudodistancia y, tras obtener los parámetros m y n, permite obtener la SDB. Sin embargo, Caballero y Stumpf (2020a) sugieren que la señal registrada en la banda del rojo detecta con más precisión la profundidad en aguas someras, aunque se disipa a partir de los 4 metros. La señal registrada en la banda del verde permite alcanzar mayores profundidades, aunque

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

en aguas someras pierde precisión. La sinergia de estos dos comportamientos llevó a Caballero y Stumpf (2020a) a proponer un método que pondera las SDB obtenidas con cada color. Así, la batimetría ponderada se calculará de la siguiente manera:

- $SDB_{rojo}$< 2 m → SDB= $SDB_{rojo}$
- $SDB_{rojo}$> 2 m y $SDB_{verde}$> 3,5 m, → SDB= $SDB_{verde}$
- $SDB_{rojo}$>= 2 m y $SDB_{verde}$<= 3,5 m, → SDB= $SDB_{ponderado}$

$SDB_{ponderado}$se determina por la siguiente regresión lineal:

- $SDB_{ponderado} = \alpha \cdot SDB_{rojo} + \beta \cdot SDB_{verde}$

Donde los parámetros α y $\beta$ se hallan a partir de les profundidades de cambio (3,5 y 2 metros):

$$\alpha = \frac{3{,}5 - SDB_{rojo}}{3{,}5-2} \text{ y } \beta = 1 - \alpha$$

Los parámetros cruciales de este estudio son los parámetros obtenidos en la relación lineal entre la pseudodistancia y la batimetría real. Una vez entrenada una imagen de 2024 de la zona del Saler con su batimetría (de esa misma zona y lugar), se aplica su modelo a una composición de imágenes adquiridas cerca de mayo de 2020 de la zona de Sagunt y se obtiene la batimetría correspondiente que, comparada con su correspondiente batimetría de referencia permite calibrar los errores de esa batimetría calculada.

## 3. Resultados

Un primer resultado ha sido la obtención de un modelo batimétrico deducido a partir de las imágenes y de la batimetría realizada en la zona del Saler en mayo de 2024. Esta batimetría calculada (SDB calculada) se ha hecho sobre una composición de 4 imágenes obtenida de dos formas diferentes: (i) usando los valores mínimos y (ii) calculando la mediana entre las distintas imágenes combinadas. De ambas soluciones, se han obtenido los residuos del modelo respecto a la batimetría de referencia. En la tabla 1 se presenta el coeficiente de determinación, $R^2$, para las composiciones de valor mínimo y de la mediana. El $R^2$ indica el porcentaje de información que el modelo ha sido capaz de explicar mientras que, el RMSE indica cuán exacto es el modelo en metros. Los cálculos se han realizado para el rango de profundidades de 0 a 6 m.

***Tabla 1.*** *Comparación entre resultados globales de las composiciones.*

| | **$R^2$** | **RMSE (m)** |
|---|---|---|
| **Composición de mínimo** | 0,95 | 0,40 |
| **Composición de mediana** | 0,95 | 0,39 |

En ambos casos, el coeficiente de correlación es igual y el RMSE similar. Para evaluar la interoperabilidad espacio-temporal, se ha entrenado el modelo en el año 2024 en el Saler y se ha aplicado sobre la composición satelital de zona de Sagunt y Canet d'En Berenguer (2020) cuya batimetría resultante ha sido evaluada con su batimetría correspondiente. Se han extrapolado ambos modelos (composición de mínimo y composición de mediana) y se ha observado que el modelo de composición de mínimo ha generado datos anómalos que no aparecen en la extrapolación de la composición de mediana. La evaluación con el modelo de mediana ha proporcionado unos resultados globales de un $R^2$ de 0,80 y un RMSE de 0,59 cm que, obviamente, son resultados menos precisos que los que encontrábamos cuando se aplicaba en la zona del Saler.

En la figura 2 (centro) se muestra la predicción para Canet d'En Berenguer, utilizando una composición de mediana para 2020. Como puede verse, la predicción es visualmente muy similar a la verdad terreno (figura 2, izquierda). Se aprecia con cierta claridad la morfología de la playa sumergida, en concreto, la existencia de las barras sumergidas, a mayor profundidad en la zona norte y más superficiales en la zona meridional. Respecto a los residuos (figura 2, derecha), en las zonas someras los valores son cercanos a cero, aunque, hasta los 4 metros, se observa una tendencia a estimar una profundidad mayor a la real, especialmente en las barras sumergidas. Sin

 BY-NC-SA

embargo, las zonas entre los 4 y 6 metros (cuya predicción corresponde enteramente al canal de color verde), se observa una tendencia a estimar profundidades menores a las reales (véase el dominio de los tonos amarillos en mapa de residuos). Este fenómeno se agranda hasta los 10 metros de profundidad, donde terminan las predicciones, si bien las estimaciones entre -6 y -10 son extrapolaciones y no se pueden tomar en considerar correctas dado que el modelo se ha creado para profundidades entre 0 y -6m. Esta tendencia a estimar profundidades menores a las reales es ampliamente conocida en la literatura científica (Caballero y Stumpf, 2021; Viaña-Borja et al. 2023). se conoce como *false-shoaling*, se debe a la turbidez del agua y constituye uno de los mayores retos de esta metodología. Los errores más groseros –claramente superiores al metro- aparecen sobre todo en las zonas con profundidades mayores a 6 m, lo cual es lógico visto que el modelo solo ha sido entrenado hasta los 6 m de profundidad.

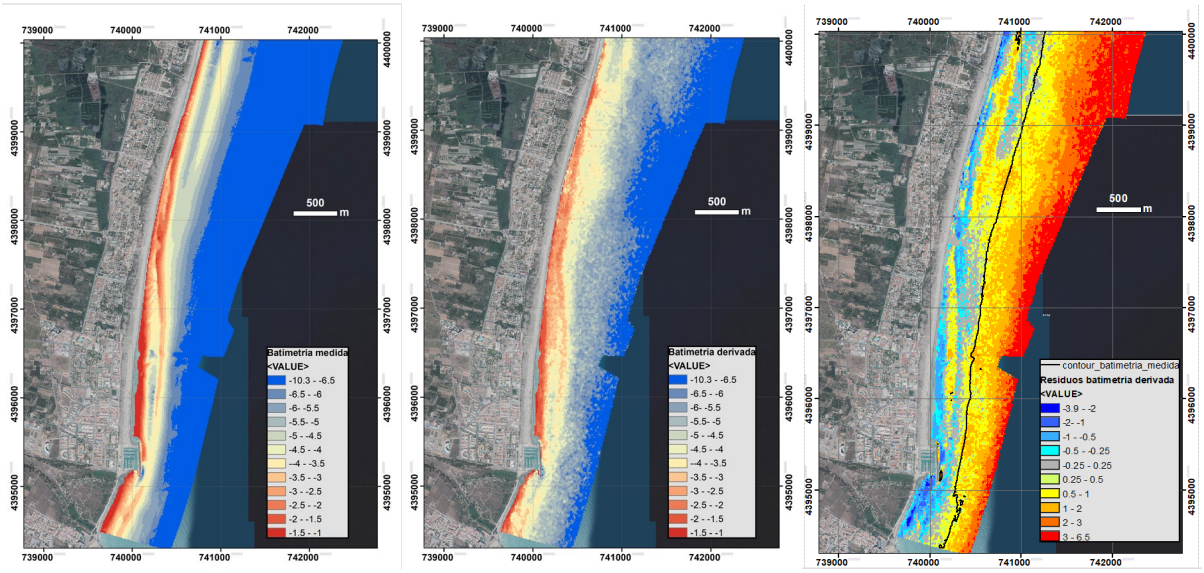



***Fig. 2.*** *De izquierda a derecha, unidades en metros: Batimetría medida por el Ministerio. La batimetría predicha con el modelo entrenado en el Saler y sus respectivos residuos (línea negra: -6 m).*

Con todo, es muy interesante verificar que, habiendo modelado en una zona completamente distinta, usando unos datos medidos de un área costera sumamente pequeña, el modelo derivado permite reconocer formas coherentes con la geomorfología de la zona.

## 4. Conclusiones

La evaluación y validación del modelo batimétrico derivado de imágenes satelitales Sentinel-2 en las zonas costeras de Saler, Sagunt y Canet d'En Berenguer ha permitido identificar varios aspectos clave en la metodología empleada y en los resultados obtenidos. En primer lugar, el empleo de composiciones de mediana para la generación de la batimetría ha demostrado ser ligeramente superior al uso de composiciones de mínimo. Esto se refleja en un menor error cuadrático medio (RMSE), lo que sugiere una mejor precisión en la predicción de la profundidad del agua cuando se utiliza la mediana como método de composición.

Los resultados del modelo entrenado en Saler y aplicado a las zonas de Sagunt y Canet indican una interoperabilidad razonable, aunque con una precisión inferior a la obtenida en la zona de entrenamiento. Específicamente, el coeficiente de determinación ($R^2$) obtenido fue de 0,80 y el RMSE fue de 0,59 m en las zonas de validación, en comparación con un $R^2$ de 0,95 y un RMSE de 0,39-0,40 m en el Saler. Estos resultados subrayan que se está avanzando en un camino correcto pero que todavía se necesita mejorar la extrapolación temporal y espacial del modelo para obtener una mayor precisión en diferentes contextos geográficos y temporales.

La visualización de las predicciones para la zona de Sagunt-Canet mostró una similitud notable con la batimetría de referencia, aunque se identificaron algunas discrepancias en las áreas someras y en profundidades mayores a cuatro metros. Estas discrepancias, conocidas en la literatura como *false-shoaling,* se atribuyen principalmente a

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

la turbidez del agua y representan un desafío significativo para la metodología de batimetría derivada de imágenes satelitales.

El análisis de residuos indicó que, en las zonas con menor profundidad, los valores predichos eran muy cercanos a los valores reales, mientras que en profundidades mayores se tendía a sobreestimar la profundidad. Este fenómeno fue más pronunciado en profundidades de hasta diez metros, donde se observaron las mayores desviaciones. Este patrón es consistente con otros estudios y resalta la importancia de abordar la turbidez del agua en futuros desarrollos metodológicos.

En conclusión, los resultados obtenidos demuestran el potencial de las imágenes Sentinel-2 para la deducción de batimetría en zonas costeras con una precisión aceptable, se demuestra asimismo que el empleo de métodos de composición de mediana evita la aparición de problemas numéricos que surgen ocasionalmente al emplear la composición de mínimo. No obstante, la variabilidad en la precisión al extrapolar el modelo a diferentes tiempos y espacios sugiere la necesidad de continuar investigando y refinando las técnicas de calibración y validación. Es fundamental mejorar la modelización de factores como la turbidez del agua y las correcciones atmosféricas específicas para zonas acuáticas, con el fin de aumentar la precisión y la fiabilidad de las batimetrías derivadas de imágenes satelitales en diversos contextos geográficos y temporales.

## 5. Agradecimientos

Este estudio se ha financiado con el proyecto SIMONPLA del programa Thinkinazul apoyado por el MCIN con fondos de la Unión Europea Next GenerationEU (PRTR-C17.I1) y la Generalitat Valenciana; el contrato de M. Salas (Programa de Re-cualificación) de CCR del Ministerio de Universidades financiado UE - NextGenerationEU y su ayuda Primeros Proyectos de Investigación (PAID-06-22) del Vicerrectorado de Invest. de la UPV.

## 6. Referencias

Caballero, I., & Stumpf, R. P. (2020a). Towards routine mapping of shallow bathymetry in environments with variable turbidity: Contribution of sentinel-2A/B satellites mission. *Remote Sensing*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/rs12030451

Caballero, I., & Stumpf, R. P. (2020b). Atmospheric correction for satellite-derived bathymetry in the Caribbean waters: from a single image to multi-temporal approaches using Sentinel-2A/B. *Optics Express*, *28*(8), 11742. https://doi.org/10.1364/oe.390316

Caballero, I., & Stumpf, R. P. (2021). On the use of Sentinel-2 satellites and lidar surveys for the change detection of shallow bathymetry: The case study of North Carolina inlets. *Coastal Engineering*, *169*. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103936

Kutser, T., Hedley, J., Giardino, C., Roelfsema, C., & Brando, V. E. (2020). Remote sensing of shallow waters – A 50 year retrospective and future directions. *Remote Sensing of Environment*, *240*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111619

Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, *48*(1 II), 547–556. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547

Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2016). Acolite for Sentinel 2: Aquatic Applications of MSI imagery. In *ESA Special Publication SP*. https://odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite

Viaña-Borja, S. P., Fernández-Mora, A., Stumpf, R. P., Navarro, G., & Caballero, I. (2023). Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *120*. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103328

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18688

# On the use of high space-time resolution satellite videos to infer bathymetries

*Aplicación de videos de satélite de alta resolución espacio temporal para inferir batimetrías*

**Candela Marco-Peretó[a], Gonzalo Simarro[a], Daniel Calvete[b], Nicola Palombo-Blascetta[c], Ruth Durán[a] y Jorge Guillén[a]**

[a]Institut de Ciències del Mar (CSIC), cmarco@icm.csic.es; gsimarro@icm.csic.es; rduran@icm.csic.es; jorge@icm.csic.es; [b] Universitat Politècnica de Catalunya , , daniel.calvete@upc.edu y [c]Satellogic Solutions, nicola.palombo@satellogic.com

How to cite: Marco-Peretó, C.; Simarro, G.; Calvete, D.; Palombo-Blascetta, N.; Durán, R. y Guillén, J. 2024. On the use of high space-time resolution satellite videos to infer bathymetries. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18688

## *Abstract*

*Remote sensing has become an effective tool for acquiring coastal data over the last decades. Algorithms, such as cBathy or UBathy, have enabled the derivation of bathymetries through the observed wave propagation using videos from, for example, fixed stations or drones. In this work, we explore the potential use of these techniques for satellite video. For this purpose, departing from uBathy, the nearshore bathymetry at Castelldefels beach (Barcelona) has been estimated using three 45-seconds satellite videos captured at 10 fps and with a spatial resolution of 1 pixel per meter. The results were compared against those of the fixed video monitoring station at Castelldefels beach (coo.icm.csic.es). Additionally, an echo sounder bathymetric survey is used as Ground Truth for validation. The obtained bathymetries from a single satellite video, with favourable wave conditions, are considered successful and almost equivalent to those obtained using 10-minute fixed station videos.*

***Keywords:*** *Remote sensing, Video imagery, Bathymetry inversion, Satellite*

## *Resumen*

*La teledetección se ha convertido en las últimas décadas en una herramienta eficaz para la adquisición de datos costeros. Algoritmos como cBathy o UBathy han hecho posible la estimación de batimetrías a través de la propagación observada de las olas utilizando videos procedentes, por ejemplo, de estaciones fijas o drones. En este estudio examinamos el uso potencial de estas técnicas para vídeos obtenidos desde satélite. Para ello, partiendo de uBathy, se ha estimado la batimetría de la playa de Castelldefels (Barcelona) utilizando tres vídeos de satélite de 45 segundos capturados a 10 fps y con una resolución espacial de 1 píxel por metro. Los resultados obtenidos se compararon con los obtenidos de la estación de cámaras fijas de la playa de Castelldefels (coo.icm.csic.es). Además, se utiliza una batimetría realizada con ecosonda como Ground Truth para la validación. Las batimetrías estimadas a partir de un solo vídeo de satélite, con condiciones de oleaje favorables, se consideran satisfactorias y casi equivalentes a las inferidas con vídeos de estación fija de 10 minutos.*

***Palabras clave:*** *Teledetección, Imágenes de vídeo, Inversión batimétrica, Satélite*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

Coastal bathymetric datasets are critical to improve our understanding of morphodynamic processes in the coastal area, as well as for decision-making on future adaptation measures. Last decades, remote sensing tenhniques has becoming a powerful tool to study the morphodynamic of the beaches (Salameh *et al.*, 2019). Coastal video monitoring stations, but also drones, have been used in recent years to derive bathymetry estimations from videos captured at few frames per seconds (fps), allowing for more frequent and cost-effective bathymetric estimations (Simarro and Calvete, 2022; Simarro *et al*., 2021).

New algorithms, such as cBathy (Holman et al., 2013) or UBathy (Simarro and Calvete, 2022), depart from the linear dispersion relation and different signal processing tools to infer bathymetry from the propagation of surface water waves (which is considered as a footprint of the bed shape).

Satellites enable coverage of large spatial areas, accessible from anywhere, and may provide high-frequency temporal monitoring. The goal of this work is to infer bathymetries through satellite high space-time resolution videos applying algorithims based on wave characteristics, namely UBathy.

## 2. Study site

Castelldefels beach (Barcelona, NW Mediterrenean, Fig. 1) is a 4.5 km open beach with a E-W orientation, composed by median grain sand of ~270 μm, and characterised by the presence of dynamics sand bars at the nearshore (Swart et al., 2021). The study site corresponds to a 1 km section of beach located in the central-eastern part of the beach (Fig. 1). It is a tideless coast (tide < 0.2 m) with a seasonal wave climate dominated by calm conditions during summer and high-energy conditions during the fall and winter. The offshore mean significant wave height is 0.7 m and the average mean period is 4.3 s (Ribas *et al.*, 2020).

A video monitoring station operates at Castelldefels beach since 2010 (http://coo.icm.csic.es/), which, besides recording hourly snapshots and timex, it is recording 3 videos per day since January 2020. The station consists of five cameras installed on top of a 30-m-high tower (the station is already described, e.g., at Simarro *et al*., 2015) (Fig. 1). The videos are recorded only by the three central cameras.

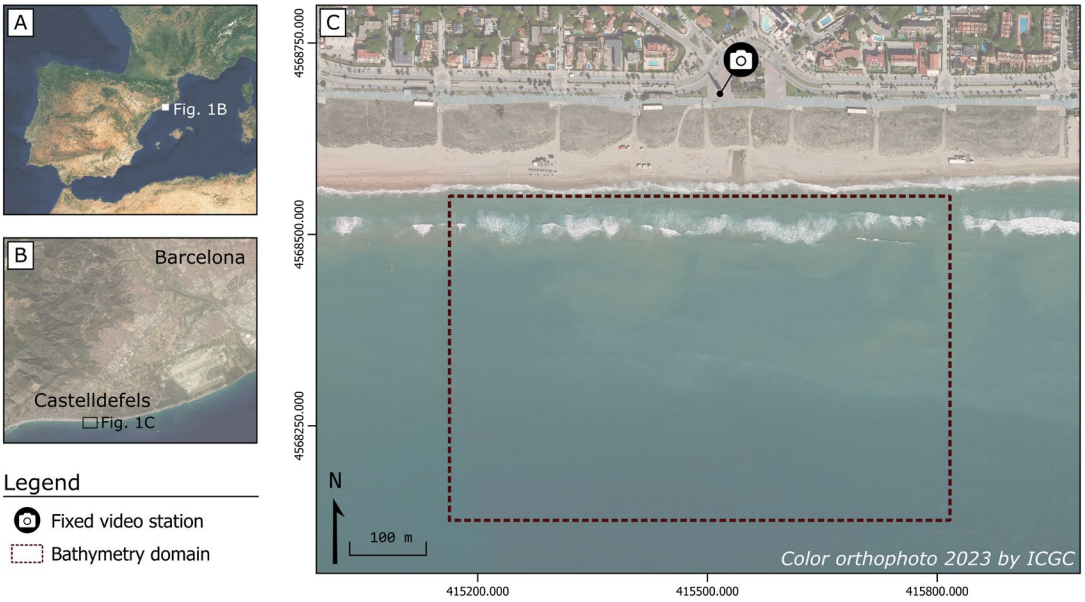



***Fig. 1.*** *Location of the study site, Castelldefels beach.*

 BY-NC-SA

## 3. Methodology

### 3.1. Data Collection

**Satellite videos** were provided by Satellogic under the licensed CC BY-NC-SA 4.0. Videos were recorded by Satellogic's microsatellite NewSat (Mark 4) that is operated in an low orbit at 470 km above the Earth. It is an almost vertical in a north-south direction with a 90 mins revisit frequency. Three satellite videos, of about 45s each one, recorded at 8.25 fps with a spatial resolution of ~1pixel/m, were used to performance the near-shore bathymetry (13/06/2023, 14/06/2023 and 04/07/2023).

**Videos from coastal fixed video station** were recorded by the station described at Section 2. Each of the three central cameras of the station provides three 10-minutes video per day, recorded at 1.87 fps with a spatial resolution of ~1 pixel/m at the shoreline).

**Echo-sounder bathymetry** was recorded and provided by AMB (Àrea Metropolitana de Barcelona). The bathymetry was measured with a single beam echo-sounder from 1m to 3-5 m depth, and with a multibeam echo-sounder in the range 3-5 m to 15-20 m at May 2023. Finally, a 1 m horizontal resolution grid was generated from the data.

All data were projected to the European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS1989) projected to the Universal Transverse Mercator system (zone31N) and referred to the EGM08D595 geoid.

### 3.2. Video stabilisation and bathymetry estimation

The UBathy algorithm (Simarro and Calvete, 2022) has been used to obtain a bathymetry estimation from the satellite videos. Prior to applying the algorithm, it is required to calibrate and stabilise the video. The satellite calibration was achieved using a modification of ULISES codes for long-range (shortly available at: https://github.com/Ulises-ICM-UPC).

The satellite used operates in an orbit 500 km above the Earth, which is deemed a long-range. It is assumed that the satellite beams arrive parallel (to each other) to the Earth's surface, and no intrinsic calibration is needed. Only the so-called extrinsic calibration is required. The extrinsic parameters are $x_0$, $y_0$, and $z_0$ (coordinates of the center of the image), the Eulerian angles $\phi$, $\sigma$ and $\tau$ and the pixel size, and were retrieved for each frame based on GCP tracking. A set of five images uniformly distributed along the video were calibrated manually and then the entire video was stabilized using the above mentioned codes.

For the Ubathy application, the video snaps were first projected into the plane $z = z_{sl}$, where $z_{sl}$ is sea level measured at the Barcelona tidal gauge at the moment of the video. Ubathy was run for each video splitting the 45 s videos in all possibe sub-videos with duration ranged between 10 and 30 s.

## 4. Results and discussion

The extrinsic parameters ($x_0$, $y_0$, and $z_0$: $\phi$, $\sigma$, and $\tau$; and the pixel size) obtained for the satellite video of 04-07-2023 are shown at Fig. 2. Here, $x_0$, $y_0$ correspond to the image center point with $z_0$ set to 0 (which is not in conflict with using a different z for the projection).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

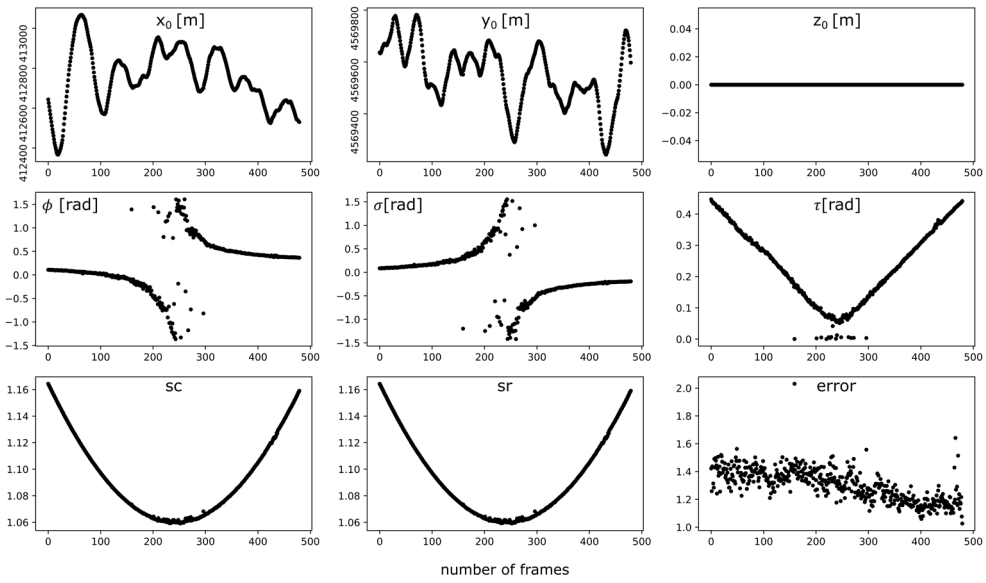



***Fig. 2.*** *Extrinsic parameters ((x0, y0, and z0: ϕ, σ, and τ; pixel size, sc and sr; and error ) obtained for satellite video (04-07-2023).*

Three bathymetries were estimated using the satellite videos. Figure 3a shows the bathymetry obtained from a video with favourable wave conditions for UBathy, i.e., a swell with small significant wave $H_s$. Under these wave conditions, the retrieved bathymetry (its averaged profile) compares well with the echo-sounder bathymetry (Fig. 4b). In addition, the results obtained allow the identification of a typical beach sand bar, as reported, e.g., in de Swart et al., 2021. Comparing the satellite bathymetry with that obtained by applying Ubathy to a 10-minute video from a coastal monitoring station, where Ubathy has already been tested (Simarro and Calvete, 2022), the results for the same date are equivalent to each other (Fig. 4b).

In the videos where the wave conditions are unfavourable for Ubathy, the algorithm is not able to infer the depth (Fig. 2b), as it occurs with the videos, with the same wave conditions, from the fixed cameras (Fig. 4a).

Given the similarity of the results between satellites and fixed cameras, it is expected that the results obtained for satellite videos would be improved by applying a Kalman filter as for fixed cameras (Fig. 4c), requiring an increase in the satellite recording frequency.

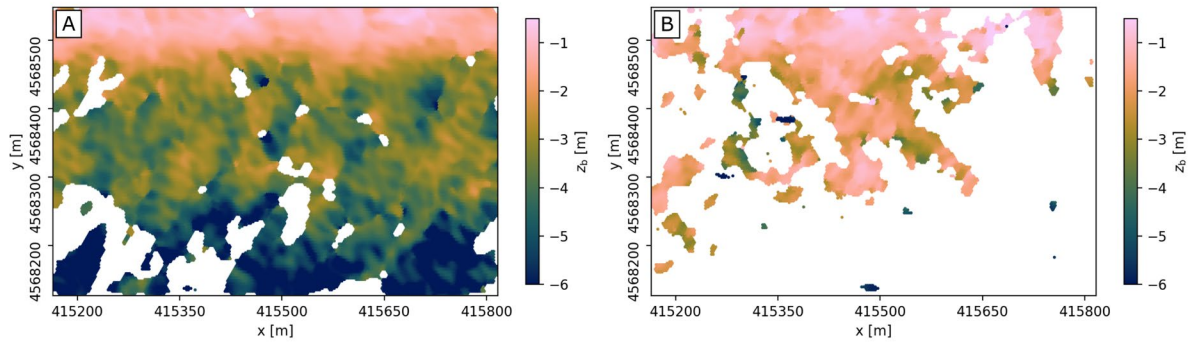



***Fig. 3.*** *Bathymetries resulted for apply Ubathy on satellite video: (A) favourable wave conditions (04-07-2024), (B) unfavourable wave conditions (13-06-2024).* Colour palette is from Crameri, 2018**.**

 BY-NC-SA

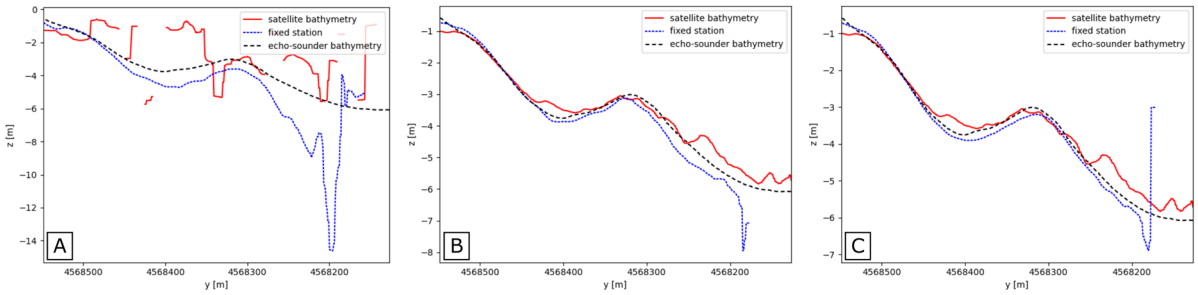



***Fig. 4.*** *Average profile calculated for bathymetry obtained from satellite video (black solid line), fixed monitoring station video (blue dotted line) and for echo sounder bathymetry (red dashed line). Results of (A) videos with unfavoureble wave conditions (13-06-2023), (b-c) videos with favoureble wave conditions (04-07-2023): (B) one video and (C) Kalman filtered apply for fixed camara video.*

## 5. Conclusion remarks

Bathymetry derived from a single satellite video, in favourable wave conditions, is successful and enables the identification of morphologies such as longshore sand bars. The resulting bathymetry from a 45s satellite video are almost equivalent to those obtained using 10-minute fixed station videos. By implementing a Kalman filter using multiple satellite videos, a more accurate bathymetry should be expected.

## 6. Acknowledgments

This work has been carried out in the framework of the MOLLY (PID2021-124272) and SOLDEMOR (TED2021-130321B-I00) research projects funded by the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities. Authors would like to thank Satellogic for providing satellite videos, and AMB for the bathymetry data. This work is contributing to the ICM's Severo Ochoa “Centre of Excellence” (CEX2019-000928-S). C. Marco-Peretó is supported by Spanish FPI grant (PRE2022-101492).

## 7. References

Crameri, F. (2018), Scientific colour maps. *Zenodo*, 10.

de Swart, R. L., Ribas, F., Simarro, G., Guillén, J. & Calvete, D. (2021). The role of bathymetry and directional wave conditions on observed crescentic bar dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(15), 3252-3270. https://doi.org/10.1002/esp.5233

Holman, R., Plant, N. & Holland, T. (2013). cBathy: A robust algorithm for estimating nearshore bathymetry. *Journal of geophysical research: Oceans*, 118(5), 2595-2609. https://doi.org/10.1002/jgrc.20199

Ribas, F., Simarro, G., Arriaga, J. & Luque, P. (2020). Automatic shoreline detection from video images by combining information from different methods. *Remote Sensing*, 12(22), 3717. https://doi.org/10.3390/rs12223717

Salameh, E., Frappart, F., Almar, R., Baptista, P., Heygster, G., Lubac, B. & Laignel, B. (2019). Monitoring beach topography and nearshore bathymetry using spaceborne remote sensing: A review. *Remote Sensing*, 11(19), 2212. https://doi.org/10.3390/rs11192212

Simarro, G., Bryan, K. R., Guedes, R. M., Sancho, A., Guillen, J., & Coco, G. (2015). On the use of variance images for runup and shoreline detection. *Coastal Engineering*, 99, 136-147. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.03.002

Simarro, G. & Calvete, D. (2022). UBathy (v2. 0): a software to obtain the bathymetry from video imagery. *Remote Sensing*, 14(23), 6139. https://doi.org/10.3390/rs14236139

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Simarro, G., Calvete, D., Plomaritis, T. A., Moreno-Noguer, F., Giannoukakou-Leontsini, I., Montes, J., & Durán, R. (2021). The influence of camera calibration on nearshore bathymetry estimation from UAV videos. *Remote Sensing*, 13(1), 150. https://doi.org/10.3390/rs13010150

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18701

# Limitaciones para la detección de cambios en la línea de costa a partir de datos de satélite: la incertidumbre asociada a la pendiente de la playa

*Limitations for shoreline change detection from satellite data: the uncertainty related to the beach slope*

**Paula Gomes da Silva[a], Albert Gallego[a], Erica Pellón[a], Jara Martínez[a], Ana Silio-Calzada[a]**

[a]IHCantabria – Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, , gomesp@unican.es; , gallegoa@unican.es; , pellone@unican.es; , jara.martinesz@unican.es; , ana.silio@unican.es

How to cite: Gomes da Silva, P.; Gallego, A.; Pellón E; Martínez, J. y Silio-Calzada, A. 2024Limitaciones para la detección de cambios em la línea de costa a partir de datos de satélite: la incertidumbre associada a la pendiente de la playa. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18701

## *Abstract*

*The analysis of changes in coastal morphology based on satellite-derived shorelines involves correcting their position to a common reference level before quantifying the changes. This correction is usually based on trigonometric relationships that consider the water level at the time of the image and the average beach slope, assuming that the beach has a constant slope over time and along the beach. However, this approach results in significant errors when estimating the instantaneous position of the coastline and change rates in beaches with complex topography or where the slope varies significantly over time. To quantify the influence of the beach slope on the accuracy of shoreline position estimates in different evironments, this study presents a sensitivity analysis in two beaches along the Spanish coast: Malgrat de Mar, a microtidal beach located in the Mediterranean, and El Puntal de Santander, a macrotidal beach located in the Cantabrian Sea.*

***Keywords:*** *teledetection, coastal change, sensitivity analysis, beach slope, total water level, change rates.*

## *Resumen*

*El análisis de cambios en la morfología costera a partir de líneas de costa derivadas de satélite implica corregir su posición a un nivel de referencia común antes de cuantificar los cambios. Esta corrección se hace habitualmente a partir de relaciones trigonométricas que consideran el nivel del mar en el momento de la imagen y la pendiente media de la playa, asumiendo que ésta es constante en el tiempo y a lo largo de la playa. Sin embargo, esta aproximación resulta en importantes errores a la hora de estimar la posición instantánea de la línea de costa y las tasas de cambio en playas con topografía compleja o donde la pendiente varía significativamente en el tiempo. Con el objetivo de cuantificar la influencia de la pendiente en la precisión de los cálculos de la posición de la línea de costa en distintos ambientes, este trabajo presenta un análisis de sensibilidad en dos playas del litoral español: Malgrat de Mar, una playa de entorno micromareal localizada en el Mediterráneo y El Puntal de Santander, una playa de entorno macromareal localizada en el Cantábrico.*

***Palabras clave:*** *teledetección, cambios costeros, análisis de sensibilidad, pendiente de playa, cota de inundación, tasas de cambio.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

El análisis de los cambios morfológicos en playas derivados de posibles pérdidas o ganancias de arena se hace frecuentemente a partir de sucesivas posiciones de la línea de costa extraídas de imágenes (e.g. desde satélites, cámaras, teléfonos móviles, etc), las cuales permiten identificar cambios en la anchura de la playa.

Sin embargo, las líneas de costa obtenidas de imágenes representan la interfaz arena-agua y reflejan el nivel del mar en el momento de la captura. Esto quiere decir que las variaciones en la anchura de la playa detectadas a partir de las imágenes incluyen ambos fenómenos: i) los cambios en la posición de la línea de costa debido a las variaciones del nivel del mar (e.g. debido a las mareas y al oleaje) y ii) los cambios debido a la erosión o acreción de la playa. Para garantizar que las variaciones detectadas en la posición de la línea de costa no son el resultado de una variación en el nivel del mar, se suele emplear un método de corrección que transfiere todas las líneas a una referencia de nivel común. Esta corrección se hace a partir de relaciones trigonométricas simples, en función del nivel de marea en el momento de la imagen y de la pendiente media de la playa (Fig 1). En este trabajo, se utilizan los acrónimos SDW (Satellite Derived Waterlines) y SDS (Satellite Derived Shorelines) para referirse a las líneas antes y después de la corrección, respectivamente.

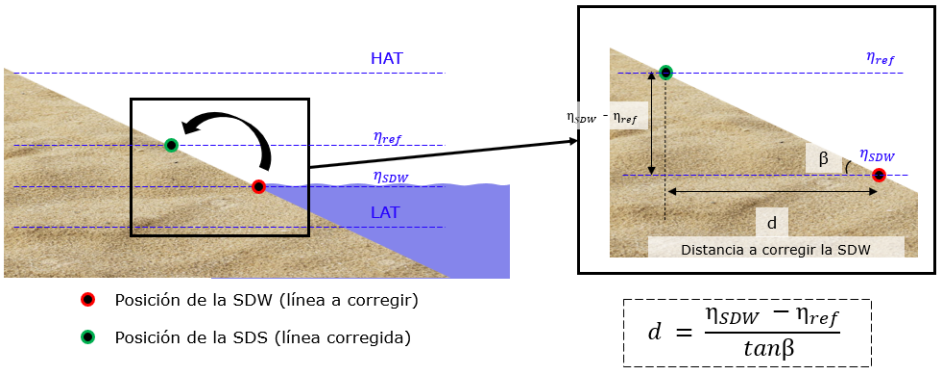



***Fig 1. :*** *Esquema de la corrección de la posición de la SDW a la posición de la SDS d: distancia a corregir, $\eta_{SDW}$: nivel del agua en el momento de la imagen, $\eta_{ref}$: nivel de referencia para la corrección, $tan\beta$: pendiente media de la playa, HAT: Highest Astronomical Tide, LAT: Lowest Astronomical Tide. Fuente: elaboración propia.*

El nivel del mar en el momento ($\eta_{SDW}$) de la imagen es el resultado de diversas componentes y normalmente se calcula como (Eq. 1):

$$\eta_{SDW} = NMM + MA + MM + R \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Donde NMM es el nivel medio del mar local, MA es la marea astronómica, MM es la marea meteorológica y $R$ es el runup, que está relacionado con el nivel máximo alcanzado por las olas en la orilla. En general, $R$ se calcula con fórmulas empíricas sencillas en función de estadísticos de oleaje y de la pendiente de la playa (Stockdon et al., 2006), asumiendo que la pendiente de la playa es constante en el tiempo y en el espacio. Sin embargo, esta aproximación resulta en importantes errores a la hora de estimar la posición de la línea de costa y las tasas de cambio derivadas de estas, ya que el valor de la pendiente puede sufrir variaciones espacio-temporales significativas. Además, se aplica la pendiente tanto para estimar el nivel del mar en el momento de la imagen (a través del cálculo de $R$) como para la transformación de las SDW en SDS mediante la corrección trigonométrica, amplificando el error.

El objetivo de este trabajo es cuantificar la influencia de la pendiente en la precisión de los cálculos de la posición de las líneas de costas derivadas de imágenes de satélite en diversos ambientes. Para ello, se presenta un análisis de sensibilidad de la posición de las SDS en función de distintos valores de pendiente observados en dos playas con características hidro-morfodinámicas diferentes, localizadas en el litoral español: la playa de Malgrat de Mar, localizada en la costa del Mediterráneo español y la playa de El Puntal de Santander, en el Mar Cantábrico.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

## 2. Área de estudio

Las playas objeto de estudio en este trabajo se encuentran en la fachada norte y noreste de la Península Ibérica (Fig 2).

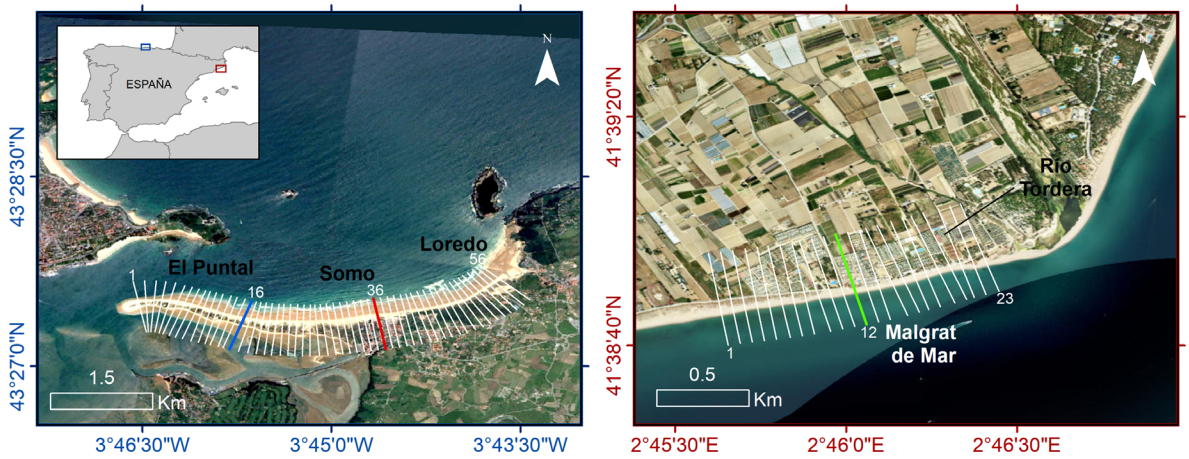



***Fig 2**: Localización de las playas objeto de estudio. A la izquierda, las playas de El Puntal, Somo y Loredo (llamadas conjuntamente "El Puntal de Santander"), en el mar Cantábrico. A la derecha, la playa de Malgrat de Mar, en el Mediterráneo catalán. Marcados en azul, rojo y verde, están los transectos para los que se presentan los resultados en este trabajo. Fuente: elaboración propria.*

Las playas de El Puntal de Santander se ubican en la costa norte, caracterizadas por un régimen de macromarea (las carreras de marea alcanzan valores mayores de 4 m) y la ocurrencia de oleajes energéticos a lo largo de todo el año, especialmente en invierno. Esta playa presenta una morfología compleja, con una zona intermareal extensa, del orden de decenas de metros, y con barras intermareales que dificultan la detección de la interfaz arena-agua durante períodos de media marea y de bajamar. La zona este de la playa tiende a presentar un retroceso de la línea de costa debido al proceso natural de transporte litoral de sedimentos hacia el oeste, a la zona de la desembocadura de la bahía de Santander. Esta zona del cantábrico está frecuentemente cubierta por nubes, lo que reduce la frecuencia de los datos disponibles. Por todo ello, la detección de líneas de costa mediante imágenes de satélite óptico es un reto en estas playas.

La playa de Malgrat de Mar se ubica en el Mediterráneo español, se trata de un entorno micromareal (con carreras de marea menores de 1 m) y dónde ocurren frecuentes eventos extremos de oleaje que causan problemas crónicos de erosión a la playa, la cual ha experimentado un retroceso de hasta 120 m en las últimas dos décadas (Gomes da Silva et al., 2024; Jiménez et al., 2018). La escasa cobertura de nubes en esta playa supone pocos problemas para la teledetección por satélite óptico. Con estas características, Malgrat es, un sitio idóneo para la detección de cambios en la línea de costa por satélite.

## 3. Datos utilizados

Los datos empleados para el análisis realizado en este estudio se obtienen de las siguientes fuentes:

- Líneas de costa de satélite: a partir de la aplicación de la herramienta CoastSat (Vos, et al., 2019a) se obtuvieron las líneas de costa de satélite (Sentinel 2) para el período 2015-2023 en los dos sitios de estudio. En total se obtuvieron 252 SDW para El Puntal de Santander y 252 para la playa de Malgrat de Mar.
- Topobatimetría medida *in situ*: datos de topobatimetría medidos en Malgrat de Mar el 11 de noviembre de 2015 por la Demarcación de Costas de Barcelona, y en El Puntal de Santander el 24 de abril de 2016 por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cantabria fueron utilizados para generar el Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución de 5 m en cada una de las playas de estudio.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

- Dinámicas marinas: datos de nivel del mar medidos por los mareógrafos de Santander y Barcelona, y datos de reanálisis de oleaje fueron obtenidos a partir de la web de Puertos del Estado (https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx).

## 4. Metodología

Los análisis de este estudio se llevaron a cabo siguiendo los siguientes pasos:

i) Cálculo de la pendiente de la playa: A partir del MDE de cada zona de estudio, se obtuvieron valores de pendiente a cada 2 m en la zona intermareal de diversos transectos distribuidos a lo largo de las playas. Con estos valores, se estimaron la pendiente correspondiente al percentil 25% (tanβ P25), al percentil 75% (tanβ P75) y la pendiente media (tanβ media).

ii) Cálculo del nivel del mar en el momento de la imagen ($\eta_{SDW}$): El nivel del mar en el momento de la captura de la imagen se obtuvo de dos formas: a) nivel del mar en calma (*Still Water Level*, SWL), que es la suma del nivel médio del mar, la marea astronómica y la marea meteorológica, y b) nivel total (*Total Water Level*, TWL) que es las suma del SWL y la elevación del nivel debido al oleaje. La componente $R$ del oleaje (*runup)* se ha calculado empleando la fórmula de *runup* propuesta por Stockdon et al., (2006).

iii) Corrección de las SDW a SDS: Se calculó la distancia de cada SDW a una línea base posicionada en tierra. A continuación, aplicando la corrección presentada en la Fig 1 y considerando como nivel de referencia ($\eta_{ref}$) el nivel medio del mar local, se obtuvieron las distancias de las SDS a la línea base. La corrección se hizo considerando las 3 pendientes y los dos niveles calculados en los pasos anteriores.

iv) Cálculo del *offset* entre datos de satélite y datos medidos *in situ*: La línea de costa medida *in situ* se obtuvo como la curva de nivel del MDE correspondiente al nivel medio del mar local. Se obtuvo la distancia a lo largo de cada transecto entre esta línea y la SDS con fecha más cercana a la campaña de mediciones *in situ.* Es decir, se comparó la línea de costa medida con una única SDS, sin discriminar si se había obtenido antes o después de la campaña de campo. Esta medida, también llamada *offset*, es una estimación del error de la posición de la línea de costa tras la corrección.

v) Análisis de los resultados: Los *offsets* en la posición de las SDS corregidas con diferentes pendientes y niveles fueron analizados y discutidos con base en las características morfodinámicas de cada sitio (véase apartado 5).

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. La influencia del nivel en la posición de la SDS

En la Fig 3 se muestran ejemplos de los resultados de *offset* (distancia entre la línea de costa medida y la línea de costa obtenida a partir de la imagen de satélite) en algunos de los transectos de las dos zonas de estudio (véase ubicación de los transectos en la Fig. 2).

El *offset* obtenido empleando el TWL (Fig 3c) fue menor que el obtenido empleando el SWL (Fig 3b). Eso indica que, en las playas analizadas en este estudio, el empleo de la componente de oleaje ($R$) mejoró la corrección de la posición de las líneas de costa. Esto es particularmente evidente en las playas de El Puntal de Santander, donde las diferencias entre los resultados aplicando ambos niveles son mayores. Castelle et al. (2021) obtuvo resultados semejantes en una playa meso-mareal de alta energía de olas en Francia. Según estos autores, en perfiles de playa con bajos valores de pendiente y que reciben gran energía de oleaje, como es el caso de los perifiles de El Puntal de Santander, las oscilaciones de las olas pueden provocar cambios instantáneos en la posición de la línea de costa del orden de decenas de metros. Estas variaciones pueden ocurrir hacia tierra (ascenso de la ola en la playa) o hacia mar (descenso de la ola en la playa), y se espera que la corrección empleando el TWL sea mejor en los casos de líneas de costa de imágenes obtenidas durante los movimientos de ascenso, ya que la componente $R$ en la Eq. 1 representa los máximos niveles alcanzados por las olas durante el estado de mar. Castelle et al. (2021) cuestionó la posibilidad de que el algoritino CoastSat detecte las SDW en la máxima marca de agua (interfaz arena seca-

 BY-NC-SA

arena mojada), algo que se detectó también en algunas de las SDW extraídas de las imágenes de El Puntal de Santander. Eso se debe a que dicho algoritmo fue calibrado con imágenes y datos de una playa micromareal y presenta limitaciones cuando se aplica a playas con características distintas. A día de hoy, no existe una herramienta que presente resultados igualmente satisfactorios en los distintos tipos de playa.

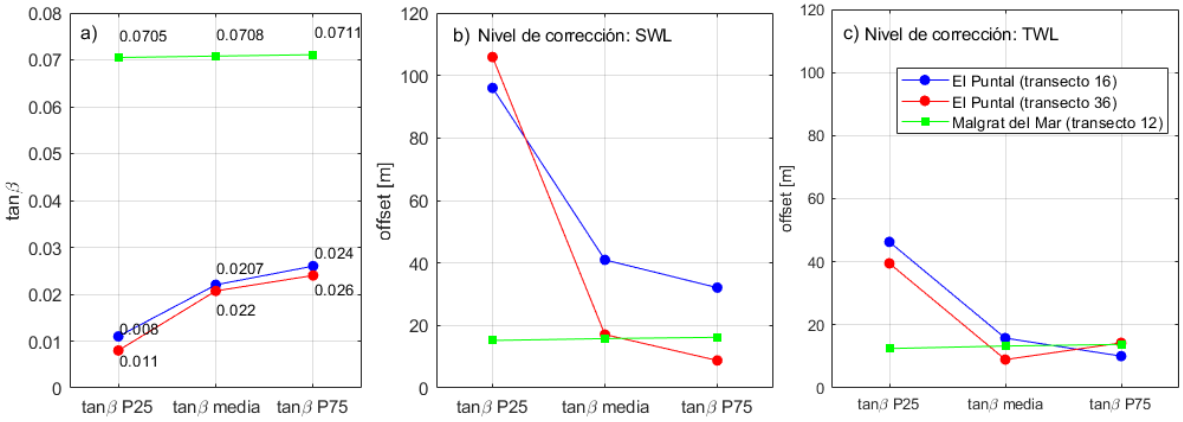



***Fig 3**. Resultados de offset entre línea de costa medida y SDS: a) pendiente de playa observada en los transectos de los dos sitios de estudio, b) valores de offset obtenidos empleando el SWL en la corrección de la posición de la SDS, c) valores de offset obtenidos empleando el TWL en la corrección de la posición de la SDS. Fuente: elaboración propria.*

### 5.2. La influencia de la pendiente en la posición de la SDS y en las tasas de cambio

No se observaron variaciones importantes en los resultados de *offset* según la pendiente en la playa de Malgrat de Mar, que presentó valores mínimos y máximos de 12,5 m (tanβ P25) y 13,8 m (tanβ P75), respectivamente (Fig 3c). Perfiles de playas de entornos micromareales tienden a ser más cortos y con poca variación de pendiente, resultando en menor incertidumbre a la hora de definir la pendiente a ser empleada en la corrección de la posición de las líneas de costa. Estos resultados confirman aquellos de estudios previos aplicados a playas con las mismas características, en los que se resalta la alta capacidad de detección líneas de costa a partir de imágenes de satélite en entornos micromareales (Gomes da Silva et al., 2024; Palomar-Vázquez et al., 2023; Vos et al., 2019b).

Por otro lado, las variaciones en la pendiente de la playa afectaron claramente los resultados de El Puntal de Santander. El offset de la posición corregida de la línea de costa en base al TWL (Fig 3c) varió de 10,1 m (tanβ P75) a 46,3 m (tanβ P25) en el transecto 16, y de 9,0 m (tanβ media) a 39,5 m (tanβ P25) en el trasecto 36. La morfología compleja de esta playa resalta las limitaciones de las metodologías actuales de detección y de análisis de cambios cuando se aplican a entornos macromareales. Estas limitaciones se señalaron también en el estudio presentado por Vos et al. (2023), en el que diferentes herramientas y métodos presentaron peores resultados en términos de detección de la línea de costa en función del rango de marea. Estos problemas suponen una limitación a la hora de detectar los cambios en las líneas de costa mediante la teledetección por satélite en algunos lugares, algo que se explorará en detalle en el futuro, en las siguientes etapas de este trabajo.

## 6. Conclusiones

Este estudio presentó un análisis de sensibilidad de la precisión en el cálculo de la posición de líneas de costa de satélite, en función de la pendiente de playa. Para eso, se analizaron las SDS obtenidas con diferentes pendientes en playas con características morfodinámicas distintas, localizadas en el litoral español. Los resultados indicaron mayores incertidumbres en las líneas de costa detectadas en entornos macromareales con morfología compleja y dinámicas muy activas. Problemas de detección de la línea de costa sumados a grandes variabilidades en la pendiente de playa introducen errores con alto grado de incertidumbre en los cambios estimados a partir de líneas de costa de satélite en estas playas.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Se requieren estudios futuros que permitan: i) comprender mejor la relación entre las fuentes de incertidumbre y la morfodinámica de las playas, ampliando los análisis presentados aquí a un conjunto de playas más amplio, con distintas características; ii) adaptar las metodologías de extracción de líneas de costa a entornos macromareales y playas con morfología compleja; iii) desarrollar metodologías que permitan identificar de manera automática problemas de detección de la línea de costa en los diferentes tipos de playas y iv) cuantificar la incertidumbre en las estimaciones de avance y retroceso en la línea de costa asociadas a la pendiente empleada en el cálculo de las tasas de cambios.

## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen a Puertos del Estado y a la Demarcación de Costas de Barcelona por proveer los datos de dinámicas marinas y de topobatimetría, empleados en el estudio. Este estudio forma parte del programa ThinkInAzul, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de Cantabria.

## 8. Referencias

Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Stokes, C., Konstantinou, A., Marieu, V., & Bujan, S. (2021). Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach. *Geomorphology*, *383*(107707). https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107707

Gomes da Silva, P., Coco, G., Garnier, R., & Klein, A. H. F. (2020). On the prediction of runup, setup and swash on beaches. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 204). https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103148

Gomes da Silva, P., Jara, M. S., Medina, R., Beck, A.-L., & Taji, M. A. (2024). On the use of satellite information to detect coastal change: Demonstration case on the coast of Spain. *Coastal Engineering*, *191*(March), 104517. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104517

Jiménez, J. A., Sanuy, M., Ballesteros, C., & Valdemoro, H. I. (2018). The Tordera Delta, a hotspot to storm impacts in the coast northwards of Barcelona (NW Mediterranean). *Coastal Engineering*, *134*, 148–158. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.012

Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2023). Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET): A New Tool for the Automatic Extraction of Satellite-Derived Shorelines with Subpixel Accuracy. *Remote Sensing*, *15*(12), 3198. https://doi.org/10.3390/rs15123198

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, *53*(7), 573–588. https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2005.12.005

Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019a). CoastSat: a Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, *122*(September), 104528. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528

Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019b). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, *150*, 160–174. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004

Vos, K., Splinter, K. D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E. C., Luijendijk, A. P., Calkoen, F., Almeida, L. P., Pais, D., Klein, A. H. F., Mao, Y., Harris, D., Castelle, B., Buscombe, D., & Vitousek, S. (2023). Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. *Communications Earth and Environment*, *4*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-023-01001-2

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18720

# Detección y caracterización de megacúspides a partir de líneas de costa derivadas de sensores remotos

*Megacusps detection and characterization from remote sensing derived shorelines*

**Eduard Angelats[a], Riccardo Angelini[b], Francisco de-Urmeneta[a], y Francesca Ribas[c]**

[a]Geomatics Research Unit, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya - CERCA, , eduard.angelats@cttc.cat, , francisco.urmeneta@cttc.cat; [b]Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, , riccardo.angelini@unifi.it y [c]Physics Department, Universitat Politècnica de Catalunya, , francesca.ribas@upc.edu .

How to cite: Angelats. E.; Angelini, R.; de-Urmeneta, F. y Ribas, F. 2024. Detección y caracterización de megacúspides a partir de líneas de costa derivadas de sensores remotos. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18720

## *Abstract*

*Megacusps, or periodic alongshore shoreline undulations, are a phenomenon of great scientific interest and of significant importance for beach management. Current knowledge of megacusps, through static video monitoring stations, has limitations in terms of spatial and geographical coverage, being limited to a few kilometres. The use of shorelines derived from satellite imagery, such as S2 or PlanetScope, as input to detect automatically the megacusps presence / absence and characterize them in large geographical areas is very appealing. In this context, this paper presents a methodology to automatically detect coastal sandy segments with megacusps using shorelines derived from aerial and satellite imagery and wavelet analysis, and to characterise the megacups in these segments using a peak detector algorithm. The methodology has been evaluated on a 10 km sandy beach segment located southern from Llobregat Delta, allowing to detect and characterise megacusps both from satellite derived and high-resolution orthophtos shorelines with similar results.*

***Keywords:*** *Subpixel shoreline extraction, beach morphology, megacusps, wavelet analysis, Remote Sensing, Sentinel-2, Aerial orthophoto*

## *Resumen*

*Las megacúspides, u ondulaciones periódicas de la línea de costa, son un fenómeno de gran interés científico y de importancia significativa para la gestión de las playas. El conocimiento de las megacúspides, a través de estaciones fijas de vídeo monitoreo, presenta limitaciones en términos de cobertura espacial y geográfica, limitándose a unos pocos kilómetros. El uso de líneas de costa derivadas de imágenes de satélite, como S2 o PlanetScope, como punto de partida para detectar automáticamente la presencia / ausencia de megacúspides y caracterizarlas en grandes áreas geográficas es muy atractivo. En este contexto, este trabajo presenta una metodología para detectar automáticamente segmentos arenosos con presencia de megacúspides usando líneas de costa de imágenes aéreas y satelitales mediante un análisis basado en wavelets, y caracterizarlas usando un algoritmo detector de picos. La metodología ha sido evaluada en un segmento de playa arenosa de 10 km situado al sur del Delta del Llobregat, permitiendo detectar y caracterizar megacúspides tanto a partir de líneas de costa derivadas de satélite como de ortofotos aéreas con resultados similares.*

***Palabras clave:*** *línea de costa subpíxel, morfología de playa, megacúspides, análisis wavelets, Teledetección, Sentinel-2, Ortofotografía aérea*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Las regiones costeras desempeñan un papel crucial debido a su rica biodiversidad y a sus usos recreativos y económicos por parte del hombre. La vigilancia del entorno costero es esencial en el marco actual del cambio climático y suele implicar la identificación de diversos indicadores, siendo la línea de costa uno de los más frecuentes. Existen varias definiciones de este indicador, pero en este trabajo nos referimos a la línea de costa instantánea, identificada automáticamente a través de imágenes de satélite o digitalizada por el operador como "verdad sobre el terreno" a partir de ortomosaicos obtenidos de fotos aéreas. Tradicionalmente la recogida de datos en grandes zonas costeras suele ser realizada manualmente por un operador humano. Este método requiere mucho tiempo, es costoso y está sujeto a las limitaciones y decisiones de cada operador. Por el contrario, la teledetección satelital se ha convertido en un recurso inestimable para la vigilancia costera, ya que ofrece las ventajas de una cobertura a gran escala y una adquisición frecuente de datos, todo ello con una gran eficiencia económica.

Trabajos recientes han demostrado que las imágenes de satélite proporcionadas por Sentinel-2 (S2) y PlanetScope, pueden emplearse para extraer la línea de costa con una resolución subpíxel y con una exactitud de pocos metros (Doherty et al., 2022; Pardo-Pascual et al., 2023, Vos et al., 2023). Las imágenes S2 y PlanetScope son imágenes multiespectrales que permiten extraer de una forma sencilla las líneas de costa basándose en la reflectancia espectral diferente entre la tierra y el agua. Para ello pueden aplicarse distintos índices (por ejemplo, Normalized Difference Water Index (NDWI), entre otros) y diferentes métodos de automatización (por ejemplo, umbralización o *thresholding* y/o métodos de clasificación supervisada o no supervisada). Los satélites S2 proporcionan imágenes gratuitas, siempre que no haya nubes con una frecuencia de 5 días y un tamaño de píxel de 10, 20 y 60 m en función de la banda espectral. Las imágenes PlanetScope pueden llegar a tener una frecuencia diaria y un tamaño de píxel de 3,7 – 4,2 m por cada una de las bandas, aunque las imágenes no son de libre acceso.

Las líneas de costa de las playas arenosas suelen presentar diversas características morfológicas debido a las variaciones en las condiciones hidrodinámicas y el movimiento del sedimento. Ejemplos de estas características son las megacúspides, ondulaciones periódicas a lo largo de la línea de costa con longitudes de onda de cientos de metros y amplitudes transversales a la costa de unos pocos a decenas de metros (de Swart et al., 2022). El desarrollo de megacúspides en playas arenosas puede estar vinculado tanto a condiciones persistentes de oleaje intermedio como a episodios de tormentas que pueden implicar una fuerte erosión, especialmente en las bahías de las megacúspides (Castelle et al., 2015). Esta fuerte erosión temporal puede afectar a los diferentes servicios de las playas, así como a las dunas y/o a las infraestructuras permanentes. Por lo tanto, profundizar en su conocimiento es importante para la gestión de las playas.

En la actualidad, la investigación sobre megacúspides presenta una serie de limitaciones, ya que los estudios son escasos y suelen estar restringidos espacialmente, y a nivel temporal pueden cubrir periodos no demasiado largos. La implantación de sistemas de *video monitoring* puede ofrecer una observación muy buena desde el punto de vista temporal y una alta resolución espacial (de Swart et al., 2022). No obstante, estos sistemas presentan restricciones en cuanto a su cobertura espacial y geográfica, limitándose a unos pocos kilómetros. Para superar estas limitaciones, proponemos utilizar líneas de costa extraídas de manera automática a partir de imágenes de satélite multiespectrales de S2 y PlanetScope. Estas líneas de costa, con una precisión suficientemente alta como para delinear ondulaciones, ofrecerían una cobertura geográfica mejorada manteniendo una buena resolución espacial y temporal, permitiendo así enriquecer sustancialmente la información disponible sobre este tipo de fenómenos.

En este contexto, este trabajo presenta una metodología basada en dos fases para detectar y caracterizar megacúspides automáticamente usando líneas de costa de imágenes areas y satelitales (S2 y PlanetScope). La primera fase utiliza un análisis de wavelets para detectar de manera automática segmentos arenosos con presencia de megacúspides. En aquellos segmentos donde se han detectado megacúspides se lleva a cabo su caracterización mediante un algoritmo de detección de picos y valles que permite estimar una serie de indicadores que describen las megacúspides (longitud de onda, sinuosidad, sigma).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

## 2. Zona de estudio y fuentes de datos

En este trabajo se ha analizado un segmento arenoso de 10 km situado en el sur del Delta de Llobregat, entre los términos municipales de Castelldefels y Gavà (Barcelona, España) (Fig. 1). Este segmento de playa se caracteriza por un régimen micro mareal y es una zona con presencia de megacúspides, muy dinámica desde el punto de vista espacial y temporal. En la fase inicial de prueba y validación de la metodología para la extracción de la línea de costa, se han utilizado tres ortomosaicos que cubren el Delta del Llobregat, proporcionados por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (Mayo 2017 y 2019, Junio 2021). Estas imágenes de alta resolución (20-25 cm) se han utilizado para digitalizar manualmente las líneas de costa que sirven de referencia, considerando la línea en la posición intermedia (aproximada) entre el *runup* y el *rundown* (es decir, en el medio de la *swash zone*). Tras confirmar las fechas donde se adquirieron las imágenes de los ortomosaicos, se eligieron las imágenes de satélite multiespectrales S2 que presentaban una nubosidad mínima o nula, y que coincidían estrechamente con las fechas de las imágenes aéreas (distancia máxima de 3 días).

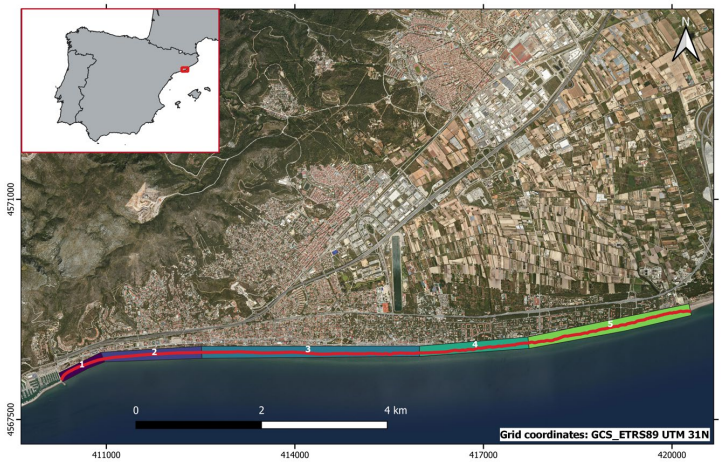



***Fig. 1*** *Localización de la zona de estudio y subsegmentos analizados. La línea roja es un ejemplo de línea de costa utilizada. Los polígonos muestran los subsegmentos analizados y su número identificativo.*

## 3. Metodología

Las líneas de costa derivadas de satélite de S2 y PlanetScope, y que se han usado en este trabajo, se extrajeron siguiendo el procedimiento detallado en Angelini et al., 2024, que permite detectar de manera automática líneas de costa con precisión subpixel. En este trabajo se han utilizado las líneas de costa derivadas utilizando el índice NDWI (para S2) y la banda NIR (PlanetScope) seguido de una clasificación no supervisada basada en GMM (Gaussian Mixture Model) para S2 y K-Means (PlanetScope). El criterio para seleccionar esta combinación fue porque obtuvo un valor menor de distancia media absoluta (DAM). Esta métrica se obtuvo a partir de la comparación entre las líneas de costa derivadas de satélite y las de referencia (obtenidas a partir de la fotointerpretación de los ortomosaicos), utilizando transectos transversales a la costa espaciados cada 10 m.

La primera fase de la metodología ha incluido diferentes pasos para poder detectar de manera automática, a partir de una línea de costa derivada de imágenes satelitales o aérea, aquellos segmentos de costa con presencia de megacúspides. El primer paso consistió en un remuestro de la línea de costa para tener puntos cada 2 metros. A continuación se dividió el segmento de línea de costa en estudio, en subsegmentos más pequeños dependiendo de si se produce un cambio de orientación de la línea de costa superior a un umbral (Fig. 1). Para cada uno de los subsegmentos más pequeños, se detecta el ángulo de rotación de la costa y se corrige la rotación mediante una transformación lineal. Después de esto, se lleva a cabo un análisis de wavelets (Coco et al., 2005, Torrence y Compo, 1998) utilizando un wavelet complejo de Morlet con frecuencia central de 1,0 y ancho de banda wavelet de 1,5, variando las escalas entre 1 y 1200. Luego, para cada punto de la línea de costa, se ha calculado el espectro de potencia del wavelet en cada una de las longitudes de onda, calculado como el módulo al cuadrado

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

de la parte real y la parte compleja del wavelet. La longitud de onda máxima se ha limitado a la mitad de la longitud del segmento, ya que valores por encima no tienen sentido para el tema de estudio. Si este valor está por encima de un umbral fijado como mínimo en una de las longitudes de onda del rango de interés (entre 50 y 400 metros), se ha considerado que este punto forma parte de una megacúspide. A continuación, por medio de técnicas de *GIS*, se delimitaron los diferentes subsegmentos y el área geográfica donde hay puntos clasificados como megacúspides, y por lo tanto se considera que hay presencia de megacúspides. Durante la delimitación de estas áreas se ha utilizado el criterio que si diferentes agrupaciones de megacúspides están separadas por menos de un cierto umbral se consideran un único subsegmento. El umbral se ha fijado en 300 m, el doble de la media de las longitudes de onda media de las megacúspides que pueden ocurrir en esta zona (de Swart et al., 2022).

Una vez delimitados los segmentos con presencia de megacúspides en el rango de longitudes de onda de interés, en una segunda fase se ha procedido a la caracterización de megacúspides en cada segmento. Para ello, a la línea de costa correspondiente al segmento de interés, se le aplica una corrección de tendencia con un polinomio de grado 2. Posteriormente se calculó la desviación estándar y la sinuosidad (Ojeda et al., 2011) para evaluar la variabilidad potencial a lo largo de la costa. A continuación, se utiliza un algoritmo de detección de picos, en el que se filtran las oscilaciones con una amplitud inferior a 3 m para evitar la inclusión de ruido. Este valor, idéntico para las líneas de costa fotointerpretadas desde ortofotografía aérea, S2 y Planetscope, se ha seleccionado entre diferentes valores probados (entre 2 y 5 m) porque proporcionaba un resultado muy robusto en diferentes segmentos de costa. Finalmente, se calculó la longitud de onda a lo largo de la costa como la distancia media entre las crestas de las megacúspides y se determinó la amplitud como la mitad de la distancia media transversal a la costa entre una bahía y sus dos crestas adyacentes.

## 4. Resultados

La Tabla 1 muestra, para la zona de estudio, el mejor resultado en términos de distancia absoluta media (DAM), error cuadrático medio (ECM), y distancia media (DM) entre las líneas de costas extraídas automáticamente de imágenes S2 y de PlanetScope, y las de referencia. Estos resultados corresponden a la media ponderada de todos los transectos de todas las fechas con líneas de costa de referencia disponibles en esta zona de estudio. Los resultados revelan que se puede obtener una precisión de unos 3,8 metros (en términos de ECM) para S2 y de 1.5 metros para PlanetScope (es decir, precisión subpíxel en ambos casos).

***Tabla 1.*** *Distancia absoluta media (DAM), error cuadrático medio (ECM), distancia media (DM) obtenidos para las tres mejores metodologías (índice y método) utilizando imágenes de S2 y PlanetScope. Los parámetros estadísticos corresponden a todos los puntos de todas las fechas de cada sitio.*

| Índice | Método | DAM [m] | ECM [m] | DM [m] | Imágenes |
|---|---|---|---|---|---|
| NDWI | GMM | 3,78 | 4,32 | -3,32 | S2 |
| NIR | k-means | 1,49 | 1,87 | -0,19 | PlanetScope |

El análisis basado en wavelets, para la detección de zonas con presencia de megacusps, se llevó a cabo para las fechas en las que se disponía tanto de un ortomosaico de alta resolución como de la imagen S2 y PlanetScope más cercana (en un plazo de 3 días). La zona de estudio se dividió en 5 subsegmentos correspondientes a cambios de orientación de la costa (Fig. 1), y el análisis se llevó a cabo en cada uno de ellos para las diferentes fechas. La Figura 2 muestra el espectograma derivado del análisis de wavelets para el subsegmento 3 de la zona de estudio (3,6 km de longitud), para líneas de costa derivadas de ortomosaicos y de S2 de mayo 2019. La Figura 2 muestra que los dos espectrogramas son muy parecidos, y que el espectro wavelet es máximo alrededor de una longitud de onda de 1km y bastante homogéneo a lo largo de la línea de costa. Por otro lado se pueden observar, tanto para las líneas de costa derivadas de S2 como de los ortomosaicos (de referencia), una zona muy localizada con magnitudes importantes alrededor de 15-20. Estos valores pueden asociarse a la presencia de megacúspides con longitudes de onda comprendidas entre 70 y 230 m (parte inferior derecha en las dos subimágenes). El resultado final de esta fase se puede observar en la figura 3 donde se muestran los puntos de la línea clasificados

2024, Editorial Universitat Politècnica de València (cc) BY-NC-SA

como pertenecientes a megacúspides y que se encuentran en dos subsegmentos de aproximadamente 0,8 y 1,4 km (la línea de costa de este ejemplo es de S2).

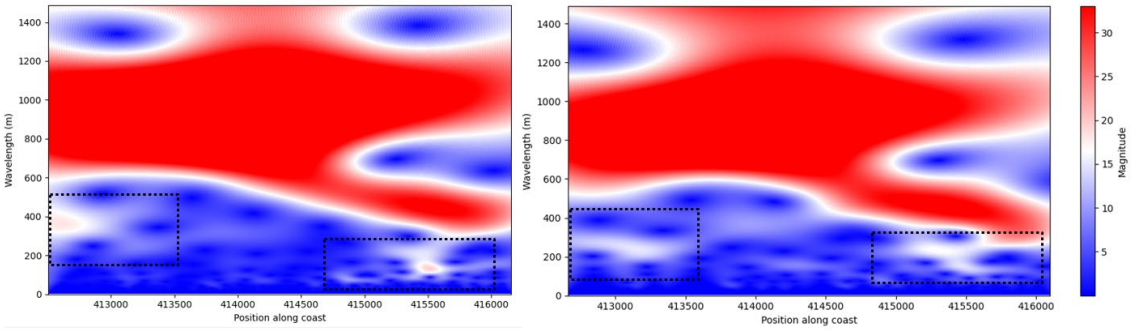



***Fig. 2*** *Espectrogramas wavelet del subsegmento número 3. Espectrogramas obtenidos a partir de las líneas de costa derivadas de ortografía aérea (izquierda) y de S2 (derecha) en mayo 2019. Las áreas con presencia de megacúspides se muestran dentro de los rectángulos negros.*



***Fig. 3*** *Ejemplo de subsegmentos delimitados automáticamente y clasificación de los puntos línea de costa. Subsegmentos de 0,8 y 1,4 km (lila y rojo) a partir de los espectrogramas wavelet del subsegmento número 3. Puntos de línea de costa clasificados como megacúspides (naranja) dentro del rango de longitudes de onda de interés, y amarillo los clasificados como no pertenecientes a megacúspide.*

Una vez detectado las zonas donde hay presencia de megacúspides, se aplica el proceso de caracterización de megacúspides en uno de estos subsegmentos (de 1,4 km), utilizando la localización automática de picos y valles. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 2 utilizando como indicadores la longitud de onda media (LOM), amplitud media (AM), sigma de la posición del subsegmento de línea de costa y sinuosidad del subsegmento de línea de costa.

***Tabla 2.*** *Longitud de onda media (LOM), amplitud media (AM), sigma y sinuosidad (S) obtenidas en las imágenes S2 y PlanetScope para un subsegmento de 1,4 km del Delta del Llobregat.*

| Índice - Método | LOM [m] | MA [m] | sigma | S | Imagen |
|---|---|---|---|---|---|
| NDWI - GMM | 142,93 | 10,63 | 4,4 | 1,054 | S2 |
| NIR - kmeans | 142,91 | 11,07 | 3,9 | 1,0154 | PlanetScope |
| Referencia | 140,88 | 11,24 | 4,2 | 1,0120 | Orfotofoto aéria |

## 5. Discusión y conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para detectar y caracterizar megacúspides a partir de líneas de costa obtenidas con sensores remotos, de manera robusta y precisa. Las características de las megacúspides (Tabla 2) detectadas automáticamente en la zona de estudio son coherentes con las observadas en de Swart et_al. (2022) a

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

partir de líneas de costa derivadas de una estación de *video monitoring*. Estos resultados prometedores se ampliaran a partir del análisis que se está llevando a cabo de todas las imágenes S2 y PlanetScope disponibles de la zona de estudio. El uso del análisis de wavelets no es nuevo ya que se ha utilizado, entre otros, para estudiar la interacción entre la línea de costa y las barras de arena (Coco et al., 2005). No obstante, en este trabajo se han utilizado para detectar de manera automática segmentos de costa con presencia de megacúspides, a partir de imágenes satélites multispectrales. La naturaleza automática del análisis lo hace fácilmente aplicable a diferentes casos de estudio y propósitos. Por lo tanto, tiene el potencial de permitir la detección y caracterización de megacúspides en una variedad de localizaciones geográficas y con buenas resoluciones espaciales y temporales. El análisis de wavelet ha revelado en algunas líneas de costa, un posible mecanismo de autorganización de la línea de costa en unas longitudes de onda mayores que las de las megacúspides (alrededor del km). Sin embargo, este resultado es preliminar y requeriría un análisis mucho más extenso y detallado. La metodología propuesta incluye el uso tanto de imágenes S2 como PlanetScope. Esto permitiría, a nivel operacional, utilizar S2 para identificar y caracterizar segmentos de costa donde se desarrollen megacúspides y a su vez identificar eventos significativos. En estos casos, se podría analizar con más detalle la evolución temporal añadiendo las líneas de costa extraídas de las imágenes PlanetScope.

## 6. Agradecimientos

Los trabajos de E.A y F.d-U reciben fondos de la Generalitat de Catalunya a través de la ayuda 2021SGR00536. Los estudios de F.R están subvencionados por el Gobierno de España a través de las ayudas PID2021-124272OB-C22 y TED2021-130321B-I00 (MINECO/FEDER).

## 7. Referencias

Angelini, R., Angelats, E., Luzi, G., Ribas, F., & Masiero, A., 2024. Shoreline Extraction Methods from Sentinel-2 and PlanetScope Images, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences., XLVIII-1-2024, 1–6. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-1-2024, 2024

Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K.D., Robinet, A., Sénéchal, N. & Ferreira, S., 2015. Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology* 238, 135–148. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.006

Coco G., Bryan K.R., Green M.O., Ruessink B.G., Turner I.L. & Van Enckevort I.M.J., 2005, Video Observations of Shoreline and Sandbar Coupled Dynamics, Proceedings of Coasts and Ports.

de Swart, R.L., Ribas, F., Calvete, D., Simarro, G. & Guillén, J., 2022. Observations of megacusp dynamics and their coupling with crescentic bars at an open, fetch-limited beach. *Earth Surface Processes and Landforms*. 47, 3180–3198. https://doi.org/10.1002/esp.5451

Doherty, Y., Harley, M. D., Vos, K. & Splinter, K. D., 2022. A Python toolkit to monitor sandy shoreline change using high-resolution PlanetScope cubesats. *Environmental Modelling and Software*. 157, 105512. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105512

Ojeda, E., Guillén, J. & Ribas, F., 2011. Dynamics of single-barred embayed beaches. *Marine Geology*. 280, 76–90. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.12.002

Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Fernández-Sarría, A., Armaroli, C., Ciavola, P., Montes, J., Souto-Ceccon, P.E. & Palomar-Vázquez, J., 2023. Assessment of Satellite-Derived Shorelines Automatically Extracted from Sentinel-2 Imagery Using SAET. *Coastal Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104426

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Torrence, C. & Compo, G.P. , 1998. A practical guide to wavelet analysis, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 79, 61-78. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079%3C0061:APGTWA%3E2.0.CO;2

Vos, K., Splinter, K.D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E.C., Luijendijk, A.P., Calkoen, F., Almeida, L.P., Pais, D., Klein, A.H.F., Mao, Y., Harris, D., Castelle, B., Buscombe, D. & Vitousek, S., 2023. Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. Communications Earth & Environment 4. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01001-2

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18652

# Técnicas geomáticas aplicadas al análisis de las consecuencias provocadas por la construcción de estructuras rígidas en las playas urbanas del entorno de "La Magdalena" (Santander)

*Geomatic techniques applied to the analysis of the consequences caused by the construction of rigid structures on the urban beaches of "La Magdalena" (Santander)*

**Germán Flor-Blanco[a], Manuel Sánchez Fernández[b], José Juan de Sanjosé Blasco[b] y Germán Flor[c]**

[a] Departamento de Geologia. Universidad de Oviedo, UNESCO IGCP 725 Forecasting coastal change. GEOCANTABRICA FECYT GROUP., , florgerman@uniovi.es; [b]Departamento de Expresión Gráfica, Universidad de of Extremadura, msf@unex.es , , jjblasco@unex.es , [c] Departamento de Geologia. Universidad de Oviedo, , gflor@uniovi.es

How to cite: Flor-Blanco, G.; Sánchez Fernández, M.; de Sanjosé Blasco, J.J. y Flor, G. 2024. Técnicas geomáticas aplicadas al análisis de las consecuencias provocadas por la construcción de estructuras rígidas en la playa urbanas del entorno de "La Magdalena" (Santander). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18652

## *Abstract*

*From the 1970s dredging sands were poured onto the embayed beaches of La Magdalena in order to increase beach width. A recent project aimed to solve the sand losses after each storm by building two perpendicular breakwaters about 620m apart. The eastern breakwater was built in the early summer of 2018, and wave storms since 2018 to 2021 progressively dismantled the reconstructed upper beach areas and eroded other segments to which they had previously retreated. The western breakwater, however, designed to retain the E-W sandy beach drift, was never built.*

*Four photogrammetric restitutions from 2005, 2010, 2014 and 2017 were obtained to better understand the previous topographic distribution of the back and foreshore. Field observations were made and six field campaigns carried out from 2015 using TLS and GNSS: since november 2018 to april 2021 The results show that the constructed breakwater solution has failed to stabilize the beach and that the predictive models that justified it have not matched the actual dynamic and sedimentary evolution, with erosion and material damage continuing to the present day.*

***Keywords:*** *Urban beaches; breakwater, erosion; aerial photogrammetry; TLS.*

## *Resumen*

*A partir de la década de 1970 se vertieron arenas de dragado en las playas de la ensenada de La Magdalena para aumentar el ancho de la playa. Un proyecto reciente tenía como objetivo solucionar las pérdidas de arena después de cada tormenta mediante la construcción de dos rompeolas perpendiculares separados por 620 m. El espigón oriental se construyó a principios del verano de 2018, y los temporales de olas desde 2018 hasta 2021 desmantelaron progresivamente las zonas superiores de la playa reconstruidas y erosionaron otros segmentos a los que previamente se habían retirado. Sin embargo, el rompeolas occidental, diseñado para retener la deriva de la playa de arena de este a oeste, nunca se construyó.*

*Se obtuvieron cuatro restituciones fotogramétricas de los años 2005, 2010, 2014 y 2017 para comprender mejor la distribución topográfica previa de la playa. Se realizaron seis campañas de*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

*campo utilizando TLS y GNSS: desde noviembre de 2018 hasta abril de 2021. Los resultados muestran que la solución del espigón construido no ha conseguido estabilizar la playa y que los modelos predictivos que la justificaron no han coincidido con la evolución dinámica y sedimentaria real, continuando la erosión y los daños materiales hasta la actualidad.*

***Palabras clave:*** *Playas urbanas; dique; erosión; fotogrametría aérea; láser escáner terrestre*

## 1. Introducción

Este trabajo recoge los resultados obtenidos tras una investigación de más de 3 años. Además, se incorpora una visión del estado actual del problema generado tras la construcción del dique de contención en la playa estuarina de La Magdalena (Santander). A este respecto, es ampliamente aceptado que muchas playas urbanas necesitan mantener su ancho de playa para recreación y seguridad costera mediante la realimanetación de arena después de tormentas severas (Holmes y Beverstock, 1996), así como la restauración de las geometrías del sector supramareal. Sin embargo, las diferencias entre el aporte y el material nativo (tamaño y composición) tienen una influencia importante en la dinámica del stock de sedimentos (Grottoli et al., 2017).

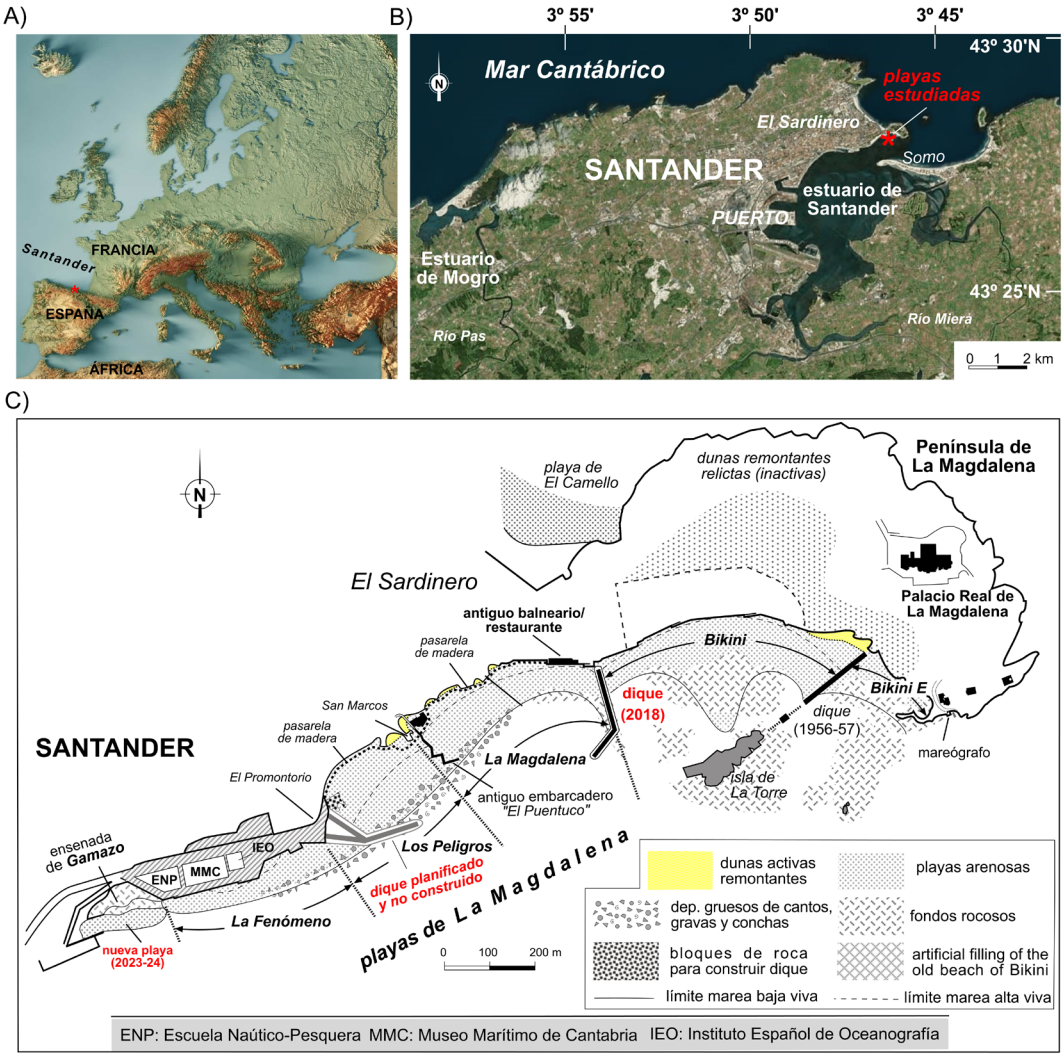



***Fig. 1****. A) Situación de la costa de Cantabria y ciudad de Santander. B) La zona de estudio se sitúa en el margen exterior occidental de la desembocadura del estuario de Santander. C) Ubicación de las playas, los dos espigones previstos (uno construido), además de otras estructuras y morfologías según la actualización de 2024.*

Proyectos pioneros en Estados Unidos optaron por la instalación de estructuras rígidas, como espigones, diques, etc., que posteriormente fueron sustituidas por alimentaciones arenosas o soluciones mixtas: alimentación de

 BY-NC-SA

playas acompañada de la construcción de pequeños embarcaderos y fondos (Finkl y Walker, 2018). Este tipo de actuaciones "blandas", llamadas así porque no introducen elementos rígidos en la playa, suelen considerarse la opción más respetuosa con el medio ambiente (Flor et al., 2015; Aragonés et al., 2016).

En el Mar Cantábrico, donde el clima húmedo hace que el litoral sea atractivo, sólo durante dos o tres meses en verano, se han realizado varios planes en sus playas. Se han desarrollado planes en playas de Asturias y Cantabria, entre ellas destaca la playa de La Magdalena, ubicada en la ciudad de Santander (Fig. 1), habiéndose regenerado éstas durante la década de los 70 del siglo pasado y, hasta la construcción del dique, se realizaban aportaciones puntuales del material de dragado del canal de entrada al estuario de Santander.

El área de estudio se circunscribe a las playas estuarinas del entorno conocido como "La Magdalena" (Santander), que se distribuyen de E a O, con las siguientes longitudes: Bikini oriental, 170 m; Bikini principal (hasta el dique), 540 m; La Magdalena, 420 m; Los Peligros, 230 m; y La Fenómeno, 240 m, que se desarrolla un lóbulo progradante adosado al muelle (Fig. 1). En todos ellos, la anchura es variable, muy corta en la zona oriental (35 m) y creciente hacia el oeste, alcanzando un máximo en Los Peligros en torno a los 130 m, y disminuyendo en La Fenómeno a 35 m y a 15 m en el lóbulo (Fig. 1C). Destacar que, en apenas dos años, en la ensenada de Gamazo (sector más occidental), se ha generado una nueva playa (Fig. 1C).

El objetivo de este trabajo ha sido determinar las transformaciones que se produjeron desde finales del siglo XX hasta 2021 con técnicas geomáticas y analizarlas para ganar la necesaria perspectiva histórica. Otro objetivo fue determinar los cambios morfodinámicos de las playas tras el cambio de gestión y la construcción de estructuras rígidas, cuantificando los volúmenes de sedimentos depositados y erosionados durante tres años consecutivos entre 2018 y 2021, añadiendo la evolución hasta 2024, para así predecir la evolución futura de estos sistemas.

## 2. Metodología

### 2.1. Fotogrametría aérea (2005-2017)

Se dispone de vuelos fotogramétricos de la ciudad de Santander desde 1946, pero los vuelos anteriores al año 2005 no pudieron ser tenidos en cuenta para esta investigación debido a su baja calidad. Los certificados de calibración de las cámaras sólo están disponibles para los vuelos fotogramétricos de 2005, 2010, 2014 y 2017, estando proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Los puntos de apoyo para la orientación fotogramétrica fueron proporcionados por GNSS, hecho que proporciona una adecuada garantía de calidad para poder realizar la cartografía de estos años a escala 1:1.000.

Toda la cartografía se ha realizado en el sistema de coordenadas oficial español (ETRS 89), en el que la altimetría se refiere al Nivel Medio del Mar en Alicante (altitud de origen en España). Ésta tiene curvas de nivel de 1 metro, siendo la altitud más baja la del nivel 0, ya que por debajo de este nivel la playa aparece sumergida en la mayoría de vuelos.

### 2.2. Laser escáner terrestre (2018–2021)

El escáner mide la posición 3D de los puntos de datos en el área de estudio, las coordenadas (x, y, z) y también recopila la intensidad de reflexión de cada punto (Kühn et al., 2014). La precisión de la posición espacial de los puntos medidos con el Faro Focus X-330 es de ±6 mm a una distancia de 100 m. Esta incertidumbre, sumada al error de posicionamiento de los objetivos determinados por GNSS en modo RTK (±20 mm), produce una incertidumbre de posición estimada ≤3 cm. La información de puntos espaciales de la nube de puntos resultante se puede utilizar para derivar modelos de elevación digitales (DEM) precisos. Las áreas que quedaron sumergidas durante el tiempo de medición con TLS, se observaron con GNSS en modo RTK.

Se realizaron dos mediciones por año para evaluar la evolución de las playas durante el invierno (octubre-marzo) y el verano (abril-septiembre), unidas a seis mediciones utilizando TLS: 6 de noviembre de 2018; 12 de marzo de 2019; 26 de octubre de 2019; 9 de marzo de 2020; 18 de octubre de 2020 y 19 de abril de 2021.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 3. Resultados

### 3.1. Registros previos a la construcción del dique. Fotogrametría aérea (2005-2017)

A lo largo de este periodo, la zona occidental de la playa de La Magdalena sufrió cambios de cierta relevancia con pérdidas notables en 2018, principalmente entre 2013 y 2014, mientras que el resto de la playa estuvo sujeta a pérdidas puntuales hasta que se implantó el espigón en 2018, tras lo cual se produjo acreción en el extremo oriental. Prácticamente la totalidad de la playa de Los Peligros sufrió "by passing" sedimentario y La Fenómeno recibía la mayor parte de la arena erosionada de las playas antes mencionadas. Por ello, se utilizó este excedente para ensanchar la superficie supramareal para uso turístico, de modo que el ancho máximo de Los Peligros quedó en 65 m en su zona central, La Magdalena con 60 m y Bikini con apenas 30 m de ancho.

Los registros entre 2010 y 2018 (Tabla 1), previos a la construcción del dique, representan una pérdida de 3094,7m$^3$, revelando que las máximas erosiones se produjeron en las playas de Los Peligros y La Magdalena. Estos datos, entre otras consideraciones, fueron decisivos a la hora de plantear el proyecto con un coste de 2.293.000 euros, con la excusa de tener que realimentar de nuevo las playas y sin contar con los costes adicionales para la reparación de los taludes y los accesos destruidos tras las tormentas desde su construcción. Durante este intervalo, se produjeron numerosos traslados artificiales de arena desde la parte oriental de La Fenómeno, con un superávit de 3242,8 m$^3$, a otras playas occidentales (intervenciones no contabilizadas).

***Tabla 1.*** *Balance sedimentario (m$^3$) entre 2010 y 2018, ambos en noviembre, que indican que hay una pérdida generalizada de arena en estas playas.*

| Playa | La Fenómeno | Los Peligros y La Magdalena | Rompeolas de La Magdalena-Bikini | Bikini | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ganancia (m$^3$)** | 3,242.8 | 3,097.5 | 11,452.7 | 8,039.5 | 25,805.5 |
| **Pérdida (m$^3$)** | -688.1 | -22,729.0 | -215.2 | -5,267.9 | -28,900.2 |
| **Balance (m$^3$)** | 2,554.7 | -19,631.5 | 11,210.5 | 2,771.6 | -3,094.7 |

### 3.2. Evolución después de construcción del dique. Control mediante láser escáner terrestre (2018-2021)

Justo después de la construcción del espigón de La Magdalena (verano de 2018), en otoño del mismo año se realizó un primer seguimiento TLS para registrar el estado inicial de las playas. Se calcularon cuantitativamente registros consecutivos cada 6 messes hasta abril de 2021. Para comprender mejor las variaciones en la playa durante este período, se obtuvieron los mismos 9 perfiles transversales a la costa. La observación detallada de los perfiles revela las características de la forma, primero perpendicular a la línea de playa y relacionada con los cambios estacionales, y segundo, la evolución de los cambios en la dirección longitudinal que sirvieron para complementar el conocimiento de los volúmenes obtenidos entre dos registros consecutivos y del total, que marcaron las tendencias de ganancias y pérdidas de sedimentos (Fig. 2). Ya durante el primer año de medida se registraron importantes cambios morfodinámicos, lo que aceleró la paralización del proyecto junto a la no finalización de la construcción del dique suroeste en el límite entre Los Peligros y La Fenómeno (Fig. 1C).

Durante el periodo de estudio entre 2018 y 2021, Se detectó acumulación en la Zona 1, adosada al dique en la playa de la Magdalena, sin embargo, en el resto de la misma la pérdida neta de sedimento fue palpable (-4.758,15 m$^3$), además del afloramiento de un antiguo embarcadero (El Puentuco), casi en el límite con la playa de los Peligros, que fue la que más recesión sufrió (-19.05,77 m$^3$) (Fig. 2). Este apoyo en el dique construido generó el cambio del perfil de ambas playas, pasando a ser más convexo, lo cual facilitó la mayor incidencia de los oleajes de tormenta, principalmente en el invierno de 2019, 2020, 2023 y 2024, provocando la erosión de la playa y el afloramiento de rocas sueltas (tamaño grava y canto), la caída del acceso a la playa de Los Peligros y un deslizamiento en la parte trasera de ésta tras la lluvias y el golpeo de una ola en la base del acantilado (Fig.3). Por otra parte, el sector de La Fenómeno (Zona 4) recibió gran parte de este sedimento, ganando 484,28m$^3$ y la creación de una playa artificial sobre una rampa de hormigón más al oeste de la zona de estudio (Figs. 2 y 3).

 BY-NC-SA

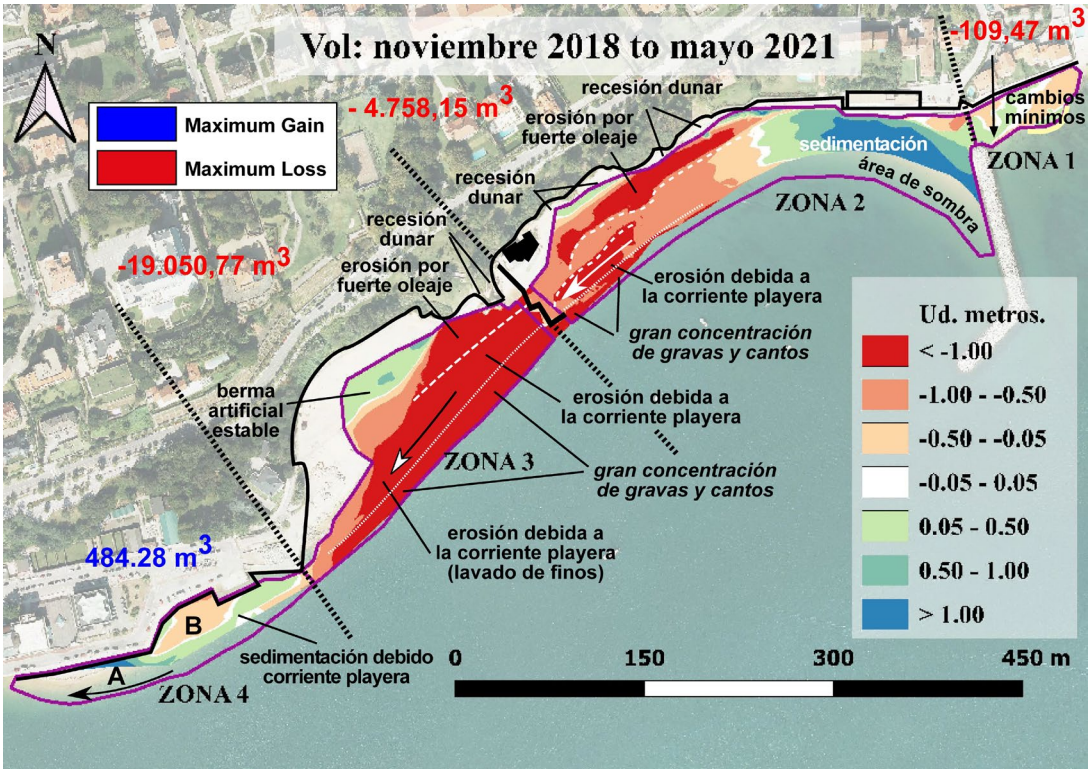



***Fig. 2.*** *Síntesis de balances sedimentarios entre noviembre de 2018 y abril de 2021 (modificado de Flor et al. 2023).*

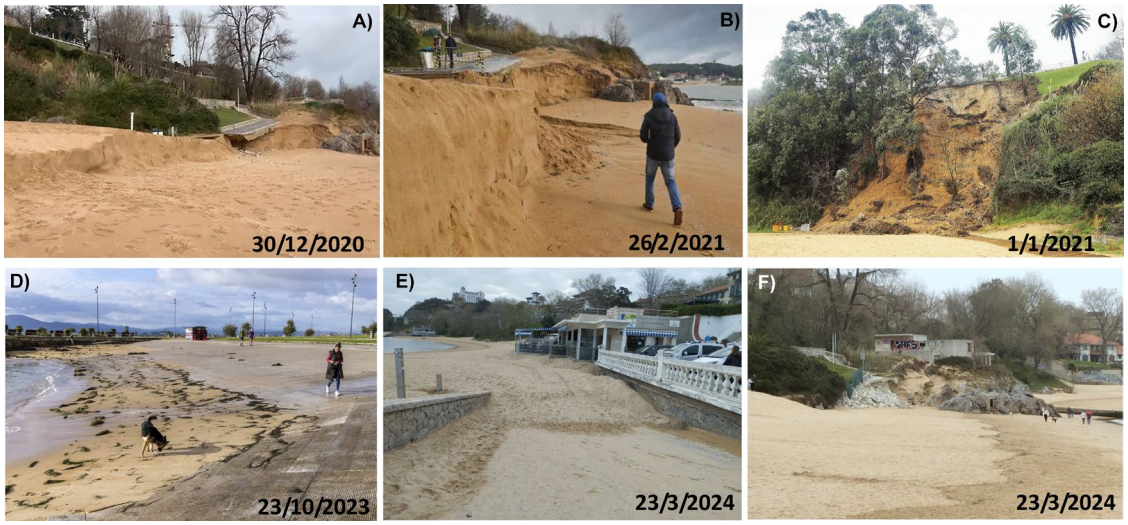



***Fig. 3.*** *Fotografías tomadas después de la construcción del dique. A) y B) Erosión y rotura del acceso a la playa de los Peligros (2020 y 2021); C) Deslizamiento por alcance de ola en la base en Los Peligros (2021); D) Aculumación en la rampa de hormigón de Gamazo por transporte de la deriva playera (2023. El Diario Montañes); E) Acumulación arenosa en el sector adosado al dique en La Magdalena (2024); F ) Erosión y desmantelamiento del acceso a Los Peligros (2024).*

En la actualidad, se está planteando la construcción del segundo dique planificado, más corto, que agudizaría en mayor medida el perfil de las playas de La Magdalena y Los Peligros, sin tener en cuenta que los temporales de 2014 fueron un punto de inflexión en todo el litoral cantábrico (Flor-Blanco et al., 2021) y que los posteriores, menos agresivos, de diciembre de 2017 y enero de 2018 más los eventos más incisivos de otoño de 2020 e invierno de 2021 han provocado daños cuantiosos. Después de culminadas las mediciones, los temporales ocurridos a lo largo de 2023 y 2024 han sumado el derrumbe de los accesos (Fig. 3). Posteriormente a estos eventos, las autoridades inmediatamente redistribuyen el sedimento para que las cicatrices erosivas y los

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

fragmentos más gruesos no sean tan visibles. Mientras, persiste la acumulación sedimentaria en el dique (Fig. 3E) y una acuciante erosión en el resto de playas, salvo en La Fenómeno y la playa artificial (Fig. 3D).

El trabajo presentado es un ejemplo más de cómo un proyecto de construcción de estructuras rígidas en una playa seminatural puede tener efectos perjudiciales sobre la dinámica y sedimentación del sistema. Para esta investigación se ha dejado de lado la modelización teórica y se ha llevado a cabo laboriosas campañas de cartografía in situ y mediciones topográficas mediante GNSS y TLS durante un periodo de más de 3 años. Definitivamente, se muestra que actuaciones blandas como el aporte de sedimentos y la redistribución con maquinaria son las metodologías más compatibles con un entorno seminatural, ya que la construcción de estructuras rígidas no mitigan la erosión y siempre vuelve a necesitarse realimentaciones externas.

## 4. Conclusiones

Durante el periodo de investigación con TLS y GNSS (noviembre de 2018 a abril de 2021), tras la construcción del dique, se han incrementado los daños por oleaje incidente, lo que, unido a la suspensión de los trabajos de redistribución de sedimentos y la construcción de bermas artificiales, ha contribuido al mantenimiento de la deriva arenosa de E-O desde la playa de La Magdalena hasta Los Peligros, La Fenómeno y la reciente creación de la playa de Gamazo sobre su rampa de hormigón. Los perfiles transversales realizados entre 2018 y 2021 en las cuatro zonas revelan la paulatina pérdida de arena en la zona distal de las playas (hacia el oeste), lo que supone que el espigón construido no ha detenido ni ralentizado el proceso de deriva, demostrando en consecuencia su ineficacia. La pretensión de construir el dique occidental apenas frenaría el flujo de arena del cuerpo principal y acentuaría el perfil del sistema, incrementado la destrucción en periodo de tormentas.

## 5. Agradecimientos

Se resalta la financiación concedida por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea (GR21156).

## 6. Referencias

Aragonés, L.; García-Barba, J.; García-Bleda, E.; López, I. & Serra, J.C. (2015). Beach Nourishment Impact on Posidonia Oceanica: Case Study of Poniente Beach (Benidorm, Spain). *Ocean Eng*. 107, 1–12. Doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.005

Finkl, C.W. & Jesse Walker, H. (2018). Beach Nourishment. In Encyclopedia of Coastal Science; Finkl, C.W., Makowski, C., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 1–17, ISBN 978-3-319-48657-4.

Flor, G., Flor-Blanco, G. & Rey, J. (2015) .Dynamics and morpho-sedimentary interactions in the lower mesotidal estuary of Villaviciosa (NW Spain): A management proposal. *Geologica Acta*. 107-107. Doi: https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2015.13.2.3

Flor, G., Sánchez-Fernández, M., Flor-Blanco, G. & de Sanjosé Blasco, J. J. (2023). Application of Geomatic Techniques for the Assessment of Anthropogenic Changes in the Urban Beaches of "La Magdalena"(Santander, Spain). *Remote Sensing*. 15(1), 25. Doi: https://doi.org/10.3390/rs15010256.

Flor-Blanco, G., Alcántara-Carrió, J., Jackson, D. W. T., Flor, G. & Flores-Soriano, C. (2021). Coastal erosion in NW Spain: Recent patterns under extreme storm wave events. *Geomorphology*. 387, 107767. Doi: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107767

Holmes, C.W. & Beverstock, P. (1996). The Beach Management Plan for Lancing and Shoreham. SAMARA Publ. LTD., CARDIGAN(UK).

Kühn, S.; Fernyhough, C.; Alderson-Day, B. & Hurlburt, R.T. (2014) . Inner Experience in the Scanner: Can High Fidelity Apprehensions of Inner Experience Be Integrated with FMRI? *Front. Psychol*. 5. Doi: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01393.

 BY-NC-SA

GEOLIT

# SESIÓN 3



XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18573

# Dinámica de bloques mediante sensores RFID en la Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Ilha de São Jorge, Archipiélago de las Azores)

*Boulder dynamics using RFID in Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Ilha de São Jorge, Azores)*

**Alejandro Gómez-Pazo[a], Ana Hipólito[b], Augusto Pérez-Alberti[c], Rui Quartau[d], Sérgio P. Ávila[e], Carlos Melo[f], Mariana Andrade[g], Esther Martín-González[h], Cesar Andrade[i] y Ricardo S. Ramalho[j]**

[a]Departamento de Geografía y Geología, Universidad de León, agomp@unileon.es; [b]CIBIO-Açores, Universidade dos Açores, ana.hipolito80@gmail.com; [c]Departamento de Edafoloxía e Química Agrícola, Universidade de Santiago de Compostela, augusto.perez@usc.es; [d]Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa, rui.quartau@hidrografico.pt; [e]CIBIO-Açores, Universidade dos Açores, ,avila@uac.pt; [f]Univ. de Lisboa, casm.azores@gmail.com; [g]GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany, mandrade@geomar.de; [h]Museo de Ciencias Naturales de Tenerife, ,mmartin@museosdetenerife.org; [i]Departamento de Geología, Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, candrade@ciencias.ulisboa.pt y [j]School of Earth and Environmental Sciences, Cardiff Univerisity, ramalhor@cardiff.ac.uk.

Gómez-Pazo, A.; Hipólito, A.; Pérez-Alberti, A.; Quartau, R.; Avila, S.P.; Melo, C.; Andrade, M.; Martín-González, E.; Andrade, C. y Ramalho, R.S. 2023. Dinámica de bloques mediante sensores RFID en la Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Ilha de São Jorge, Archipiélago de las Azores). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18573

***Abstract***

*This research focuses on the evolution of a boulder beach on a barrier surrounding a lagoon on a coastal-talus platform located on the north of the volcanic island of São Jorge. The Azores Islands are exposed to a high energetic wave regime, combining wind-waves (local and storm derived) and high-energy swells from distant storms. Geomorphological response of this coastal feature to oceanographic forcing has led to the development of a monitoring program to evaluate short-term morphological variations, sediment transport dynamics and to identify evolution patterns. With this aim, boulder mobility was tracked in 2022 by deploy 30 RFID sensors. During the first tag retrieval survey (2023), 15 boulders were recovered. Maximum displacement exceeded 25 m with an average of 7.7 m and varied significantly throughout the analysed area. Directional displacements show a remarkable similarity with the dominant wave (W-NW). After these initial results, the number of monitored boulders has been increased to track the sediment transport processes in greater detail.*

***Keywords:*** *Coastal evolution, boulder beach, coastal-talus platform, RFID.*

***Resumen***

*Esta investigación se centra en la evolución de una playa de bloques en una barrera a lo largo de un lago en la isla de São Jorge. Las islas Azores están expuestas a condiciones de alta energía de oleaje. La respuesta geomorfológica de este sector ha llevado al desarrollo de un programa de seguimiento para evaluar las variaciones morfológicas a corto plazo y las dinámicas/patrones de transporte de sedimentos. Con este objetivo, la movilidad de los bloques se monitorizó en 2022 con la introducción de 30 RFIDs. En la primera campaña de recuperación (2023) se localizaron 15 bloques. El desplazamiento máximo superó los 25 m con una media de 7.7 m, que varía de forma importante a lo largo de la zona analizada. Las direcciones de los desplazamientos encajan con el régimen de oleaje dominante (W-NW). Tras estos primeros resultados, se aumentó el número de bloques monitorizados para conocer más en detalle el proceso de transporte de sedimentos.*

***Palabras clave:*** *evolución costera, playa de bloques, plataforma costera detrítica, RFID.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

El archipiélago de las Azores constituye un lugar de gran interés para el desarrollo de actividades científicas de múltiple índole. Su exposición a un régimen energético marítimo fuerte, con recurrencia de temporales marinos, se suma a factores de orden geológico y geomorfológico, incluyendo procesos vulcanológicos, sedimentarios, erosivos, eustáticos e isostáticos que determinan la evolución de estas islas volcánicas oceánicas. Estas condiciones marcan la existencia de un litoral de substrato rocoso compacto y de depósitos sedimentarios móviles de materiales muy gruesos, en detrimento de las playas de arena que son menos comunes. En este contexto aparecen morfologías inusuales que exhiben una dinámica sedimentaria propia, relacionada con procesos de erosión, transporte y acumulación de sedimentos costeros de gran tamaño. Un claro ejemplo son las *fajãs* detríticas con sistemas lagunares (Melo et al., 2018; Ramalho et al., 2013) rodeadas por barreras litorales de gravas y bloques, como es el caso de la Fajã da Caldeira de Santo Cristo, en la isla de São Jorge.

Este proyecto pretende analizar en detalle las dinámicas costeras en un entorno rocoso como son las playas de bloques de una barrera litoral con el uso de nuevas tecnologías. En este caso el análisis se centra en la introducción de sensores de radiofrecuencia (RFID) para la monitorización de la movilidad de bloques naturales. A partir de estos datos se busca comprender las dinámicas de transporte sedimentario presentes en el sector de estudio y estimar en detalle la tendencia de evolución costera en esta zona.

## 2. Área de estudio

La posición geográfica del archipiélago de Azores en el contexto de la circulación global atmosférica y oceánica, además de la influencia de la extensa masa de agua de la que emergen, marcan las condiciones climáticas del archipiélago, con consecuencias directas sobre el nivel energético y la distribución y dirección del oleaje. El régimen de oleaje se caracteriza por una altura significativa (Hs) de 1-2 m y períodos de pico (Tp) de 9-11 s (Esteves et al., 2009). La marea tiene un régimen semidiurno, incluyéndose dentro de un litoral micromareal por sus características (Borges, 2003). Son comunes los episodios de fuertes temporales marítimos que surgen de las tormentas de origen tropical llegadas de latitudes más septentrionales del Atlántico Occidental y asociadas a vientos fuertes con dirección predominantemente de NW (Rusu & Onea, 2016). No obstante, la posición septentrional del archipiélago hace que sea recurrente el paso de ciclones tropicales, los cuales otorgan un medio de transporte que asegura, con cierta regularidad, la llegada de nuevas especies a este archipiélago aislado (Ávila et al., 2018). Los datos de agitación marina marcan una altura máxima significativa de ola por encima de los 5 m durante los temporales (Esteves et al., 2009), sobrepasando ocasionalmente los 10 m (Monteiro et al., 2022).

La zona analizada se localiza en la costa norte de la isla volcánica de São Jorge, grupo central del archipiélago, en el entorno de la Fajã da Caldeira de Santo Cristo (Fig. 1). Se trata de un sector costero marcado por la presencia de una *fajã* detrítica con un sistema lagunar, una morfología definida por una plataforma litoral de bajo relieve aproximadamente al nivel del mar, formada a partir de la acumulación subárea de detritos producidos por los movimientos en masa en los acantilados costeros. Delimitando la *fajã* se extiende una barrera litoral de gravas que integra una extensa playa reflectiva de sedimentos gruesos. Estas acumulaciones sedimentarias constituyen eficientes muros de protección natural ante el avance del mar. Con todo, existen sectores sujetos a una intensa erosión, lo que, junto a la sedimentación de la laguna que conduce al cierre del canal que la comunica con el mar, son factores que marcan la inestabilidad actual de la morfología de la *fãja*.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

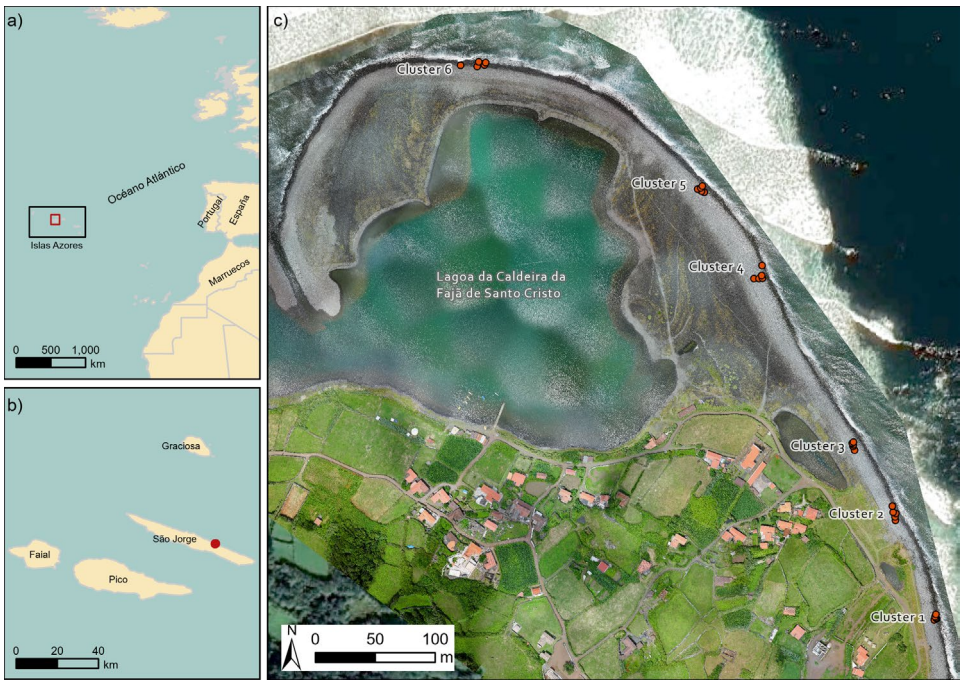



***Fig. 1*** *Zona de estudio en (a) contexto atlántico, (b) archipiélago de las Azores y (c) Fajã da Caldeira de Santo Cristo con la localización de los sensores RFID en 2022. Fuente: Elaboración propia. Información cartográfica a) y b) Eurostat.*

## 3. Materiales y métodos

La dinámica de los desplazamientos de bloques se ha monitorizado a través de la introducción de sensores RFID e imágenes de alta resolución. La implantación de los sensores se realizó el 19 y 20 de junio de 2022, aunque desde 2020 se han obtenido anualmente imágenes de alta resolución a través de drones, que también se han utilizado para comprender el dinamismo de este sector.

El principal componente del análisis es el empleo de sensores RFID. En este caso se han empleado los HDX PIT tags de OregonRFID con una longitud de 23 mm y un diámetro de 3.65 mm. Para completar la tarea de identificación de los sensores se empleó la antena receptora del mismo fabricante, que conectada mediante bluetooth a un smartphone permite visualizar el código único del sensor. Para registrar la posición de cada bloque se usó un equipo de posicionamiento topográfico de alta resolución GNSS, con un receptor equipado con posicionamiento cinemático relativo en tiempo real RTK de la marca Leica Geosystems, modelo CS10 con una precisión mínima de 0.05 m.

Previamente a la fase de campo, los sensores se introducen en protectores de silicona y se comprueba su código identificador. La fijación de los sensores se realizó sobre el terreno, seleccionando bloques en distintos sectores a lo largo de la playa, tratando de cubrir la mayor extensión y agrupándolos en clústeres de cinco sensores, para tratar de estimar si existen distintos patrones de desplazamiento a lo largo de la zona de estudio. En esta primera campaña se realizaron seis clústeres cuya posición se refleja en la Fig. 1.

Tras la selección del bloque a monitorizar se realiza un orificio usando un taladro, en el que se introduce el sensor y se sella con silicona. Una vez introducido el RFID se identifica su código usando la antena receptora OregonRFID, y se graba la posición con el receptor GNSS. De cara a futuros análisis de correlaciones, se realiza la medición de los tres ejes de los bloques sobre el terreno y se almacenan fotografías desde varios ángulos de todos ellos.

En la segunda campaña, desarrollada el 26/07/2023, se procedió a buscar los sensores a partir de barridos a lo largo de todo el perfil de la playa, y a posicionar, con el mismo receptor GNSS, las coordenadas de cada uno de los bloques monitorizados.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

A partir de los datos recogidos en ambas campañas y con la ayuda de R *software* se procedió al análisis de los vectores de desplazamiento de cada bloque, y la relación de estos con las posibles dinámicas oceánicas. En el caso de los desplazamientos, para este análisis se ha empleado un umbral de 2 m para definir si un bloque se había desplazado. Este valor pretende evitar el registro de variaciones que pueden deberse a la posición del receptor GNSS sobre el bloque o a la incertidumbre de este.

## 4. Resultados

La mitad de los sensores introducidos en 2022 han sido recuperados en 2023 (15/30), de los cuales 10 han experimentado desplazamientos superiores a 2 m (Tabla 1). En los bloques recuperados que se consideraron estáticos (5) el desplazamiento medio fue de 33 cm, lo que se puede relacionar con la propia ondulación en condiciones modales en estos entornos en función del tamaño y la posición de los bloques y/o con un rápido enterramiento, siendo este uno de los elementos que deberán analizarse en detalle en futuras campañas.

***Tabla 1.*** *Principales estadísticos del desplazamiento de los bloques*

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|---|---|---|---|
| Bloques recuperados | 15 | Bloques con desplazamientos > 2 m (móviles) | 10 |
| Mayor desplazamiento | 25.6 m | Desplazamiento medio (total/móviles) | 7.7 m / 11.4 m |

El desplazamiento medio durante el período analizado ha sido de 7.7 m, si bien este valor cambia bastante entre los seis clústeres en los que se divide, entre los 4.0 m y los 17.6 m de los clústeres 6 y 2 respectivamente (Fig. 2). Por su parte, el mayor desplazamiento se produjo en el Clúster 2, con los 25.6 m que varió la posición del bloque 08 que presenta unas dimensiones de 65x45x26 cm (eje mayor, intermedio y menor). Cerca de la mitad de los bloques se encontraban enterrados o parcialmente enterrados en esta campaña.

En cuanto a la orientación del desplazamiento, mayoritariamente es S-SE (media 143º), ya que siete de los 10 bloques móviles presentan orientaciones entre 106 y 152º (Tabla 2). Estos desplazamientos siguen en buena medida el perfil del litoral, con movimientos que principalmente se producen de manera paralela a la línea de costa o de forma descendente, desde elevaciones mayores en el perfil de la playa hasta el sector más próximo al mar. Una excepción es el bloque 20 (Fig. 2; Clúster 4), con un desplazamiento, ascendente en el perfil, superior a los 12 m, que se sitúa en un sector de alta recuperación de sensores, pero de baja movilidad.

***Tabla 2.*** *Orientación media del desplazamiento de los bloques por clúster*

| Clúster | Bloques móviles | Orientación media | Clúster | Bloques móviles | Orientación media |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 151 | 4 | 1 | 187 |
| 2 | 2 | 142 | 5 | 2 | 132 |
| 3 | 2 | 116 | 6 | 2 | 158 |

## 5. Discusión

La tasa de recuperación de los sensores (50%) ha sido similar a la observada en otros lugares como Galicia (Gómez-Pazo et al., 2021). Estas cifras son inferiores a las existentes en plataformas costeras (Hastewell et al., 2020), lo que se relaciona con su propia morfología y con la capacidad de las playas de bloques para enterrar el material, impidiendo su movimiento y lectura. La experiencia previa sugiere que parte de los bloques no localizados en esta primera campaña podrían aparecer en sucesivos años.

El análisis por sectores muestra diferencias relevantes en cuanto a las dinámicas existentes, a pesar de la similitud en la orientación de los desplazamientos en la mayoría de los casos. Esto se relaciona también con el escaso número de sensores recuperados en cada clúster (Tabla 2). El Clúster 1 se corresponde con una zona de menor recuperación, a pesar de ser un sector menos expuesto; presenta claras muestras de erosión, vinculada a la morfología de la playa sumergida, donde se estima que pueden encontrarse parte de los sensores introducidos, atendiendo a los vectores de desplazamiento de los bloques relocalizados. Los clústeres 2 y 3 presentan un transporte más intenso, con zonas

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

de rebase y lenguas de bloques desde la cresta, lo que propició un mayor enterramiento de los bloques con sensores, incluso de los recuperados. Además, la presencia de cantos y bloques con algas indica un transporte continuo desde zonas más profundas. También destaca el reducido desplazamiento registrado en el Clúster 6, que pese a encontrarse en la zona más expuesta, presenta una menor energía por la escasa profundidad del entorno, lo que indica un bajo hidrodinamismo. Esto se observa con claridad en el retrabajo del material fino en la zona. Las interferencias en la dirección de las olas en las proximidades de la costa parecen justificar los movimientos de bloques en sentidos opuestos. Estas direcciones para los años 2022-2023 no coinciden con las direcciones residuales de la deriva litoral inferidas por Borges (2003), en el análisis entre marzo de 1999 y abril de 2000.

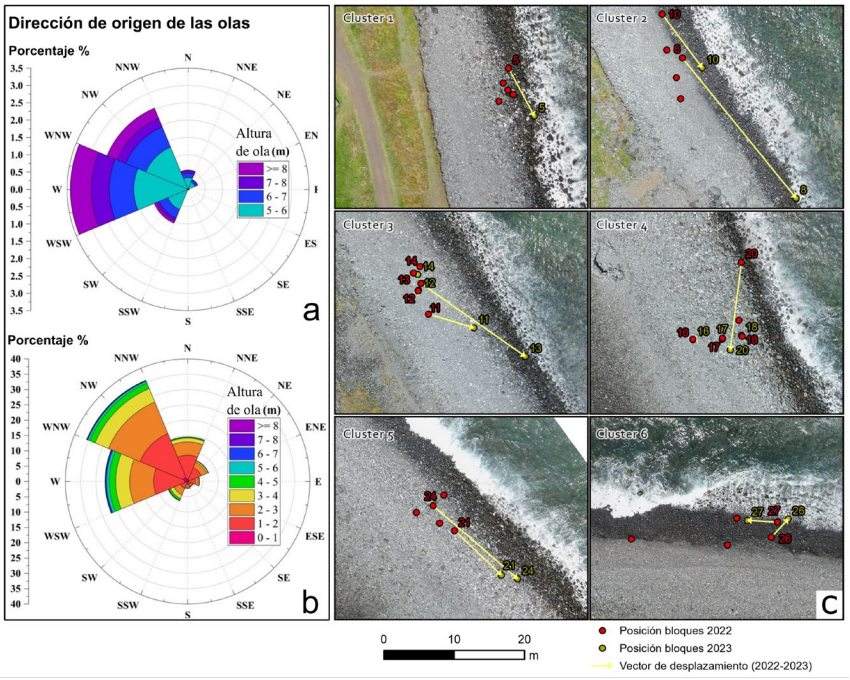



***Fig. 2*** *Altura significativa del oleaje en Capelinhos 1989-2002. IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera (Carvalho, 2002) para (a) todas las olas y (b) olas > 5 m. (c) Vectores de desplazamiento y posición de los bloques (2022-2023) en cada clúster. Fuente: Oleaje adaptado de Zhao et al. (2019).*

En esta primera aproximación al empleo de sensores RFID en São Jorge se observó la necesidad de incluir un mayor número de dispositivos, con el fin de mejorar la tasa de recuperación y tener una mayor cobertura, ampliando las zonas del sector litoral y aumentando la cantidad de sensores donde se ha logrado una tasa de recuperación menor. Por ello, durante el verano de 2023 se han instalado 40 sensores en el mismo entorno de la Fajã da Caldeira de Santo Cristo. La repetición sistemática de esta metodología contribuirá al esclarecimiento de la dinámica sedimentaria de la barrera en términos de variabilidad estacional e interanual, y a establecer las tendencias de evolución a largo plazo.

## 6. Conclusiones

Se ha demostrado que los RFID son una herramienta de gran utilidad para identificar patrones de desplazamiento de bloques rocosos en zonas costeras. La baja tasa de recuperación (50%) entre las dos primeras campañas pretende mejorarse en el futuro gracias a la instalación de nuevos sensores y a la mejora de los dispositivos de detección. Se ha identificado una dinámica de desplazamiento hacia el SE, que se presenta en la mayoría de los bloques, y que se relaciona perfectamente con la dirección predominante del oleaje en la región (cuadrante W-NW, Fig. 2). En algunos de los casos en los que se observa un movimiento en el perfil de playa, este parece vinculado a la acción de episodios tormentosos y el efecto de la gravedad al cesar el oleaje, además de con el posible transporte durante la resaca de la ola de los materiales que no alcanzan la cresta de la barrera.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 7. Agradecimientos

Este proyecto contó con el apoyo financiero y logístico de la Câmara Municipal de Calheta de São Jorge y el Governo Regional dos Açores (M3.3B/ORG.R.C./010/2022/EDIÇÃO1). Este trabajo es una contribución al IGCP Project 725 "Forecasting Coastal Change". S.P. Ávila reconoce su contrato M1.1.A/INFRAEST CIENT/A/001/2021 - Base de Dados da PaleoBiodiversidade da Macaronésia, financiado por el Governo Regional dos Açores, y el contrato FCT/2023.07418CEEECIND. Proyecto financiado con fondos FEDER (COMPETE), fondos nacionales, FCT (UIDB/50027/2020, POCI-01–0145-FEDER-006821, UIDB/00153/2020, LA/P/0048/2020), y del Governo Regional dos Açores (M1.1.a/005/Funcionamento-C-/2016, CIBIO-A; M3.3.B/ORG.R.C./005/2021).

## 8. Referencias

Ávila, S.P., Cordeiro, R., Madeira, P., Silva, L., Medeiros, A., Rebelo, A.C., Melo, C., Neto, A.I., Haroun, R., Monteiro, A., Rijsdijk, K., & Johnson, M.E. (2018). Global change impacts on large-scale biogeographic patterns of marine organisms on Atlantic oceanic islands. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 101–112. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.087

Borges, P. (2003). *Ambientes litorais nos grupos central e oriental do arquipélago dos Açores. Conteúdos e dinâmica de microescala*. Universidade dos Açores.

Esteves, R., Valente, A. S., Costa, M., Reis, F. V., & Azevedo, E. B. (2009). Dados direcionais de agitação marítima nos Açores (projeto CLIMAAT - Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos). *Atas das 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*.

Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., & Trenhaile, A. (2021). Tracking clast mobility using RFID sensors on a boulder beach in Galicia, NW Spain. *Geomorphology*, 373, 107514. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107514

Hastewell, L., Inkpen, R., Bray, M., & Schaefer, M. (2020). Quantification of contemporary storm-induced boulder transport on an intertidal shore platform using radio frequency identification technology. *Earth Surface Processes and Landforms*. https://doi.org/10.1002/esp.4834

Melo, C. S., Ramalho, R. S., Quartau, R., Hipólito, A., Gil, A., Borges, P. A., Cardigos, F., Ávila, S. P., Madeira, J., & Gaspar, J. L. (2018). Genesis and morphological evolution of coastal talus-platforms (fajãs) with lagoons: The case study of the newly-formed Fajã dos Milagres (Corvo Island, Azores). *Geomorphology*, 310, 138–152. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.006

Monteiro, N. M. R., Oliveira, T. C. A., Silva, P. A., & Abdolali, A. (2022). Wind–wave characterization and modeling in the Azores Archipelago. *Ocean Engineering*, 263, 112395. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112395

Ramalho, R. S., Quartau, R., Trenhaile, A. S., Mitchell, N. C., Woodroffe, C. D., & Ávila, S. P. (2013). Coastal evolution on volcanic oceanic islands: A complex interplay between volcanism, erosion, sedimentation, sea-level change and biogenic production. *Earth-Science Reviews*, 127, 140–170. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.007

Rusu, E., & Onea, F. (2016). Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands. *Renewable Energy*, 85, 687–703. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.042

Zhao, Z., Mitchell, N. C., Quartau, R., Tempera, F., and Bricheno, L. (2019). Submarine platform development by erosion of a Surtseyan cone at Capelinhos, Faial Island, Azores. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44: 2982–3006. https://doi.org/10.1002/esp.4724

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18733

# La investigación en Geomorfología de Costas Rocosas en España: producción científica y su impacto a través de publicaciones periódicas y congresos

*Research in geomorphology of rocky coasts in Spain: scientific production and impact through periodical publications and congresses*

**Lluís Gómez-Pujol y Joan J. Fornós**

Grup de Recerca de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, , lgomez-pujol@uib.es; , joan.fornos@uib.es.

How to cite: Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. 2024. La investigación en geomorfología de costas rocosas en España: producción científica y su impacto a través de publicaciones periódicas y congresos. . En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18733

***Abstract***

*The study of the forms, agents, processes and rhythms of erosion of rocky coasts has a track record of researchers and contributions in Spain that, although modest, is maintained over time and has made relevant contributions to Coastal Geomorphology discipline. The present work analyzes from the programs of the Spanish Coastal Geomorphology Conference, that have been held since 2000, as well as from the periodical publications with impact index, the authors, their contribution and the topics covered within rocky coast geomorphology during the period 2000-2023. Additionally we address the research groups projection and the establishment of international collaboration networks. Among the most notable contributions made by the community of Hispanic geomorphologists we can mention the role of geological inheritance in the evolution of rocky coasts, the soft rock cliffs retreat, the role of biological agents in the processes of dismantling the rocky coast on short time scales or the links between rocky coast macroforms and coastal karst.*

***Keywords:*** *rocky coasts, cliffs, shore platforms, bibliometric studies, scientific production.*

***Resumen***

*El estudio de las formas, agentes, procesos y tasas de erosión de las costas rocosas cuenta en el ámbito del Estado Español con una nómina de investigadores y contribuciones, que aunque modesta, se mantiene en el tiempo y ha venido realizando contribuciones relevantes para esta rama de la geomorfología litoral. En el presente trabajo se analiza a partir de los programas de las Jornadas de Geomorfología Litoral que desde el 2000 se celebran en Españ, así como de las publicaciones periódicas con índice de impacto, cual ha sido la contribución y los temas abordados dentro de la geomorfología de costas rocosas durante el período 2000-2023, así como su proyección y las redes de colaboración internacional que se han establecido. De entre las aportaciones más destacadas realizadas por la comunidad de geomorfólogos hispánicos cabe citar el papel de la herencia geológica en la evolución de las costas rocosas,el retroceso de los acantilados blandos, el papel de los agentes biológicos en los procesos de desmantelamiento de la costa rocosa en escalas temporales cortas o la relación entre las macroformas delas costas rocosas y el karst costero.*

***Palabras clave:*** *costas rocosas, acantilados, plataformas litorales, estudios bibliométricos, producción científica.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

La importancia de la Geomorfología Litoral como subdisciplina, tanto en términos de producción científica, como en términos del contingente humano que a ella se dedica, en el marco geográfico del Estado Español, es de sobra conocida (vid. García Ruíz, 2008) y por ello se justifica que sea uno de los pocos grupos de geomorfólogos hispánicos que, períodicamente y de forma independiente y complementaria a la Reuniones Nacionales de Geomorfología, viene convocando desde el año 2000 sus propias jornadas científicas. En este sentido, en los albores del segundo milenio, García Ruiz (1999, p. 33) apuntaba que la producción científica de la geomorfología española presentaba disparidades "enormes" (sic) entre ramas y temas de trabajo. Concretamente, a raíz de su estudio bibliométrico, afirmaba que "*quizás resulte sorpredente que la geomorfología litoral ocupe un lugar muy destacado, con 332 artículos, seguida -y ello parece más lógico- por los estudios sobre erosión (281 artículos)*". Dicho escenario entendía que venía justificando por el fuerte desarrollo de tres núcleos de investigación: el del Departamento de Geografia de la Universidad de Valencia encabezado por V. Rosselló-Verger; el de la Facultad de Geología de la Universidad Complutense liderado por Caridad Zazo (luego en el CSIC) y José Luis Goy (luego en la Universidad de Salmanca), así como el del antiguo Instituto Lucas Mallada del CSIC y de la persona de Isidoro Asensio Amor. Además también mencionaba los trabajos de otros grupos menores, pero muy activos, en A Coruña (J.R. Vidal Romaní), Oviedo (G. Flor), Huelva (J. Rodríguez Vidal) y Cádiz (F.J. Gracia). No obstante, el desarrollo de la geomorfología litoral no ha sido ajeno a la evolución conceptual, técnica y metodológica que ha experimentado la Geomorfología y sí hasta la década de los ochenta del siglo pasado primaba una visión de carácter geográfico-descriptivo, que dejó paso a paso a enfoques más evolutivos centrados en el estudio de la historia geomorfológica cuaternaria de las costas; a partir de los noventa proliferaron las aproximaciones entradas en la comprensión y cuantificación de los procesos que actúan sobre el litoral (De Anrés y Gracia, 2000). Aunque con frecuencia se argumenta que el estudio de las costas rocosas, a diferencia de las playas o de los estudios de evolución cuaternaria, siempre ha contado –en un ámbito geográfico global– con un menor número de investigadores y de contribuciones científicas (Naylor et al., 2010), lo cierto es que dos publicaciones recientes como son el monográfico sobre costas rocosas a escala global de la Geological Society (Kennedy et al., 2014) o el volumen a propósito de las costas españolas de Springer (Morales, 2019) revelan la existencia de varios grupos activos de trabajo en costas rocosas; amén de una red de colaboraciones internacionales a reseñar. En este contexto, cabe reflexionar sobre el papel y el tratamiento que han tenido las costas rocosas en la geomorfología litoral hispánica. Por todo ello el objetivo del presente trabajo pretende realizar una aproximación al estado del conocimiento sobre la geomorfología de costas rocosas en España a partir de la producción científica y su impacto en publicaciones periódicas con índice de impacto de los diferentes autores y grupos de trabajo, así como de su contribución a las Jornadas de Geomorfología Litoral.

## 2. Métodos

El período de referencia para la realización del presente estudio abarca desde el año 2000 hasta el 2023, puesto que en mayo de 2000 se celebró en Cádiz la primera de las Jornadas de Geomorfología Litoral y tras la última acontecida en Santiago de Compostela (2021), la próxima se celebrará en Valencia en 2024. Para dicho intervalo de tiempo se han analizado desde un punto de vista bibliométrico las comunicaciones de geomorfología litoral cuya temática són las costas rocosas –en sentido amplio– recogidas en los volúmenes de actas y resúmenes de cada una de las Jornadas de Geomorfología Litoral; así como la producción científica en revistas científicas indexadas y su impacto a partir del numero de citas obtenidas.

Para el escrutinio de las contribuciones a las Jornadas de Geomorfología Litoral se ha cuantificado el número de trabajos relativos a costas rocosas respecto del total de trabajos presentados y publicados en los volúmenes de actas, la temática específica dentro de la geomorfología de costas rocosas separando aproximaciones descritptivas, procesos y tasas de erosión, depósitos en costas rocosas y evolución a largo plazo.

Para el análisis de la producción científica y su impacto, se han considerado sólo los trabajos referenciados en la base de datos SCOPUS publicados en revistas científicas con índice d'impacto (JCR). Se ha partido de un listado de todos los autores de las comunicaciones sobre costas rocosas de las Jornadas de Geomorfologia Litoral, que se

2024, Editorial Universitat Politècnica de València (cc) BY-NC-SA

han ampliado con los resultados de una segunda búsqueda por palabras clave (p.e. cliff, shore platform, abrasión, bioerosion, etc.) y referencias geográficas (p.e. Spain, Western Mediterranean, etc.). De cada uno de los autores se han listado las contribuciones y se ha anotado el número de citas que ha recibido cada artículo. Como criterio general, si no se trataba de un primer autor, para poder formar parte de la base de datos, los autores deben aparecer como co-autores en al menos dos trabajos. Una vez obtenido el listado final de autores, de cada uno dellos se ha generado un campo con el índice H (IH), el número total de citas, el número de citas recibido durante los últimos cinco años, el máximo número de citas recibido por un trabajo específico de costas rocosas y el máximo número de citas recibido por un trabajo que no sea de costas rocosas. Se ha tomado como indicador de especialización la ratio, en base cien, entre el número máximo de citas recibido por un trabajo de costas rocosas y el trabajo de toda la bibliografía del autor que ha recibido más citas, correspondiendo los valores cercanos a 100 a autores muy especializados y de proyección en el campo de costas rocosas y los valores bajos para autores con un perfil y temática de publicación más diverso. El número de citas también ha servido para evaluar la proyección y repercusión en la comunidad internacional de los temas abordados por los diferentes autores. Con el objeto de detectar centros de producción y grupos de trabajo se ha registrado la filiación de los autores. En el caso de investigadores extranjeros, siempre que han colaborado en más de dos trabajos, se han incorporado a la base de datos, recogiendo también las variables descritas para el resto de autores. A partir de las colaboraciones y del número de artículos publicados conjuntamente se ha elaborado un análisis de ligazones para determinar las redes de colaboración.

## 3. Resultados

Desde las Jornadas de Geomorfología Litoral celebradas en el año 2000 en Cádiz, las contribuciones a propósito de la geomorfología de las costas rocosas han formado parte del programa de las reuniones bianuales de forma contínua, aunque oscilando tanto en número absoluto como en proporción respecto del resto de contribuciones (Fig. 1). Así en términos relativos los trabajos de costas rocosas han oscilado del 5% de las comunicaciones presentadas en 2021 en Santiago de Composteral al 22% presentados en las jornadas, también celebradas en Santiago de Compostela, en 2003.

En cuanto a los contenidos temáticos de las comunicacions, como puede apreciarse en la Fig. 2, estos han sido variables a lo largo del tiempo, aunque existe una tendencia en la que los aspectos descriptivos dejan terreno a los estudios centrados en procesos y tasas de erosión y los estudios evolutivos-a largo plazo de las costas. De forma puntual han ido apareciendo contribuciones a propósito de los depósitos (p.e. bloques de tormenta vs. Bloques de tsunami, rasas, playas fósiles) en las crestas o pies de los acantilados. En cualquier caso, para el periodo 2002-2023, el 34% de las comunicaciones corresponde a trabajos de tipo dinámico, en los que se aborda o cuantifican procesos erosivos o generación de formas de erosión, el 30% de los trabajos explora la evolución del modelado de las costas rocosas en escalas temporales a largo plazo, un 29% son trabajos estrictamente descriptivos, bien de carácter regional, bien centrados en aspectos morfológicos y finalmente, un 7% de las comunicaciones atañen al estudio de depósitos relacionados con la costa rocosa. La mayoría de las contribuciones dentro de dicha categoría corresponden a la identificación y caracterización de bloques de tsunami.

Aunque hay un número variado de autores, en las comunicaciones presentadas en las Jornadas de Geomorfología Litoral hay cuatro grupos de investigación que de forma reiterada presentan trabajos relativos a las costas rocosas. Destaca el de la Universidad de Santiago de Compostela que configura una línea de investigación en la que se combinan los trabajos de evolución a largo plazo y el estudio de los procesos de abrasión en plataformas rocosas. Procedentes de la Universidad de las Islas Baleares dos grupos distintos ahondaran por un lado en la dinámica erosiva de las costas rocosas carbonatadas y en las relaciones entre el modelado de las costas rocosas y la interferecia con el karst costero, y por el otro en la caracterización de los bloques de tsunami depositados en la cresta de diferentes acantilados del archipiélago Mediterráneo. Finalmente, desde la Universidad de Cádiz, se aborda la dinámica y el retroceso de los acantilados tallados en roquedos blandos de la costa atlántica andaluza.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

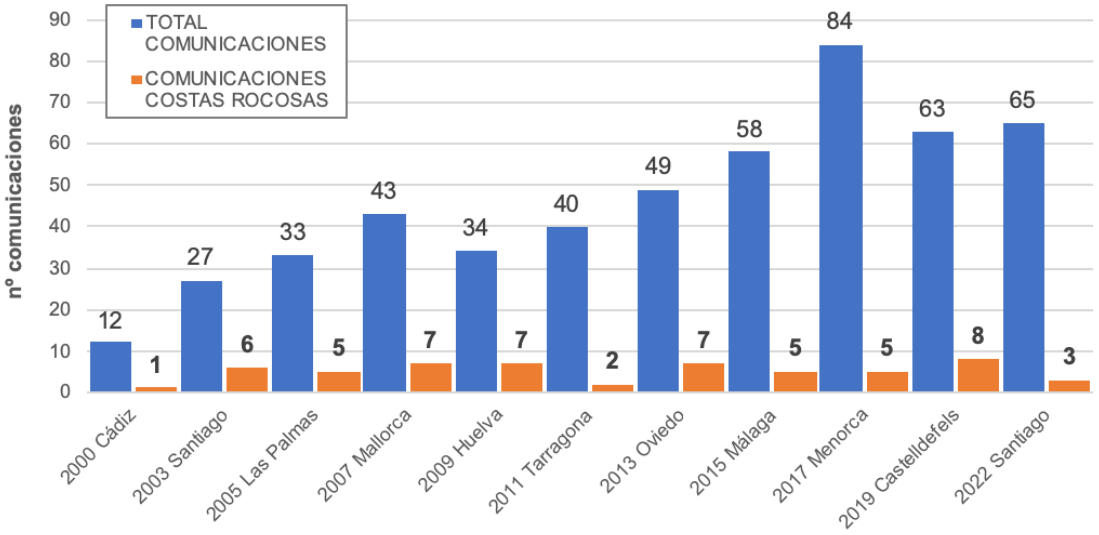



***Fig. 1.*** *Comunicaciones sobre costas rocosas presentadas en las Jornadas de Geomorfología Litoral.*

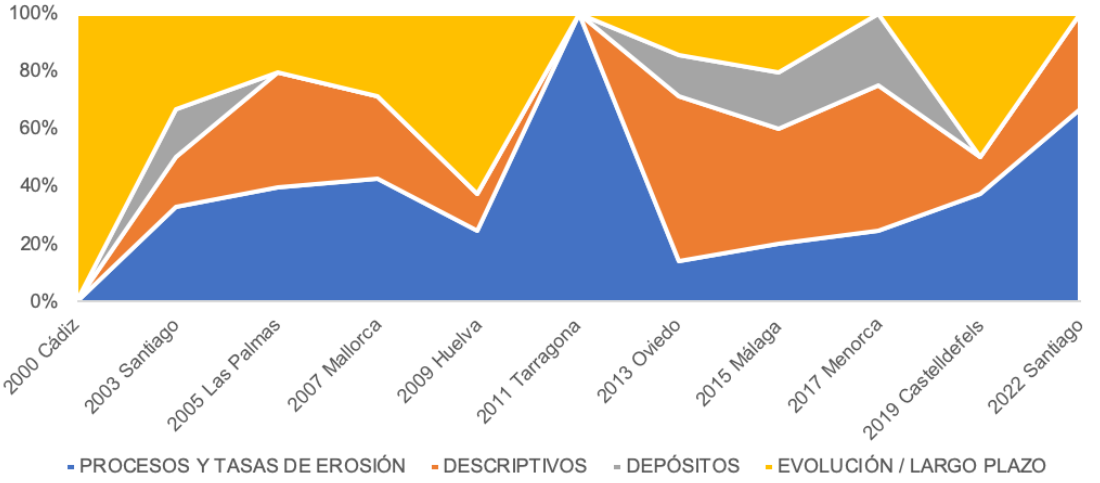



***Fig. 2.*** *Temática de las comunicaciones sobre costas rocosas presentadas en las Jornadas de Geomorfología Litoral.*

En cuanto a las publicaciones en revistas con índice de impacto recabado en SCOPUS a partir del índice de autores descrito, más el listado de trabajos publicados en el monográfico de costas rocosas de la Geological Society o en el monográfico de Geomorfología Litoral de España de Springer, se ha compilado un conjunto de 70 referencias entre 2000 y 2023. Lo que da un promedio de tres trabajos internacionales sobre costas rocosas cada año durante dicho periodo en los que contribuye un autor radicado en España. En total, una nómina de 52 autores que en su mayoría pertenecen a la Universidad de Oviedo, a la Universitat de les Illes Balears, la Universidad de Santiago de Compostela y la Universidad de Cádiz, amén de autores extranjeros que cubren un abanico geográfico diverso (Canadá, Australia, Nueva Zelanda, Reino Unido, Francia, Italia, Portugal, Ecuador, Argentina, entre otros). El estudio del contenido de los trabajos recabados pone de manifiesto la especialización de los diferentes grupos. Así, el grupo de la Universidad de Oviedo, muy activo durante el último quinquenio, trabaja principalmente en movimientos de masas y retroceso de acantilado; como también lo ha hecho el grupo de la Universidad de Cádiz, desarrollando tanto casos de estudio, como trabajos de tipo metodológico. Los procesos bioerosivos en roquedos calcáreos costeros son el *leimotiv,* junto al karst litoral, de uno de los grupos de la Universitat de les Illes Balears que también abordan la herencia geológica en la formación de plataformas litorales y los paleoniveles matinos. Tema central, el de las herencias geológicas, en que también destaca el grupo de la Universidad de Santiago de

 BY-NC-SA

Compostela junto con la caracterización de procesos de abrasión. Si en lo temático las contribuciones ubican a los trabajos realizados en España en la vanguardia de la investigación en costas rocosas, en lo metdológico cabe citar que también sobresale el uso de técnicas como el LIDAR aéreo y terrestre, el uso de drones, perfiladores microtopográficos láser, microerosiómetros de dial fijo y móvil (MEM y TMEM), tests de exposición de roca, durómetros digitales (Schmidt Hammer y Equotips) o incluso la incorporación de las nuevas técnicas de genómica, entre otros.

Las nóminas de autores de los trabajos también ponen de manifestó el elevado grado de internacionalización y colaboración con los investigadores extranjeros de referencia en el campo de la geomorfología de costas rocosas. En este sentido, los autores de mayor proyección internacional en esta subdisciplina de la geomorfología litoral son los profesores Alan Trenhaile de la Universidad de Windsor, el profesor Wayne Stephenson de la Universidad de Otago, la profesora Larissa Naylor de la Universidad de Glasgow y el profesor David Kennedy de la Universidad de Melbourne. Alan Trenhaile –un clásico en vida de la geomorfología de costas rocosas– ha sido un asiduo colaborador del grupo de Santiago de Compostela y el resto de los investigadores citados han trabajado puntualmente con miembros de la Universitat de les Illes Balears.

Si se pasa a considerar la proyección internacional y el impacto de los trabajos publicados por los autores radicados en España (Fig. 3) llama la atención que de las 70 referencias estudiadas, una vez descartados los artículos de tipo teórico que firman los referentes internacionales antes citados, los trabajos realizados por investigadores con mayor índice de impacto son los relativos al papel de la herencia geológica en la formación de plataformas litorales desarrollados por el grupo de la Universidad de Santiago (93 citas), seguidos de los trabajos metodológicos para la caracterización del retroceso de acantilados blandos del grupo de la Universidad de Cádiz (84 citas) o el análisis regional de las costas rocosas del Mediterráneo en el que participaron miembros de la Universitat de les Illes Illes Balears (72 citas). Le seguirá a este último, en impacto, el trabajo sobre el control del biofilm en la dinámica erosiva de las plataformas litorales también desarrollado desde la Universitat de les Illes Balears (51 citas).

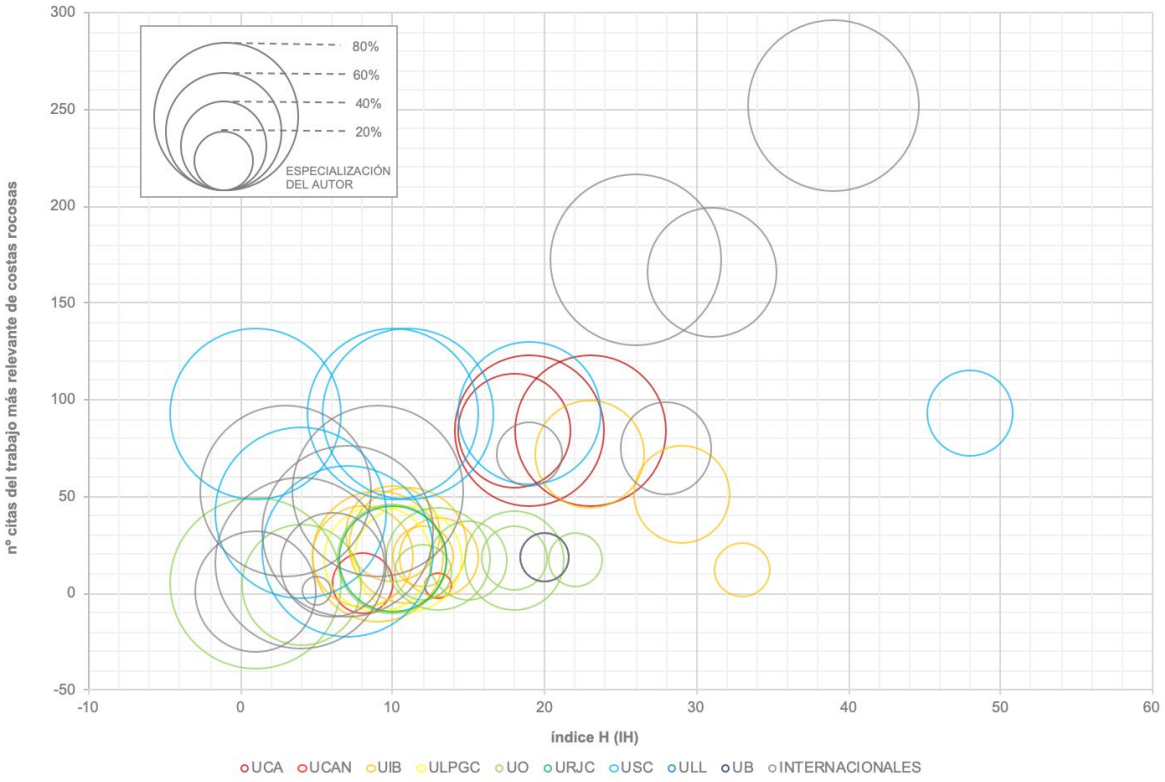



***Fig. 3.*** *Impacto de las contribuciones, proyección y especialización de los grupos de trabajo en costas rocosas.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Igualmente interesante es evaluar el grado de especialización de los distintos grupos y si dicha especialización se traslada en un mayor impacto internacional de sus contribuciones. En la Figura 3 queda consignado el máximo número de citas alcanzado por un trabajo de costas rocosas de un autor, en relación al índice H del mismo y en una tercera dimensión cual es la especialización en costas rocosas del mismo autor en relación a toda su producción científica. En este sentido en la Fig. 3 pueden apreciarse, como mínimo, tres patrones claros. Por un lado en el cuadrante inferior izquierdo aquellos autores que pese a que su producción en conjunto no es citada con frecuencia han aportado trabajos de costas rocosas que han contado con un número de citas significativo. En esta categoría entrarían la mayoría de contribuciones a propósito de los movimientos de masas en acantilados o los trabajos relativos a los depósitos de bloques de tsunami. Vale la pena destacar que la trayectoria de dichos autores es muy coherente desde un punto de vista temático, costituyendo los trabajos de costas rocosas como mínimo el 40% de su obra. Un segundo grupo lo integrarían contribuciones de autores que han sido muy relevantes, ya que casi alcanzan el centenar de citas, pero la proyección del conjunto de su obra, pese a estar muy especializada dentro de la geomorfología de costas rocosas, ha tenido una diseminación restringida. Dentro de este patrón cabría cobijar las contribuciones a propósito de la abrasión en las costas rocosas o el estudio de depósitos de bloques a los pies o crestas de acantilados. Cierra el tercer patrón un perfil de investigadores, con una práctica temática diversa, que tanto trabajan en costas rocosas como en otros temas, pero que gozan de cierto predicamento en el conjunto de su obra y que tienen trabajos específicos de costas rocosas que han resultado relevantes y han alcanzado más de 50 citas desde que fueron publicados. Es el patrón donde cabría ubicar los autores de los trabajos relativos al papel de la herencia geológica en la evolución de la plataformas litorales, el uso de drones y otras técnicas de fotointerpretación para el estudio de acantilados tallados en roquedos poco cohesivos o en la contribución de la biogeomorfología en la dinámica de las costas rocosas.

## 4. Conclusiones

Durante las poco más de dos décadas que separan las primeras Jornadas de Geomorfología Litoral de la actualidad, la contribución de la investigación en costas rocosas de los geomorfólogos radicados en España se ha ido consolidando y a alcanzado hitos de impacto científico considerables. Son relevantes para el conjunto de la disciplina las aportaciones realizadas relativas al papel de la herencia geológica en la formación de las plataformas litorales, la dinámica de los acantilados blandos y la contribución de la bioerosión en la dinámica de las costas rocosas.

## 5. Agradecimientos

El presente trabajo es una contribución al proyecto PID2020-112720GB-I00/AEI/10.13039/501100011033 financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (MCINN) y la Agencia Española de Investigación (AEI).

## 6. Referencias

De Andrés, J.R. & Gracia, F.J. (Eds.), (2000). *Geomorfología litorral. Procesos activos*. ITGME, Madrid.

García-Ruíz, J.M. (1999). *La producción científica de la Geomorfología Española y su impacto, a través de las publicaciones periódicas*. CSIC, Zaragoza.

García-Ruíz, J.M. (2008). *Una historia de la Sociedad Española de Geomorfología (1987-2008)*. Sociedad Española de Geomorfología, Cádiz.

Kennedy, D.M., Stephenson, W.J. & Naylor, L.A. (Eds.), (2014). Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis. Geological Society, London.

Morales, J.A. (Ed.) (2019). The Spanish Coastal Systems. Dynamic Processes, Sediments and Management. Springer, Cham.

Naylor, L.A., Stephenson, W.J. & Trenhaile, A.S. (2010). Rock coast geomorphology: Recent advances and future research directions. *Geomorphology*, 114, 3-11. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.004

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18871

# Morfología y arquitectura de una eolianita del Pleistoceno superior adosada al acantilado (Punta de l'Avançada, Mallorca, Mediterráneo occidental)

*Morphology and architecture of a late pleistocene cliff-front eolianite (Puta de l'Avançada, Mallorca, western Mediterranean).*

**Laura del Valle [a] Federica Perazzoti [b], Joan J. Fornós [a]**

[a]Universitat de les Illes Balears, Earth Sciences Research Group. Departamento de Biologia, Universitat de les Illes Balears, Ctra. Valldemossa, km. 7.5, 07122. Palma (Mallorca), Illes Balears, Spain. (, laura.del-valle@uib.es, , joan.fornos@uib.es); [b]IUSS Pavia-Istituto Universitario di Studi Superiori, Piazza della Vittoria, 15, 27100. Pavia, Lombardia, Italy.

How to cite: del Valle, L.; Perazotti, F. y Fornós, J.J. 2024. Morfológía y arquitectura de una duna del Pleistoceno superior adosada al acantilado (Sa Fortelesa-Mallorca, Mediterraneo occidental). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* València, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18871

***Abstract***

*A late Pleistocene cliff-front eolianite in northern Mallorca has been studied in detail for the first time. Three evolutionary stages were identified in the dune evolution of unit U3: initial, intermediate, and final. In the initial phase, a wind speed of 10 m/s from the southwest (SSW) was required. During the intermediate phase, the wind speed fluctuated between 5 and 8 m/s from the west-southwest (WSW). In the final phase, the average wind speed was 7 m/s from the west (W) with peaks up to 10 m/s. These findings highlight the influence of wind conditions and topography on the dynamics of eolian accumulation, improving the understanding of sedimentary processes and dune architecture. This study provides valuable insights into the interaction between climatic and geological factors in coastal eolian systems.*

***Keywords:*** *cliff-front dune, stratigraphy, late Pleistocene, western Mediterranean, Mallorca.*

***Resumen***

*Se ha estudiado en detalle por primera vez una duna del Pleistoceno superior situada frente a un acantilado en el norte de Mallorca.Se identificaron tres etapas evolutivas en la duna de la unidad U3 inicial, intermedia y final. En la fase inicial, se requirió un viento de 10 m/s con dirección suroeste (SSW). Durante la fase intermedia, la velocidad fluctuó entre 5 y 8 m/s con dirección oeste-suroeste (WSW). En la fase final, la velocidad media fue de 7 m/s, con dirección oeste (W) y picos de hasta 10 m/s. Estos resultados destacan la influencia de las condiciones de viento y la topografía en la dinámica de acumulación eólica, mejorando la comprensión de los procesos sedimentarios y la arquitectura de las dunas, aportando conocimiento sobre la interacción entre factores climáticos y geológicos en sistemas eólicos costeros.*

***Palabras clave:*** *duna adosada, estratigrafía Pleistoceno superior, Mediterráneo occidental, Mallorca.*

## 1. Introducción

La morfología y la arquitectura de las eolianitas correspondientes a dunas adosadas a los acantilados ofrecen una perspectiva única para entender los procesos geomorfológicos y sedimentarios que moldean estos sistemas. Estas formaciones no solo reflejan las condiciones ambientales y climáticas del pasado, sinó también las interacciones

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

complejas entre el viento, la topografía y la vegetación. Aunque, el principal problema radica en desentrañar cómo estos factores combinados influyen en la formación, evolución y preservación de las dunas adossadas, y cómo los procesos post-deposición, como la diagénesis, afectan su estructura y composición.

Las dunas impedidas, bien por la vegetación o por factores topográficos, son comunes y características de muchas zonas desérticas y costeras. Se pueden diferenciar en acumulaciones que se producen en el lado de barlovento o de sotavento del obstáculo. Las acumulaciones eólicas frente a los acantilados comprenden dunas eco, dunas escaladoras y rampas de arena (p.e, Livingstone y Warren, 1996). Idealmente se puede distinguir entre dunas de eco fijas y dunas trepadoras que ascienden por el obstáculo.

En el noreste de Mallorca, se encuentra un afloramiento que brinda una oportunidad para abordar este problema. El afloramieneto muestra una exposición detallada de una eolianita correspondiente a una duna adosada al acantilado, que permite un análisis exhaustivo de sus características estratigráficas y sedimentológicas. La accesibilidad y el estado de conservación del afloramiento posibilitan la aplicación de diversas técnicas de investigación que pueden arrojar luz sobre la historia evolutiva de la duna y los procesos que han influido en su desarrollo. Así, este afloramiento en Mallorca se convierte en una clave para profundizar en el entendimiento de la morfología y arquitectura de las dunas adosadas a los acantilados.

El principal objetivo de este estudio es caracterizar y analizar la morfología y arquitectura de una duna adosada al acantilado, con el fin de comprender los procesos geomorfológicos y sedimentarios que han influido en su formación, evolución y preservación. Se busca desentrañar las interacciones entre el viento, la topografía y la vegetación que han determinado la estructura de la duna, así como investigar los procesos post-deposición, incluyendo la diagénesis, que han afectado su integridad. Este análisis detallado permitirá reconstruir las condiciones paleoambientales del Pleistoceno superior en esta área y contribuirá al conocimiento general de la evolución de las dunas costeras adosadas a acantilados.

## 2. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra en el N de Mallorca, en la bahía de Pollença, al pie de los acantilados que caracterizan la fachada oriental de la Punta de l'Avançada; un saliente de 900 m de largo y 250 m de ancho, recortado sobre calizas jurásicas, que orientado de N a S da cobijo al puerto de Pollença y se emplaza a 2 km de la costa del pintoresco enclave costero. Su costa oriental es un acantilado formado por calizas de edad jurásica casi vertical cubierto parcialmente en la actualidad por depósitos pleistocenos (eólicos en su mayor parte) que han sido explotados en una antigua cantera. La altura del acantilado está entre los 22,5 y los 23,8 m en el área de estudio.

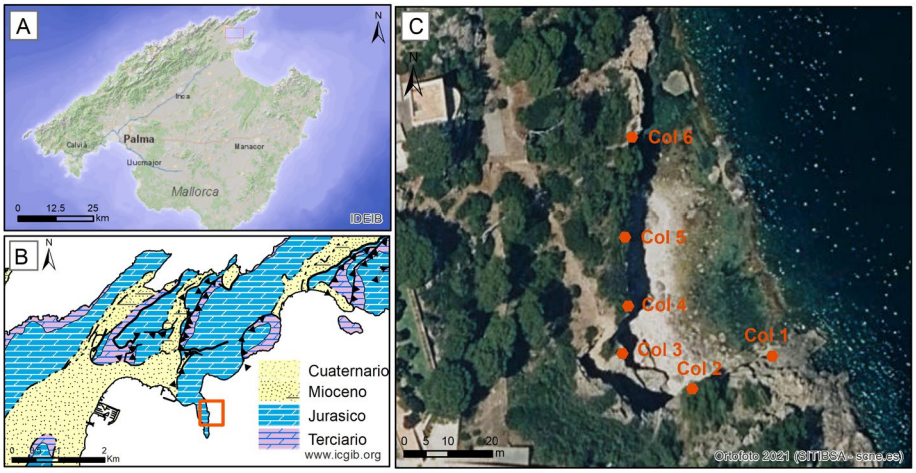



***Fig. 1.*** *A) Mapa de la Isla de Mallorca. B) Mapa geológico de la zona y localización del área de estudio (Punta de l'Avançada). C) PNOA 2023 detalle del área de estudio (cantera costera abandonada) y localización de las columnas estratigraficas.*

 BY-NC-SA

## 3. Materiales y métodos

Los cortes realizados en la explotación de la antigua cantera han permitido el acceso a la estructura interna de la eolianita pudiéndose realizar una serie de columnas estratigráficas y descripciones de detalle de los materiales, los cuales se han dividido en facies según las principales características litológicas y contenindo macrofossil y/o composición mineralógica, litología (C: conglomerado, B: brecha; S: arenisca y P: paleosuelo), textura predominante (a: arena, s: limo, m: arcilla), tamaño de grano (c: cantos, d: gravas e: arena media a muy gruesa; h: arena fina a media), estructuras sedimentarias (l: laminada, p: plana, t: transversal, u: cruzada de bajo ángulo, g: clasificación, n: masiva), biogénica características (f: altamente fosilíferas, r: moldes de raíces).

La presencia de diversos cortes en varias direcciones originadas en la explotación de la cantera permite estudiar en detalle la arquitectura en 3D de la construcción eólica. En este sentido, se ha podido calcular a partir del buzamiento y arquiectura de la laminación dunar, el flujo de aire y su evolución así como los registros de variabilidad del paleoviento y movilidad. Las interpretaciones de la formación dunar se han comparado con estudios de alineación de la forma de la base en el flujo de aire bidireccional (Rubin e Ikeda, 1990) y flujo de aire a sotavento de las dunas (Sweet y Kocurek, 1990). Se ha estimado también el transporte potencial de sedimento compatible con las características texturales y morfológicas de la duna aplicando la equación de Letteu y Lettau (1977):

$$Q = k(\rho/g)\sqrt{D/D_{ref}}^{2} u^2 * (u - u_t\ )$$

Donde $k$ és una constante dependiente del sedimento superficial con un valor de 4,2; $\rho$ és la densidad del aire 1,25 kg m$^{-3}$, $g$ és la aceleración debida a la gravedad, 9,81 m s$^{-2}$; $D$ es el calibre medio del sedimento, $D_{ref}$ es el calibre medio de referencia del sedimento (0,25 mm); $u$ és la velocidad de corte, $u_t$ és la velocidad de corte umbral (a coeficiente empírico, normalmente 0,1). Las velocidades teóricas de umbral del viento se estiman aplicando la equación de Bagnold (1941):

$$u_{*t} = A\left[gD\left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a}\right)\right]^{1/2}$$

Donde $u_{*t}$, es la velocidad de fricción crítica a la que se inicia el transporte $\rho_s$ es la densidad del sedimento, 2650 kg m-3, y $A$ es una constante de 0.085 durante la saltación activa (Costas et al., 2016), $g$ es la aceleración debido a la gravedad, $D$ es D50 y $\rho_a$ la densidad del aire.

Por otra parte, para la medición de los parámetros de calibre de grano (muestreo de 100 granos por foto y cálculo de la media del eje mayor) se realiazó con muestras de mano (5x5cm) en un microscopio óptico (National Digital Microscope), junto con el software de análisis digital de imágenes ImagJ.ink.

## 4. Resultados

En la antigua cantera localizada en la Punta de l'Avançada (Pollença, NE Mallorca), se ha identificado una secuencia del Pleistoceno superior compuesta por seis unidades bien diferenciadas entre las que destaca una unidad caracterizada por una eolianita de gran tamaño (U3) (Fig. 2). La secuencia se inicia con la unidad U1, en la base, la cual está compuesta por depósitos coluviales, con clastos heterométricos de 2 a 16 cm soportados por la matriz y una cierta imbricación de tierra a mar. Encima de ella, la unidad U2, consiste en depósitos de arenas medias (250-500 μm) bien cementadas, con estratificación tabular, de color marrón pálido, que es seguida por la unidad U3, compuesta por calcarenitas de arenas finas a medias (125-250 μm), de color marrón pálido a blanco, con estratificación cruzada, moderadamente cementadas. La unidad U4, que solo se observa en la parte occidental del afloramiento, está compuesta por fragmentos de conchas de origen marino y matriz arenosa, con niveles de gravas bien redondeadas. La unidad U5 se caracteriza por materiales limosos de color marrón rojizo y una gran cantidad de clastos de 1 a 20 cm de diámetro. Finalmente, la unidad U6 está formada por calcarenitas bien cementadas formadas por arenas bioclásticas de color marrón pálido, con laminación cruzada y planar (Fig. 2).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

La unidad más destacada de toda la secuencia (U3), corresponde a una acumulacion eólica adosada al acantilado. La observación detallada de la misma permite su división en tres sub-unidades que son asimilables a diferentes estadios de formación (Fig. 3A). La sub-unidad inferior, -estadio inferior-, corresponde a una serie de dunas de aproximadamente 6-10 m de espesor, interpretadas como dunas parabolicas. La sub.unidad eólica intermedia está compuesta por una serie de dunas de menor dimensión, alcanzando una potencia de 5,5 m, con una cresta muy definida, e interpretada como una duna escalante. Finalmente, la parte superior, el último estadio de evolución de la duna, presenta unas crestas muy marcadas y una potencia aproximada de 9 m.

A partir de la observación de las diversas secciones expuestas por las labores de la cantera, se observa claramente que el crecimiento de la duna fue acercándose de forma gradual al frente del acantilado. Dividimos la evolución de la duna en tres etapas principales: etapa temprana, etapa intermedia y etapa tardía (Fig. 3A). La vista en planta de la duna y de la cresta en las diferentes etapas de su evolución muestran que esta evolucionó desde casi recta o débilmente ondulada en las primeras etapas de crecimiento hasta fuertemente curvada en las últimas etapas de crecimiento, siguiendo una orientacion NNE- SSW.

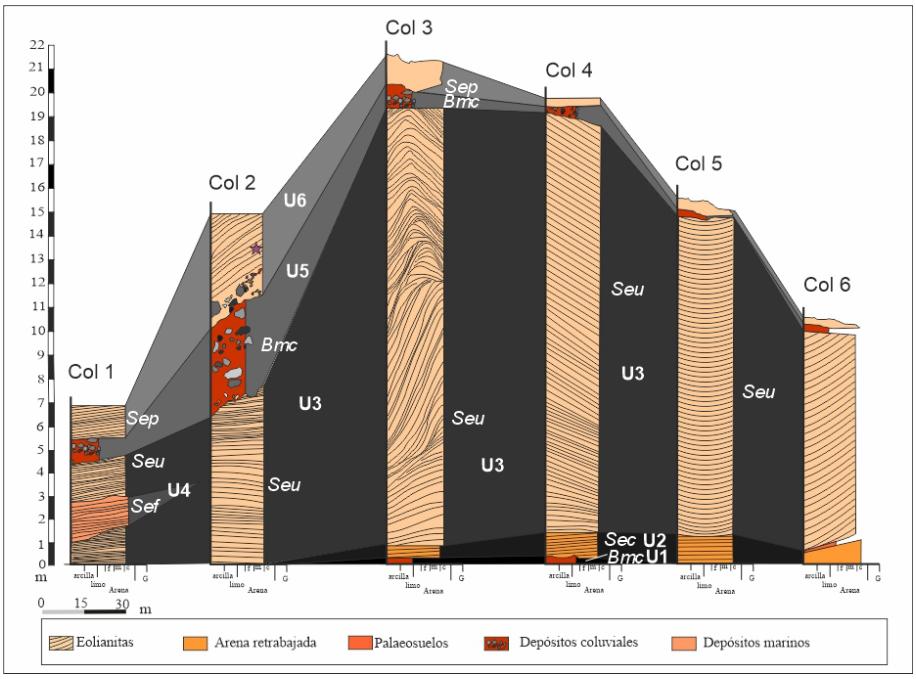



***Fig. 2.*** *Columnas estratigráficas de la zona de estudio, Punta de l'Avançada (Pollença, N Mallorca).*

El tamaño de grano de la arena que forma la eolianita, está estrechamente relacionado con la velocidad del flujo eólico. La relación precisa entre la velocidad del viento y el tamaño de grano de la arena puede variar dependiendo de factores como la composición de la arena, la humedad del aire y la topografía del área en cuestión, así como la densidad (composición mineralógica) de los sedimentos (bioclastos vs litoclastos, entre otros).

En condiciones típicas (densidad del grano de arena ~2.7 g/cm$^3$; tamaño de grano 250 µm; humedad 78%; composición principalmente de silicatos, referenciados a 1 m de altura respecto de la superficie, la velocidad sobre superficie puede ser menor, incluso 4 m/s, pero difícilmente se tienen anemómetros en esa posición utilizamos el criterio a 1 m, se necesita una velocidad de al menos 8-10 m/s para iniciar la movilización de arena media, y de 4-6 m/s para arena fina (Torres y Cruz, 2014). Velocidades del viento inferiores a 4 m/s rara vez mueven sedimentos (Masselink y Hughes, 2003). Otras variables como la vegetación pueden influir en la velocidad del viento. Los vientos actuales en la zona alcanzan velocidades de alrededor de 7-8 m/s durante algunas semanas en invierno.

A partir de nuestras observaciones del tamaño de grano, podemos calcular algunos valores ilustrativos. Los valores proporcionados por la ecuación muestran que la velocidad del viento necesaria para mover arenas finas es aproximadamente 7 m/s y para arena gruesa es aproximadamente 10 m/s

 BY-NC-SA

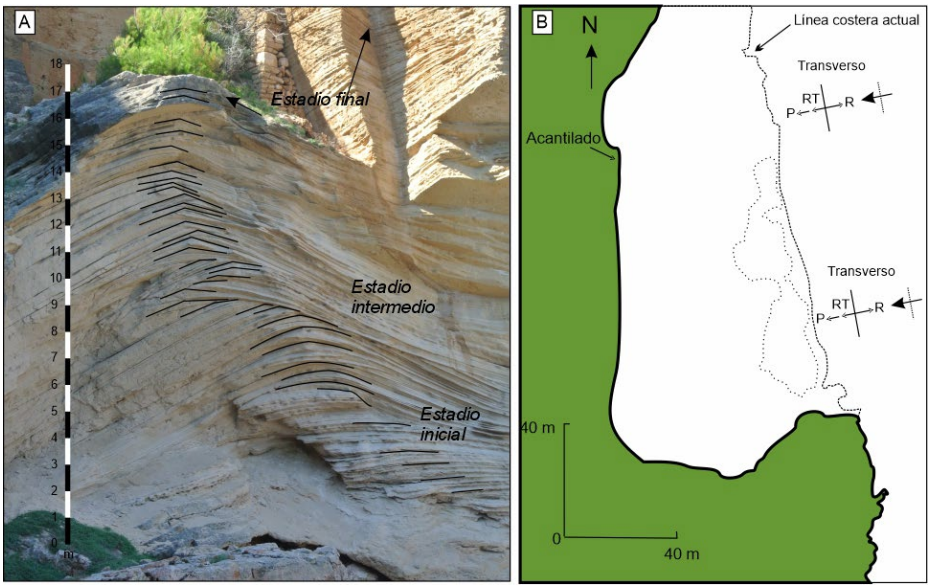



***Fig. 3.*** A) *Etapas de crecimiento de la duna correspondiente a la Unidad 3 (escala en metros). B) Linea de puntos: linea de costa actual; linea de puntos espaciados: zona inundada.*

Durante el estadio inicial de la formación de la duna de la unidad U3, se necesitó un viento de unos 10 m/s para su movilización, con una dirección predominante del SW. En cambio, durante la fase intermedia, la velocidad del viento fluctuó entre 5 y 8 m/s, con una dirección predominante de SW-W debido al obstáculo que representa el acantilado. Finalmente, en la etapa final, la velocidad media del viento fue de unos 7 m/s, con una dirección predominante de oeste, con intervalos cortos de una velocidad de 10 m/s (representado por los niveles de arenas medias-gruesas).

***Tabla 1.*** *Tabla resumen de las velocidades inferidas y dirección preodominante del viento durante las diferentes fases de formación de la duna de la unidad U3.*

| **Fase** | **Velocidad media del viento** | $\overline{X}$ **calibre sedimento** | **Dirección predominante del viento** |
|---|---|---|---|
| Inicial | 10 m/s | 400 µm | SSW |
| Intermedia | 5-8 m/s | 125-250 µm | WSW |
| Final | 7 m/s – 10 m/s | 180-450 µm | W |

## 5. Conclusiones

Este estudio ha profundizado en la comprensión de las acumulaciones eólicas adyacentes a acantilados, una variante particularmente relevante en entornos costeros. Durante el último período glacial, momento de acumulación dunar, la zona de estudio estaba separada de la línea de costa por una amplia llanura costera.

La caracterización detallada de seis unidades sedimentarias (U1-U6) ha proporcionado información sobre la composición y la compleja historia pleistocena de esta zona. En particular, el estudio de la duna prominente en la unidad U3 ha revelado tres etapas principales en su evolución (inicial, intermedia y final), destacando la importancia de considerar el contexto temporal para interpretar sus características morfológicas

La relación entre el tamaño de grano de la arena y la velocidad del viento proporciona información sobre las condiciones necesarias para la movilización de sedimentos y la acumulación eólica por lo que este estudio puede contribuir a ampliar nuestra comprensión de los procesos que controlan la dinámica de las dunas de este tipo específico común en entornos costeros donde los aspectos morfológicos y dimensionales de los acantilados juegan un papel fundamentan en la arquitectura de la acumulación eólica. En este sentido, el estudio de la formación de

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

la duna de la unidad U3 revela diferentes velocidades del viento durante cada fase de su evolución. En la fase inicial, se requirió un viento de aproximadamente 10 m/s con dirección suroeste (SSW) para movilizar los sedimentos. Durante la fase intermedia, la velocidad del viento fluctuó entre 5 y 8 m/s con dirección oeste-suroeste (WSW), influenciada por el obstáculo que representa el acantilado. En la etapa final, la velocidad media del viento fue de aproximadamente 7 m/s, con una dirección predominante oeste (W) y periodos cortos alcanzando hasta 10 m/s, lo cual está representado por los niveles de arenas medias-gruesas.

Estas variaciones en la velocidad y dirección del viento han permitido entender mejor los procesos de formación y evolución de las dunas eólicas adyacentes a acantilados. Los resultados obtenidos subrayan la importancia de considerar las condiciones de viento y los obstáculos topográficos en la interpretación de la dinámica de acumulación eólica, especialmente en entornos costeros. Esta información es crucial para mejorar nuestra comprensión de los procesos sedimentarios y la arquitectura de las dunas en relación con las características morfológicas de los acantilados, además de contribuir al conocimiento sobre la interacción entre factores climáticos y geológicos en la formación de estos sistemas.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo forma parte del projecto de investigación financiado los la Agencia Estatal de Investigaciíon (AEI), PID2020-112720 GB-100 del MICINN. También queremos agradecer a los revisores del articulo, por la mejora sustancial con sus sugerencias.

## 7. Referencias

Bagnold, R.A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, London. 265 pp.

Costas, S., Naughton, F., Goble, R. e Renssen, H. (2016). Windiness spells in SW Europe since the last glacial maximum. *Earth and Planetary Science Letters*. 436, 82-92. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.023.

Fornòs, J.J. e Gelabert, B. (2011). Condicionants litológics i estructurals del carst a les Illes Balears. *Endins*, 35. / *Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*, 17, 37-52.

Howard, A.D. (1985). *Interaction of sand transport with topography and local winds in the northern Peruvian coastal desert*. In: Procedings of International Workshop on the Physics of Blown Sand, Aahus. O.E. Barndorff-Nielsen, J.T., Moller, K.R. Rasmussen and B.B. Willets (eds) pp. 511-544. University of Aarhus.

Lettau, K. e Lettau, H. (1977). Experimental and micrometerorological field studies of dune migration. In: Lettau, K., Lettau, H (Eds), *Exploring the World's Driest Climate*, University of Wisconsin Press, Madison. 110-149 pp.

Livingstone, I e Warren, A. (1996). Aeolian Geomorphology and sediments of sand ramps in the Mojave Desert. *Geomorphology*, 17, 000151, 165.

Rubin, D. e Ikeda, H. (1990). Flume experiments on the aligment of tranverse, oblique and longitudinal bedforms in directionally varying flows. *Sedimentology*, 37, 673-684. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1990.tb00628.x

Sweet, M.L. e Kocurek, G. (1990). An empirical model of aeolian dune lee-face airflow. *Sedimentology*, 37. 1023-1038. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1990.tb01843.x

Torres, R. e Cruz, R. (2014). Capacidad de transporte eólico de arena hacia las dunas en Los Taínos, Varadero, Cuba. Scielo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 35(2). ISSN 1680-0338.

Tsoar, H. (1983). Wind tunnel modelling of echo and climbing dunes. In: M.E. Brookfield and T.S. Ahlbrandt, (eds), *Eolian Sediments and Processes*, 247-259. https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)70798-2

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

GEOLIT

# SESIÓN 4



XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18330

# Dinámica sedimentaria de playa sobre un afloramiento patrimonial del Pleistoceno: la superficie de pisadas de El Pichilín (Almonte, Huelva)

*Beach sedimentary dynamics on a Pleistocene heritage outcrop: the footprint surface of El Pichilín (Almonte, Huelva).*

**J.A. Morales[a], A. Rodríguez-Ramírez[a], E. Mayoral[a], R. Díaz-Delgado[b], A. Santos[c], J. Duveau[d], I. Díaz-Martínez[e] y A. Gómez Olivencia[f]**

[a]Departamento de Ciencias de la Tierra, CCTH-Centro de Investigación Científico Tecnológico, Campus de El Carmen, Universidad de Huelva, 21071 Huelva, España. jmorales@uhu.es [b]LAST (Remote Sensing & GIS Lab), Estación Biológica de Doñana-CSIC, 41092 Sevilla, España. [c]Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 33005, Oviedo, España. [d]UMR 7194 Histoire Naturelle de l'Homme Préhistorique, CNRS, Muséum National d'Histoire Naturelle, Université Perpignan Via Domitia, Paris, Francia. [e]Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada, Facultad de Ciencias, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, Cantabria, España. [f]Dept. Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV, Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, España.

How to cite: Morales, J.A.; Rodríguez Ramírez, A.; Mayoral, E.; Díaz-Delgado, R.; Santos, A.; Duveau, J.; Díaz-Martínez, I. y Gómez Olivencia, A. 2024. Dinámica sedimentaria de playa sobre un afloramiento patrimonial del Pleistoceno: la superficie de pisadas de El Pichilín (Almonte, Huelva). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25 – 27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18330

## *Abstract*

*Recent papers described a tracked surface at the northwest of Matalascañas beach (Almonte, Huelva). There, dozens of human footprints and hundreds of other vertebrate footprints were discovered. The outcrop, which has a Pleistocene age, is affected by coastal dynamics. The beach is developed on the wave-cut platform of a sandy bluff. The discovery occurred after storms coinciding with neap tides. Under these conditions storm waves eroded the beach and removed the sand to deeper shoreface areas. However, subsequent storms coinciding with high spring waters attacked the base of the cliff, providing a high volume of sand, reburying the footprints and contributed to their preservation. This work studies the sand dynamics under different energy situations, establishing those that contribute to a better preservation of the outcrop.*

***Keywords:*** *Pleistocene, paleoichnology, geological heritage, coastal dynamics, preservation.*

## *Resumen*

*Trabajos recientes han descrito una superficie con abundantes icnitas al noroeste de la playa de Matalascañas (Almonte, Huelva). En ella se descubrieron decenas de huellas humanas y cientos de huellas de otros vertebrados. El afloramiento, que tiene una edad Pleistoceno, se ve afectado por la dinámica costera. La playa se desarrolla sobre la plataforma de abrasión de un acantilado arenoso. El descubrimiento se produjo tras un período de tormentas coincidentes con mareas muertas. En estas condiciones, las olas de la tormenta erosionaron la playa y arrastraron la arena a zonas más profundas. Sin embargo, tormentas posteriores coincidentes con mareas altas vivas atacaron la base del acantilado, proporcionando un gran volumen de arena que volvió a enterrar las huellas y contribuyó a su conservación. Este trabajo estudia la dinámica de la arena bajo diferentes situaciones energéticas, estableciendo aquellas que contribuyen a una mejor preservación del afloramiento patrimonial.*

***Palabras clave:*** *Pleistoceno, paleoicnología, geopatrimonio, dinámica costera, preservación.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

A principios de junio de 2020 la erosión ocurrida en Matalascañas (Huelva, SO de España) durante sucesivos temporales invernales dejaron al descubierto una extensa superficie de algo más de 6000 $m^2$. En una inspección visual llevada a cabo el 3 de junio de 2020 por dos biólogas del Parque Nacional de Doñana (Mª Dolores Cobo García y Ana Mateos Morillo) se informó sobre la presencia de numerosas huellas de animales. Los autores de este trabajo acudieron a la llamada de las autoridades del espacio natural para estudiarlas. Otro equipo de investigadores se centró en principio en las numerosas huellas de animales, que eran muy abundantes y evidentes y publicaron en pocos meses los primeros trabajos sobre las mismas (Neto de Carvalho et al., 2021). Los autores del presente trabajo se centraron en un descubrimiento menos evidente y que el otro equipo pasó por alto: la presencia de huellas de homínidos (Mayoral et al., 2021). Los trabajos se han ido sucediendo en los últimos tres años (Mayoral et al., 2022). Sin embargo, el estudio de esta superficie presenta una enorme dificultad, ya que al encontrarse el afloramiento dentro de la zona intermareal, se ve diariamente cubierto por la marea y además suelen quedar enterradas bajo los sedimentos arenosos de la playa, que de un día para otro pueden ocultar totalmente la superficie expuesta impidiendo así su estudio. El presente trabajo estudia la dinámica de la arena bajo diferentes situaciones de mareas y oleaje, estableciendo las condiciones dinámicas que contribuyen a una mejor preservación de este importante afloramiento patrimonial.

## 2. Zona de estudio

El afloramiento de El Pichilín está situado en la Playa de Castilla (37º 0´58" N; 6º 35´3" W) a unos 45 km al SE de la localidad de Huelva (España) y unos 2 km al NO de la urbanización de Matalascañas (Fig. 1). Se encuentra normalmente bajo las arenas de una playa holocena y sometido a la dinámica litoral. Esta playa arenosa se desarrolla sobre la plataforma de abrasión de un sistema acantilado activo tallado sobre formaciones pleistocenas denominado acantilado de El Asperillo. Este sistema acantilado se extiende en dirección NW-SE a lo largo de unos 30 km de longitud y posee una altura media de unos 20 m. El perfil del acantilado hace aflorar la secuencia sedimentaria depositada durante el Pleistoceno Medio y Superior. Esta secuencia está conformada por cinco unidades eólicas que fueron definidas por Zazo et al. (2005) y sobre las cuales se ubican los sistemas dunares del Holoceno. Estas unidades están separadas por paleosuelos ferruginosos y niveles arcillosos ricos en materia orgánica. En uno de estos niveles de paleosuelo se encuentra el afloramiento con las huellas.




***Fig. 1** Localización del área de estudio y panorámica del afloramiento.*

La dinámica costera se caracteriza por un régimen de oleaje de baja energía, con olas de altura significante media de 0,5 m. Con este régimen se consideran olas de tormentas aquellas con alturas superiores a 1,5 m. En estos temporales invernales se alcanzan frecuentemente los 4 m y han llegado a medirse olas de hasta 7 metros (Rodríguez Ramírez et al., 2003). Es una costa de tipo meso-mareal, con un rango medio de 2 m, que oscila entre

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

los 1,25 m de las mareas muertas y los 3,8 m de las mareas vivas. Se trata, pues de una costa de energía mixta cuyas características geomorfológicas están controladas por la conjunción entre olas y mareas.

En verano, durante oleaje de buen tiempo, esta playa es de características disipativas desarrollando sistemas de barras que remontan desde el shoreface para adosarse al foreshore en el frente del acantilado (Rodríguez Ramírez et al., 2003). En invierno, cuando coinciden las mareas meteorológicas con pleamares vivas el nivel del mar alcanza la base de los acantilados y permite al oleaje de tormenta atacar y erosionar sus formaciones arenosas. En estas condiciones, el afloramiento rocoso puede encontrarse expuesto y ser erosionado en algunas condiciones dinámicas, mientras que en otras permanece bajo espesores significativos de arena. Determinar cuáles son las condiciones que hacen que se produzcan una u otra situación es el objetivo de este trabajo.

## 3. Metodología

Se realizaron dos vuelos programados a baja altitud utilizando un vehículo aéreo no tripulado (UAV) el 9 y el 18 de junio de 2020, ambos durante condiciones de marea baja. Un multirotor DJI PHANTOM 4+ con una cámara CMOS RGB 4k de 20 Mpix, volando a una altura media de 7 m sobre el suelo, recogió en cada ocasión más de 350 fotografías sobre el área de estudio. Se produjeron sendos ortomosaicos fotogramétricos utilizando el software PIX4DMAPPE y AGISOFT METASHAPE PROFESSIONAL. Este procedimiento permitió el estudio de las huellas, pero además documentó los cambios en la posición de las barras de arena que migran sobre el afloramiento.

Con esta información se realizó un levantamiento tridimensional utilizando el MODELO DE SUPERFICIE DIGITAL (DSM). DSM es un archivo ráster (cuadrícula con tamaño de píxel = 0,6 m) del área de estudio donde los valores de los píxeles corresponden a la altura topográfica sobre un nivel de referencia.

En paralelo, se realizaron perfiles topográficos sobre el terreno en días sucesivos a partir del segundo vuelo de dron (entre el 19 y el 21 de junio de 2020) y en meses posteriores, después de cada tormenta (22 de septiembre, 4 y 7 de octubre de 2020). Los perfiles de playa se obtuvieron mediante el uso de una estación total Nikon DTM 332 y se refirieron al cero de mareas (nivel de referencia de las cartas náuticas y de los mareógrafos de Puertos del Estado).

Los datos de altura del oleaje se obtuvieron de la base de datos de Puertos del Estado para el punto SIMAR 5035021, mientras que las medidas de rango mareal se obtuvieron de la estación más próxima al área de estudio, situada en el puerto deportivo de Mazagón.

## 4. Resultados

Los datos de alturas de olas y rangos de marea de los días previos al descubrimiento de las huellas (Fig. 2) permiten observar cómo desde el 9 al 15 de mayo actuaron sobre la playa olas superiores a 1 m, registrándose un fuerte temporal con olas superiores a 2,5 metros entre las 4:00 horas del día 14 y las 6:00 horas del día 15 de mayo. Estas condiciones de temporal, procedente del SO, se mantuvieron durante dos pleamares y una bajamar, en una situación de marea muerta, con un rango máximo de 0,77 m. En estas condiciones la cota máxima del nivel del mar no alcanzó la base del acantilado, rompiendo el oleaje en todo momento sobre la superficie de la playa. Esta fue la situación que provocó la erosión de la playa y la retirada de los sedimentos hacia zonas más profundas del *shoreface*, haciendo aflorar la plataforma de abrasión situada bajo la arena y con ello la superficie donde se encontraban las huellas. Las condiciones de olas y mareas de todo el mes posterior a este evento fueron favorables a la migración sedimentaria hacia cotas superiores, aunque sin llegar a cubrir el afloramiento en el momento en el que fue descubierto el 3 de junio de 2020.

El perfil realizado el 9 de junio a partir del vuelo de dron (Fig. 3A y C) muestra un afloramiento prácticamente descubierto, no observándose acumulación de sedimentos, sino en los niveles topográficos más bajos. El vuelo del 18 de junio (Fig. 3B) muestra ya la presencia de una primera barra, situada en un sector más alto y una segunda barra situada en una zona topográficamente más baja. Ambas cubren casi la totalidad del afloramiento.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

El perfil del día 18 muestra que estas barras alcanzan un espesor máximo de 0,36 m con una longitud de en torno a los 40 m (Fig. 3D). Los perfiles realizados entre los días 18 y 21 de junio muestran una rápida migración transversal de la segunda barra de más de 30 m hacia la parte superior de la playa cubriendo totalmente el afloramiento. El día 21 de junio la acumulación de sedimentos llega a alcanzar un espesor máximo de 0,62 m sobre el afloramiento.

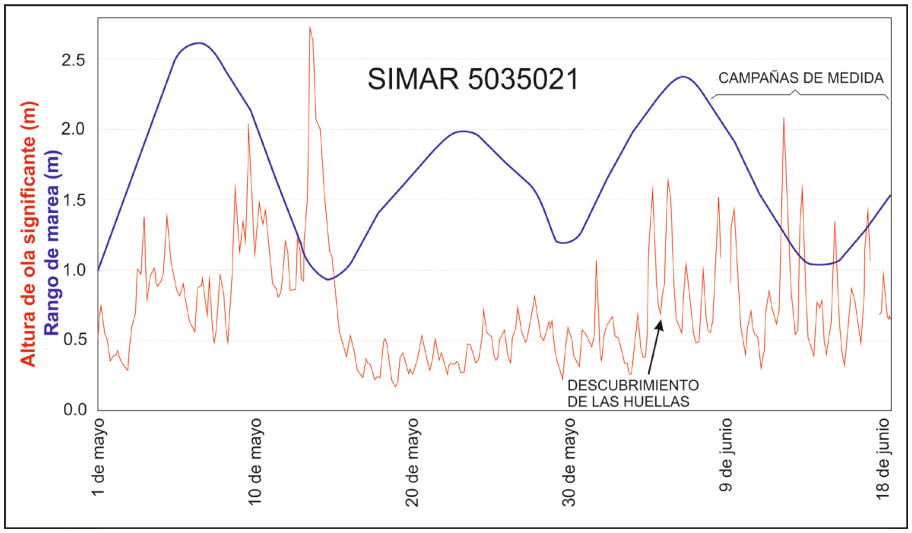



***Fig. 2*** *Altura de ola significante y rango de marea en el mes anterior al descubrimiento de las huellas.*

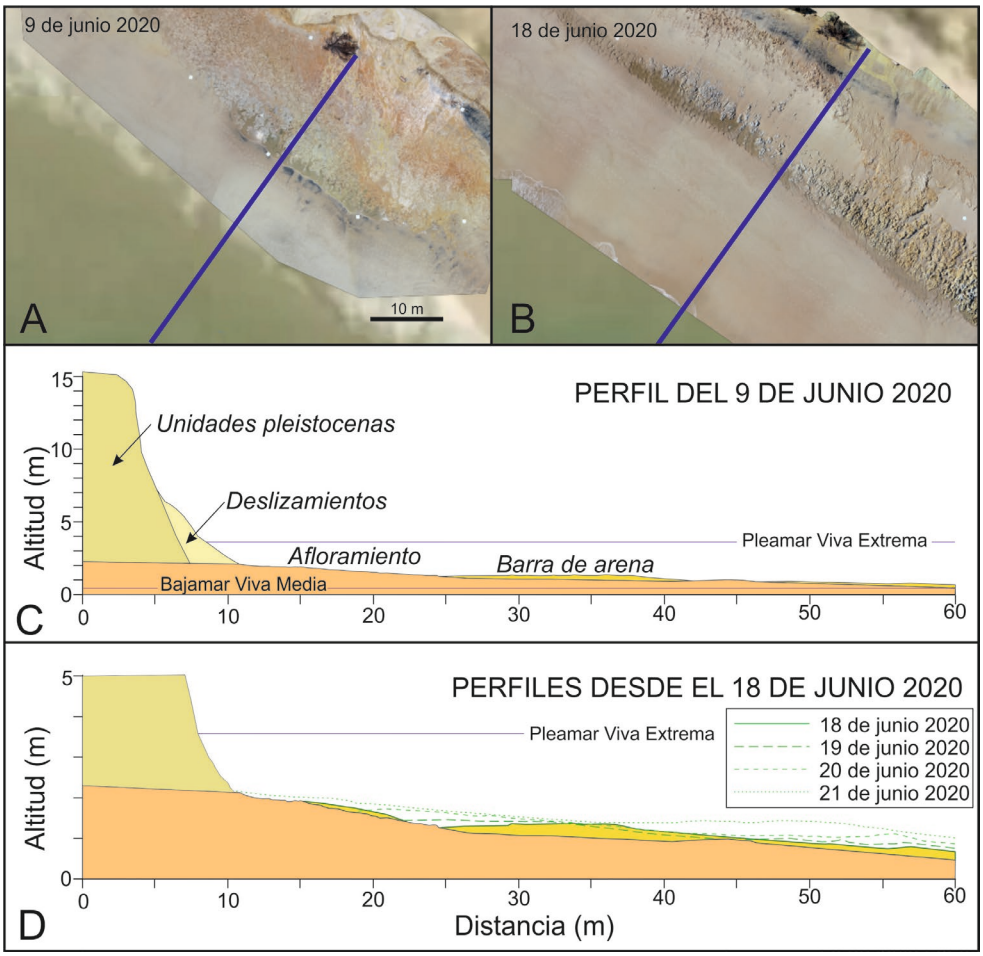



***Fig. 3*** *Situación de los perfiles topográficos en los respectivos vuelos de dron (A y B) y perfiles levantados en junio de 2020 (C y D).*

 BY-NC-SA

Durante todo el verano se mantuvieron condiciones de oleaje de buen tiempo con olas de altura inferior a los 0,5 m. La llegada de nuevos frente atlánticos dio lugar a condiciones energéticas el día 18 de septiembre. El oleaje de tormenta llegó desde el SO, con olas cuya altura alcanzó los 2,69 m. Esta vez estas olas coincidieron con una pleamar viva (Fig. 4), llegando a cotas que permitieron la llegada del nivel del mar a la base del acantilado. Estas condiciones energéticas se saldaron con un retroceso del acantilado de casi 2 m, ya que el oleaje desestabilizó su base y provocó numerosos deslizamientos gravitacionales que pusieron a disposición del oleaje un importante volumen de arena. El perfil medido tras este temporal (Fig. 5A) muestra una plataforma de abrasión cubierta con un espesor de arena que supera los 0,9 m en algunos puntos.

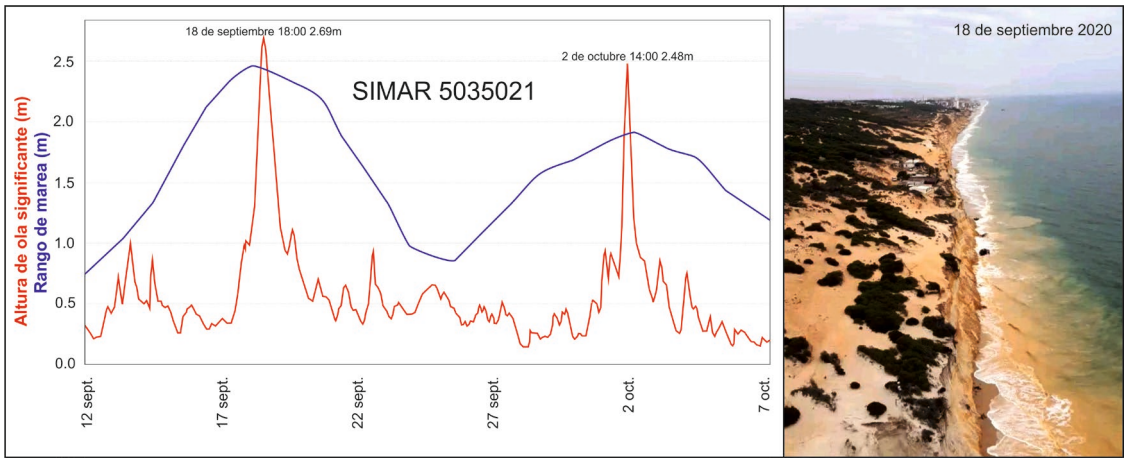



***Fig. 4*** *Altura de ola significante y rango de marea durante los primeros temporales ocurridos tras el verano.*

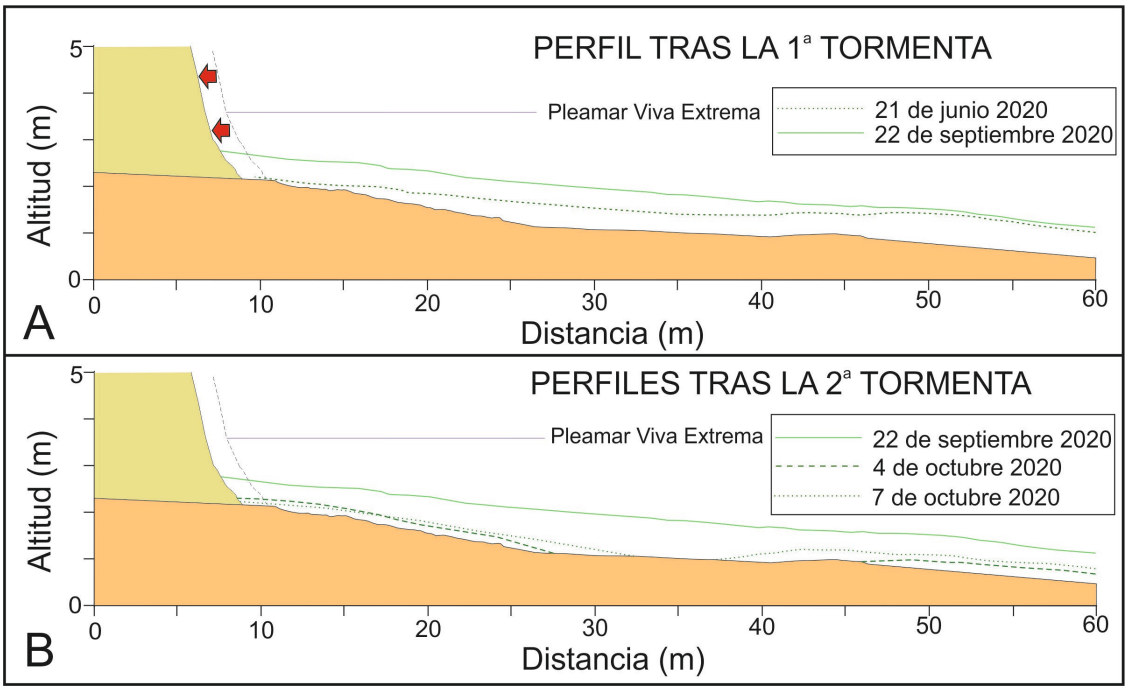



***Fig. 5*** *Perfiles levantados tras las primeras tormentas de 2020.*

Un segundo temporal ocurrió el 2 de octubre, dos semanas después, con olas significante máximas de 2,48 m y también en condiciones de pleamar viva. Este temporal atacó de nuevo la plataforma de abrasión causando una erosión de la misma y un nuevo desplazamiento hacia la zona profunda de casi la totalidad de la arena acumulada en la playa por el retroceso del acantilado en el temporal anterior, dejando nuevamente expuesto el afloramiento. En los días posteriores al temporal, olas con alturas inferiores a 0,5 m ya habían formado una nueva barra, que el día 7 de octubre migraba hacia las zonas más altas de la playa cubriendo el afloramiento.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 5. Discusión y conclusiones

El yacimiento de huellas de El Pichilín se encuentra sometido a la actuación de una morfodinámica ligada principalmente a los procesos de batida del oleaje descritos en detalle por Kroon y Masselink (2002). Los perfiles realizados en esta zona muestran una clara dinámica transversal de las barras bajo el control de los procesos ligados a la batida de las olas. La existencia de barras arenosas y su migración hacia las zonas altas de la playa dependen del tiempo de residencia de estos procesos de batida y resaca sobre la playa durante los ciclos de marea (Anthony et al. 2004). A pesar de que en estas barras se ha observado un modo de funcionamiento vertical, no puede descartarse una migración longitudinal de la arena, ya que el oleaje incide sobre esta costa de un modo oblicuo, generando una deriva litoral en sentido SE (Sedrati & Morales, 2017).

Toda esta dinámica de barras puede verse interrumpida por eventos erosivos bajo condiciones de fuerte agitación. Sin embargo, las condiciones de mayor erosión observadas no se producen como en el resto de las playas al coincidir las olas máximas con las pleamares vivas. En este caso, la máxima pérdida de arena se observa cuando las olas de temporal coinciden con mareas muertas y la batida tiene lugar sobre la arena que cubre el afloramiento. Por el contrario, cuando coinciden olas de temporal con mareas vivas, la batida ataca el frente acantilado y lo hace retroceder desestabilizando su base. En estas condiciones se produce una recarga sedimentaria de la playa y el afloramiento se ve cubierto con importantes volúmenes de arena. A pesar de que estas condiciones dificultan el estudio de las huellas, la presencia de una cobertura sedimentaria y la dinámica de las barras representa las condiciones de máxima preservación de las huellas, puesto que la arena impide la acción directa del oleaje sobre las mismas y su destrucción por procesos erosivos.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo es resultado del proyecto de Investigación 2993/2023, "Caracterización, seguimiento y control del yacimiento de icnitas humanas en el Espacio Natural de Doñana: un reto ante el Cambio Global", concedido por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

## 7. Referencias

Anthony, E.J., Levoy, F. & Monfort, O. (2004). Morphodynamics of intertidal bars on a megatidal beach, Merlimont, Northern France. *Marine Geology*, 208, 73-100.

Kroon, A. & Masselink, G. (2002). Morphodynamics of intertidal bar morphology on a macrotidal beach under low-energy wave conditions, North Lincolnshire, England. *Marine Geology*, 190, 591-608.

Mayoral, E., Díaz-Martínez, I., Duveau, J. et al. (2021 Tracking late Pleistocene Neandertals on the Iberian coast. *Scientific Reports*, 11: 4103.

Mayoral, E., Duveau, J., Santos, A., et al. (2022). New dating of the Matalascañas footprints provides new evidence of the Middle Pleistocene (MIS 9-8) hominin paleoecology in southern Europe. *Scientific Reports*, 12: 17505.

Neto Carvalho, C., Belaústegui, Z., Toscano, A., et al. (2020). First vertebrate tracks and palaeoenviron-ment in a MIS-5 context in Doñana National Park (Huelva, SW Spain). *Quat. Sci. Rev.*, 243: 106508.

Rodríguez-Ramírez, A., Ruiz, F., Cáceres, L.M., Rodríguez-Vidal, J., Pino, R., Muñoz, J.M. (2003). Analysis of the recent storm record in the south-western Spain coast: implications for littoral management. *The Science of the Total Environment* 303, 189–201.

Sedrati, M. & Morales, J.A. (2017). Efecto de los espigones transversales en la dinámica de las playas disipativas con barras: Ejemplo de Matalascañas, Huelva. *Geo-Temas*, 17: 239-242.

Zazo, C. et al. (2005). Landscape evolution and geodynamic controls in the Gulf of Cadiz (Huelva coast, SW Spain) during the Late Quaternary. *Geomorphology*, 68: 269–290.

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18563

# Estudio preliminar sobre la foredune en Cabo Verde: Naturaleza y Amenazas

*A Preliminary study about the foredune in Cape Verde: Nature and Threats*

**Leví García-Romero[a], Néstor Marrero-Rodríguez[a], Esther Beltrán-Yanes[b], Albert Taxonera[c], Vânia Tavares[c] y Javier Dóniz-Páez[b]**

[a]Grupo de Geografía, Medio Ambiente y Tecnologías de la Información Geográfica, Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Univerisidad de Las Palmas de Gran Canaria, ULPGC, España, levi.garcia@ulpgc.es; nestor.marrero@ulpgc.es; [b]Grupo Geoturvol, Departamento de Geografía e Historia, Facultad de Humanidades, Universidad de La Laguna, España, estyanes@ull.edu.es; jdoniz@ull.edu.es y [c]Associação Projeto Biodiversidade, Santa Maria, Sal Island, Cabo Verde, albert.taxo@projectbiodiversity.org; vania.tavares@projectbiodiversity.org

How to cite: García-Romero, L.; Marrero-Rodríguez, N.; Beltrán-Yanes, E.; Taxonera, A.; Tavares, V. y Dóniz-Páez, J. 2024. Estudio preliminar sobre la foredune en Cabo Verde: Naturaleza y Amenazas. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18563

***Abstract***

*Foredune is formed by aeolian sand deposition in vegetation on the backshore. It is a landform structure produced by biogeomorphological processes that depend on multiple environmental factors (wind regime, precipitation, temperature, sediment supply, vegetation, among others). The objective of this research is to characterise the foredune of the beach-dune systems of Cape Verde, especially on the islands of Sal and Boa Vista, in order to understand, in a preliminary way, its nature and the threats that may be affecting its natural processes. For this, a fieldwork was carried out in June 2023 where data on morphological and vegetation variables were collected in four plots. Results show that the foredune is formed by "nebkhas" type biogeoforms, and the structuring vegetation is mainly herbaceous with xerophytic and halophytic species such as Sesuvium portulacastrum, Tetraena fontanesii, Tetraena waterlotii and Suaeda caboverdeana. However, some factors that may be controlling the natural distribution of the nebkhas that make up the foredune are shown and discussed.*

***Keywords:*** *Cape Verde, coastal dune, aeolian landforms, dune vegetation, environmental impact*

***Resumen***

*La foredune es formada por la deposición de arena eólica en torno a la vegetación localizada en el backshore Se trata de una estructura producida por procesos biogeomorfológicos que dependen de múltiples factores ambientales (régimen eólico, precipitación, temperatura, suminitro de sedimento, vegetación, entre otros). El objetivo de esta investigación es caracterizar la foredune de los sistemas playa-duna de Cabo Verde, especialmente en las islas de Sal y Boa Vista, para entender, de forma preliminar, su naturaleza y las amenazas que pueden estar afectando el funcionamiento natural de esta. Para ello se realizó una campaña de campo en junio de 2023 donde se tomaron datos de variables morfológicas y de vegetación en cuatro parcelas. Los resultados muestran que la foredune, está formada por biogeoformas tipo "nebkhas", y la vegetación estructurante es principalmente herbácea donde actúan especies xerófilas y halófilas como Sesuvium portulacastrum, Tetraena fontanesii, Tetraena waterlotii y Suaeda caboverdeana. Sin embargo se muestran y discuten algunos factores que pueden estar controlando la distribución natural de las nebkhas que conforman la foredune.*

***Palabras clave:*** *Cabo Verde, duna costera, geoformas eólicas, vegetación dunar, impacto ambiental*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

La foredune (duna costera) se puede entender como una estructura producida por procesos biogeomorfológicos en los que interviene la dinámica sedimentaria eólica desde la zona intermareal (foreshore), y que resulta de la acumulación de sedimento por acción del viento sobre la vegetación en la parte alta de las playas (backshore) (Davidson-Arnott et al., 2018). En los sistemas de dunas costeras, se ha demostrado que el desarrollo y la evolución de las foredunas (incluidas las nebkhas) y los campos de dunas dependen de diversos factores regionales o locales, como la velocidad y la dirección del viento (Rotnicka, 2011), la energía de las olas y el tipo de zona de oleaje-playa, la intensidad de las tormentas, la aparición de escarpes, y la dinámica costera a corto y largo plazo (estabilidad, progradación o retrogradación), el suministro de sedimento (Hesp, 2002) y los usos del suelo. Por otro lado, los patrones de precipitación y temperatura son responsables de las diferentes regiones florísticas en los sistemas de dunas de playa de todo el mundo (Brunbjerg et al., 2014). La vegetación costera, la morfología de las especies vegetales y su densidad en los sistemas de dunas de playa reflejan los factores de perturbación locales que influyen, forman o alteran las geoformas eólicas (Hesp, 2002).

En los últimos años se han abordado trabajos, especialmente en Canarias, Noroeste de África y en la Gran Bahía Autraliana (GAB), donde se han detectado que los tipos de foredune no sólo están relacionados con un gradiente climático y la latitud, sino también con variaciones en longitud, cobertura y diversidad vegetal, e índices de movilidad de las dunas. En este sentido, se ha observado que por debajo de 300 mm de precipitaciones anuales, predominan nebkhas, y que a medida que aumentan las precipitaciones (>300 mm) la foredune presenta una morfología continua (García-Romero et al., 2019; Hesp et al., 2021a,b). Asociada a esta investigación, actualmente se continúa analizando nuevos casos de estudio en diferentes regiones climáticas. Por esta razón, el principal objetivo de este trabajo es mostrar los resultados preliminares que ayudan a caracterizar la foredune en otro archipiélago de la Macaronesia como Cabo Verde (geomorfología y vegetación), especialmente en las islas de Sal y Boa Vista. También se mostrarán aquellas amenazas históricas y actuales que pueden haber dado lugar a cambios ambientales y, por lo tanto, han sido las causantes de que la foredune esta aún en un periodo de respuesta biogeomorfológica dando lugar al funcionamiento actual.

## 2. Área de estudio

Las islas de Sal y Boa Vista pertenecen a la República de Cabo Verde (Figura 1, izquierda). Es un archipiélago de origen volcánico con diez islas y cinco islotes en la región de la Macaronesia con una superficie de 4.033 km$^2$. Están situadas entre las latitudes 14°28'N y 17°12'N y las longitudes 22°40'W y 25°22'W, y a una distancia de 500 km de la costa de Senegal. Boa Vista (620 km$^2$) y Sal (216 km$^2$) presentan una topografía normalmente plana, interrumpida únicamente por conos volcánicos dispersos que no superan los 390 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en el caso de Boa Vista y 410 m.s.n.m en la isla de Sal (Delgado Neves et al., 2017). El litoral está formado en gran parte por playas detrás de las cuales se desarrollan numerosas geoformas sedimentarias eólicas. El clima se caracteriza por temperaturas suaves con promedios anuales entre 23ºC y 24,1ºC en la isla de Sal y entre 24ºC y 25,5ºC para Boa Vista (INECV, 2017) (Figura 1, derecha). Las precipitaciones se caracterizan por su escasez e irregularidad, siendo la temporada de lluvias entre agosto y febrero con totales anuales que generalmente no superan los 155 mm (INECV, 2017). En general, debido a la frecuencia y distribución de las temperaturas y precipitaciones, las islas muestran un clima desértico árido (*BWk*) de acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger (1928) (Delgado Neves et al., 2017). En cuanto a sus características socioeconómicas, estas dependen en parte de las condiciones climáticas, pues ha provocado que su economía se oriente hacia el sector servicios, especialmente el turístico. Sal y Boa Vista han ganado importancia en los últimos veinte años gracias al desarrollo del turismo de sol y playa (Eusébio et al., 2018) representando alrededor del 36,0% del total de turistas de Cabo Verde, después de los turistas de la isla de Sal (54,8%) (INECV, 2017).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

## 3. Metodología

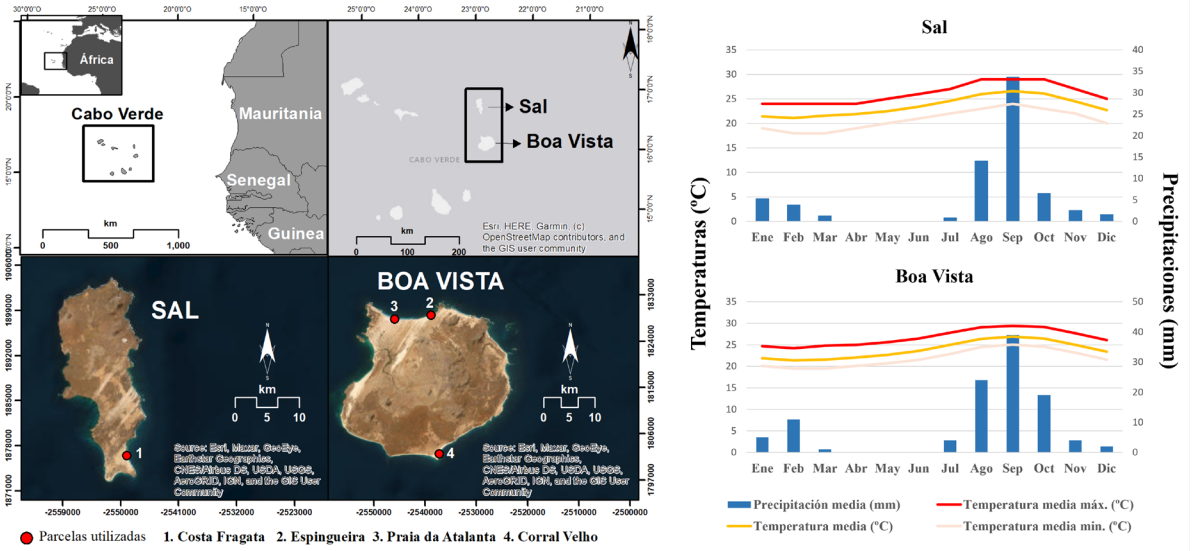



***Fig. 1.*** *Zona de estudio y distribución anual de las temperaturas y precipitaciones*

Se realizó una campaña de campo del 23 al 30 de junio de 2023 (tres días en la isla de Sal y 4 en la isla de Boa Vista). Durante ese tiempo se seleccionaron los sistemas sedimentarios eólicos de cada isla, especialmente aquellos que presentaban a priori un bajo grado de intervención humana. Finalmente, se instalaron cuatro parcelas (una en Sal y tres en Boa Vista) de 100 x 100 metros a partir de la primera línea de dunas formada en el backshore y hacia el interior (Figuras 1 y 2). En las parcelas se georreferenciaron mediante GPS todas las nebkhas existentes y se tomaron datos de diferentes variables relacionadas con la morfología (altura, eje menor y eje mayor); indicadores de la dinámica del viento (presencia de raíces exhumadas, presencia de ripples y presencia de dunas de sombra); datos de vegetación (presencia de plantas secas en el frente de dunas, riqueza de especies, cobertura total de la vegetación en la nebkha, cobertura por especies). Por último, a través de las misma campañas se identificaron los principales factores que controlan la dinámica natural. En este documento de investigación, sólo se mostrarán algunos resultados preliminares relacionados con la morfología de la foredune (altura) y las especies vegetales que presentan un papel estructurante en esta unidad geomorfológica.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Morfología

La altura de duna presenta rangos dispares para las cuatro parcelas estudiadas, sin embargo se detecta un patrón donde la altura de las dunas es mayor en el sector del frente de la foredune y disminuye hacia el interior, excepto en la parcela de Costa Fragata (1), con alturas reducidas en el frente de la foredune, aumentando hacia el centro de la parcela, y disminuyendo nuevamente hacia el interior (Figura 2, escalas relativas de color negro). En la parcela 1, las nebkhas presentan una altura que varía entre los 20 y los 190 cm, con un valor modal de 140 cm aproximadamente y con el 57% de las nebkhas superando el metro de altura. En la parcela 2 y 3, el rango de altura (30-180 cm) es bastante similar al de la parcela 1; mientras que, para la parcela 4 el rango es bastante inferior (30-90 cm). A diferencia de la parcela 1, las modas para el resto de parcelas es bastante inferior, siendo para la parcela 2 (60 cm), 3 (50 cm) y 4 (45 cm); por tanto, en ningún caso superan el metro de altura. En referencia al porcentaje de nebkhas que superaba el metro de altura es inferior al 25% en las parcelas 2 y 3, y un valor de 0% para la parcela 4. En relación con la distribución desde la línea de costa en la figura 2 se puede observar que en la mayoría de casos la altura de las dunas se reduce hacia el interior del sistema, comportamiento similar al encontrado en las islas Canarias (Marrero-Rodríguez et al., 2020); no obstante, en la parcela 1 las dunas presentan una tendencia algo estable hacia el interior con una tendencia al aumento de altura poco significativa.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

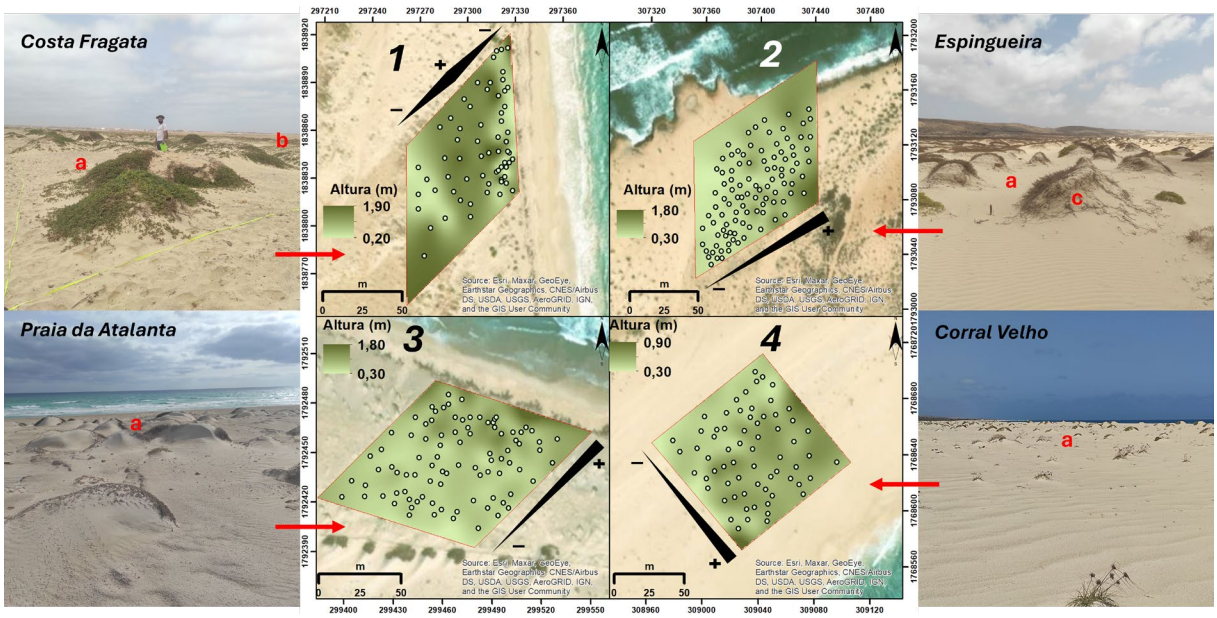



***Fig. 2*** *Distribución de la altura de nebkha que forman la foredune en Cabo Verde y fotos de campo de las parcelas. a. foredune formada por nebkhas, b. cordón formado por Sesuvium portulacastrum en Costa Fragata (isla de Sal), c. frentes de nebkhas con raíces exhumadas y vegetación seca en Spingueira (isla de Boa Vista) Fuente: Elaboración propia*

### 4.2. Vegetación

Se registraron un total de 13 especies: *Calotropis procera, Cistanche phelypaea, Cyperus crassipes, Frankenia pseudericifolia, Heliotropium ramosissimum, Launaea arborescens, Polycarpaea caboverdeana, Sesuvius portulacastrum, Suaeda caboverdeana, Tamarix senegalensis, Tetraena fontanesii y Tetraena waterlotii*. En la parcela de la isla de Sal (Costa Fragata), se identificaron tres especies, actuando *S. portulacastrum y T. fontanesii* en el desarrollo de las nebkhas, mientras que la presencia de *C. phelypaea*, al ser una planta parásita, está siempre asocida a una especie húesped. En la parcela 2, las especies dominantes fueron *T. fontanesii y T. waterlotii*, mientras que la presencia de *S. portucalastrum* era mucho más reducida. En la parcela 3, las principales especies son *S. caboverdeana, T. fontanesii y T. waterlotii*, siendo la presencia de *F. pseudericifolia* reducida a las depresiones interdunares donde también afloran paleosuelos. En la parcela 4, se detectaron nebkhas asociadas a *T. fontanesii* acompañada de *C. phelypaea* en el caso de las dunas de mayor tamaño, mientras que las de menor tamaño están asociadas a *C. crassipes*.

### 4.3. Factores influyendo en la dinámica natural

La foredune contribuye a la estabilidad de la costa y la biodiversidad (Hesp, 2002), sin embargo, a través del trabajo de campo y la bibliografía consultada, los sistemas playa-duna, así como la foredune de Cabo Verde, al igual que muchas otras áreas costeras en el mundo, enfrentan una serie de alteraciones, tanto actuales como históricas, que ponen en riesgo su integridad y funcionalidad ecológica. Por un lado, los impactos ambientales antropogénicos observados (sin descartar la contaminación, Cambio Climático, entre otros) son: i) desarrollo urbano-turístico en torno a los sistemas playa-duna (Figura 3, a): la construcción de hoteles, carreteras y otras infraestructuras marinas y terrestres contribuyen a la destrucción y alteración de las dinámicas sedimentarias eólicas y de otros procesos naturales en torno a la foredune (García-Romero et al., 2016); ii) extracción de arena (Figura 3, b): especialmente utilizado para las construcciones, su sobreexplotación produce degradación, así como reducción del sedimento disponible que provee a la foredune y a la playa frente a la erosión (Marrero-Rodríguez et al., 2020); iii) invasiones biológicas (Figura 3, c): la introducción de especies invasivas de plantas, como podría ser la *S. portulacastrum* o, probablemente *C. procera.* estarían dando lugar al desplazamiento de la vegetación nativa de las dunas aprovechando la degradación del espacio y alterando, por tanto, los procesos biogeomorfológicos naturales. En este sentido, este último factor podría explicar el cambio de patrón morfológico

 BY-NC-SA

que muestra la parcela 1 (Costa Fragata), donde mayor es la presencia de *S. portulacastrum*, creando un tapiz en torno a las nebkhas dando lugar a una topografía más llana y en forma de cordón (Figura 3, c); iv) los usuarios de las playas (Figura 3, d): debido a que Cabo Verde se oferta como un destino para el turismo de sol y playa, son muchos los turistas que utilizan las playas y, entre otros impactos ambientales, el pisoteo o la llegada a la playa con vehículos son habituales, especialmente sobre la foredune, produciendo efectos negativos sobre la vegetación y la estabilidad sedimentaria de esta. Otros factores pero de origen natural también podrían estar controlando la dinámica sedimentaria eólica como son: i) aumento en la frecuencia de tormentas ciclónicas marinas: este fenómeno, asociado al Cambio Climático, podría estar favoreciendo la erosión de la foredune; ii) el proceso de desove de las tortugas marinas (Figura 3, e): durante la anidación, las tortugas marinas pueden perturbar la vegetación y la morfología dunar al excavar sus nidos en torno a la foredune, produciendo la rotura en las ramas de la vegetación, compactación de la arena alrededor de los sitios de anidación, y afectando la estructura del suelo. No obstante, las tortugas marinas depositan huevos en la arena y pueden dejar excrementos ricos en nutrientes en la playa, influyendo en la actividad microbiana y en el crecimiento de plantas. Además, es probable que las tortugas formen parte de la dinámica natural de las dunas, siendo interesante esta temática para futuros trabajos, donde se examine en detalle la respuesta de la foredune a los procesos de llegada, anidación y desove de tortugas.

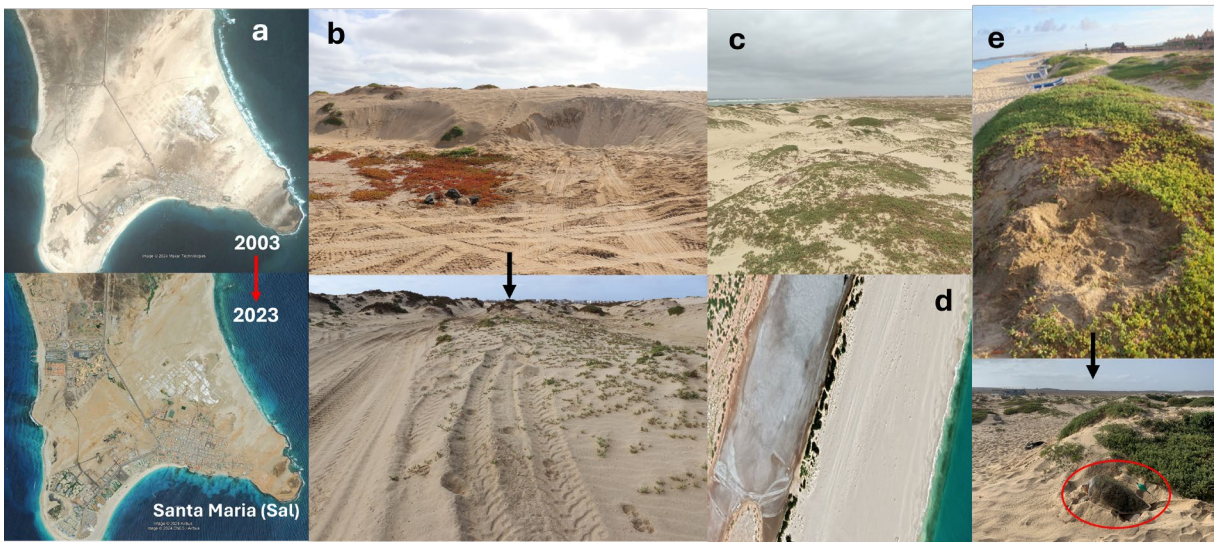



***Fig. 3*** *Amenazas y factores influyendo en la dinámica sedimentaria eólica. a. Desarrollo urbano-turístico sobre un sistema de dunas en Santa Maria (Sal); b. Extracción de arena en Costa Fragata (Sal); c. S. portulacastrum formando un cordón dunas detrás del frente de la foredune en Costa Fragata; d. Huellas de vehículos para acceder a la playa Corral Velho (Boa Vista); e. Tortuga desovando y el resultado del proceso. Fuente: Google Earth y elaboración propia*

## 5. Conclusiones

La presente investigación muestra los resultados preliminares de un estudio sobre la distribución de los tipos de foredune y sus variables biogeomorfológicas de acuerdo a patrones climáticos. Para ello se ha analizado el funcionamiento natural de la foredune de Cabo Verde, archipiélago de la región de la Macaronesia. En este sentido se ha caracterizado la foredune de los sistemas playa-duna en las islas de Sal y Boa Vista, concluyendo: i) la foredune está formada por biogeoformas tipo "nebkhas"; ii) las nebkhas muestran un patrón morfológico con mayor altura en el frente de la foredune y disminuyendo hacia el interior del sistema dunar; iii) el patrón anteriormente descrito se rompe en la parcela analizada en la isla de Sal (Costa Fragata), donde las nebkhas del frente son de menor altura que la topografía del centro de la parcela (ligeramente mayor pero con topografía llana) y finalmente la altura hacia el interior vuelve a ser de menor tamaño; iv) la vegetación estructurante es principalmente herbácea con especies xerófilas y halófilas como *S. portulacastrum, T. fontanesii, T. waterlotii y S.- caboverdeana*; v) *S. portulacastrum* tiene la mayor presencia en la parcela de la isla de Sal, observándose que debido a sus características, comienza a desarrollar en la foredune morfología llana y en cordón; vi) los factores que determinan la evolución de la foredune de origen antropogénico están asociadas al desarrollo urbano-turístico,

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

extracción de arena, invasión biológica y a los usuarios de las playas; vii) los factores detectados de origen natural que controlan el desarrollo de la foredune, están asociados a tormentas marinas y al proceso de desove de las tortugas marinas. Finalmente, es necesario continuar con al realización de trabajo de campo para la toma de datos y evaluar en detalle nuevos aspectos de la duna costera y los factores que están controlando su evolución y estado actual.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo es una contribución a los proyectos "VOLTURMAC (MAC2/4.6c/298)", confinanciado por el Programa de Cooperación INTERREG V-A España-Portugal MAC (Madeira-Azores-Canarias) 2014–2020, y al proyecto de I+D+i "PID2021-124888OB-I00", financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación y por "FEDER". L. García-Romero es contratado postdoctorales del programa Catalina Ruiz del Gobierno de Canarias y Fondo Social Europeo (APCR2022010005). N. Marrero-Rodríguez es contratado postdoctoral Margarita Salas financiado por el Ministerio de Universidades y la Unión Europea a través de fondos Next Generation (UNI/501/2021).

## 7. Referencias

Brunbjerg, A.K., Cavender-Bares, J., Eiserhardt. W.L., et al. (2014). Multi-scale phylogenetic structure in coastal dune plant communities across the globe. *Journal of Plant Ecology*, 7, 101–114.

Davidson-Arnott, R., Hesp, P.A., Ollerhead, J., Walker, I., Bauer, B., Delgado-Fernandez, I., & Smyth, T.A.G. (2018). Sediment budget controls on foredune height: a comparison of simulation model results and field data. *Earth Surface Processes and Landforms,* 43(9), 1798-1810.

Delgado Neves, D. J., de Paulo Rodrigues Silva, V., Rodrigues Almeida, R. S., de Assis Salviano de Sousa, F., & da Silva, B. B. (2017). Aspectos gerais do clima do arquipélago de Cabo Verde. *Ambiência*, 13(1), 59 – 73.

Eusébio, C., Vieira, A. L., & Lima, S. (2018). Place attachment, host–tourist interactions, and residents' attitudes towards tourism development: The case of Boa Vista Island in Cape Verde. *Journal of Sustainable Tourism*, 26(6), 890-909.

García-Romero L., Hernández-Cordero, A.I., Fernández-Cabrera, E., Peña-Alonso, C., Hernández-Calvento, L., & Pérez-Chacón E. (2016). Urban-touristic impacts on the aeolian sedimentary systems of the Canary Islands: conflict between development and conservation. *Island Studies Journal,* 11(1): 91-112.

García-Romero, L., Hesp, P. A., Peña-Alonso, C., da Silva, G. M., & Hernandez-Calvento, L. (2019). Climate as a control on foredune mode in Southern Australia. *Science of the Total Environment*, 694, 133768.

Hesp, P.A. (2002). Foredunes and blowout: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology,* 48, 245-268.

Hesp, P. A., Hernández-Calvento, L., Hernández-Cordero, A. I., Gallego-Fernández, J. B., García-Romero, L., da Silva, G. M., & Ruz, M. H. (2021a). Nebkha development and sediment supply. *Science of the Total Environment*, 773, 144815

Hesp, P. A., Hernández-Calvento, L., Gallego-Fernández, J. B., da Silva, G. M., Hernández-Cordero, A. I., Ruz, M. H., & García-Romero, L. G. (2021b). Nebkha or not?-Climate control on foredune mode. *Journal of Arid Environments*, 187, 104444

Marrero-Rodríguez, N., García-Romero, L., Peña-Alonso, C., & Hernández-Cordero, A. I. (2020). Biogeomorphological responses of nebkhas to historical long-term land uses in an arid coastal aeolian sedimentary system. *Geomorphology*, 368, 107348.

Rotnicka, J. (2011). Factors controlling the development of foredunes along the Łeba Barrier on the south Baltic coast of Poland. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 308-313.

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi : https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18586

# Particle size analysis of mixed sediments in oscillating flows with mobile beds

**Tiago Abreu [a], Caroline C. Ferreira [b], João Matos [c], Ana M. Bernabeu [d] and Paulo A. Silva [e]**

CESAM & ISEP, Polytechnic of Porto, , taa@isep.ipp.pt; [b] IDL & Oceanic Observatory of Madeira, Regional Agency for the Development of Research, Technology and Innovation (ARDITI), , caroline.ferreira@oom.arditi.pt; [c] ISEP, Polytechnic of Porto, , jem@isep.ipp.pt; [d] Mariña Research Center, University of Vigo, GEOMA , bernabeu@uvigo.gal; y [e] CESAM, University of Aveiro, , psiva@ua.pt.

How to cite: Abreu, T; Ferreira, C.C.; Matos, J.; Bernabeu, A.M. and Silva, P.A. 2024. Particle size analysis of mixed sediments in oscillating flows with mobile beds. In the book of minutes: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 september. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18586

## *Abstract*

*The dynamics of beaches encompass complex mechanisms in sediment transport, which are contingent on the heterogeneous nature of sands. Understanding these mechanisms is crucial for morphodynamic modeling. This study conducted a thorough analysis of the vertical granulometric distribution of sediments on the bed, relying on laboratory experiments carried out in a wave flume and employing a laser particle counter. The bed was covered with sand mixtures obtained from two well-sorted grain-size fractions: a fine sediment (F) with a median diameter of 0.21 mm and a coarse sediment (C) with a median diameter of 0.58 mm. As observed in the experiments analyzed in this study, the initially homogeneous bed composition undergoes changes, illustrating a trend toward coarsening in the majority of the layers.*

***Keywords:*** *heterometric sediments, wave flume, stratification, segregation*

## *Resumen*

*La dinámica de las playas abarca mecanismos intrincados en el transporte de sedimentos, los cuales dependen de la naturaleza heterogénea de las arenas. Comprender estos mecanismos es crucial para la modelización morfodinámica. Este estudio llevó a cabo un análisis exhaustivo de la distribución granulométrica vertical de los sedimentos en el lecho, basándose en experimentos de laboratorio realizados en un canal de oleaje y utilizando un contador láser de partículas. El lecho estaba cubierto con mezclas de arena obtenidas a partir de dos fracciones de tamaño de grano bien clasificadas: un sedimento fino (F) con un diámetro mediano de 0.21 mm y un sedimento grueso (G) con un diámetro mediano de 0.58 mm. Según se observó durante los experimentos de este estudio, los resultados indican que la composición inicialmente homogénea del lecho experimenta cambios, mostrando una tendencia hacia el engrosamiento en la mayoría de las capas.*

***Palabras clave:*** *sedimentos heterométricos, canal de oleaje, estratificación, segregación.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

Considerations about sediment size and distribution are crucial in many subjects, such as sediment transport calculations (Hassan and Ribberink, 2005) or projects involving the artificial replenishment of beaches with different dredged materials (e.g., Staudt et al., 2021). Specifically, the movement of sediments with varying sizes is influenced by hiding and exposure effects, leading to transport rates that may differ from those observed in uniformly sorted sediments (Hassan and Ribberink, 2005; Caliskan and Fuhrman, 2017). On the other hand, grain of different sizes are differently organized in the bed layer, modifying the bed shear stress.

To incorporate the processes of hiding/exposure into practical formulas for predicting uniform sand transport, modification factors have been proposed. Two well-known approaches for hiding/exposure modification factors, presented by Egiazaroff (1965) and Day (1980), consider multi-fractional interactions in different ways. The Egiazaroff (1965) modification factor aims to adjust uniform sand equations by raising the threshold of critical shear stress for finer particles and reducing it for coarser sand. Consequently, coarser sands in a multi-fractional mixture are more easily entrained compared to a uniform condition (single fraction). In contrast to the Egiazaroff (1965) approach, the Day (1980) approach seeks to modify the effective shear stress applied to sediment fractions. Hassan et al. (2001) compared their experimental dataset with predicted transport rates using integrated Egiazaroff (1965) and Day (1980) approaches in practical formulas, suggesting that the Day (1980) approach is significantly more efficient. However, the validation and development of these formulas require the availability of experimental data focusing on graded sands under wave motion and how they are organized vertically in the bed. While some experiments have been conducted in oscillatory flow tunnels (OFTs) with graded sands, there are known limitations associated with them as they fall short in capturing the full spectrum of real surface wave characteristics near the bed layer, particularly the absence of progressive wave streaming (Kranenburg et al., 2013). Nevertheless, there is still a significant scarcity of experiments conducted in large wave flumes.

In this study, the vertical granulometric distribution of sediments on the bed, composed of distinct sand mixtures, is analyzed from an experiment conducted in a large wave flume. A Coulter laser counter is utilized, capable of counting and measuring sediment particles of various sizes, to perform an analysis of grain size on the bed. This methodology offers clear advantages compared to the sieving method.

## 2. Experiments

The experiments were conducted in the Großer Wellenkanal (GWK) wave channel in Hannover, which has dimensions of 300 meters in length, 5 meters in width, and 7 meters in depth (Ferreira et al., 2023). Four different sand mixtures, each with a thickness of 0.3 m were deployed in a specific horizontal test section with 30 meters in length and 5 m width.These mixtures were composed of two sand fractions with median diameters: a fine fraction (F) with $d_{50}$=0.21 mm and a coarse fraction (C) with $d_{50}$=0.58 mm. Fig. 1 shows the cumulative distribution of particle sizes for both fine and coarse fractions obtained from the Coulter, indicating that particle sizes range from 0.04 μm to 1.14 mm. The experimental setup included varying proportions of the two sediments: Sand A - 100%F, Sand B - 75%F+25%C, Sand C -50%F+50%C, and Sand D -25%F+75%C (see Table 1). Eight experiments were conducted for each sand mixture, considering two conditions of regular waves with the same wave period (T=7 s) but different wave heights (H=1.0 m and H=1.5 m).

For each wave condition, five sets of 200 regular waves were generated using a wave paddle. Bed samples were extracted after each run from the central section of the flume with the assistance of a custom-designed 5-meter-long PVC suction core (Bernabeu et al., 2009).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

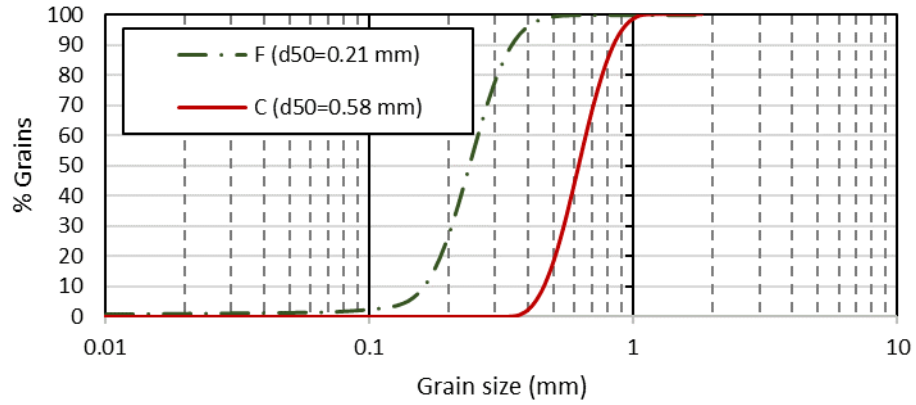



***Fig. 1*** *Cumulative distribution of particle sizes of the fine fraction (F) with $d_{50}$=0.21 mm and a coarse fraction (C) with $d_{50}$= 0.58 mm.*

***Table 1.*** *STENCIL experiments*

| Test | Fine % | Coarse % | Wave Condition | Wave Height, m | Wave Period, s |
|---|---|---|---|---|---|
| Sand A | 100 | 0 | WC1 | 1.5 | 7.0 |
| | | | WC2 | 1.0 | 7.0 |
| Sand B | 75 | 25 | WC1 | 1.5 | 7.0 |
| | | | WC2 | 1.0 | 7.0 |
| Sand C | 50 | 50 | WC1 | 1.5 | 7.0 |
| | | | WC2 | 1.0 | 7.0 |
| Sand D | 25 | 75 | WC1 | 1.5 | 7.0 |
| | | | WC2 | 1.0 | 7.0 |

## 3. Results

Figure 2 presents the results of the vertical granulometric analysis of a bed sample collected in the central region of the test section. This sample includes an initial surface layer of 1 cm and subsequent deeper layers of 2 cm. The findings pertain to the bimodal distribution 25%F+75%C after the propagation of 1000 regular waves with a height (H) of 1.0 m (Sand D – WC2). Remarkably, there is significant variability in weights between the fractions of fine and coarse sediments across different layers of the bed, deviating from the expected distribution of the initial mixture. Except for the surface layer, sediment coarsening was observed in all other layers.

Specifically, Fig. 2a illustrates that the layers [1,3] cm and [5,7] cm present higher maximum percentages of coarse sediments, reaching 14.3%, and maximum percentages of fine sediments of about 2%. The deepest layer [7,9] cm and the intermediate layer [3,5] cm also tend to contain higher maximum percentages of coarse sediments compared to the initial sediment distribution. The surface layer, [0,1] cm, exhibits a maximum percentage of 11.5% of coarse sediments, which is practically equal to the value at the beginning of the experiments. In comparison to this initial situation, this surface layer differs only in containing a higher maximum percentage of fine sediments, which reached around 4.1% at the end of several runs. It could be postulated that fine particles in suspension settled to the bed at the end of the experiment, explaining the higher percentage of fines in this surface layer.

Fig. 2b shows that the $d_{50}$ of the mixture is relatively constant for all layers, being nearly identical to the $d_{50}$ of the coarse sediment ($d_{50}$= 0.58 mm).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

The composition of the bed, which presents a higher proportion of coarser sediments, supports the armoring effect that can reduce the entrainment of the fine fraction. It can be postulated that this, along with the winnowing effect, contributes to bed coarsening.

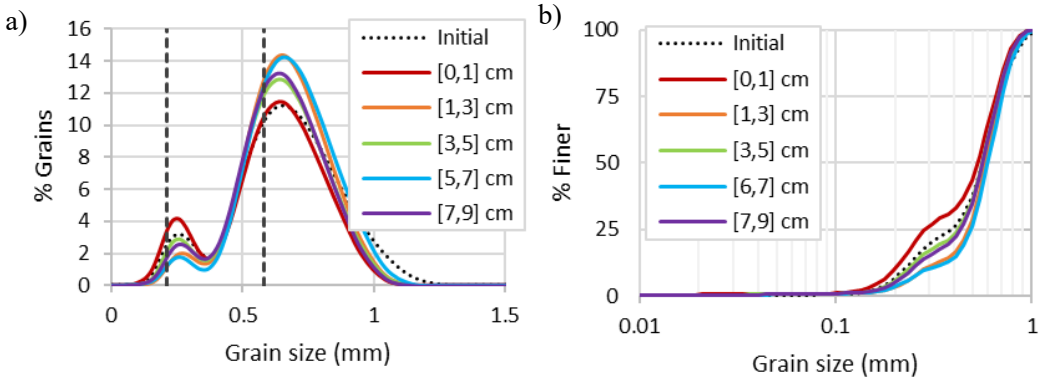



***Fig. 2*** *(a) Particle size distribution at the end of Test D (condition WC2) at different layers and (b) respective cumulative distribution of particle sizes.*

## 4. Conclusions

This study presents the outcomes of a grain-size analysis using a Coulter counter based on recent full-scale wave flume experiments conducted in the Large Wave Flume (Großer Wellenkanal, GWK) in Hannover. The use of a Coulter counter for bimodal distributions with particle sizes ranging from 0.04 µm to 1.14 mm enabled precise characterization of particle sizes in various sand mixtures.

The obtained results indicate that the initially well-mixed bed, subjected to wave action, undergoes vertical stratification and segregation of granular materials. In this experimental scenario, it is evident that, by the end of the runs, a coarsening is observed in the majority of the layers, as they tend to contain higher percentages of coarse sediments. Only the surface layer differs from the other layers because it contains a higher maximum percentage of fine sediments compared to the initial condition. The higher percentage of fines in this surface layer may be attributed to the fact that fine particles in suspension settled to the bed at the end of the experiment.

## 5. Acknowledgements

The authors thank FCT/MCTES for the financial support to CESAM (UIDP/50017/2020+UIDB/50017/2020+ LA/P/0094/2020), through national funds. The flume experiments were funded through the project STENCIL - Strategies and Tools for Environment-friendly Shore Nourishment as Climate Change Impact Low-Regret Measures (German Federal Ministry of Education and Research/BMBF, contract no. 03F0761). Thanks are due to all the participants in the experiments and Franziska Staudt and Stefan Schimmels for all the support.

## 6. References

Bernabeu, A. M., Rey, D., Rubio, B., Vilas, F., Domínguez, C., Bayona, J. M., & Albaigés, J. (2009). Assessment of cleanup needs of oiled sandy beaches: Lessons from the Prestige oil spill. *Environmental science & technology*, 43(7), 2470-2475.

Caliskan, U., & Fuhrman, D. R. (2017). RANS-based simulation of wave-induced sheet-flow transport of graded sediments. *Coastal Engineering*, 121, 90-102.

Day, T. J. (1980). A study of the transport of graded sediments. *Hydraulics Research Sta tion, Report IT 190, Wallingford*.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Egiazaroff, I. V. (1965). Calculation of nonuniform sediment concentrations. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), 225-247.

Ferreira, C. C., Silva, P. A., Bernabeu, A. M., & Abreu, T. (2023). Transport of heterometric sediments in wave-dominated flows–Tracer experiments. *Marine Geology*, 459, 107042.

Hassan, W. N., & Ribberink, J. S. (2005). Transport processes of uniform and mixed sands in oscillatory sheet flow. *Coastal Engineering*, 52(9), 745-770.

Kranenburg, W. M., Ribberink, J. S., Schretlen, J. J., & Uittenbogaard, R. E. (2013). Sand transport beneath waves: The role of progressive wave streaming and other free surface effects. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(1), 122-139.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18662

# Material particulado en las marismas de la Bahía de Cádiz: Tasas de acumulación y composición orgánica

*Particulated matter in the saltmarshes of Cádiz Bay: Acumulation rates and nature of the matter*

**Javier Benavente[a,b], María Galindo[c], Gloria Peralta[a,c], Juan José Vergara[a,c], Alba Yamuza[a,c]**

[a]Instituto Universitario de Investigación Marina – Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz; [b] Dpto. Ciencias de la Tierra, javier.benavente@uca.es; [c]Dpto. Biología, maria.galindo@alum.uca.es, gloria.peralta@uca.es, juanjo.vergara@uca.es, alba.yamuza@uca.es.

How to cite: Benavente, J.; Galindo, M.; Peralta, G.; Vergara, J.J.; y Yamuza, A. 2024. Material particulado en las marismas de la Bahía de Cádiz: Tasas de acumulación y composición orgánica. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18662

***Abstract***

*Saltmarshes provide important ecosystem services such as coastal flood protection and blue carbon burial. A key processes for the survival of these systems to sea level rise is the capture of allochthonous particulate matter (PM), few works quantify this process. This work quantifies and characterizes seasonality and nature of deposited PM in the saltmarshes of Cádiz Bay. The results suggest that PM deposition rate in Cadiz Bay marshes is highly related to elevation and season. The deposition rate decreases with increasing elevation and the values are higher in spring than in winter. The organic matter content (%OM) of the deposited PM shows the opposite pattern with an increase in %OM with elevation and higher values in winter than in spring. These results provide the first clues about the importance of allochthonous material for the burial of blue C in the saltmarshes of Cádiz Bay.*

***Keywords:*** *POM, saltmarsh, Cadiz Bay, sedimentation, blue carbon*

## *Resumen*

*Las marismas proporcionan importantes servicios ecosistémicos, como la protección contra inundaciones costeras y el entierro de carbono azul. Un proceso clave para la supervivencia de estos sistemas ante el aumento del nivel del mar es la captura de material particulado (MP), pero pocos trabajos han cuantificado previamente este proceso. Este trabajo cuantifica y caracteriza la estacionalidad y naturaleza del MP depositado en las marismas de la Bahía de Cádiz. Los resultados sugieren que la tasa de deposición de PM en las marismas de la Bahía de Cádiz está muy relacionada con la elevación y la estación del año. La tasa de deposición disminuye con el aumento de la elevación y los valores son más altos en primavera que en invierno. El contenido de materia orgánica (%MO) del MP depositado muestra el patrón opuesto, con un aumento del %MO con la elevación y valores más altos en invierno que en primavera. Estos resultados aportan las primeras pruebas sobre la posible importancia del material particulado alóctono en el entierro de C azul en las marismas de la Bahía de Cádiz*

***Palabras clave:*** *MOP, marismas, Bahía de Cadiz, sedimentación, carbono azul*

## 1. Introducción

Las marismas mareales proporcionan servicios ecosistémicos muy importantes, entre los que destacan los servicios de protección frente al riesgo de inundación costera y el enterramiento de carbono azul (Barbier et al. 2011). Lamentablemente, el futuro de estos importantes ecosistemas costeros vegetados está fuertemente amenazado por gran parte de los escenarios previstos de aumento de nivel del mar (Wu et al. 2017). Uno de los procesos clave para la superviviencia de estos sistemas a dichos escenarios, y para el mantenimiento de sus servicios ecosistémicos, es la captura de material particulado y la naturaleza del mismo (Temmerman et al. 2004, Kelleway

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

et al. 2016). La captura de material particulado permite la adaptación de la elevación del sistema al incremento del nivel medio del mar (Friess et al. 2012), y la naturaleza de dicho material (orgánica vs inorgánica) puede incrementar la capacidad del sistema para enterrar de carbono azul (Komada et al. 2022).

Lamentablemente, son pocos los trabajos que cuantifican las tasas de deposición de sedimentos en sistemas costeros vegetados y menos aún los que analizan la naturaleza de dicho material. Es por eso que el objetivo de este trabajo es cuantificar y caracterizar el material particulado que se deposita en los diferentes horizontes de la marisma mareal de la Bahía de Cádiz y evaluar si estos procesos muestran algún patron estacional.

## 2. Área de estudio

El presente trabajo se desarrolla en la Bahía de Cádiz ubicada en la costa suroeste de la Península Ibérica, y abierta al Océano Atlántico en su margen noroccidental (Fig. 1.A). Esta zona está sometida a un clima mediterráneo, alcanzando temperaturas máximas en verano y una media anual de 17ºC. La Bahía de Cádiz está sometida a vientos persistentes, principalmente de levante y de poniente. Las precipitaciones tienen un marcado régimen estacional (moderadas en invierno, muy escasas en verano) y una media anual de 700 mm/año (Junta de Andalucía, 2015).

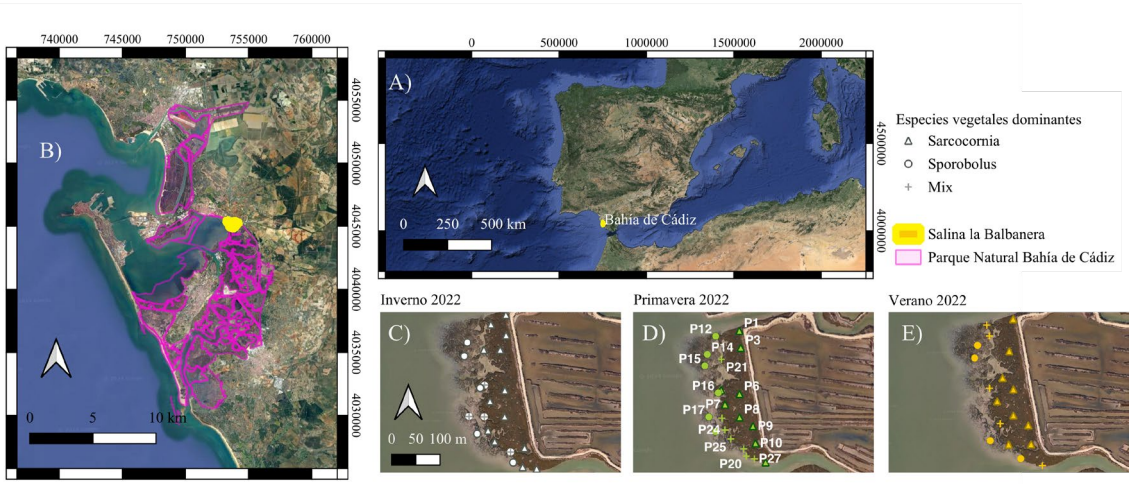



***Fig. 1**. Localización de la Bahía de Cádiz en la Península Ibérica (A) y de la zona de trabajo dentro de la bahía (Salina de la Balbanera, B). Localización de los puntos de muestreo en las estaciones de invierno, primavera y verano de 2022 (C, D y E respectivamente). En primavera se especifica el nombre de los puntos de muestreo. El camino de color albero en las figuras C-D corresponde a la vuelta de fuera de la Salina de Balbanera.*

La Bahía de Cádiz está formada por dos cuerpos de agua (Fig. 1.B) comunicados entre sí por el estrecho de Puntales. El régimen mareal es mesomareal semidiurno con un rango máximo de 3.5 m (Álvarez et al., 1999). El cuerpo de agua externo (saco externo) presenta una profundidad media de 12 metros, mientras que el interno (saco interno) presenta una profundidad media de 2 metros respecto del cero hidrográfico (Jiménez-Arias et al., 2020). El saco interno tiene una extensión de 3399 ha, donde un 70% es zona intermareal con una presencia mayoritaria de arcillas y limos (Martín et al., 2003). La marea puede renovar hasta un 75 % de la columna de agua durante el ciclo mareal. Esta zona está protegida del oleaje oceánico por el tómbolo de la ciudad de Cádiz, aunque si esta afectada por el oleaje generado por fuertes vientos locales y por el intenso viento de levante (Álvarez et al., 1999).

La zona intermareal se caracteriza por la presencia de marismas y praderas de fanerógamas marinas (de los Santos et al., 2023) asentadas sobre sedimentos fangosos povenientes fundamentlmente del río Guadalete (Caporizzo et al., 2021) . De mayor a menor elevación, la zonación vegetal incluye por encima del nivel medio del mar (NMM) una banda dominada por *Sarcocornia* spp. en la marisma media y otra banda dominada por *Sporobolus maritimus* en la marisma baja. Por debajo del nivel medio del mar (NMM) dominan las praderas de fanerógamas marinas incluyendo una franja de *Zostera noltei* en las elevaciones más cercanas al NMM y posteriormente de *Cymodocea nodosa* (puntualmente también se observan manchas de *Zostera marina;* Brun et al., 2015). Por último, en la elevaciones más bajas de la zona submareal es muy abundante la presencia de la macroalga enraizante *Caulerpa prolifera* (Peralta et al., 2021; de los Santos et al., 2023).

 BY-NC-SA

La Bahía de Cádiz está rodeada por 5 núcleos urbanos (Fig. 1.B), que juntos forman la cuarta aglomeración urbana más importante de Andalucía, (Junta de Andalucía, 2015). Este alto grado de antropización se considera responsable de numerosos impactos, entre los que destacan la desecación de marismas para usos industriales y agrícolas (López-Herrera et al., 2020). Entre estos impactos, destaca especialmente la modificación del ciclo de agua para usos salineros y acuícolas. Esta última práctica tiene raíces ancestrales, y a día de hoy más del 80% de la superficie de las marismas mareales ha sido transformada en salinas (Gracia et al., 2017). A pesar de estos impactos, la mayoría de las zonas intermareales de la Bahía de Cádiz se consideran en buen estado, estando protegidas como Parque Natural (Ley 2/1989/CA) (de los Santos et al., 2023), zona RAMSAR (1265, 24/10/02) y Lugar de Importancia Comunitaria (LIC ES0000140) dentro de la Red Natura 2000.

Para desarrollar este estudio, se seleccionó como zona de trabajo la marisma natural situada frente a la salina de la Balbanera (Fig. 1.C-D). Esta zona está ubicada en la región noroeste del saco interno y presenta un excelente desarrollo de la vegetación de marisma y un fácil acceso.

## 3. Material y métodos

Los datos meteorológicos diarios se han descargado de la plataforma de open data de la AEMET (Cádiz, estación 5973). Las tasas de deposión de material particulado y la naturaleza de dicho material se estimó con el uso de trampas de sedimentación. Las trampas están construidas por fragmentos de tubo de PVC (9 cm de diámetro y 12 cm de altura) que en su interior albergan 12 tubos más pequeños (1 cm diámetro x 10 cm de altura) que evitan la resuspensión del material depositado.

El diseño experimental incluyó 20 trampas repartidas homogéneamente por la superficie de la marisma vegetada asegurando una separación mínima de 20 m entre trampas (Fig. 1. C-E). La ubicación precisa se tomó mediante un GPS diferencial (RTK-DGPS Leica 900). Entre invierno y verano de 2022, cada trampa fue instalada al comienzo de la estación y recogida al final de la misma. El material particulado se extrae de las trampas mediante lavado con agua a presión. La solución de agua y material particulado resultante se deja sedimentar durante 4 días, tras lo cual, se elimina gran parte del agua sobrenadante y se seca el material depositado en la estufa a 60ºC hasta alcanzar un peso estable. La tasa de deposición del material particulado se estima según la ecuación 1.

$$TD = \frac{PS}{\pi r^2 * \Delta t} \qquad (1)$$

Donde *TD* (gPS $m^{-2}$ $d^{-1}$) es la tasa de deposición en; *PS (g)* el peso seco del material particulado recogido en la trampa, r (m): el radio de la trampa de sedimento y $\Delta t$ *(d):* el tiempo transcurrido entre la ubicación y la recogida de las trampas.

Una vez seco, el contenido en materia orgánica (MO, %PS) del material particulado de las trampas se estimó mediante el método de *lost-on-ignition* (LOI) con muestras de aproximadamente 0.5 g de PS mediante una combustión a 450º durante 4h (Heiri et al. 2001).

Para extrapolar los resultados a las tasas anuales de deposición de c-orgánico alóctono, se consideraron la proporciones MO / c-orgánico publicadas para sedimentos de la Bahía de Cádiz. *Sporobolus*: CO (% PS) = 0.461*MO - 0.266 (de los Santos et al. 2023) y *Sarcocornia*: CO = 0.553*MO - 1.624 (estación TOR.M, Díaz-Almela et al. 2019).

Los resultados se ajustaron a modelos lineales, utilizando como predictores elevación y estacionalidad. Las asunciones del modelo se comprobaron gráficamente sobre los residuos de los mismos.

## 4. Resultados

En el interior de la Bahía de Cádiz, el oleaje generado por el viento local es el principal agente en generar la resuspensión, por lo tanto, es esperable que los periodos de vientos intensos se correspondan con momentos de gran resuspensión del material particulado. Durante el año de este estudio (2022), el viento en condiciones de estabilidad atmosférica osciló entre 10 – 20 km $h^{-1}$, mientras que en momento de temporal soplaron vientos entre 25 – 50 km $h^{-1}$ con una clara componente de levante (Fig. 2). La incidencia de temporales de levante fue mayor en invierno y primavera, si bien el evento más prolongado se produjo en verano.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

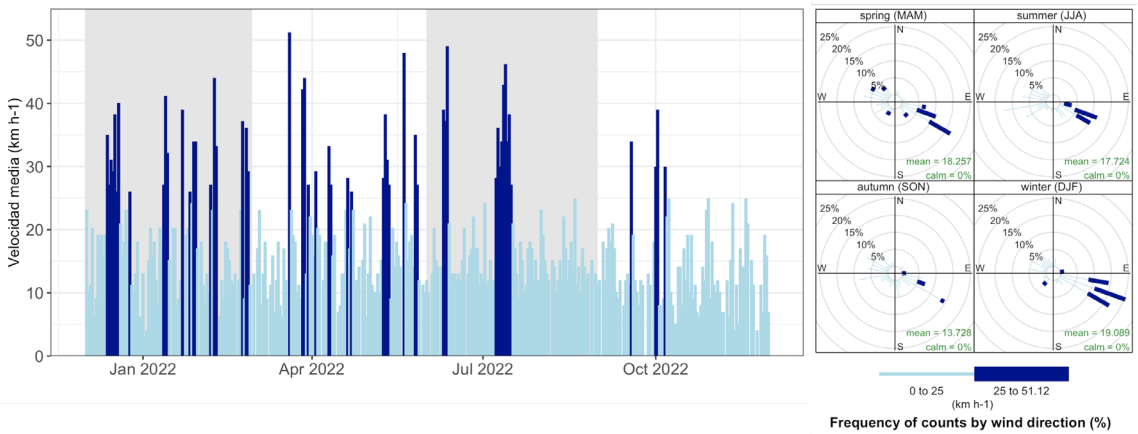



***Fig. 2.*** *Velocidad media del viento en la Bahía de Cádiz durante el periodo de estudio. Las barras oscuras corresponden a condiciones de velocidad media del viento superiores a 25 km h$^{-1}$. Las zonas sombreadas en gris representan las estaciones de invierno y verano de 2022. La figura de la derecha representa la dirección e intensidad del viento.*

Los resultados de las trampas de sedimentación (Fig. 3) sugieren que la tasa de deposición está significativamente afectada por la elevación y la estación del año (Fig. 3), con un claro descenso de la deposición de material particulado con el aumento de elevación y unas tasas significativamente mayores en primavera que en invierno (Tabla 1).

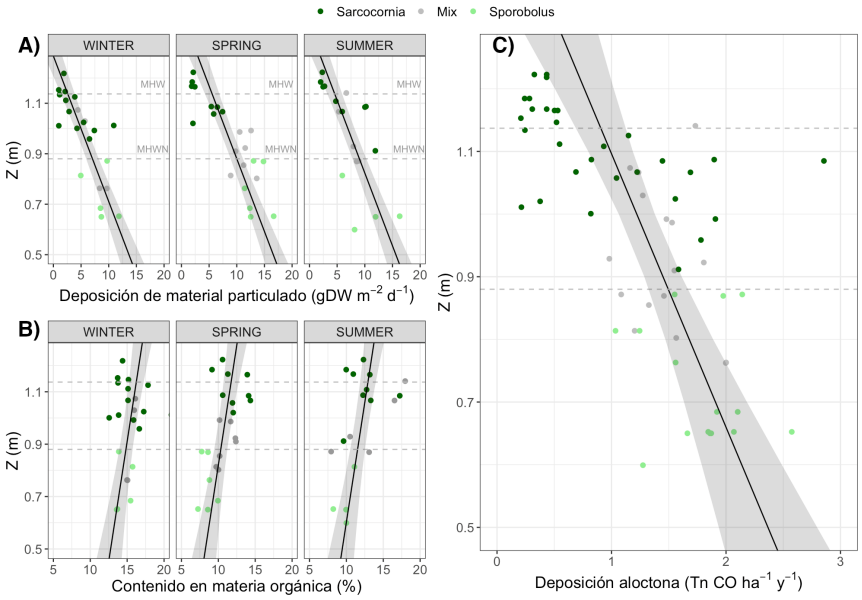



***Fig. 3****. Evolución temporal del material particulado depositado según la elevación en las marismas de la Balbanera (Bahía de Cádiz). A) Tasas de deposición de material particulado. B) Porcentaje de materia orgánica en el material particulado depositado. C) Estimaciones de deposición de carbono orgánico alóctono. Las elevaciones están referidas al nivel medio del mar local. Las líneas horizontales discontinuas representan la elevación del nivel medio de marea alta muerta (MHWN por sus siglas en inglés) y nivel medio de marea alta (MHW). Los datos corresponden al año 2022. La línea negra continua representa el modelo lineal con mejor ajuste (ver Tabla 1), las zonas sombreadas corresponden al 95% intervalo de confianza del correspondiente modelo.*

Por el contrario, el contenido en materia orgánica (%MO) mostró un patrón opuesto. Con un aumento del %MO con la elevación y un mayor %MO en invierno que en primavera y verano (Fig. 3, Tabla 1). Extrapolando estos resultados a los valores de carbono orgánico encontrados en la materia orgánica de los sedimentos vegetados de la Bahía de Cadiz, se estima que la marisma de la Bahía de Cádiz podría estar atrapando alrededor de 1.3 Tn c-org ha$^{-1}$ a$^{-1}$ (Fig. 3). Este valor no parece estar afectado por la estacionalidad (Tabla 1)., pero si por la elevación, observándose un descenso del CO alóctono atrapado con la elevación. Este patrón está muy vinculado a la tasa de

 BY-NC-SA

deposición de material particulado y sugiere que, a escala anual, la marisma baja atrapa más c-orgánico que la marisma media.

***Tabla 1***. *Analisis estadístico de los efectos de la elevación y la estacionalidad en la tasa de deposición de sedimento (TD, gPS $m^{-2}$ $d^{-1}$), el porcentaje de materia orgánica del material depositado (MO, %PS) y la estimación de carbono orgánico alóctono depositado (OC, Tn $ha^{-1}$ $a^{-1}$). Z: Elevación con respecto al NMML, INV, PRI y VER las correspondientes estaciones del año. F: estadístico F, ADJ. $R^2$: $r^2$ ajustado al número de predictores, GL: grados de libertad para el numerador (n) y el denominador (d). El código alfabético junto a los coeficientes estacionales indica diferencias significativas en caso de no coindencia.*

| modelo | Z | INV | PRI | VER | ADJ. $R^2$ | F | GLn / GLd |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TD ~ Z + ESTACIÓN | -17.35*** | 22.33[a] | 25.27[b] | 24.28[ab] | 0.64 | 36.49*** | 3 / 58 |
| MO ~ Z + ESTACIÓN | 5.46*** | 10.03[b] | 5.52[a] | 6.71[a] | 0.54 | 24.81*** | 3 / 58 |
| OC ~ Z | -2.29*** | n.s. | | | 0.31 | 27.99*** | 1 / 60 |

*p-valor: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 'n.s.' no significativo*

## 5. Discusión

La deposición de material particulado es un proceso fundamental en dinámica de las marismas mareales, afectando por tanto a sus servicios de protección frente al riesgo costero y de enterramiento de C-azul (Amann et al. 2023). El presente trabajo muestra la variabilidad de las tasas de deposición de material particulado, y la naturaleza de mismo, en una de las marismas más meridionales de Europa como es la Bahía de Cádiz. La elevación se presenta como una variable clave para entender los patrones espaciales de deposición, mientras que la estación del año explica los patrones temporales. En sistemas como la Bahía de Cádiz, protegidos frente al oleaje oceánico, el oleaje generado localmente representa una variable clave en la resuspensión de sedimento (Achab y Manning, 2013). El viento resuspende el material depositado en las primeras capas del sedimento, más rico en materia orgánica que capas más profundas (de los Santos et al. 2023). Esto explica el patrón temporal observado tanto para la deposición de sedimento como para el contenido en MO, ambos claramente con valores mayores en invierno cuando se registra el mayor número de temporales de viento.

Sin duda alguna una variable determinante en los patrones espaciales de deposición de sedimento es la elevación que ocupa la zona en el recorrido de la marea (REF). Las marismas mareales ocupan la franja intermareal por encima del nivel medio del mar (MSL por sus siglas en inglés). En el caso de la Bahía de Cádiz, estas marismas están pobladas principalmente por *Sporobolus maritimus,* que domina las elevaciones más bajas (MSL-MHWN, marisma baja), y *Sarcocornia* spp que domina las elevaciones intermareales por encima del nivel medio de marea alta muerta (MHWN – MHW, marisma media) (García de Lomas et al., 2008). Con esta zonación, los predictores elevación y especie dominante son claramente colineales (no independientes) y por lo tanto, con datos campo no se puede discriminar la contribución de la vegetación dominante dentro del efecto descrito para la elevación, pero tampoco se puede descartar. En cualquier caso, el poco material particulado que alcanza las zonas más elevadas, claramente es un material más enriquecido en MO, aumentando la contribución relativa de la producción alóctona al servicio de enterramiento de C-azul de las franjas de *Sarcocornia*.

Utilizando los valores de materia orgánica y carbono orgánico publicados para los sedimentos de las marismas de la Bahía de Cádiz (de los Santos et al. 2023, Díaz-Almela et al. 2019) se puede estimar una primera aproximación de cual sería la contribución alóctona a los stocks de carbono azul del sistema, asumiendo que todo el material capturado en las trampas sea alóctono y permaneciera en el sistema. Los resultados muestran que los patrones de MP depositado y %MO se compensan lo suficiente como para amortiguar las diferencias estacionales, pero no para compensar las diferencias espaciales (i.e. elevación). El resultado es que se estima una contribución promedio de c-orgánico alóctono de 1.3 Tn $ha^{-1}$ $a^{-1}$ (Fig. 3), aunque los valores pueden oscilar entre 0.7 y 1.8 Tn $ha^{-1}$ $a^{-1}$ según la elevación. Estos valores son del mismo orden de magnitud que los publicados previamente como tasas de enterramiento de c-orgánico en las marismas de la Bahía de Cádiz (0.91 Tn c-org $ha^{-1}$ $a^{-1}$, de los Santos 2023; 0.5 – 2 Tn c-org $ha^{-1}$ $a^{-1}$, Díaz-Almela et al., 2019).

Nuestros resultados sugieren que gran parte del sedimento que se deposita en las zonas e marismas es sedimento removilizado durante los temporales de viento y no asociado a los aportes de los ríos tras los episódicos de precipitación, que en el año de seguimiento no fueron de importancia. Sin embargo, aún queda trabajo por hacer para entender cual es la contribución final del material alóctono a los stocks de c-orgánico en sistemas costeros

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

vegetados. El presente trabajo pone de manifiesto la necesidad de entender los procesos implicados en la fijación orgánica del carbono (producción autóctona), los procesos implicados en la desposición/erosión del material particulado y los procesos implicados en la degradación de la materia orgánica en los primeros centrímetros del sedimento para entender correctamente los procesos de captación y retención del carbono orgánico (carbono azul) en los sistemas costeros vegetados.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2021-123597OB-I00 (iBESBLUE), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "FEDER Una Manera de hacer Europa", así como del proyecto MODUL, finaciado por la Junta de Andalucía, PAIDI2021 PROYEXCEL_00995. 2022-2025

## 7. Referencias

Achab, M. & Manning, A.J. (2013) Composition and Transport Dynamics of Suspended Particulate Matter in the Bay of Cadiz and the Adjacent Continental Shelf (SW - Spain). En: Sediment Transport Processes and Their Modelling Applications. InTechOpen. DOI:https://doi.org/10.5772/51104

Amann B., Chaumillon E., Schmidt S., Olivier L., Jupin J., Perello M.C. & Walsh J.P. (2023) Multi-annual and multi-decadal evolution of sediment accretion in a saltmarsh of the French Atlantic coast: Implications for carbon sequestration. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 293, art. no. 108467. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108467

Barbier E.B., Hacker S.D., Kennedy C., Koch E.W., Stier A.C., Silliman B.R. (2011) The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81 (2), pp. 169 – 193. DOI: https://doi.org/10.1890/10-1510.1

Caporizzo, C., Gracia, F.J., Aucelli, P.P.C., Barbero, L., Martín-Puertas, C., Lagóstena, L., Ruiz, J.A., Alonso, C., Mattei, G., Galán-Ruffoni,I., López-Ramírez, J.A. & Higueras-Milena, A. (2021). Late-Holocene evolution of the Northern Bay of Cádiz from geomorphological, stratigraphic and archaeological data. *Quaternary International*, Volume 602, Pages 92-109. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.028

de los Santos, C.B., Egea, L.G., Martins, M. et al. (2023) Sedimentary organic carbon and nitrogen sequestration across a vertical gradient on a temperate wetland seascape including salt marshes, seagrass meadows and rhizophytic macroalgae beds. *Ecosystems,* 26, 826–842. DOI: https://doi.org/10.1007/s10021-022-00801-5

Díaz-Almela, E., Piñeiro-Juncal, N., Marco-Méndez, C., Giralt, S., Leiva-Dueñas, C., & Mateo-Mínguez, M. Á. (2019). *Carbon Stocks and Fluxes Associated To Andalusian Saltmarshes and estimates of impact in stocks and fluxes by diverse land-use changes,* DELIVERABLE C2. LIFE14CCM/ES/000957. Blanes.

Friess D.A., Krauss K.W., Horstman E.M., Balke T., Bouma T.J., Galli D. & Webb E.L. (2012) Are all intertidal wetlands naturally created equal? Bottlenecks, thresholds and knowledge gaps to mangrove and saltmarsh ecosystems. *Biological Reviews*, 87 (2), pp. 346 – 366. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00198.x

García de Lomas, J., García, C.M. & Alvarez, O. (2008) Identificación de Hábitat de interés comunitario y estimaciones preliminares de posibles efectos de su inundación. *Revista de la Sociedad Gaditana de Historia Natural* 5, 9-37. ISSN-e 2340-5759. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7335336

Heiri, O., Lotter, A.F. & Lemcke, G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology,* 25, 101–110. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1008119611481

Kelleway, J.J., Saintilan, N., Macreadie, P.I. & Ralph, P.J. (2016) Sedimentary Factors are Key Predictors of Carbon Storage in SE Australian Saltmarshes . *Ecosystems*, 19 (5), pp. 865 – 880. DOI: https://doi.org/10.1007/s10021-016-9972-3

 BY-NC-SA

Komada, T., Bravo, A., Brinkmann, M.T., Lu, K., Wong L. & Shields, G. (2022). "Slow" and "fast" in blue carbon: Differential turnover of allochthonous and autochthonous organic matter in minerogenic salt marsh sediments. *Limnology and Oceanography*, 67 (S2), pp. S133 - S147. DOI: https://doi.org/10.1002/lno.12090

Temmerman, S., Govers, G., Wartel, S. & Meire, P. (2004) Modelling estuarine variations in tidal marsh sedimentation: Response to changing sea level and suspended sediment concentrations. *Marine Geology*, 212 (1-4), pp. 1 – 19. DOI: https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.10.021

Wu ,W.-T., Zhou, Y.-X. & Tian, B. (2017) Coastal wetlands facing climate change and anthropogenic activities: A remote sensing analysis and modelling application. *Ocean and Coastal Management*, 138, pp. 1 – 10. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.005

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18707

# Estructura interna de la duna de Valdevaqueros, Cádiz

*Internal structure of the Valdevaqueros dune, Cádiz*

**Inmaculada Rodríguez-Santalla[a], David Gómez Ortiz[b], Lara González-Martin[c] y Juan José Muñoz-Pérez[d]**

[a]Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, , inmaculada.rodriguez@urjc.es, [b]Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, , david.gomez@urjc.es, [c]Departamento de Biología y Geología, Física y Química Inorgánica, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, l.gonzalezmarti@alumnos.urjc.es y [d]CASEM, Universidad de Cadiz, 11510, Puerto Real, , juanjose.munoz@uca.es.

How to cite: Rodríguez-Santalla, I.; Gómez-Ortiz, D.; González-Martin, L. y Muñoz-Pérez, J.J. 2024. Estructura interna de la duna de Valdevaqueros, Cádiz. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18707

## *Abstract*

*The dune of Valdevaqueros, located on the Atlantic coast of Cádiz, is considered one of the largest active dunes in Europe. Anthropogenic activities carried out in the second half of the 20th century caused unchecked growth, without an effective method for stabilization being found. Thus, the dune of Valdevaqueros has been the subject of numerous studies aimed at obtaining a good characterization of its behaviour and evolution over time, in order to carry out proper environmental management of it and its surroundings. This work presents an analysis of its internal structure based on ground-penetrating radar profiles, revealing a variety of sedimentary structures reflecting different intensities and directions of the wind, highlighting the role of topography in the development of these structures. These results expand the knowledge of transverse dunes and, especially, the dynamics of the dune of Valdevaqueros.*

***Keywords:*** *Ground penetrating radar, climbing dune, Valdequeros Dune*

## *Resumen*

*La duna de Valdevaqueros, ubicada en la costa atlántica de Cádiz, es considerada una de las dunas activas más grandes de Europa. Las actuaciones antrópicas llevadas a cabo en la segunda mitad del siglo XX provocaron un crecimiento desmedido sin que se haya encontrado un método eficaz para estabilizarla. Así, la duna de Valdevaqueros ha sido objeto de numerosos estudios con el fin de obtener una buena caracterización de su comportamiento y de su evolución a lo largo del tiempo, al objeto de realizar una correcta gestión medio ambiental de la misma y de su entorno. En este trabajo se presenta un análisis de su estructura interna a partir de perfiles de georradar revelando una variedad de estructuras sedimentarias que reflejan diferentes intensidades y direcciones del viento, destacando el papel de la topografía en el desarrollo de estas. Estos resultados amplían el conocimiento sobre las dunas rampantes y, especialmente, de la dinámica de la duna de Valdevaqueros.*

***Palabras clave:*** *Georradar, duna rampante, duna de Valdevaqueros*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Actualmente, los campos dunares enfrentan diversos problemas, los cuales tienen su origen en la presión humana, como la ocupación de las playas, y en prácticas tradicionales que afectan este entorno costero, como la extracción de áridos para la construcción y la invasión de vehículos en las playas. Sin embargo, esta presión ha motivado un cambio en la percepción de las dunas, reconociéndolas como una valiosa defensa natural contra la erosión costera (Hesp, 2002, Rodriguez-Santalla et al., 2008) de forma que el Estado, así como entidades autonómicas y locales, favorezcan su preservación, impidiendo la invasión de estos espacios. Siguiendo esta idea, resulta esencial profundizar en el conocimiento de los procesos y mecanismos que influyen en la formación y evolución de las dunas. La duna de Valdevaqueros es un ejemplo de duna modificada por la actuación antrópica, que ha propiciado un desequilibrio en el sistema, de forma que presenta un crecimiento desenfrenado que afecta a las poblaciones cercanas. Comprender la disposición interna de las dunas permite entender su historia, su estado actual y cómo las condiciones ambientales afectan su conservación. Las técnicas de georradar se destacan como herramientas eficaces, rápidas y poco invasivas para estudiar la disposición interna de los diferentes estratos y facies que componen las dunas (Bristow et al., 2000; Havholm et al., 2004; Girardi, 2005).

## 2. Área de estudio

La duna de Valdevaqueros, situada a 10 kilómetros al NO de Tarifa (Cádiz) (Fig. 1), está considerada como una de las dunas transgresivas más grandes de Europa: 700 m de largo, 600 de ancho y 50 m sobre el nivel del mar. La migración de la duna se realiza hacia el interior, desde el SE hacia el NO, desarrollando crestas orientadas perpendicularmente a la dirección del flujo de viento de levante, el predominante en la zona, que provoca una tasa media de migración de casi 18 m/año, siendo una de las dunas más activas de España (Navarro, 2011). Esta alta tasa de migración es debida a que el 70% de la velocidad del viento excede la velocidad umbral para los sedimentos, y ha llegado a alcanzar desplazamientos de hasta 1 metro por día debido al viento del este (Navarro et al., 2015, Martinez-Garcia et al., 2021, 2023). Esta dinámica convierte a la duna de Valdevaqueros en una de las principales dunas rampantes de la península. El sedimento que alcanza la cresta dunar de Valdevaqueros presenta buena selección y está formado por arenas medias de 0,3 mm, compuesto principalmente por cuarzo (Muñoz-Perez et al.; 2009). González-Martín y Rodríguez-Santalla (2021) estimaron un incremento del volumen de la duna del 50% entre 2008 y 2015 (2.848.296 m3 y 4.320.089 m3, respectivamente), siendo la cresta de la duna y la cara de sotavento las zonas donde se concentra la mayor parte del sedimento ganado. La morfología de la playa se adapta una bahía en Z (del Río et al., 2013), y presenta una pequeña laguna costera de carácter estacional generada por la desembocadura del río del Valle localizada al este de la playa. Tal y como ocurre en este tipo de playas, registra erosión en la zona de sombra, con un retroceso medio de 10,4 m con un pico máximo de 18,5; y acreción en la zona distal, al este de la desembocadura del río del Valle, con un valor medio 9,56 m con un máximo de 11,8 m (González-Martín y Rodríguez-Santalla, 2021).

Si bien las dunas costeras proporcionan una variedad de servicios ecosistémicos, la migración tan intensa de la duna de Valdevaqueros genera un problema al invadir la carretera autonómica A-2325 que da acceso al pueblo de Paloma Baja. Se han propuesto diferentes alternativas de actuación para mitigar esta situación (Fages et. al, 2007, Bello-Millán, et al., 2016), pero la duna mantiene su pulso alcanzando ya gran parte del pinar adyacente que se plantó a mediados del siglo pasado precisamente para frenar el avance de la duna. Estabilizar el movimiento de una duna de estas dimensiones resulta de extrema complejidad cuando se cumplen todos los condicionantes que favorecen su movilidad: disponibilidad de arena, superficie arenosa sobre la que incide el viento (fetch), relieve propicio y actuación frecuente de vientos fuertes y secos (Gómez-Pina, et al., 2002). Así, hasta el momento no se ha encontrado ningún método que pueda estabilizar la duna, debido a que los fuertes vientos de la zona y la gran carga sedimentaria transportada superan la capacidad de retención de la vegetación o barreras artificiales (Roman-Sierra et al. (2004).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

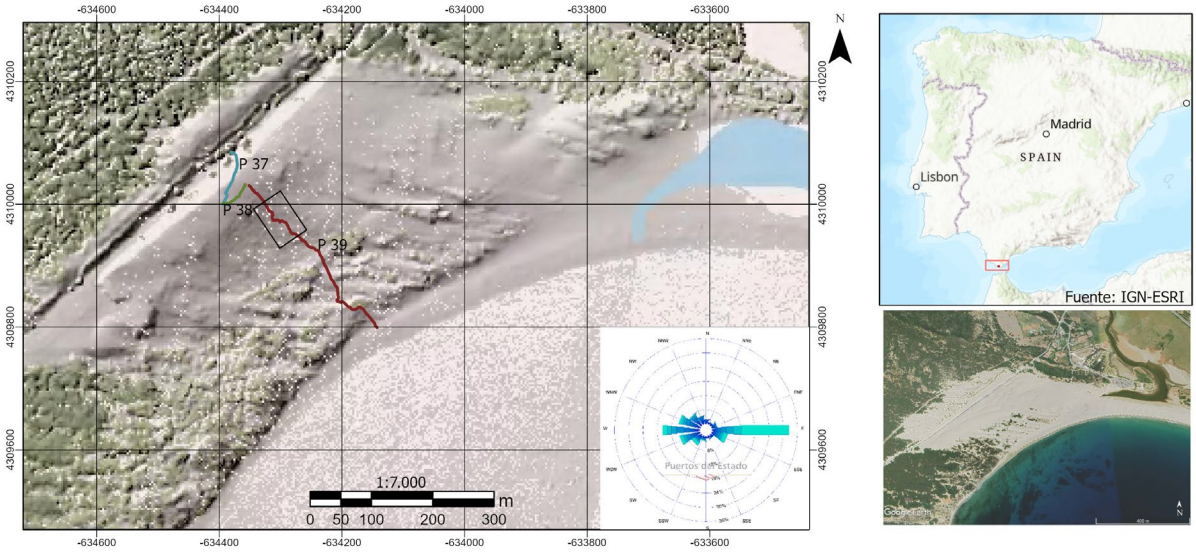



***Fig. 1.*** *Localización de la duna de Valdevaqueros con la posición de los perfiles de georradar y la rosa de los vientos global del periodo 2011 a 2018. (Fuente de datos: Modelo digital del IGN;Imagen de Google Earth;Rosa de los vientos de Puertos del Estado (Punto SIMAR 6048018)*

## 3. Material y métodos

De acuerdo con Martínez (2024) los ecosistemas dunares son íntimamente dependientes de la dinámica sedimentaria, del campo de vientos incidentes, y las propiedades del sedimento; por ello, no es posible conocer su evolución y desarrollo sin entender la estructura interna de la duna. Con este fin se analizaron 3 perfiles consecutivos de georradar realizados en 2011 (Fig. 1). Los perfiles se obtuvieron con un equipo RAMAC usando una antena apantallada de 250 Mhz de frecuencia central. El espaciado entre las trazas de los perfiles es de 2 cm y se utilizó una rueda marcadora calibrada para asegurar la equidistancia entre trazas. La topografía a lo largo del perfil se obtuvo mediante GPS diferencial y dichos datos se utilizaron para corregir la topografía durante el procesado de los datos. El procesado de los radargramas consistió en corrección del tiempo cero de cada traza, corrección de la saturación de la señal, utilización de un control automático de la ganancia (AGC), filtrado paso banda, corrección estática, corrección topográfica y migración de Kirchoff.

El perfil localizado más al norte (perfil 37) se desarrolla en la cara de sotavento, y finaliza en la carretera A-2325, con una longitud de algo más de 40 metros. El segundo perfil (perfil 38) se ha realizado siguiendo una trayectoria paralela a la cresta de la duna, y alcanza una longitud de 30 metros. El tercer perfil (perfil 39) es el más largo, abarca toda la pendiente de la cara de barlovento hasta la línea de costa, con un total de 198 metros y una trayectoria mayoritariamente transversal a la duna. En los casos en los que se ha podido identificar el nivel freático, se ha representado mediante una línea discontinua.

## 4. Resultados y discusión

En el radargrama del perfil 37 (Fig. 2), se observa entre los 20 y 30 m reflectores en onlap por migración de la duna hacia el norte. En las partes más próximas a la carretera, entre los 8 y 10 m, las truncaciones de los reflectores muestran removilización del sedimento por caída y también debido a las labores de retirada de arena para mantener la carretera.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

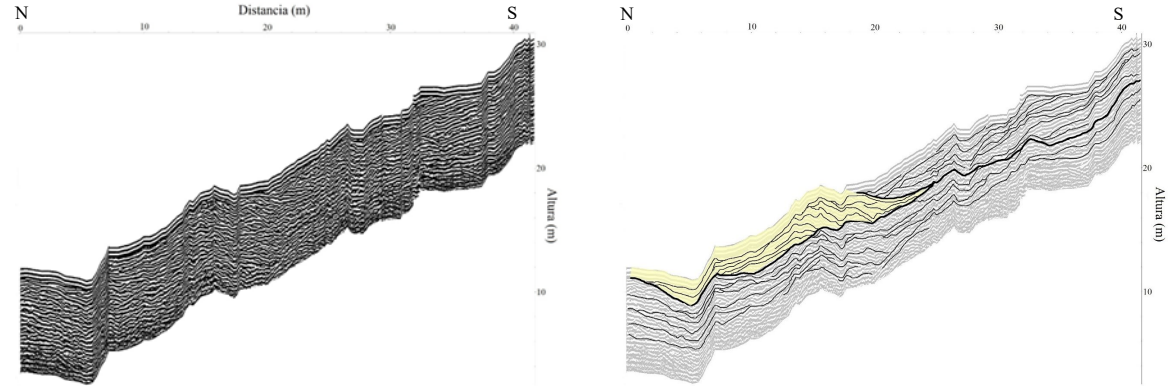



***Fig. 2.*** *Perfil 37 (cara de sotavento)*

El radargrama correspondiente al perfil 38 (Fig. 3), consiste en un corte longitudinal de la cresta, en dirección SO-NE. Las facies más bajas del tramo comprendido entre los 20 y 30 m presentan reflectores continuos y paralelos, asociados a la agradación vertical del foreset. Entre los 10 y 20 m se observan estratificaciones cruzadas estableciendo relaciones, onlap, downlap y toplap a consecuencia del empuje de los vientos de componente sur que movilizan el sedimento hacia la cresta de la duna, que en su parte más elevada muestra truncaciones debidas a cambios y reactivaciones del viento.

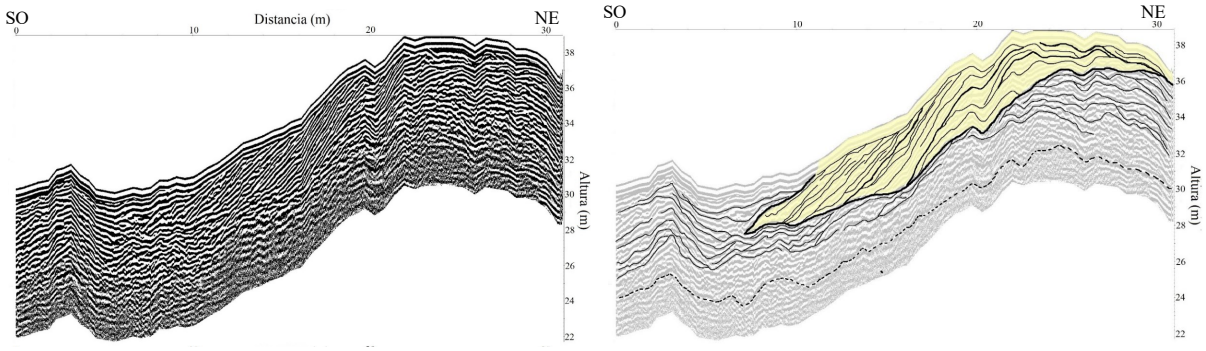



***Fig. 3***. *Perfil 38 (cresta de la duna)*

El perfil 39, corresponde a la cara de barlovento. Dado su gran longitud, se presenta uno de los tramos más significativos, ya que la zona localizada más al sur, colindante con la línea de orilla muestra clara acreción vertical, con un depósito prácticamente formado por reflectores paralelos y continuos lateralmente y de gran longitud asociados a depósitos de playa (Costas et al., 2006). En el tramo intermedio del perfil (Fig. 4) se observan reflectores que marcan estructuras en roll-over y estratificaciones cruzadas en artesa o surco, que muestran la migración del sedimento por la pendiente de barlovento hacia la cresta de la duna. En el tramo 60-90 m se distingue una unidad formada por reflectores continuos lateralmente en la base, y con estructuras hiperbólicas en su parte superior, que se asocian a protodunas y/o matorral costero.

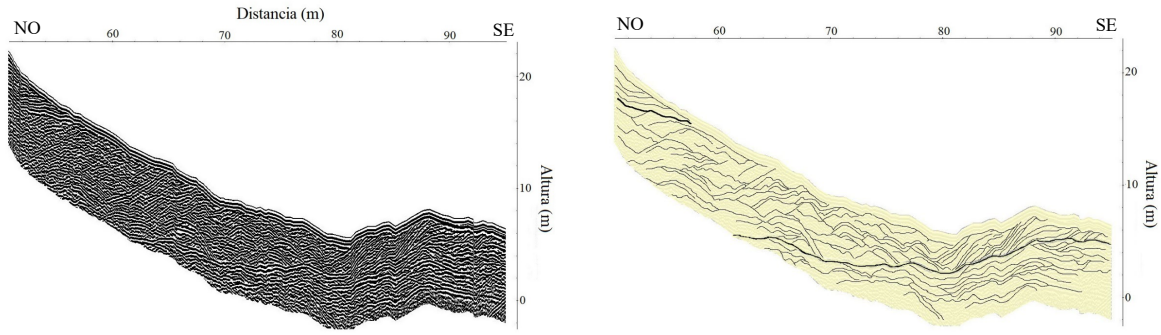



***Fig. 4.*** *Perfil 39 (tramo de la cara de barlovento. Su posiciñon está localizada en la Fig 1)*

 BY-NC-SA

Como se observa, la estructura interna de la duna de Valdevaqueros muestra cierta variedad de estructuras sedimentarias que se diferencian a lo largo del perfil debido a las diferentes intensidades y direcciones del viento, y especialmente por el marcado control topográfico que condiciona las dunas rampantes (Rodríguez-Santalla et al., 2008; Fernandez et al., 2016; Flor-Blanco et al., 2012). La cara de sotavento muestra reflectores que buzan en la dirección del viento, truncan grupos de estratificaciones cruzadas y crean superficies de superposición a medida que pasan la cresta de la duna y descienden por la cara de avalancha (Bristow, 2019; Rodríguez-Santalla et al., 2021). Esto también se comprueba en la cresta de la duna donde se produce la superposición de radarfacies, propio de dunas muy dinámicas (Bristow, 2019). En la parte central de la cara de barlovento, encontramos estratificaciones cruzadas por solapamiento de distintos pulsos del viento, estructuras cut and fill y roll-over descritas por Bristow et al. (2000), entre otros. En la zona de mayor pendiente los reflectores tienen forma de domo, inclinados a favor de la pendiente, similares a las descritos por Flor-Blanco et al., (2016) en el campo dunar de Xagó, en Asturias. La unidad localizada en la base del perfil 39 se relaciona con la duna original correspondiente a la morfología que tenía en la mitad del último siglo, tal y como se encuentra descrita en Navarro-Pons (2016).

## 5. Conclusiones

El estudio de la estructura interna de la duna de Valdevaqueros refleja la dinámica que presenta la duna, encontrándose en la base de los perfiles de georradar depósitos asociados a la duna original previa a la actuación humana de mediados del siglo XX. El análisis de estos radargramas también amplía la descripción de las estructuras sedimentarias propias de dunas rampantes, escasa en la literatura. Por último, supone un paso más en el conocimiento de la dinámica de la duna de Valdevaqueros.

## 6. Referencias

Bristow, C.S. (2019). Bounding Surfaces in a Barchan Dune: Annual Cycles of Deposition? Seasonality or Erosion by Superimposed Bedforms? *Remote Sensing*, *11*, 965. https://doi.org/10.3390/rs11080965

Bristow, C, Chroston, P.N, & Bailey, S.D. (2000): The structure and development of foredunes on a locally prograding coast: insights from ground penetrating radar surveys. *Sedimentology, 47*: 923-944. https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00330.x

Costas, S., Alejo, I., Rial, F., Lorenzo, H. & Nombela, M. A. (2006). Cyclical evolution of a modern transgressive sand barrier in northwestern Spain elucidated by GPR and aerial photos. *Journal of Sedimentary Research, 76.* https://doi.org/10.2110/jsr.2006.094

Del Río, L., Gracia, F.J. &- Benavente, J. (2013). Morphological and evolutionary classification of sandy beaches in Cadiz coast (SW Spain). *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65*, pp. 2113-2118. https://doi.org/10.2112/SI65-357.1

Fages. L.; Gómez-Pina, G.; Navarro, M.; Román-Sierra, J.; Giménez-Cuenca, M.; Ruiz, J.A., & Muñoz-Pérez, J.J. (2007). Coastal management activities in Valdevaqueros Dune Area (Tarifa, SW Spain). International Conference on Management and Restoration of Coastal Dunes (ICCD 2007) 2014, 168-171.

Fernández, G.B; Figueiredo, M.S; Rocha, T.B; Maluf, V.B; Martins, C. & Moulton, M.B.A. (2016). Foredunes Morphological Changes by Offshore Winds Revealed by Grund-Penetrating Radar: Massambaba Beach – Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Coastal Research, 75*, 278-282. https://doi.org/10.2112/SI75-56.1

Flor-Blanco, G.; Rubio, D.; Flor, G. & Fernández, J.P. (2012). Estructura interna e interpretación de la evolución del campo dunar eólico de Xagó (costa central de Asturias, NO de España). Conference 7º Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlântica, Lisboa, 2012, 71-76.

Flor-Blanco, G., Rubio-Melendi, D., Flor, G., Fernández-Álvarez, J. P. & Jackson D. W. T. (2016). Holocene evolution of the Xagó dune field (Asturias, NW Spain) reconstructed by means of morphological mapping and ground penetrating radar surveys. *Geo-Marine Letters 36*, 35–50. https://doi.org/10.1007/s00367-015-0427-1

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Girardi, J.D. (2005). A GPR and mapping study of the evolution of an active parabolic dune system, Napeague, NewYork. PhD Thesis. Department of Geosciences, Stony Brook University. Manhatttan.

Gómez-Pina, G.; Muñoz-Pérez, J.J; Ramírez, J.L. & Ley, C. (2002). Sand dune management problems and techniques, Spain. *Journal of Coastal Research, 36,* 325-332. https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.325

González-Martín, L. & Rodríguez-Santalla, I. (2021) Analysis of the dynamics of the Valdevaqueros dune. *Environmental Science Proceeding*.

Havholm, K.G., Ames, D.V., Whittecar, G.R., Wenell, B.A., Riggs, S.R., Jol, H.M., Beger, G.W. & Holmes, M.A. (2004) Stratigraphy of back-barrier coastal dunes, northern North Carolina and southern Virginia. *Journal of Coastal Research, 20,* 980–999. https://doi.org/10.2112/03503A2.1

Hesp, P.A. (2002) Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology, 48*:245–268. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8

Martínez, F.P. (2024). Transferencia espacial de datos de viento. Aplicación a la Duna de Valdevaqueros (Cádiz). Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz, 197 pp.

Martinez-García, F. P., Contreras-de-Villar, A. & Muñoz-Perez, J. J. (2021). Review of wind models at a local scale: advantages and disadvantages. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 318. https://doi.org/10.3390/jmse9030318

Martinez-Garcia, F. P., Muñoz-Perez, J. J., Contreras-de-Villar, A., Contreras, F. & Jigena-Antelo, B. (2023). A Methodology to Design a Wind Transfer Function: Application to the Valdevaqueros Dune (SW Spain). *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 923. https://doi.org/10.3390/jmse11050923

Muñoz-Pérez, J.J., Navarro, M.; Román-Sierra, J.; Tejedor, B.; Rodríguez-Santalla, I. & Gómez-Pina, G. (2009). Long-term evolution of a transgressive migration dune using reconstruction of the EOF method. *Geomorphology*, 112, 167-177. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.016

Navarro, M. (2011). Modelización de la evolución morfodinámica de la duna de Valdevaqueros (T.M. Tarifa) mediante la aplicación de funciones empíricas ortogonales a corto, medio y largo plazo. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, España, 2011.

Navarro, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J., Ruiz-Cañavante, A. & Gómez-Pina, G. (2015). Characterization of wind-blow sediment transport with height in a highly mobile dune (SW Spain). *Geologica Acta, 13(2),* 155-166. https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2015.13.2.6

Navarro-Pons, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J. & García, S. (2016). Evidence of coastal dune mobility increases over the last half century in response to historical human intervention. *Scientia Marina 80(2),* 1-12. https://doi.org/10.3989/scimar.04336.16A

Rodríguez-Santalla, I., Sánchez, M.J; Montoya, I., Gómez, D., Martín, T. & Serra, J. (2008). Internal structure of the aeolian sand dunes of El Fangar spit, Ebro Delta (Tarragona, Spain). *Geomorphology, 104*, 238-252. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.017

Rodríguez-Santalla, I., Gómez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., Sánchez, M.J., Montoya-Montes, I., Martín-Velázquez, S., Barrio, F., Serra, J., Ramírez-Cuesta, J.M. & Gracia, F.J. (2021). Study and Evolution of the Dune Field of La Banva Spit in Ebro Delta (Spain) Using LiDAR Data and GPR. *Remote Sensing, 13*, 17 pp.https:/doi.org/10.3390/rs13040802

Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Gomez-Pina, G., Fages-Antiñolo, L. & Muñoz-Pérez, J. J. (2004). Ecosistemas dunares en la provincia de Cádiz: Estabilizaciones en Bolonia y Valdevaqueros, TM Tarifa. *Revista de Obras Publicas*, n. 3450: 65-76.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18734

# Acumulación y permanencia de arribazones de *Posidonia oceanica* en las playas de Mallorca y Menorca: una década de datos de videomonitorización costera

*Accumulation and permanence of* Posidonia oceanica *seagrass wracks on the beachface of Mallorca and Menorca beaches: a decade of coastal video monitoring data*

**Lluís Gómez-Pujol[a], Gabriel Arbona[a], M. Teresa Guevara[a], Àngels Fernández-Mora[b] y Alejandro Orfila[c]**

[a] Grup de Recerca de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, , lgomez-pujol@uib.es; [b] Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares, SOCIB (MINECO-CAIB-CSIC), , afernandezmora@socib.es y [c] IMEDEA (CSIC-UIB), , aorfila@imedea.uib-csic.es

How to cite: Gómez-Pujol L.; Arbona, G.; Guevara, M.T.; Fernández-Mora, A. y Orfila, A. 2024. Acumulación y permanencia de arribazones de *Posidonia oceanica* en las playas de Mallorca y Menorca: una década de datos de videomonitorización costera. . En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18734

***Abstract***

*On the Mediterranean coasts, the sandy and rocky bottoms are colonized by bioherms of the endemic phanerogam Posidonia oceanica. As with other species of marine plants and algae, it plays an important role in the dynamics of beaches since it contributes to the accumulation of sediments, the attenuation of waves and currents or the stability of the beach. From the end of summer to mid-autumn, P. oceanica loses its leaves, which appear accumulated on the beach face, forming structures measuring a few centimeters to a few meters high that French-rooted literature has called "banquetes." In the present work, ten years of observations are presented regarding the accumulation and dynamics of P. oceanica wracks from the recording of two coastal video monitoring stations for the beaches of Cala Millor (NE Mallorca) and Son Bou ( S Menorca). The sea states that cause the emergence and accumulation of seagrass berms are identified, as well as their removal and time spent on the beach.*

***Keywords:*** *seagrass berms, P. oceanica, coastal videomonitoring, beach morphodynamics.*

***Resumen***

*En las costas mediterráneas, los fondos arenosos y rocosos están colonizados por biohermos de la fanerógama endémica Posidonia oceanica. Como ocurre con otras especies de plantas marinas y algas, ésta juega un papel importante en la dinámica de las playas puesto que contribuye a la acumulación de sedimentos, la atenuación del oleaje y las corrientes o a la propia estabilidad de la playa. Desde finales de verano hasta mediados del otoño, P. oceanica pierde sus hojas que aparecen acumuladas en la ribera formando estructuras de escasos centímetros a pocos metros de potencia que la bibliografía de raigambre francesa ha denominado "banquetes". En el presente trabajo, se presentan diez años de observaciones a propósito de la creación y dinámica de las bermas vegetales de P. oceanica a partir del registro de dos estaciones de videomonitorización costera para las playa de Cala Millor (NE Mallorca) i de Son Bou (S Menorca). Se identifican los estados de mar que provocan la salida y acumulación de bermas vegetales, así como su desmonte y tiempo de permanencia sobre la playa.*

***Palabras clave:*** *bermas vegetales, P. oceanica, videomonitorización costera, morfodinámica playas.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

El papel ecológico e hidrodinámico de las praderas de fanerógamas marinas y algas en los sistemas litorales no se restringe a las praderas propiamente dichas. En función del grado de exposición al oleaje y las corrientes, entre otros factores, los detritos procedentes de las praderas marinas forman acumulaciones que, en forma de parche o cordón, se disponen sobre el estrán de las playas y pueden intervenir activamente en la morfodinámica de las playas.

En las costas mediterráneas, los fondos arenosos y rocosos están colonizados por biohermos de la fanerógama endémica *Posidonia oceanica*. Como ocurre con otras especies de plantas marinas y algas, *P. oceanica* juega un papel importante en la dinámica de las playas puesto que contribuye a la acumulación de sedimentos, la atenuación del oleaje y las corrientes o la propia estabilidad de la playa (Gómez-Pujol et al., 2019). Desde finales de verano hasta mediados del otoño, *P. oceanica* pierde sus hojas que aparecen acumuladas en la ribera formando estructuras de escasos centímetros a pocos metros de potencia (Mateo et al., 2002) que la bibliografía de raigambre francesa ha denominado ”banquetes” (Bouderesque & Jeudy de Grissac, 1983) y que Vacchi et al. (2017) proponen designar como bermas vegetales *(seagrass berms*).

Existe un debate sobre el paradigma que afirma que las bermas desempeñan un papel importante en la protección de la costa durante las tormentas y en el control de la morfodinámica de la playa (Vacchi et al., 2017). Existen unos pocos estudios cualitativos con datos parciales que sostienen este punto (Servera et al., 2002; de Falco et al., 2008), mientras que estudios más recientes basados en la videomonitorización costera ponen de manifiesto, a partir de una base de datos observacionales y continuas, que el papel de las bermas vegetales en la protección de playas no es concluyente (Gómez-Pujol et al., 2013). Otros trabajos realizados en las Islas Baleares han demostrado que la retirada de las bermas vegetales y las técnicas de gestión asociadas provocan una mayor erosión de las playas (vid. Roig-Munar et al., 2006).

Desde el punto de vista de la gestión costera y los servicios ecológicos, las banquetas se encuentran a lo largo de la mayoría de las costas mediterráneas, y tienden a ser eliminadas para la explotación de su biomasa o con fines turísticos (De Falco et al., 2008; Roig et al., 2006), ya que se supone que los turistas consideran que las banquetas son antiestéticas y las vinculan con malos olores, mosquitos, etc. En algunos países de la cuenca mediterránea la retirada de arribazones de *P. oceanica* está prohibida (e.g. Francia “Arrêté du 19 juillet 1988 relatif à la liste des espèces végétales protégées”). En el Estado Español no hay una normativa al respecto, aunque en las Islas Baleares se ha regulado su retirada, estando permitida en las playas urbanas durante la temporada turística y en el caso de playas naturales con permisos específicos (BOIB 2018 nº93 Artículo 6).

El debate sobre la dinámica en la formación de bermas vegetales, su característica como hábitat de interés comunitario recogido por la Directiva Hábitat (1210 Vegetación efímera sobre desechos marinos acumulados), el papel que pueden ejercer como elementos de protección costera; así como la oportunidad que supone contar con series temporales de largo alcance de videomonitorización costera que ya superan más de diez años de observaciones (Fernández-Mora et al., 2023), abren la posibilidad de ahondar en los mecanismos de formación y desmantelamiento de esta formación-hábitat tan particular. Puesto que la ICTS SOCIB (MICINN-CAIB) dispone de una estación de videomonitorización costera en las playa de Son Bou (S Menorca) y Cala Millor (NE Mallorca), ambos dos con unos fondos intensamente colonizados por praderas de *P. oceanica*, los objetivos del presente trabajo son: (a) Caracterizar las condiciones hidrodinámicas de formación y desmantelamiento de los arribazones de *Posidonia oceanica*; (b) Evaluar el tiempo de permanencia/residencia de los arribazones sobre la playa subaerea y (c) Discriminar si existen diferencias estacionales e interanuales en la formación de depósitos de necromasa de *P. oceanica*.

## 2. Áreas de estudio

La playa de Son Bou (SNB) situada al sur de la isla de Menorca, en las Islas Baleares, es una playa semi expuesta cerrada por los salientes de *na Redona* y el *cap de ses Penyes*, cubriendo más de 2,4 kilómetros de longitud y 120 metros de anchura y con una orientación noroeste-sureste (Figura 1). La playa se caracteriza principalmente por

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

arenas blancas carbonatadas de grano fino a grueso de origen biogénico marino, con cantidades variables terrígenos y cuarzo, y por su exposición a un oleaje de baja energía (Hs = entre 0.5 y 1 m y Tp entre 2 y 4 s) . De acuerdo con los datos de oleaje, calibre y el perfil de playa, Son Bou se inscribiría en las playas intermedias con un leve sesgo de estados de mar de carácter disipativo y entre sus condicionantes fisiográficos destacaría el carácter de playa adosada a un cordón de restinga y los afloramientos rocosos que crean múltiples células litorales a lo largo de la línea de costa.

La playa de Cala Millor (CLM) está situada en la costa noreste de Mallorca (Fig. 1). Es una playa de arena carbonatada, de ~2 km de longitud, con una forma cóncava que queda cerrada por un paseo marítimo construido sobre un sistema de dunas del Holoceno y los restos de una zona húmeda Es una playa intermedia con una configuración de barras transversales y crescénticas que presenta gran variabilidad de la línea de costa. El fondo de la playa se caracteriza por el afloramiento de arrecifes de roca, y a profundidades de 6 a 35 m existen paleocanales y una densa pradera de *P. oceanica*. Los sedimentos de la playa consisten en arenas marinas bioclásticas de carbonato medio con un diámetro medio de aproximadamente 1,8 phi. Cala Millor está expuestaa condiciones de oleaje leve a moderado, con una altura de ola media significativa $H_s$ = 0,52 m y un período pico Tp = 6,1 s. El clima marino está fuertemente dominado por el ciclo estacional, con un oelaje más energético en invierno y otro más moderado, asociado a la brisa marina, en verano. Los máximos de carácter anual alcanzan los 4 m de altura.

En ambas playas el papel de las mareas es poco significacito, ya que el rango de marea diario es de ~0,2 m, aunque las componentes del oleaje inducidos por el viento o la presión atmosférica pueden aumentar el nivel del mar hasta 1 m. Sin embargo, existe una variación interanual del nivel del mar de hasta 0,5 m debido a las fluctuaciones interanuales de la temperatura del mar, las oscilaciones internas en la cuenca mediterránea y la interacción de las corrientes internas en el mar (Gómez-Pujol et al., 2020).

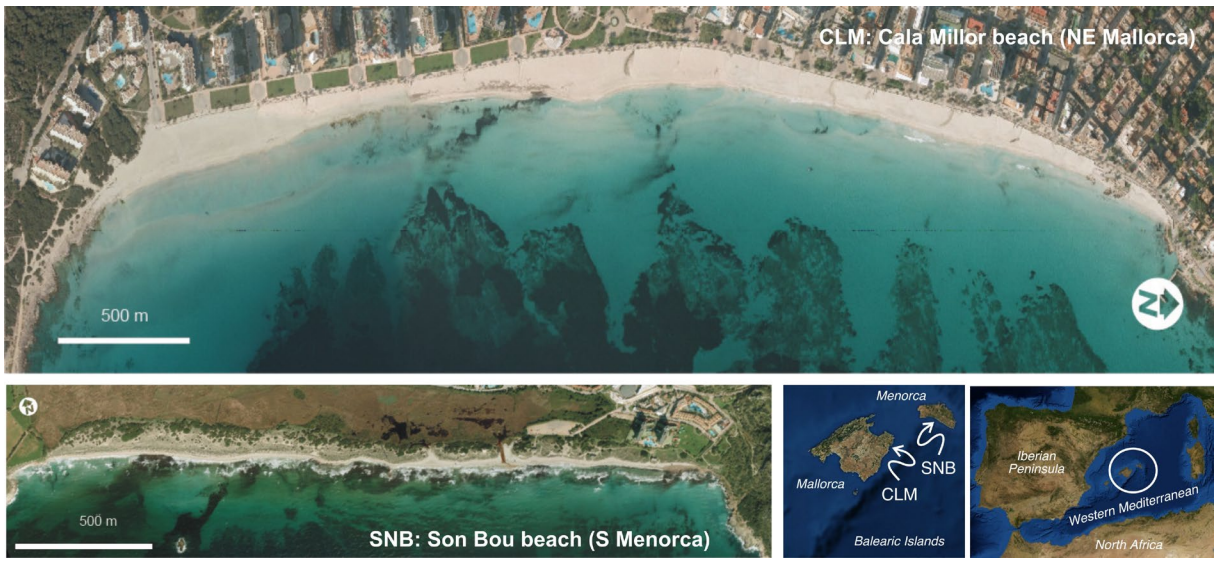



***Fig. 1.*** *Localización de las playas en las que se ha desarrollado el estudio.*

## 3. Método

Las imágenes costeras se obtuvieron de dos estaciones de videomonitorización SIRENA (Nieto et al., 2010) desplegadas, respectivamente, en la playa de Cala Millor y en la playa de Son Bou por el SOCIB (Fernández-Mora et al., 2023). Aunque SIRENA adquiere instantáneas, imágenes de varianza y time-stacks resultantes de promediar las 4.500 imágenes tomadas durante los diez primeros minutos de cada hora, este trabajo sólo se ocupa de las series de instantáneas obtenidas en la playa de Cala Millor de mayo de 2011 a julio de 2023 (4.422 días) y en la playa de Son Bou de octubre de 2011 a julio de 2023 (4.266 días). Durante el invierno, las imágenes se capturan de 06:00 a 16:00 UTC y durante el verano de 04:00 a 18:00 UTC. En ambas ubicaciones cinco cámaras cubren toda la playa

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

y todas las imágenes están disponibles en el repositorio institucional de acceso web del SOCIB http://apps.socib.es/beamon (Fernández-Mora et al., 2023). Aunque en Son Bou el sistema de videomonitorización del SOCIB cubre casi la totalidad de la playa, dada la existencia de zonas de sombra, sólo se utilizaran las cámaras 1, 2 y 3, que cubren el sector más oriental de la playa.

Para estudiar la presencia o ausencia de bermas vegetales de *P. oceanica* se ha creado una base de datos horaria que indica la presencia/ausencia de necromassa depositada en el estrán de playa a lo largo de la costa, la tendencia de acumulación o desmantelamiento en la dinámica de las acumulaciones y una estimación aproximada del volumen de las bermas vegetales acumuladas. Debido a que las acumulaciones de restos de *P. oceanica* sobre la playa se eliminan en las zonas turísticas, principalmente en verano, este estudio ha descartado de la base de datos aquellas imágenes con evidencias de trabajos de limpieza (e.g. rodaduras de tractores, apilamientos, etc.).

Los datos de oleaje asociados a los eventos de acumulación y desmonte de las bermas vegetales, se obtuvieron a partir de los perfiladores de oleajes (ADCP Nortek ® Awac) instalados por el SOCIB en cada una de las playas, a 17 de profundidad, que proporcionarion series temporales de altura significativa, dirección y período pico (Fernández-Mora et al., 2023).

## 4. Resultados y discusión

De los datos de videomonitorización se desprende que las bermas vegetales de *P. oceanica* aparecen en el 65% de los días monitorizados en CLM y un 25% en SNB, aunque con una marcada componente estacional. Siguiendo a Cañellas et al. (2010), la estación hibernal en términos de clima marino se extiende de octubre a marzo, mientras que la estival, lo hace de abril a septiembre. Así, las bermas vegetales de *P. oceanica* aparecen principalmente en invierno y es en este periodo cuando exhiben mayor continuidad a lo largo de las línea de costa. En CLM en invierno se registran el 57% de los días con acúmulos de necromassa y en verano el 43%, mientras que en SNB los días con presencia de bermas vegetales representa el 80% de los días de invierno y el 20% de los de verano (Tabla 1). Tanto en CLM como en SNB la presencia de bermas vegetales no sólo es más habitual en la estación hibernal que en la estival, sinó que en la primera predomina la acumulación en forma de bermas contínuas a lo largo de la línea de costa. Aunque el volumen de las bermas vegetales sólo puede estimarse de forma qualitativa a partir de las imágenes de videomonitorización, puede constatarse que las acumulaciones estivales suelen ser de menor entidad en verano, tanto si aparecen como retazos continuos de hojarasca a lo largo del frente de playa, como si lo hacen en forma de parches discontinuos de restos vegetales; mientras que los acúmulos registrados durante el invierno suelen implicar un mayor volumen y construcir acúmulos con potencias que en ocasiones pueden superar el metro de potencia (Fig. 2).

***Tabla 1.*** *Presencia (días) y tipología de bermas vegetales en el frente de playa. CLM, Cala Millor; SNB, Son Bou.*

| **CLM** | **Días de monitorización** | **Presencia de bermas (**días) | **Bermas contínuas** (días) | **Bermas a parches** (días) | **Ausencia de Bermas** (días) |
|---|---|---|---|---|---|
| Verano | 2235 | 1244 | 97 | 1157 | 991 |
| Invierno | 2187 | 1642 | 113 | 1529 | 545 |
| Total | 4422 | 2886 | 200 | 2686 | 1536 |

| **SNB** | **Días de monitorización** | **Presencia de bermas (**días) | **Bermas contínuas** (días) | **Bermas a parches** (días) | **Ausencia de Bermas** (días) |
|---|---|---|---|---|---|
| Verano | 1893 | 195 | 13 | 182 | 1698 |
| Invierno | 1990 | 771 | 63 | 708 | 1219 |
| Total | 3883 | 966 | 76 | 890 | 2917 |

 BY-NC-SA



***Fig. 2.*** *Las bermas vegetales depositades durante el periodo hibernal tienden a presentar acúmulos de mayors volumen y potencia (imágnes superiores -Cala Millor- e inferior izquierda -Son Bou-) que las estivales, que en caso de ser contínuas tienen escasa envergadura (imagen inferior derecha, Son Bou) .*

En cuanto a la permanencia de la bermas vegetales sobre el estrán de las playas entre el 51 y el 71% de los eventos registrados durante la última década, no permanecen sobre la playa más allá de 4 días, y un 33% tanto en CLM como en SNB apenas resisten en el frente de playa más allá de un día. Entre el 15 y el 20% de los eventos de acumulación llegan a la semana de residencia en la playa, mientras que sólo entre un 14 y un 28% lo hacen más de 8 días (Tabla 2). Como se puede apreciar en el caso de SNB éstos acontecen mayoritáriament en las estación hibernal, y aunque en CLM el reparto es más equitativo, las bermas vegetales de envergadura y cierto porte que resisten en el frente de playa sólo se dan en invierno, mientras que las de verano aunque con tiempos de residencia superiores a los ocho días se presentan con una morfología más de arribazón que de berma vegetal (Tabla 2).

***Tabla 2.*** *Permanencia de bermas vegetales en el frente de playa (%). CLM, Cala Millor; SNB, Son Bou.*

| **CLM** | **Eventos** (N) | **1 – 2 días** | **2 – 4 días** | **4 – 8 días** | **> 8 días** |
|---|---|---|---|---|---|
| Verano | 114 | 18 | 11 | 8 | 12 |
| Invierno | 119 | 16 | 6 | 12 | 16 |
| Total | 233 | 34 | 17 | 20 | 28 |

| **SNB** | **Eventos** (N) | **1 – 2 días** | **2 – 4 días** | **4 – 8 días** | **> 8 días** |
|---|---|---|---|---|---|
| Verano | 77 | 16 | 15 | 5 | 1 |
| Invierno | 125 | 17 | 23 | 10 | 12 |
| Total | 202 | 33 | 38 | 15 | 14 |

Tanto en CLM como en SNB se han registrado algunos eventos de permanencia extraordinarios durante el periodo de estudio, alcanzando los 21 días en verano o los 61 días en invierno. Ambos dos asociados, a periodos con un nivel del mar por efectos atmosféricos más bajo en relación al nivel del mar y la sobrelevación alcanzados durante el eventos de deposición, y periodos de oleaje energéticos muy bajos. Por lo los valores anómalos de permanecia vendrías justificados porque el depósito de necromasa de *P. oceanica* se produce en una cota topográfica que queda

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

por encima que el nivel que con posterioridad alcanzará el nivel medio del mar i el swash asociado a un oleaje poco energético.

En cuanto a los mecanismos de deposición y desmonte, las observaciones recogidas entre 2011 y 2023 (vid. Guevara, 2023), no hacen más que ratificar los resultados ya descritos por Gómez-Pujol et al. (2013) en que la formación de las bermas vegetales está asociada a la disponibilidad de necromasa, que tiene un marcado componente estacional, y a la concurrencia de eventos energéticos capaces de transportar los restos vegetales de la zona de asomeramiento a la playa alta. Por el contrario, la gran mayoría de desmontes se produce en condiciones poco energéticas y en contada ocasionas, las bermas vegetales permanecen en la playa cuando sufre la acción del siguiente evento de oleaje energético. En estas ocasiones són, escasos, los registros en los que la berma vegetal aparece como un cordón contínuo a lo largo de la línea de costa, siendo lo habitual que en dichos casos sobre el estrán aparezcan algunos retazos, parches dispersos, de bermas vegetales que han experimentado un desmantelamiento previo.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del proyecto Tech2Coast (TED2021-130949B-I00) financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por la UE "NextGenerationEU /PRTR". La presente investigación se ha realizado en el marco de la acreditación AEI "Centro de Excelencia María de Maeztu" otorgada al IMEDEA (CSIC-UIB) (CEX2021-001198) y también es una contribución al proyecto de investigación LIFE AdaptCalaMillor – LIFE21 GIC/ES/101074227 financiacio por la UE.

## 6. Referencias

Boudouressque, C.F. & Jeudy de Grissac, A. (1983). L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée: les interactions entre le plante et le sédiment. *Journal de Recherche Océanographique*, 8, 99-122.

De Falco, G., Simeone, S. & Baroli, M. (2008). Management of beach-cast Posidonia oceanica seagrass on the island of Sardinia (Italy, Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, 24, 69–75. https://doi.org/10.2112/06-0800.1

Fernández-Mora, A., Criado-Sudau, F.F., Gómez-Pujol, L., Tintoré, J. & Orfila, A. (2023). Ten years of morphodynamic data at a micro-tidal urban beach: Cala Millor (Western Mediterranean Sea). *Scientific Data*, 10, 301. https://doi.org/10.1038/s41597-023-02210-2

Gómez-Pujol, L., Fornós, J.J., Morales-Márquez, V., Pereda, L., Compa, M. & Tintoré, J. (2019). Beach Systems of the Balearic Islands: Nature, Distribution and Process. In : J.A. Morales (Ed.), The Spanish Coastal Systems (pp. 269-287). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_12

Gómez-Pujol, L., Orfila, A., Álvarez-Ellacuría, A., Terrados, J. & Tintoré, J. (2013). *Posidonia oceanica* beach-cast-litter in Mediterranean beaches: a coastal videomonitoring study. *Jouranl of Coastal Research*, SI65, 1768–1773. https://doi.org/10.2112/SI65-299.1

Guevara, M. T. (2023). *Dinámica de los depósitos de necromasa de Posidonia oceanica en la playa menorquina de Son Bou*. [MSc thesis, Máster de Ecología Litoral, Universitat de les Illes Balears].

Mateo, M.A., Sánchez-Lizaso, J.L. & Romeo, J. (2002). *Posidonia oceanica* "banquettes": a preliminary assessment of the relevance for meadow carbon and nutrient budget. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 56, 85-90. https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00123-3

Roig, F.X., Martín-Prieto, J.A., Comas, E. & Rodríguez-Perea, A. (2006). Space-time análisis (1956-2004) of human use and management of the beach-dune systems of Menorca (Balearic Islands, Spain). *Journal of Coastal Research*, SI48, 107-111.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Vacchi, M., De Falco, G., Simeone, S., Montefalcone, M., Morri, C., Ferrari, M., et al. (2017). Biogeomorphology of the Mediterranean Posidonia oceanica seagrass meadows. *Earth Surface Processess and Landforms*, 42, 42–54. https://doi.org/10.1002/esp.3932

Servera, J., Martín-Prieto, J.A. & Rodríguez-Perea, A. (2002). Forma y dinámica de las acumulaciones de Posidonia oceanica. Su papel como elemento protector de la playa subáerea. In: A. Pérez-González, J. Vegas, J. & M.J. Machado (Eds.), *Aportaciones a la Geomorfología de España en el incicio del Tercer Milenio* (p. 363-369). IGME.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18736

# High-resolution morphometric analysis of the rocky coast of the Prebetic System (western Mediterranean)

*Análisis morfométrico de alta resolución de la costa rocosa del Sistema Prebético (Mediterráneo occidental)*

**J. Alcántara-Carrió[a,b], J.E. Tent-Manclús[c], D. Bonomo[b], A. Fontán-Bouzas[d], R.P. Manzolli[a] and L. Portz[a]**

[a]Dept. Geology and Geochemistry. Universidad Autónoma de Madrid, , javier.alcantara@uam.es, ,rogerio.manzolli@uam.es, , luana.portz@uam.es; [b]Multidisciplinary Institute for Environmental Studies Ramón Margalef. Universidad de Alicante, , davide.bonomo@ua.es; [c]Dept. Earth and Environmental Sciences. Universidad de Alicante, , je.tent@ua.es [d]Centro de Investigación Marina. Universidad de Vigo, , afontan@uvigo.es.

How to cite: Alcántara-Carrió, J.; Tent-Manclús, J.; Bonomo, D.; Fontán, A.; Manzolli, R, & Portz, L. 2024. High-resolution morphometric analysis of the rocky coast of the Prebetic System (western Mediterranean). In book of minutes: *Proceedings of the XII Jornadas Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 September 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18736

## *Abstract*

*The rocky coast of the Prebetic System (southeast Iberian Peninsula) presents a marked tecto-structural control and by subaerial processes. The objective of this study is the morphometric characterization of this rocky coast. The analysis of the digital elevation model (2x2 m grid resolution) obtained from LIDAR, combined with the geological map, field work and review of previous studies, allows the identification and morphometric characterization of 271 geomorphological units, which mainly include stretches of high or medium cliffs, intercepted by numerous gullies (some of them hanging), stretches of low rocky coastline associated in many cases with Upper Pleistocene (5e) coastal deposits, and coastal plains of fluvial valleys, as well as some coastal lagoon, tombolo, islands, alluvial fan and a arheic basin. The high and medium cliffs show a smoothed profile in their upper section, evidencing the action of fluvial runoff and karstic erosion. The erosive action of waves is evidenced mainly in the formation of shore platforms, mapped and their minimum area determined from satellite images.*

***Keywords:*** *Geomorphology, cliff, shore platform, gully, island, LIDAR.*

## *Resumen*

*La costa rocosa del sistema prebético (sureste de la Península Ibérica) presenta un marcado control tecto-estructural y por los procesos subaéros. El objetivo de este estudio es la caracterizacion morfométrica de esta costa rocosa. El análisis del modelo digital de elevaciones (resolución de malla 2x2 m) obtenido a partir de datos LIDAR, combinado con el mapa geológico, trabajo de campo y revisión de estudios previos, ha permitido identificar y caracterizar morfométricamente 271 unidades geomorfológicas, que incluyen principalmente tramos de acantilados altos o medios, interceptados por numerosos barrancos (algunos de ellos colgados), tramos de costa rocosa baja asociada en muchos casos a depósitos costeros del Pleistoceno Superior (5e) y planicies costeras de valles fluviales, así como también alguna laguna costera, tómbolo, islas, abanico aluvial y una cuenca arreica. Los acantilados altos y medios muestran un perfil suavizado en su tramo superior, evidenciando la acción de la escorrentía fluvial y erosión kárstica. La acción erosiva del oleaje se evidencia principalmente en la formación de plataformas de abrasión, cartografiadas y determinada su área mínima a partir de imágenes de satélite.*

***Palabras clave:*** *Geomorfología, acantilado, plataforma de abrasión, barranco, isla, LIDAR.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

The geomorphology of rocky shores is controlled by their lithology, structure and the gravitational, fluvial, karstic and marine processes. New remote sensing techniques make it possible to obtain high-resolution mapping. In particular, LIDAR makes it possible to cover large areas of the territory. The aim of this study is the morphometric characterization of the rocky coast of the Prebetic System in the southeast of the Iberian Peninsula, based on high-resolution topography obtained with LIDAR.

## 2. Study area

The study area covers the coastal outcrops of the Prebetic System in the southeastern Iberian Peninsula (Fig. 1). The Alpine orogeny that affected shallow platform environments determines the predominant presence of limestone and marl rocks. This orogeny explains the presence of its mountain ranges and coastline, as well as the main folds and faults, some with neotectonic activity (Rey and Fumanal, 1996; Estévez et al., 2004). Precipitation is more intense in the northern zone. The coast shows a microtidal regime, with bidirectional waves of moderate energy.

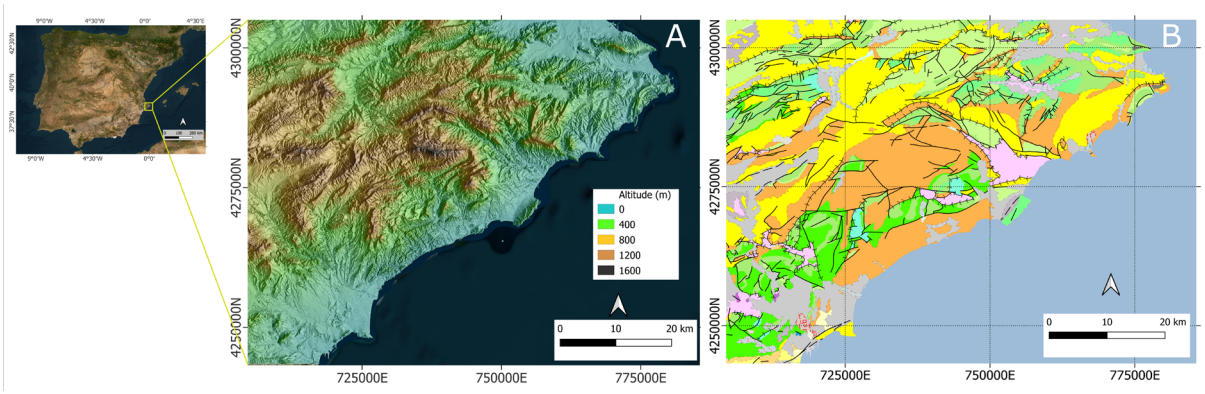



***Fig. 1*** *Study area. Digital elevation model and geologic map (ETRS89 UTM 30S; Source: Inst. Cartográfico de Valencia)*

## 3. Material and methods

The characterization of the relief has been obtained from the high-resolution topography of the emerged zone provided by the ICV, measured with LIDAR (2009) by the PNOA and with a grid size resolution of 2x2 m (Fig. 1A). The topographic curve of 0.25 m above mean sea level (a.m.s.l.) has been defined as the shoreline, as it was not possible to identify the curve of 0 m a.m.s.l. Other analyzed shorelines were discarded as they showed inconsistencies. Lithology and geological structures (faults, folds) have been obtained from geological cartography (1:350,000 and 1:25,000) elaborated between the Instituto Geológico Minero of Spain and the Instituto Cartográfico of Valencia (ICV) (Fig. 1B), field work, and review of previous studies (among others, Sanjaume, 1985; Blázquez Morilla, 1998; Blázquez Morilla et al., 1996, Rey et al., 1999, Tent et al., 2024). The geomorphological units have been obtained considering the division of the fluvial basins (rivers and gullies) and cliffs, as well as the different lithologies and geological structures. After delimiting the geomorphological units, their slope map has been obtained. The current marine abrasion platforms have been identified and delimited from the most recent satellite images available in Google Earth, as they have better resolution than the orthophotos of the IGN, ICV and other data sources analyzed. All the cartography has been generated in the ERTS89 UTM zone 30, projecting the easternmost part of the area to this system.

## 4. Results and discussion

The littoral is articulated with an alternation of wide rocky headlands and bays, in which some rocky sections also outcrop. The fragmentation of the cliffs in numerous sections due to the intersection of the gullies stands

 BY-NC-SA

out. A total of 271 geomorphological units have been identified and delimited, grouped into 18 sectors, most of which correspond to stretches of cliffs and gullies; stretches of low rocky coast, alluvial plains, coastal lagoons, tombolos, islands and an arheic basin have also been identified (Fig. 2). Abrasion platforms are not included in this calculation.

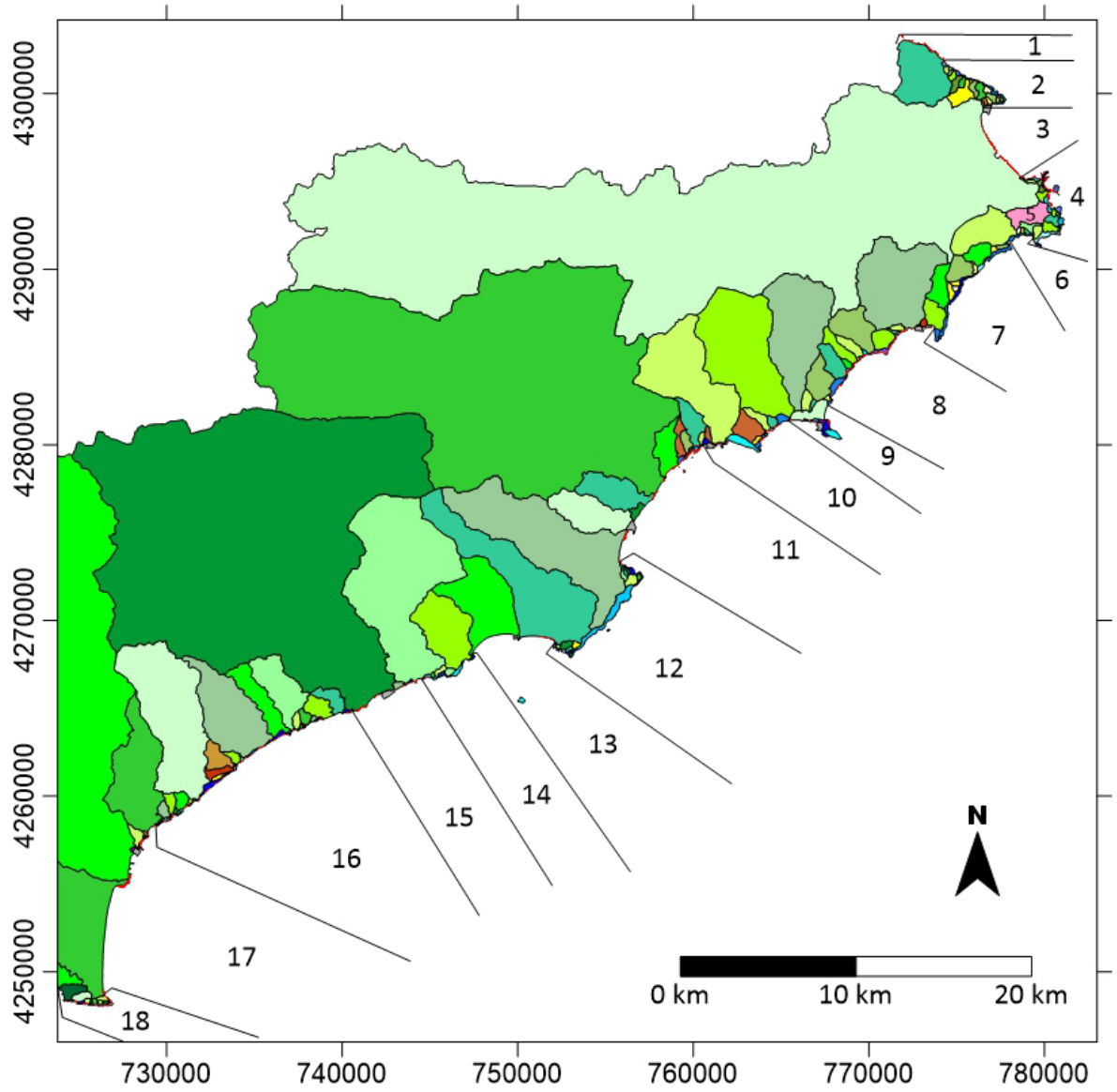



***Fig. 2*** *Sectors and geomorphological units. The units include cliffs and low rocky coast (blue colors, or purple if inactive due to harbor construction), shore platforms (red), river basins (green colors, yellow if their mouth is overhanging, or brown if they flow into a harbor). The location of the arheic basin (sector 5, pink color) and harbors (gray color) are also indicated.*

The highest cliffs are located in Gelada Range, Toix Promontory and Ifach Rock. Some sectors have stretches with vertical cliffs associated with faults (Gelada Range, Toix Promontory), olistoliths (Ifach Rock) or dolines (San Antonio Cape), with no wave action determining their formation. Most of the cliffs, high or low, show a lower slope in their upper zone, as a result of the action of subaerial agents; therefore, the average slope of no sector exceeds 50º (Fig. 3, Table 1).

The seaward-dipping cliffs show profiles with gentle slopes, but those with the opposite dip show stepped rather than vertical profiles, evidence of the importance of subaerial processes and the existence of strata of different hardness (e.g. at Moraira Point). Structural control is also evident in that the straightest rocky coastal section is associated with folding axes parallel to the coast, south of Villajoyosa City.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

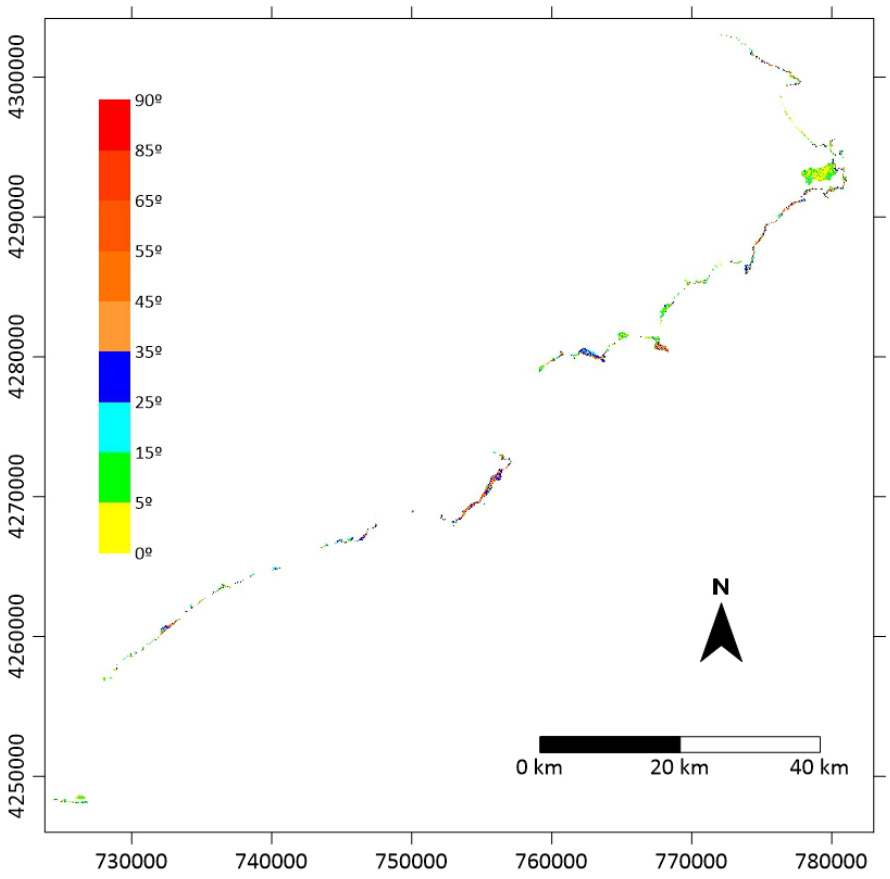



***Fig. 3*** *Slope map of the rocky coast and the arheic basin (sector 5) units.*

***Tabla 1.*** *Morphometric characterization of the rocky coast sectors. Due to its complexity, sector 9 has been divided among units 9A Ifach Rock, 9B hillside deposits, and 9C Upper Pleistocene eolianites. The area of lagoons and coastal plains is included in that of the river basins that drain into each coastal sector.*

| Sector | No. of rocky coast stretches | No. of islands | Total area ($km^2$) | Area of shore platforms ($km^2$) | Max. Altitude (m) | Average slope (º) | Max. slope (º) | Area of fluvial basins ($km^2$) | No. of hanging wallies |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | | 0.05 | 0.17 | 12.24 | 12.10 | 70.60 | 8.43 | |
| 2 | 11 | | 0.57 | 0.02 | 168.47 | 35.59 | 88.61 | 3.49 | 6 |
| 3 | 2 | | 0.12 | 0.33 | 5.24 | 5.01 | 48.14 | 440.01 | |
| 4 | 13 | 3 | 1.10 | 0.34 | 150.84 | 33.37 | 88.29 | 1.77 | |
| 6 | 3 | | 0.19 | 0 | 155.32 | 37.24 | 85.94 | 6.20 | 2 |
| 7 | 7 | | 1.10 | 0 | 196.85 | 38.57 | 87.99 | 5.92 | 5 |
| 8 | 12 | | 0.89 | 0.39 | 67.73 | 15.69 | 84.97 | 30.46 | |
| 9A | 1 | | 0.27 | 0 | 326.26 | 49.24 | 89.17 | | |
| 9B | 3 | | 0.40 | 0.05 | 148.77 | 20.95 | 75.40 | 48.80 | |
| 9C | 4 | | 0.04 | 0.01 | 13.91 | 9.36 | 62.43 | | |
| 10 | 7 | | 1.30 | 0.13 | 340.71 | 27.42 | 86.92 | 23.83 | 2 |
| 11 | 7 | 2 | 0.23 | 0.37 | 80.90 | 18.27 | 82.93 | 255.47 | |
| 12 | 10 | 1 | 1.73 | 0.03 | 432.82 | 41.51 | 88.23 | 1.35 | 2 |
| 13 | 2 | 1 | 0.07 | 0.07 | 71.68 | 21.39 | 76.97 | 39.86 | |
| 14 | 4 | | 0.42 | 0.03 | 146.77 | 29.49 | 86.14 | 10.03 | |
| 15 | 1 | | 0.06 | 0.14 | 48.13 | 19.07 | 76.17 | 268.50 | |
| 16 | 26 | | 1.04 | 0.31 | 198.96 | 27.30 | 83.08 | 76.84 | 5 |
| 17 | 3 | | 0.13 | 0.30 | 25.92 | 12.91 | 69.10 | 526.32 | |
| 18 | 9 | | 0.38 | 0.17 | 57.79 | 11.72 | 69.06 | 1.67 | |

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

There are also several sectors with low rocky coast (maximum altitude < 15 m), which mainly correspond to Upper Pleistocene cemented coastal deposits located in the coastal plains (Sectors 1, 3, 9C, 11 and 13). The erosive action of waves is manifested in the formation of shore platforms, mainly located in these Pleistocene deposits, as well as at the base of the marl cliffs. There are also numerous stretches of medium cliffs with marl lithology at the base of which small beach deposits are formed, mainly on the coast of Villajoyosa, which gives these cliffs an inactive character for most of the year. Finally, the waves also form notches in the vertical cliffs of more competent rocks, as is the case of the Ifach Rock and Toix Promontory.

Several studies have questioned whether the plains west of San Antonio Cape and between San Martí Cape and La Nao Cape are marine terraces or continental formations (Dumas, 1977, López-Gómez and Roselló, 1978). Coinciding with the opinion of Cavanilles (1797) and Sanjaume (1985), the present morphometric analysis, based on high-resolution topography, shows that they are not marine terraces. Thus, in the plain at the base of the Montgó Mountain there is a doline in the central area and a hanging valley on the nearby coastline, also due to karstic subsidence processes. There are also two coves just west of Cape San Antonio associated with the collapse of dolines, with small hanging valleys at the top. To the west of Cape San Martín, the area of gentle slopes (mean slope 5.87º) corresponds to a 2.2 km$^2$ arheic basin where a doline has formed, with a minimum altitude of 88 m a.m.s.l. in the interior and a peripheral altitude ranging between 99 and 166 m a.m.s.l., surrounded by mountainous elevations (Fig. 4a). Also associated with karst processes, there are numerous caves on the shore of different sectors of resistant lithology (limestone) in the northern half of the study area, but it is not possible to identify them in the topography obtained by LIDAR.

The river courses intercepting the cliff sections show drainage networks ranging from linear to bifurcate and dendritic. The headwaters of the gullies are located in the vast majority of cases further inland than the headwaters of the cliffs. The mouths of most of the gullies reach the current coastline, but some of them appear as hanging gullies. The upward erosion at the head of some gullies with parallel drainage networks to the coastline or dendritic drainage networks also generates erosion of the upper part of the cliffs from the landward side (Fig. 4b). Gullies are therefore a very important erosional agent in the evolution of this rocky coast.

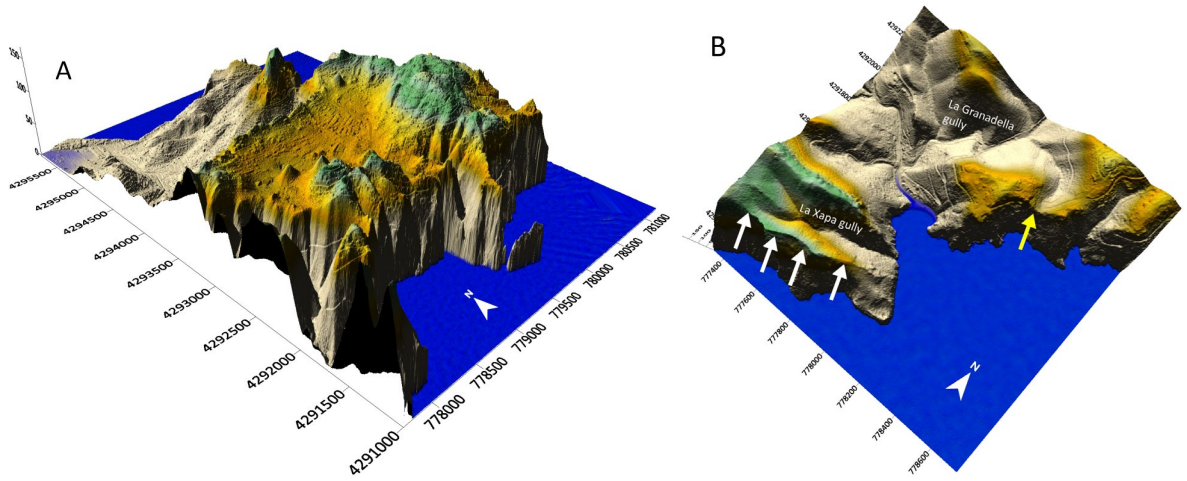



***Fig. 4*** *Karstic and fluvial runoff processes. A) arheic basin surrounded by mountains, excluding the possibility of a marine terrace, B) valley parallel to cliff top in La Xapa gully (white arrows) and head of La Granadella gully (yellow arrow).*

The formation processes of the islands are generally clear. For example, the Portixoll and Berganti islands are the result of differential erosion, while Peñas de Arabi and Benidorm islands are associated with blocks sinking by faults. The Benidorm and La Olla islands are also located at the top of the dividing line between two river courses, currently submerged due to the high sea level in the current Holocene interglacial. On the other hand, the origin of El Descubridor Island is more uncertain. This island has an elongated shape (maximum length 333 m, area 2.25 ha, maximum height 58.44 m). The present small strait (minimum width 21 m) that separates it from the continental promontory is probably the result of subaerial erosion during periods of lower sea level (Sanjaume, 1985). However, the orientation of the island (N110ºE) is different from the nearby coast, with very

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

vertical slopes up to 30 m deep and then a large area (minimum length 1.5 km) of very low slope up to 35 m deep. Therefore, its formation may also be related to the fall of a block or an unidentified fault.

Urban occupation is high in many areas, reaching in many cases to the very top of the cliff. Some marinas are located at the mouth of gullies and others have caused some sections of cliffs to become inactive. In addition, the construction of numerous roads modifies the drainage network of the basins, with possible repercussions during floods.

## 5. Conclusions

The cliffs show in their topographic profile the action of both subaerial and marine agents, as well as lithological and structural control. Tectonics marks the general alignment of the coast. The straight stretches are controlled by folds (Villajoyosa) or faults (Toix Promontory, Gelada Range). The highest heights are located in sections with high tectonic control (Gelada Range, Toix Promontory, and Ifach Rock). The entire rocky coast shows a great deal of erosion by subaerial processes (surface runoff and karstic processes), with numerous gullies and smoothed profiles in the upper part of the medium or high cliffs, while in the bays (e.g. Javea, Altea) there remain small stretches of low rocky coast, in many cases associated with cemented deposits from the Upper Pleistocene. The gullies produce an intense fragmentation of the cliffs and in some valleys parallel to the cliff or with dendritic networks there is even cliff top back erosion. At San Antonio Cape and west of San Martin Cape there are no marine terraces, but their morphology is associated with the predominance of karstic processes. The formation of the caves is mainly associated with endokarst processes, rather than wave action. Shore platforms are mainly located in areas with Pleistocene biocalcarenite or marl deposits. The origin of some islands is associated with the block sinking by fault planes (Benidorm and Peñas de Arabi islands), they are vestiges of the dividing line between contiguous riverbeds now flooded by the high interglacial sea level (Benidorm and La Olla islands), or the result of differential erosion (Portixoll and Bergantí islands).

## 6. Acknowledgements

This work is a contribution to the research project GVA-THINKINAZUL/2021/039 of the Generalitat Valenciana, funded by the thinkinazul NextGenerationEU program (PRTR-C17.I1) of the European Union. It is a contribution of the VIGROB21-053 research group of the University of Alicante. J.A.C. thanks the grant "Ayudas para la Recualificación del Sistema Universitario Español" ref. CA2/RSUE/2021-00418.

## 7. References

Blázquez Morilla, A.M., Fumanal, M.P & Olmo, J. (1996). Rasgos sedimentológicos de la plataforma interna valenciana (tramo Oliva-la Vila Joiosa) y su relación con la geomorfología continental. Cad. Lab. Xeolóxico Laxe 21, 671–683.

Blázquez Morilla, A.M. (1998). Factores morfogenéticos del litoral entre Valencia y Alicante: algunas notas. *Cidaris*, 13-14, 4-16.

Cavanilles, A. (1797). *Observaciones sobre la historia natural, geografía, agricultura, población y frutos del Reyno de Valencia*, Madrid. Imprenta real. 2 vol.

Dumas, B. (1977). *Le Levant Espagnol. La genèse du relief*. Doctoral Thesis, Universite de Paris XII, C.N.R.S, 520 p

Estévez, A., Vera, J.A., Alfaro, P., Andreu, J.M., Tent-Manclús, J.E. & Yébenes, A. (2004). Geología de la Provincia de Alicante. In: *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12(1), 2-15.

López Gómez, A. & Roselló Verger, V.M. (1878). *Geografía de la provincia de Alicante*. Exma. Diput. Provincial Alicante. Alicante 615 p.

 BY-NC-SA

Rey, J. & Fumanal, M.P. (1996). The Valencian coast (Western Mediterranean): Neotectonics and geomorphology. *Quaternary Science Reviews 15* (8-9), 789-802.

Rey, J., Ferández-Salas, L.M., Blázquez Morilla & A.M. (1999). Identificación de las unidades morfosedimentarias cuaternarias en la plataforma interna del litoral del País Valencianoel rol de los factores morfoestructurales y eustáticos. In: *Geoarqueología quaternari litoral: memorial María Pilar Fumanal.* Universidad de Valencia. Valencia. 403-418.

Sanjaume E. (1985). Las costas valencianas*. Sedimentología y Morfología. Universidad de Valencia. Valencia* 505 pp.

Tent-Manclús, J.E., Bonomo, D., Alcántara-Carrió, J. & Estévez, A. (2024). Evolución reciente del acantilado marino del Morro de Toix (Alicante, SE España). *Geo-Temas*, 20, 90-93.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18864

# The Pleistocene double tombolo of Calpe and the submerged fault scarps between Moraria Point and Ifach Rock (western Mediterranean)

*El doble tombolo pleistoceno de Calpe y los escarpes de falla sumergidos entre la Punta de Moraira y el Peñón de Ifach (Mediterráneo occidental)*

**J. Alcántara-Carrió [a,b], J.E. Tent-Manclús[c], D. Bonomo[b], A. Fontán-Bouzas[d], L. Portz[a] & R.P. Manzolli[a]**

[a]Dept. Geology and Geochemistry. Universidad Autónoma de Madrid, javier.alcantara@uam.es, rogerio.manzolli@uam.es, luana.portz@uam.es; [b]Multidisciplinary Institute for the Study of the Environment Ramón Margalef. Universidad de Alicante, davide.bonomo@ua.es; [c]Dept. Earth and Environmental Sciences. Univ. de Alicante, je.tent@ua.es; [d]Centro de Investigación Marina. Universidad de Vigo, afontan@uvigo.es.

How to cite: Alcántara-Carrió, J.; Tent-Manclús, J.E.; Bonomo, D. & Fontán, A. 2024. The Pleistocene double tombolo of Calpe and the submerged fault scarps between Moraira Point and Ifach Rock (western Mediterranean). In the minutes book: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 September 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18864

## *Abstract*

*Double and triple tombolos are rare on Holocene coasts. Previous studies have proposed the existence of a double tombolo of Calpe in the Upper Pleistocene. The aim of this work is to demonstrate, map and deduce the implications of the existence of this double tombolo in the Upper Pleistocene. The analysis of high-resolution bathymetry and seabed classes mapping, combined with field work, has allowed mapping the presence of a submerged bar of a calcarenite with abundant ooid forms 2-km long and with a crest depth between 3 and 4 m, separated from the present shore by a depression with a maximum of 6 m. The bimodal wave regime facilitated the formation first of this northern tombolo and later or synchronously formed the western tombolo, leaving the lagoon in its interior. The analysis of this and other double tombolos leads to define them as a new model of convergent paired spits, different from the genesis of the simple tombolos. In the submerged zone, previously unmapped faults have also been identified.*

***Keywords:*** *Prebetic System,, Quaternary, seabed, bathymetry, calcarenite, eolianite, paired spits.*

## *Resumen*

*Los dobles y triples tómbolos son poco frecuentes en las costas holocenas. Estudios previos han propuesto la exisencia de un doble tómbolo en Calpe en el Pleistoceno Superior. El objetivo de este trabajo es demostrar, cartografiar y deducir las implicaciones de la existencia de este doble tómbolo en el Pleistoceno Superior. El análisis de la batimetría de alta resolución y la cartografía de los tipos de fondo, combinado con trabajo de campo, han permitido cartografiar al norte del Peñón de Ifach la presencia de una barra sumergida de calcarenita con abundantes de ooides de 2 km de longitud y profundidad en su cresta entre 3 y 4 m, separada de la orilla actual por una depresión de profundidad máxima 6 m. El oleaje bimodal facilitó la formación primero de este tómbolo septentrional, y posteriormente o sincrónico se formó el tómbolo occidental, quedando la laguna en su interior. El análisis de éste y otros dobles tómbolos lleva a definirlos como un nuevo modelo de sistemas de dobles flechas litorales convergentes, génesis diferente a la de los tómbolos simples. En la zona sumergida se han identificado además fallas previamente no cartografiadas.*

***Palabras clave:*** *Sistema Prebético, Cuaternario, fondo marino, batimetría, arenisca, eolianita, doble flecha litoral.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

Double or triple tombolos are rare on Holocene coasts. Some of the best known are located at Thordarhöfdi (Boderé, 1973), Biddeford (Hulmes, 1981), Giens (Vella et al., 2000), Orbetello (Goiran et al., 2023) and Akrotiri (Polidorou et al., 2021). Several authors have proposed the existence of a double tombolo in Calpe (SE Iberian Peninsula) since the Upper Pleistocene (Sanjaume, 1985, Alfaro et al., 1999). The aim of this study is to confirm and characterize this double tombolo, with a particular focus on the tombolo formed north of the Ifach Rock, and to elucidate its implications both for the geomorphological evolution of this coastal area since the Upper Pleistocene to the present day and for the morphogenetic models of the double tombolos.

## 2. Study area

The study area covers the coastline and the inner continental shelf from Toix Headland to Moraira Point, a sector divide in blocks with different subsidence (Gaibar-Puertas, 1972). It presents, among other geomorphological units, cliffs with shore platforms, small pocket beaches, the Ifach Rock and the double tombolo of Calpe, which includes a coastal lagoon inside (Fig. 1). The Ifach Rock (326 m high above mean sea level) is an olistolith composed of Upper Eocene - Lower Oligocene limestones and marls, overlying Lower Miocene marls and marl-limestones (Yébenes et al., 2004). The continental gullies near the massif contributed sediments that gradually filled the bay to the northwest. Marine dynamics created a double tombolo system with an inland coastal lagoon (Sanjaume, 1985). On the Cantal Roig Beach, cemented dune deposits from the Upper Pleistocene (5e) have been identified with important Roman archaeological remains (Baños de la Reina). Next, close to the western margin of the Ifach Rock, Miocene marl outcrops forming small cliffs. Meanwhile, on La Fossa Beach, north of the Ifach Rock, only Holocene beach and dune deposits have been identified. To the north, in Les Bassetes shore, oolitic eolianites with abundant microfossils have been identified, corresponding to rampant dunes from the Upper Pleistocene (Martínez Gallego et al., 1995, Riquelme and Blázquez, 2001), resting on cliffs sculpted in molasse, marls and Burdigalian limestones, whose erosion formed shore platforms.

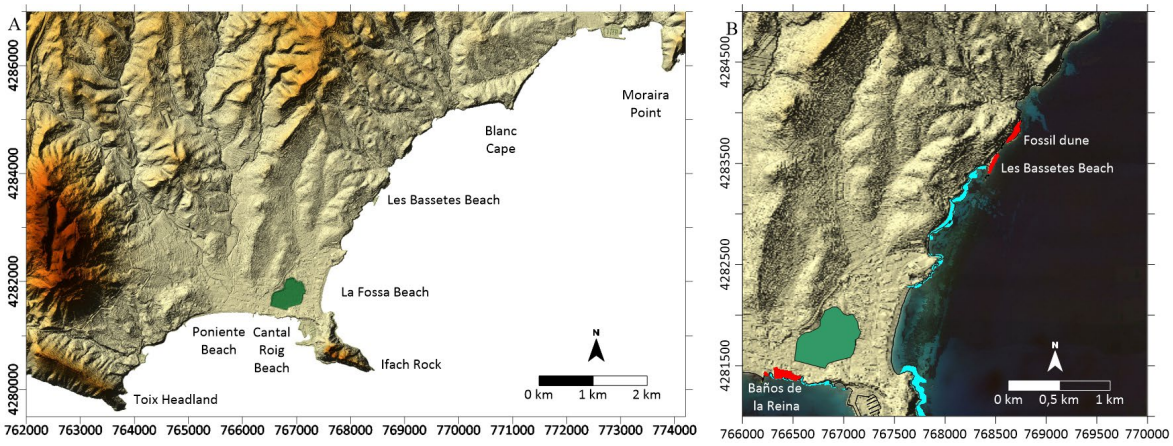



***Figure 1*** *Study area. A) Relief B) Shore platforms (blue), Upper Pleistocene aeolianites (red) and a submerged bar showed in the satellite image (Source of topographic data: Instituto Cartográfico de Valencia; satellite image: Google Earth).*

## 3. Methodology

The bathymetric and seabed classes were obtained from the Ecocartographic Study of Alicante, elaborated by HIDTMA ECOMAR in 2006 and 2007. For the emerged zone, the topographic data (2x2 m grid size) elaborated by the Valencian Cartographic Institute from LIDAR data (2009) of the PNOA has been used. The digital elevation model and digital slope model (both with 1x1 m grid size) in ETRS89, UTM coordinates zone 30S, were generated using SURFER and QGIS for the geomorphological analysis. The presence of Upper Pleistocene oolitic calcarenite was assessed by field work in both the emerged and submerged zones. The offshore wave regime has been obtained from the SIMAR2086103 point (38.58ºN, 0.17ºE, 1989-2022, Puertos del Estado).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

## 4. Results

The digital elevation model shows an internal platform with greater topographic irregularities to the north than to the west of the Peñón Rock. Thus, in the northern area several escarpments are observed (Fig. 2A). Of special relevance is the presence of a 2 km long bar in the shallowest area, between Les Bassetes Beach and the Ifach Rock. The top of the barrier has depths between 3 and 4 m (Fig. 2B), while the depression between the bar and the shore reaches depths of 5 m in front of La Fossa Beach and up to 6 m in the bay just south of Les Bassetes Beach.

The present climate in Calpe is dry and sunny practically all year round, with a predominance of anticyclonic conditions. Rainfall is mainly associated with easterly winds in autumn. The wave rose for deep waters clearly shows a bimodal behavior for medium regime, with the main component for ENE and E waves, with a second component for SSW waves (Fig. 2C). The seasonal analysis shows unimodal SSW waves in winter, unimodal E-ESE in summer and bimodal with ENE and E predominance in spring and autumn. The greatest wave heights come from the S-SW and secondly from the E-NE. Most of the time it corresponds to wind-sea waves ($Tp \leq 6$ s), although the most energetic storms are associated with swell waves ($Tp \geq 9$ s).

The diving dives confirmed the continuity and stratification of the calcarenite barrier (Fig. 2D and 2E), also visible in the satellite image (Fig. 1), although in some areas it is covered by sediments. The rock fragment sampled from the submerged barrier east of La Fossa Beach is similar to the oolitic calcarenite described by Riquelme and Blázquez (2001) in Les Bassetes (Fig. 2F), where a notch has been identified at 1 m depth.

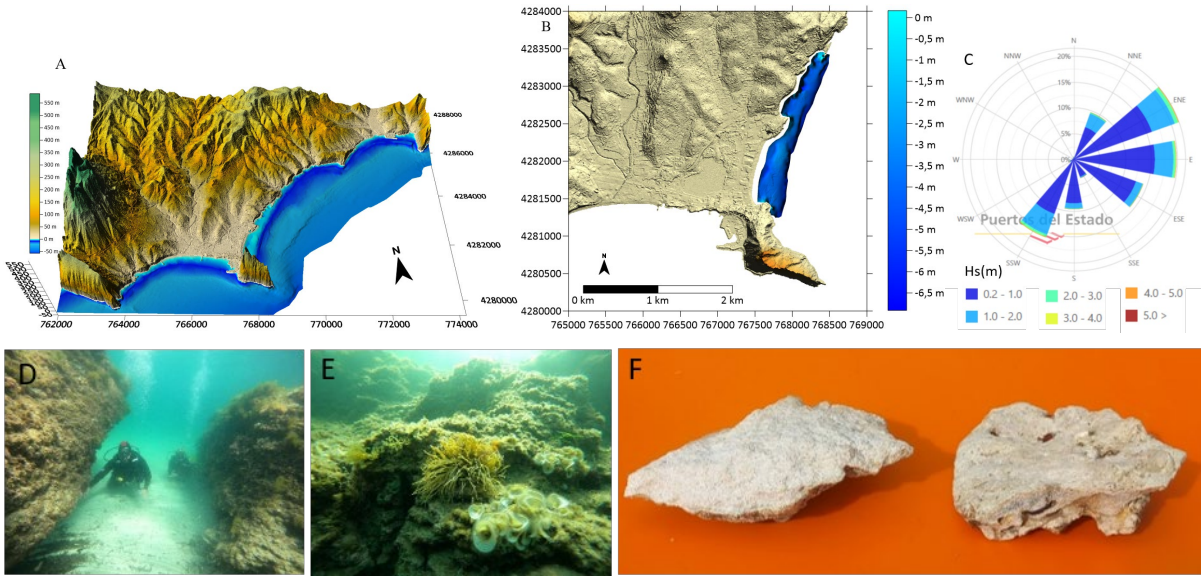



***Figure 2.*** *The Pleistocene tombolo north of Ifach Rock. A) general topo-bathymetry, B) location of the Pleistocene barrier, C) wave rose, D and E) images of the submerged barrier, F) samples of the Pleistocene calcarenite from Les Bassetes (left) and east of La Fossa Beach (right). (Wave rose: Puertos del Estado; pictures C and D: Les Bassetes Diving Club)*

The Ecorcatographic Study shows no outcrops of bedrock on the seabed, except at the base of the Ifach Rock itself, but it shows a 5-km long strip of "boulders and/or blocks and/or sedimentary rocky crust" bordering the northern bay, at depths of around 5 and 10 m, from La Fossa Beach to Blanc Cape. This strip is partially located on the calcarenite bar and therefore, confirms that it is not an unconsolidated sand barrier. It is unique in its extension in the entire coast of the Prebetic System of the southeast of the Iberian Peninsula. Next to it, deeper, there is a wide strip of substrate with high vegetation cover, followed by a strip of medium-fine sediments and in the deepest zone very fine sediments. On the other hand, in the bay west of the Ifach Rock, the Ecorcatographic Study shows that the seabed is covered by very fine sediments, with some areas of high vegetation cover, with no outcrops of bedrock, boulders, blocks or sedimentary rocky crust.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

The slope map of the submerged zone shows the predominance of areas with a slope of less than 2º, with extensive areas of very gentle slope (<0.5º) in the northern bay. In this bay, numerous escarpments are also observed at depths of 10 and 20 m, with a N47ºE direction from the east of the Ifach Rock, until outcropping on the eastern margin of Blanc Cape, and N90ºE direction to the west of Blanc Cape and Moraira Point (Fig. 3).

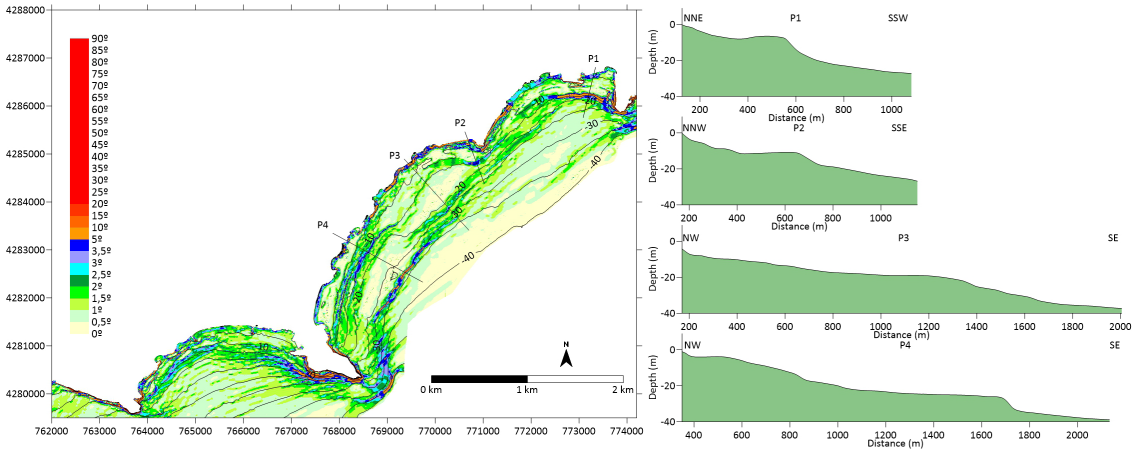



***Figure 3.*** *Morphology of the inner continental shelf. Bathymetric and slope map, and topographic profiles showing the presence of fault scarps at 10 (P1 y P2) and 20 m (P3 y P4) depth.*

## 5. Discussion

In simple tombolos, two sediment accumulations develop in the wave- shaded zones behind the island and in front of the continent, until they finally merge. In contrast, double tombolos are actually a system of double spits that from the mainland prograde and converge towards the island, associated with a bidirectional wave regime and generally contiguous fluvial inputs (Giaime et al., 2020). As a consequence and unlike single tombolos, double tombolo systems typically form a coastal lagoon in their interior. The two paired spits of the double tombolo are not necessarily synchronous. Thus, the first spit, when attached to the island, creates an area of reduced wave energy, towards which a second spit associated with the second wave component eventually converges (Polidorou et al., 2021).

The formation of paired spits has been associated with several processes: a) coastal barrier breaching (Ward, 1922; Lovegrove, 1953), b) convergent littoral drift in a narrow bay (Zenkovich, 1967), c) bidirectional littoral drift with hydraulic blockage (Kunte and Wagle, 1991), d) shearing of a littoral arrow by tidal currents (FitzGerald et al., 2000) or high-energy events such as storms (Jume and Herdenddorf, 1992), hurricanes (Aubrey and Gaines, 1982) or high river discharge (Alcántara-Carrió et al., 1998), e) convergence of the mouth of two estuaries with associated spits (Alcántara-Carrió et al., 2018), f) convergent littoral drift in interdistributary bays of deltas (Alcántara-Carrió et al., 2023) and g) convergent littoral drift in coastal channels (Alcántara-Carrió et al., 2023). The analysis of the evolution of several double tombolos allows us to define them as the final state of convergent paired spits towards islands, thus stablishing a novel of paired spits convergence (Fig. 4).

Calpe has been defined as a double tombolo formed in the Upper Pleistocene (5e), where the eolianites of Baños de la Reina (Cantal Roig Beach) are evidence of the western tombolo, while the northern tombolo would be below the present Holocene barrier (Sanjaume, 1985, Alfaro et al., 1999, Estévez et al., 2004). On the other hand, López Gómez and Roselló (1978) cite a shallow rocky substrate from Les Bassetes to Ifach Rock, which Fumanal et al. (1997) suggest to be a submarine extension of the Pleistocene eolianites. The present study demonstrates the existence of this submerged oolitic calcarenite, which therefore corresponds to the northern barrier of the double tombolo of Calpe (Fig. 3). The wave regime in the Upper Pleistocene should be similar to the current bimodal pattern, likely with higher predominance of the ENE-E waves. This wave pattern favored the formation of the northern tombolo, and subsequently or synchronously was formed the tombolo in the western bay, the latter related to lower energy of the waves and therefore lower magnitude of the coastal drift.

 BY-NC-SA

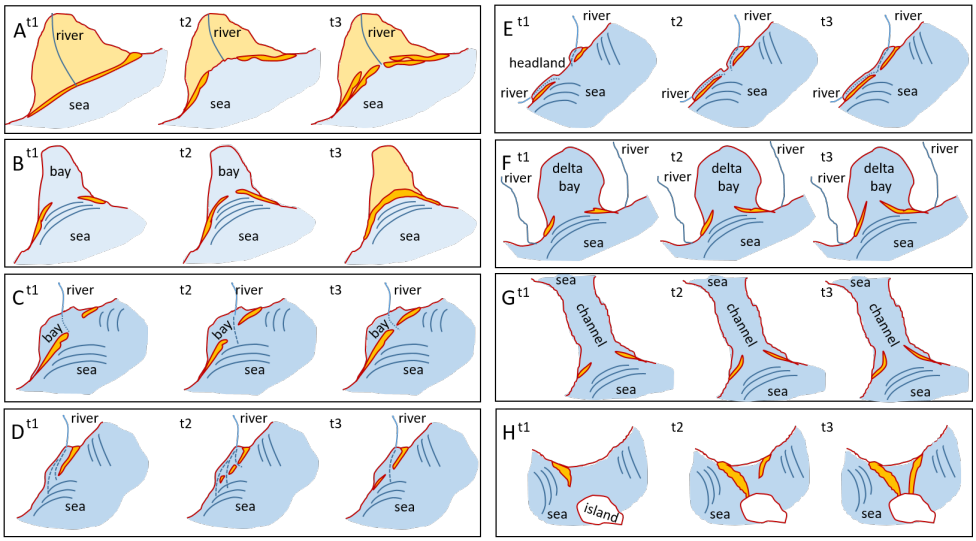



***Figure 4.*** *Morphogenetic models for convergent paired spits. It includes the new model (H) for paired spits converging to an island until they develop a double tombolo (modified from Alcántara-Carrió et al., 2023).*

The Holocene double tombolos of Dzaoudzi (Guilcher, 1961) and Peinchorran (Selby and Smith, 2007) also present cementation of the two tombolos, but Calpe is the only Pleistocene double tombolo with preservation, by cementation, of both tombolos. The Pleistocene eolianite deposits identified, currently in the subtidal, intertidal and emerged shore zones, indicate that the Pleistocene shoreline was in a currently submerged location, evidence of subsidence in the area. The Pleistocene shoreline barrier is found at depths around 5 m (Fig. 3), suggesting a subsidence rate of 5 m in the last 100,000 years. Upper Pleistocene coastal eolianites have also been described in Javea and Altea (Sanjaume, 1985), and Upper Pleistocene lagoon barrier island systems have been described in the Gulf of Valencia, also submerged, due to even greater subsidence (Albarracín et al., 2013; Alcántara-Carrió et al, 2013). The 1-m deep notch at Les Bassetes should correspond to the Holocene transgression maximum. The submerged escarpments (10 and 20 m depth), likely correspond to normal faults associated with the generalized subsidence of the submerged zone. Some of these faults have already been described in the emerged zone (Aberasture et al., 2021), but not in the submerged one.

## 6. Conclusions

This study evidences that double tombolo of Calpe already existed in the Upper Pleistocene (5e), while the other tombolos described in the scientific literature are all Holocene. Along the emerged coast of Calpe, only eolianite remains of both tombolos are left. In this study, the northern 2-km long Pleistocene barrier has been located between Les Bassetes Beach and the Ifach Rock, and mapped at depths ranginf from 3 to 7 m. During the Upper Pleistocene (5e), the probably bidirectional wave regime favored the formation of the double tombolo. First, the northern spit was formed, until it joined the Ifach Rock, subsequently or perhaps synchronously, the southwestern spit ended up forming the second tombolo, leaving a coastal lagoon confined between the two. The presence of eolianites on the present shore and the submerged position of the coastal barrier provide evidence of subsidence in the area, of the order of 5 m in the last 100,000 years. The terraced surfaces identified on the inner continental shelf, at depths of 10 and 20 m, are associated with fault scarps exhibiting i) N47ºE direction from Ifach Rock to Blanc Cape, and ii) N90ºE direction both west of Blanc Cape and west of Moraira Point.

## 7. Acknowledgments

This work is a contribution to the research project GVA-THINKINAZUL/2021/039 of the Generalitat Valenciana, funded by the thinkinazul NextGenerationEU program (PRTR-C17.I1) of the European Union. It is a contribution of the VIGROB21-053 research group of the University of Alicante. J.A.C. thanks the grant

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

"Ayudas para la Recualificación del Sistema Universitario Español" ref. CA2/RSUE/2021-00418. Thanks to Carlos Carrión for participating in diving dives and to the IMEDMAR for helping with the diving equipment.

## 8. References

Albarracín, S., Alcántara-Carrió, J, Barranco, A., Sánchez-García, M.J., Fontán Bouzas, A. & Rey Salgado, J. (2013). Seismic evidence of the preservation of several stacked Pleistocene coastal barrier/lagoon systems in the Gulf of Valencia continental shelf (western Mediterranean). *Geo-Marine Letters* 33, 217-233.

Alcántara-Carrió, J., Albarracín, S, Montoya-Montes, I., Flor-Blanco, G., Fontán-Bouzas, A & Rey Salgado, J. (2013). An indurated Pleistocene coastal barrier on the inner shelf of the Gulf of Valencia (western Mediterranean): evidence for a prolonged relative sea-level stillstand. *Geo-Marine Letters*, 33, 209-216.

Alcántara-Carrió, J., Fontán-Bouzas, A., Caicedo Rodríguez, A.; Manzolli, R.P. & Portz, L. (2023). Global distribution and morphodynamic patterns of paired spits developed at the mouths of interdistributary bays of deltas and within coastal channels. *Remote Sensing 15*,2713.

Alcántara-Carrió, J., Dinkel, T.M., Portz, L. & Mahiques, M.M. (2018). Two new conceptual models for formation and degradation of baymouth spits by longshore drift and fluvial discharge (Iguape, SE Brazil). *Earth Surface Processes and Landforms, 43*, 695–709.

Alfaro, P., Andreu, J.M., Estévez, A., López Arcos, M., Soria, J.M., Yébenes, A., Castro, J.M., González Fernández, J., González Herrero, M., López Gómez, F.J. & López Martín, J.A. (1999). Itinerario Geológico Litoral entre Benidorm y Calpe. Universidad de Alicante, 31 p.

Aubrey, D.G. & Gaines, A.G. (1982). Rapid formation and degradation of barrier spits in areas with low rates of littoral drift. *Marine Geology, 49*, 257–277.

Boderé, J.C. (1973). Le tombolo double de Thordarhöfdi (Island septentrionale). *Norois*, 78, 213-235.

Estévez, A., Vera, J.A., Alfaro, P., Andreu, J.M., Tent-Manclús, J.E. & Yébenes, A. (2004). Geología de la Provincia de Alicante. In: *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (12.1), 2-15.

FitzGerald, D.M., Kraus, N.C. & Hands, E.B. (2000). Natural mechanisms of sediment bypassing at tidal inlets. *Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note IV–30*; United States Army Engineer Research and Development Center: Vicksburg,MS, USA, 10 p.

Fumanal, M.P., Rey, J.; Usera, J., Martínez, J., Mateu, G., Blázquez, A.M. & Ferrer, C. (1997). El Proyecto La Nao: evolución cuaternaria del litoral meridional valenciano. In: J. Rodríguez Vidal (Ed.). *Cuaternario Ibérico*, AEQUA, 98-112

Gaibar-Puertas, C. (1972). *Los movimientos recientes del litoral alicantino en el segmento septentrional hasta el Peñón de Ifach*. Rev. Inst. Est. Alicante, 7, 21-66.

Giaime, M., Morhange, C. & Marriner, N. (2020). Contextualization and typology of ancient island harbors in the Mediterranean: from natural hazards to anthropogenic imprints. In: A. Gilboa y A. Yasur-Landau (eds.). *Nomads of the Mediterranean: Trade and Contact in the Bronze and Iron Ages*. Serie Culture and History of the ancient near east, vol. 112, 105-127.

Goiran, J.P., Bertini, A., Leporati Persiano, et al.. (2023). Histoire et paléogéographie des paysages côtiers d'Orbetello (Toscane): Une approche pluridisciplinaire pour l'étude des relations entre une ville et sa lagune. *Bollettino di Archeologia online*, 14(1), 163-183.

Guilche, A. (1961). Le "beach-rock" ou grès de plage. *Annales de Géographie*, 376, 113-125.

Hulmes, L.J. (1981). Holocene stratigraphy and geomorphology of the Hills Beach and Fleck Neck tombolo system, Biddeford, ME. In: Leonard, N.E, Maurmeyer E. (eds.) *Northeastern Geology 3*, 197-201.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Hume, T.M. & Herdendorf, C.E. (1992). Factors controlling tidal inlet characteristics on low drift coasts. *J. Coastal Research, 8*, 355–375.

Kunte, P.D. & Wagle, B. (1991). Spit evolution and shore drift direction along South Karnataka Coast, India. *G. Giol., 153*, 71–80.

López Gómez, A. & Roselló Verger, V.M. (1978). Geografía de la provincia de Alicante. *Exma. Diput. Provincial Alicante*. Alicante 615 p.

Lovegrove, C.H. (1953). Old shorelines near Camber Castle. *Geog. J., 119*, 200-207.

Martínez-Gallego, J., Rey, J.; Fumanal, M.P., & Somoza, L. (1995). Evolución cuaternaria del dominio marinocontinental situado entre el Puntal de Moraira y la Sierra de Bérnia (Alicante, España). *Cuaternario y Geomorfología*, 9(3-4), 75-84.

Polidorou, M., Evelpidou, N., Tsourou, T., Drinia, H., Salomo, F. & Blue, L. (2021). Observations on palaeogeographical evolution of Akrotiri Salt Lake, Lemesos, Cyprus. *Geosciences*, 11, 321.

Riquelme, J. & Blázquez, A.M. (2001). Caracterización de las eolianitas cuaternarias entre Cap Blanc y el Penyal d'Ifac (litoral valenciano). *Cuadernos de Geografía*, 68-70, 163-186.

Sanjaume E. (1985). *Las costas valencianas. Sedimentología y Morfología*. Universidad de Valencia. Valencia 505 pp.

Selby, K.A. & Smith, D.E. (2007). Late Devensian and Holocene relative sea-level changes on the isla of Skye, Scotland, UK. *Journal of Quaternary Science*, 22(2), 119-139.

Vella, C., Provansal, M, Long, L. & Bourcier, M. (2000). Contexte géomorphologique de trois ports antiques provençaux: Fos, Les Laurons, Olbia. *Méditerranée* 1(2), 39-46.

Ward, E.M. (1992). *English Coastal Evolution*; Methuen & Co. Ltd.: London, UK, 105 p.

Yébenes, A., Estévez, A., López-Arcos, M. & Alfaro, P. (2004). Itinerario geológico litoral entre Benidorm, Altea y Calpe. In: P. Alfaro, J.M. Andreu, A. Estévez, J.E. Tent-Manclús, A. Yébenes. *Geología de Alicante*. Universidad de Alicante. 89-116.

Zenkovich, V.P. (1967). *Processes of Coastal Development*; Wiley-Interscience: New York, NY, USA, 751p.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18746

# Interpretación paleoambiental de la Albufera de Valencia a partir de asociaciones de foraminíferos bentónicos

*Paleoenvironmental interpretation of the Albufera of Valencia based on benthic foraminiferal associations*

**María Sofía Briones y Ana María Blázquez Morilla**

Instituto de Medio Ambiente y Ciencia Marina (IMEDMAR-UCV). Universidad Católica de València. , maso.briones@gmail.com; , ana.blazquez@ucv.es.

How to cite: Briones, M.S. y Blázquez, A.M. 2024. Interpretación paleoambiental de la Albufera de Valencia a partir de asociaciones de foraminíferos bentónicos. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18746

## *Abstract*

*Foraminifera are a group of marine microorganisms that are highly important in paleontology and geology, as their fossil remains can be used to date and interpret geological formations. This study aims to provide a paleoenvironmental interpretation of the Albufera de Valencia through the study of benthic foraminiferal assemblages. For this purpose, a rotary coring was carried out at a station located near the Perellonet beach inlet, and the core was systematically sampled to identify lithofacies and biofacies. The study of biofacies focused primarily on the taxonomic classification of benthic foraminifera, while the analysis of lithofacies focused on sediment grain size and morphoscopic characteristics. The latter facilitated the interpretation of changes in benthic foraminiferal assemblages along the core for subsequent paleoenvironmental interpretation. A total of 2,831 benthic foraminiferal tests were studied and classified into 5 species. The dominant species in the analyzed core are Ammonia tepida (Cushman), Haynesina germanica (Ehrenberg), and Elphidium excavatum (Terquem). This dominance varies along the core, allowing the distinction of different paleoenvironments: brackish lagoon, brackish marsh, freshwater marsh and barrier facies.*

***Keywords:*** *Foraminifera, Albufera de Valencia, Paleoenvironmental interpretation, Sedimentology.*

## *Resumen*

*Los foraminíferos son un grupo de microorganismos marinos muy importantes en paleontología y geología, ya que sus restos fósiles pueden ser utilizados para datar e interpretar formaciones geológicas. En este trabajo se pretende realizar una interpretación paleoambiental de la Albufera de Valencia a través del estudio de las asociaciones de foraminíferos bentónicos. Para ello se realizó un sondeo por rotación en una estación localizada cerca de la gola de la playa del Perellonet, cuyo testigo fue muestreado de forma sistemática con el objetivo de identificar las litofacies y las biofacies. El estudio de las biofacies se centralizó principalmente en la clasificación taxonómica de los foraminíferos bentónicos y el estudio de las litofacies se focalizó en el análisis granulométrico y morfoscópico de los sedimentos. Este último, favoreció la interpretación de los cambios producidos en las asociaciones de foraminíferos bentónicos a lo largo del testigo para la posterior interpretación paleoambiental. Se han estudiado 2831 caparazones de foraminíferos bentónicos los cuales han sido clasificados en 5 especies. Las especies dominantes en el testigo analizado son Ammonia tepida (Cushman), Haynesina germanica (Ehrenberg) y Elphidium excavatum (Terquem). Esta dominancia va variando a lo largo del testigo, lo que permite distinguir paleoambientes distintos: laguna salobre, marjal salobre, marjal dulceacuícola y facies de barrera.*

***Palabras clave:*** *Foraminíferos, Albufera de Valencia, Interpretación paleoambiental, Sedimentología.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

En los últimos años, el estudio de los medios sedimentarios costeros (playas, lagunas costeras, zona intermareal, llanuras deltaicas, etc.) ha ganado un papel muy importante. Esto es debido al aumento de la preocupación por los efectos del cambio climático y a las variaciones del nivel del mar en las zonas litorales, especialmente por su intensa ocupación. Se trata de conocer cómo han evolucionado a distintas escalas temporales para conocer su respuesta ante la amenaza del cambio global.

Numerosas zonas húmedas han sido estudiadas para este fin, como es el caso de la marjal de Almenara (Blázquez *et al*., 2017; Rodríguez-Pérez *et al*., 2018), la marjal del Moro (Blázquez *et al*., 2024), la Albufera de Valencia (López-Belzunce *et al.,* 2020, 2022), la Albufereta de Alacant (Ferrer y Blázquez, 2012), la Albufera d'Elx (Blázquez, 2005), el Bajo Segura (Blázquez y Ferrer, 2012, 2023), etc. Todas estas zonas han sido estudiadas a partir de la misma metodología, es decir, a través de sondeos mecánicos que han sido analizados desde el punto de vista sedimentario y micropaleontológico.

El objetivo de este trabajo es determinar los cambios paleoambientales a lo largo del Holoceno en la zona costera de la Albufera de Valencia, es decir, el espacio más sensible a los cambios del nivel del mar. Para ello se han utilizado los foraminíferos bentónicos como bioindicadores en un testigo de sondeo que alcanzó los 5 m de profundidad.

## 2. Área de estudio

La Albufera de Valencia es una laguna litoral situada en la costa, aislada del Mediterráneo por una restinga de 30 km que se extiende entre la desembocadura del río Turia y el cabo de Cullera (Verger e Ibor, 2016). Su forma es casi circular, de unos 6 km de diámetro máximo en su zona más ancha. Su profundidad media es de aproximadamente 1 m. Ocupa la parte central de una amplia zona húmeda, declarada Parque Natural, que se extiende entre los ríos Turia y Júcar, con una extensión aproximada de 223 $km^2$ y que, en su mayor parte, se encuentra dedicada al cultivo del arroz. La comunicación de la laguna con el mar se lleva a cabo por tres canales o "golas" donde el flujo de agua es regulado por compuertas que mantienen el nivel de la laguna en los valores más adecuados para el cultivo de arroz.

## 3. Materiales y Métodos

Se realizó un sondeo mecánico (Sal 6) a unos 250 m de la gola del Perellonet y a unos 600 m de la línea de costa actual (39º18'80"N 0º17'43"). En ese punto se extrajo un testigo de unos 15 cm de diámetro, obtenido por un sistema de rotación, que llegó a una profundidad de 5 m. De los 5 m de testigo se obtuvieron 48 muestras de manera sistemática cada 10 cm. Una vez recogidas y enumeradas las muestras, se inició el trabajo de laboratorio.

El proceso comenzó secando las muestras en una estufa a 80ºC durante 24-48 horas. Una vez obtenidas las muestras secas, se procedió al pesado y a la clasificación por color mediante las tablas de Munsell.

A continuación, se realizó el análisis granulométrico a partir de la separación de texturas más gruesas (cantos y gravas) de las más finas (arenas, limos y arcillas), mediante el proceso de levigado, tras sumergirlas en agua 24 h. Los sedimentos fueron lavados por un tamiz de 0,063 mm de luz con el objetivo de separar la fracción limoarcillosa de la fracción de arena. Obtenida la muestra resultante, se procedió a su secado para calcular el peso final. Para separar la fracción de arena de la fracción de cantos y gravas se utilizó un tamiz de 2 mm de luz, pesando por separado el resultado. Se calculó la proporción de cada fracción a partir del peso total de la muestra utilizada.

A partir de la lupa binocular y con una bandeja micropaleontológica, la arena fue observada para la identificación de litoclastos y bioclastos; entre estos últimos, especialmente los foraminíferos y los ostrácodos fósiles. Se extrajeron caparazones de foraminíferos de 14 muestras.

A partir de la fracción arenosa se extrajeron los foraminíferos y se adhirieron, clasificados por especies, en un portaforaminíferos. A continuación, se pesó la parte del sedimento que había sido triada para calcular la

 BY-NC-SA

densidad de foraminíferos en cada muestra. Los foraminíferos fueron clasificados de acuerdo con dos fuentes: la base de datos online "Word Foraminifera Database", que forma parte de la "Worlds Register of Marine Species" (WoRMS Editorial Board, 2023), que se basa principalmente en los estudios genéticos moleculares (Pawlowski *et al*., 2013) y en la clasificación sistemática de los foraminíferos realizada por Loeblich y Tappan (1988).

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1. Unidades paleoambientales

A continuación, se detallan los distintos paleoambientes inferidos en el sondeo Sal6 a través del estudio sedimentológico y micropaleontológico de las muestras. Se han estudiado un total de 2.831 caparazones, que han sido clasificado en 5 especies del orden Rotaliida. Las especies más abundantes son *Ammonia tepida* (Cushman) (72,20%), *Haynesina germanica* (Ehrenberg) (24,76%), *Elphidium excavatum* (Terquem) (2,30%), *Trichohyalus aguayoi* (Bermúdez) (0,60%) y *Ammonia beccari* (Linné) (0,14%).

El contenido sedimentológico y micropaleontológico de las muestras ha permitido distinguir 4 unidades paleoambientales, que de base a techo son: la Unidad I, la Unidad II (con subunidades a, b, c), la Unidad III y la Unidad IV (Fig. 1). Los índices de diversidad, dominancia y equidad de los foraminíferos calculados figuran en la Tabla 1.

- **Unidad I**

La Unidad I se extiende entre - 5 m y – 4 m y comprende un total de 12 muestras (49-37). En esta unidad predominan las texturas limoarcillosas. Las arenas presentan unos valores que van aumentando hacia techo. Los cantos y gravas prácticamente están ausentes en esta unidad.

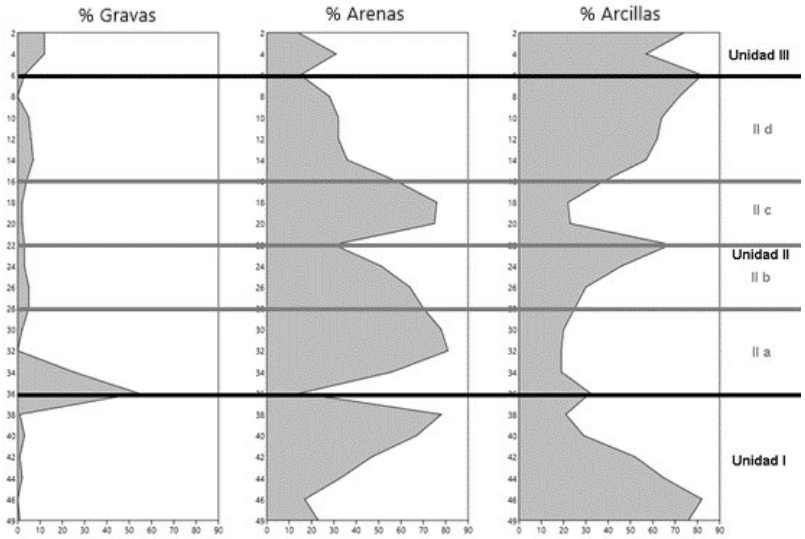



***Figura 1:*** *Resultados granulométricos de las muestras del sondeo Sal 6.*
*Número de muestras en el eje de abscisas y % del sedimento en el eje de ordenadas. Fuente: Elaboración propia*

En cuanto al contenido biogénico se observa la presencia de ostrácodos de aguas salobres (*Cyprideis torosa* Jones, en algunos casos articulados), bivalvos y gasterópodos (*Hydrobia* sp.). Las especies de foraminíferos dominantes en esta unidad son *A. tepida* y *H. germanica*; su número va disminuyendo hacia techo (muestra 36). Se consideran autóctonas por su estado de conservación.

Los resultados de los índices observados en la Tabla 1 indican en esta unidad una diversidad baja (valor medio de 0,433), una dominancia alta (0,737), debido a que solo hay 2 especies y 1200 individuos, y una equidad de 0,624, lo que indica que las especies son menores en igualdad de abundancia.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

***Tabla 1:*** *Índices medios de diversidad, dominancia y equidad de foraminíferos. Fuente: Elaboración propia*

| Índices | Unidad I | Subunidad IIb | Unidad III |
|---|---|---|---|
| Individuos | 1200 | 600 | 1000 |
| S | 2 | 4 | 5 |
| H = In. Div. Shannon | 0,433 | 0,873 | 0,821 |
| D = In. Dom. Simpson | 0,737 | 0,480 | 0,511 |
| J = In. Equidad | 0,624 | 0,630 | 0,510 |

- **Unidad II**

La Unidad II se extiende entre – 3,9 m y –1 m y comprende un total de 20 muestras (36-16). Está compuesta por las 3 subunidades siguientes, donde son dominantes las arenas de cuarzo:

- Subunidad IIa. Las especies de foraminíferos predominantes en esta subunidad son *A. tepida, H. germanica, E. excavatum* y *A. beccari*. Destacan los cantos y las gravas en la base.
- Subunidad IIb. Las especies de foraminíferos dominantes en esta subunidad son *A. tepida, H. germanica, E. excavatum* y, en menor cantidad, *T. aguayoi*.
- Subunidad IIc. Las especies de foraminíferos obtenidas en esta subunidad son *A. tepida* y *H. germanica*.

Los resultados de los índices de diversidad, reflejados en la Tabla 1, indican una diversidad alta en la Subunidad IIb (valor medio de 0,873). Se observa una dominancia prácticamente homogénea en esta unidad (0,480) y se registra una equidad de 0,630, lo que muestra cierta homogeneidad en la frecuencia de las especies. En las subunidades IIa y IIc no fue posible el cálculo de los índices debido a la baja abundancia de caparazones.

Todas las especies halladas se consideran autóctonas por su estado de conservación, excepto *A. beccarii* que muestra señales de rodamiento en la subunidad IIa.

- **Unidad III**

La Unidad III se extiende entre – 1,8 m y – 1 m y comprende un total de 10 muestras (15-6). Predominan los limos y arcillas, las cuales van aumentando progresivamente hacia techo. Los cantos y gravas prácticamente están ausentes en esta subunidad. En cuanto al contenido biogénico se observa la presencia de una mayor cantidad de ostrácodos articulados (*C. torosa*), y gasterópodos (*Hydrobia* sp.), de aguas salobres. Las especies de foraminíferos encontradas en esta unidad son *A. tepida, H. germanica, E. excavatum* y, en menor cantidad, *T. aguayoi* y *A. beccarii*. Se consideran autóctonas por su estado de conservación, a excepción de *A. beccari* que presenta señales de transporte. Los resultados de los índices de diversidad (Tabla 1), indican una diversidad con un valor de 0,821. Además, se observa una dominancia prácticamente homogénea, con un valor medio de 0,511 y una equidad con un valor medio de 0,510.

- **Unidad IV**

La Unidad IV se extiende desde 0,9 m hasta el techo y comprende un total de 5 muestras (5-1). En esta unidad predominan las texturas limoarcillosas. Las arenas tienen valores en torno al 30% y los cantos y gravas tienen valores muy bajos. En cuanto al contenido biogénico no hay apenas presencia de foraminíferos, ostrácodos o gasterópodos. Se identifican ostrácodos de agua dulce. Los resultados de los índices de diversidad no se han contemplado, ya que solo hay 2 especies y 3 individuos. Se consideran alóctonas por el estado de conservación.

### 4.2. Interpretación paleoambiental

Las características sedimentológicas y micropaleontológicas permiten distinguir cuatro paleoambientes en el sondeo Sal 6 (Fig. 2).

La Unidad I, se interpreta como una laguna salobre “brackish lagoon”. Los sedimentos finos y la asociación identificada de foraminíferos permiten inferir el paleoambiente lagunar de agua salobre sin comunicación


BY-NC-SA

marina (*A. tepida* y *H. germanica*). Los índices calculados corroboran esta interpretación. La base de esta unidad indica una edad por $^{14}C$ de 7273-7156 cal yr BP (muestra 44).

La Unidad II se ha interpretado como una "backbarrier flat", es decir, la parte interna de la barrera que contacta con una laguna, donde se reconocen especies de foraminíferos de aguas salobres y marinas. Se trata de un medio dominado por las arenas de cuarzo, las cuales presentan una oscilación a lo largo del testigo. La variación en el contenido de arena, la presencia de caparazones autóctonos y los cambios en la densidad de foraminíferos han permitido dividir esta unidad en tres subunidades. En general, cuando aumenta el porcentaje de arena disminuye el contenido en foraminíferos. En la Subunidad IIa hay un aumento del tamaño de grano (presencia de cantos y gravas) y no se aprecia la asociación de foraminíferos salobres, por lo que se deducen condiciones de emersión de la barrera. Como señalan algunos autores (Sabatier *et al*., 2008), esto puede ser debido a eventos puntuales de tormentas ("washover fan") o podría ser el resultado de una pequeña migración de la barrera hacia la laguna. En cualquier caso, el nivel del agua de la laguna disminuye en esta subunidad y la barrera, por un mecanismo u otro, la invade. En la Subunidad IIb hay un aumento de limos y arcillas y una disminución de arenas hacia techo y, además, se recuperan las especies de aguas salobres (*A. tepida, H. germanica, E. excavatum*). Aparece de manera puntual *T. aguayoi*, lo que corrobora, junto a la asociación dominante, la interpretación de la recuperación de la laguna salobre. En la Subunidad IIc vuelven a darse las condiciones de la Subunidad IIa, es decir, la densidad de foraminíferos disminuye de forma muy notable y dominan las arenas, lo que indicaría de nuevo la dominancia de facies de barrera. En la subunidad IIc, una datación del $^{14}C$ indica una edad de 2190 cal yr. BP (muestra 19).

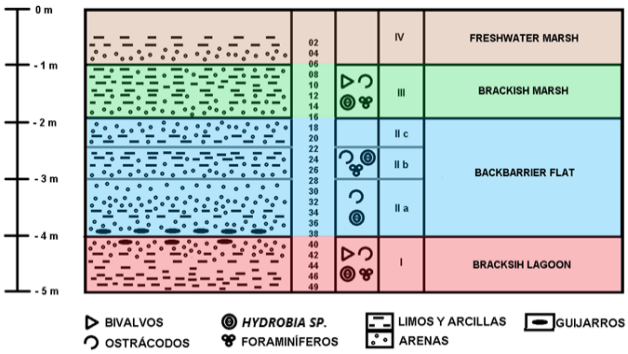



***Figura 2.*** *Unidades paleoambientales del sondeo Sal 6. Fuente: Elaboración propia*

La Unidad III se ha interpretado como un marjal salobre. En esta unidad la marjal es totalmente estable y no sufre invasión de las arenas de la barrera, al menos en el punto de sondeo. Destaca de forma notable el porcentaje de limos y arcillas y una mayor diversidad de especies de foraminíferos de aguas salobres. Hay que destacar la presencia de la especie *T. aguayoi*, asociada de forma frecuente a marjales y albuferas actuales (Guillem Martínez, 2007). Finalmente, la Unidad IV muestra un marjal totalmente dulcificado. Está dominada por limos y arcillas y no hay presencia de foraminíferos u ostrácodos salobres autóctonos. La presencia de restos de macrófitas y carbón indican un cambio respecto a la unidad anterior.

Respecto a la causa de los cambios ambientales, varios autores (López-Belzunce *et al*., 2020, López-Belzunce *et al*., 2022) indicaron la misma secuencia descrita en este estudio en la zona NW de la Albufera, donde la laguna salobre se registra entre el 8200 cal yr. BP. y 1000-1200 d.C. Las invasiones de la laguna por parte de sedimentos de la barrera pueden obedecer a episodios puntuales de alta energía ligado con temporales o a períodos más largos donde la zona litoral dispone de más sedimentos como consecuencia del mayor *input* sedimentario, relacionado con mayores inundaciones fluviales. Cambios rápidos y drástico de la temperatura global pueden explicar estos episodios (Cacho *et al*., 2001; Moberg *et al*., 2005).

El cambio paleoambiental más importante se produce cuando la laguna salobre pasa a ser un marjal dulceacuícola, ya que indica la total desconexión marina y la colmatación parcial de la misma. Los escasos

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

foraminíferos son caparazones mal conservados y son los ostrácodos de agua dulce los que permite inferir este paleoambiente. Este cambio al paisaje actual se registra en la zona norte de la Albufera de Valencia en el siglo XII d.C. (Carmona *et al.*, 2016). El impacto humano más intenso ocurre por la expansión agrícola y el fuerte control hidrológico de la laguna, lo que contribuyó sin duda a la dulcificación de la laguna.

## 5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las especies dominantes de foraminíferos son A. *tepida, H. germanica, E. excavatum*, *T. aguayoi* y *A. beccarii*. Presentan una muy buena conservación en todo el testigo (autóctonos), salvo en el caso de la especie *A. beccarii*, de aguas marinas, la cual se interpreta como alóctona.
- El análisis granulométrico de las muestras ha mostrado una clara dominancia de limos y arcillas en facies de marjal y de laguna, mientras que las arenas predominan en facies de "backbarrier flat", relacionada con la barrera. Los cantos y gravas son escasos a lo largo del testigo, salvo en las subunidades interpretadas como parte de la barrera y se asocian a episodios de alta energía.
- Los análisis sedimentológicos y micropaleontológicos permiten identificar cuatro unidades paleoambientales en el sondeo Sal 6 de la Albufera de Valencia, que de base a techo son: Laguna salobre, "backbarrier flat", marjal salobre y marjal dulceacuícola.

## 6. Referencias

Blázquez, A. (2005). *Evolución cuaternaria de l'Albufera d'Elx: Paleoambientes y foraminíferos fósiles*, 1º Edición, Alicante: Memorias del Museo Paleontológico de Elche.

Blázquez, A., López-Belzunce, M., Rodríguez-Pérez, A.E., Guillem, J., Ferrer, C., Nieto, M., Torres, T. & Ortiz, J.E. (2024). The role of the Holocene transgression in the environmental changes of lagoons and marshes of the Mediterranean coast. *Marine Geology*, 471, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107286

Blázquez, A. & Ferrer, C. (2012). Role of human actions on landscape changes since the Upper Holocene in the Bajo Segura Basin. *Catena*, 97, 31-40. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.010

Blázquez, A.M., Rodríguez-Pérez, A., Torres, T. & Ortiz, J.E. (2017). Evidence for Holocene Sea level and climate change from Almenara marsh (western Mediterranean). *Quaternary Research*, 88 (2), 206–222. https://doi.org/10.1017/qua.2017.47.

Cacho, I., Grimalt, J., Canals, M., Sbaffi, L., Shackleton, N., Schonfeld, J. & Zahn, R. (2001). Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25,000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 16, 40-52. https://doi.org/10.1029/2000PA000502

Carmona, P., Ruíz, J., Blázquez, A., López Belzunce, M., Riera, S., & Orengo, H. (2016). Environmental evolution and mid-late Holocene climate events in the Valencia lagoon (Mediterranean coast of Spain). *The Holocene*, 26, 1750-1765. https://doi.org/10.1177/0959683616645940

Guillem Martínez, J. (2007). *Tafonomía, taxonomía y ecología de los foraminíferos de la Albufera de Torreblanca*. Tesis doctoral, Universidad de Valencia, Valencia.

Loeblich, A. R. & Tappan, H. (1988). *Foraminiferal Genera and Their Classification*, 1º Edición, New York: Springer New York.

López-Belzunce, M., Blázquez, A.M., Carmona, P. & Ruiz, J.M. (2020). Multi proxy analysis for reconstructing the late Holocene evolution of a Mediterranean Coastal Lagoon: Environmental variables within foraminiferal assemblages. *Catena* 187, 104333. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151230

López-Belzunce, M., Blázquez, A.M., Sánchez-Palencia, Y., Torres, T. & Ortiz, J.E. (2022). Environmental evidence of Valencia Lagoon coastal barrier stabilization from 8500 BP to present. Climate and

 BY-NC-SA

eustatic variations. Sci. Total Environ. (STOTEN) *Environment Science,.* 807 (2), 151230 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151230.

Moberg, A., Sonechkin, D., Holmgren, K., Datsenko, N. M., Karlén, W. & Lauritzen, S. E. (2005). Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433, 613-617. https://doi.org/10.1038/nature03265

Pawlowski, J., Holzmann, M. & Tyszka, J. (2013). New supraordinal classification of Foraminifera: Molecules meet morphology. *Marine Micropaleontology*, 100, 1- 10. https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2013.04.002

Rodríguez-Pérez, A. (2017). *Evolución holocena del Marjal de Almenara: cambios eustáticos y climáticos.* Tesis Doctoral, Universidad Católica de Valencia, Valencia.

Rosselló I Verger, V. M. & Sanchis Ibor, C. (2016). "La génesis de l'Albufera de Valencia", en: J. F. Mateu Bellés, *El territorio valenciano. Tranformaciones ambientales y antrópicas*, Valencia: Publicacions de la Universitat de València 121-124.

Sabatier, P., Dezileau, L., Condornines, M., Briqueu, L., Colin, C., Bouchette, F. & Clanchemanche, P. (2008). Reconstruction of paleostorm events in a coastal lagoon (Hérault, South of France). *Marine Geology,* 251, 224-232. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.03.001

WoRMS Editorial Board (2023). World Register of Marine Species. Disponible en: https://www.marinespecies.org/ [Consulta: 25-05-23]

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18673

# Optimización de parámetros morfométricos para caracterizar las playas encajadas de la costa mediterránea peninsular

*Optimisation of morphometric parameters for the characterisation of the Mediterranean peninsular embayed beaches.*

**Amanda Sancho-García[a], Gonzalo Simarro[b], Laura Lambarri[a], Lorena Expósito[a], Ana Carlota Rodríguez-Gómez[a], Jorge Guillén[b] y Ruth Durán[b]**

[a]Instituto de Medio Ambiente y Ciencia Marina, Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir (IMEDMAR-UCV); (, amanda.sancho@ucv.es, , lalamgo@mail.ucv.es, , loexlo@mail.ucv.es, , anacarlota.rodriguez@mail.ucv.es)
[b]Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC)(, simarro@icm.csic.es, , jorge@icm.csic.es, rduran@icm.csic.es ).

How to cite: Sancho-García, A.; Simarro,G.; Lambarri, L.; Expósito, L.; Rodríguez-Gómez, A.C.; Guillén, J. y Durán, R. 2024. Optimización de parámetros morfométricos para caracterizar las playas encajadas de la costa mediterránea peninsular. En el libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18673

***Abstract***

*The study of the morphology of the embayed beaches is crucial to determine their morphodynamic characteristics and their evolution in the context of the climate change. The large number of embayed beaches on the Spanish Mediterranean coast requires a holistic approach. This work presents an analysis of the variability of morphometric parameters of 203 embayed beaches in Catalonia, Valencian Community and Murcia Region using Principal Component Analysis (PCA). The results show that the combination of the parameters* $S_l/R_0$, $Xd/S_l$, $\frac{a}{\sqrt{Ae}}$, $a/S_l$ *best captures the variability of the beaches studied. The first two modes of this combination of parameters explain 96.82% of the variability of the morphological characteristics of the beaches. This methodology allows a more robust classification of the embayed beaches in this area because it integrates a higher volume of information.*

***Keywords:*** *embayed beaches, Mediterranean coast, morphological parameters, Principal Component Analysis (PCA).*

***Resumen***

*El estudio de la morfología de las playas encajadas es de vital importancia para determinar sus características morfodinámicas y su evolución frente a los potenciales efectos del cambio climático. El elevado número de playas encajadas existente en la costa mediterránea española requiere que se aborde su clasificación desde una perspectiva integral. En este estudio se presenta un análisis de la variabilidad de los parámetros morfométricos de 203 playas encajadas de Cataluña, Comunidad Valenciana y Región de Murcia mediante un Análisis de Componentes Principales. Los resultados muestran que la combinación de los parámetros* $S_l/R_0$, $Xd/S_l$, $\frac{a}{\sqrt{Ae}}$, $a/S_l$ *es la que mejor captura la variabilidad de las playas estudiadas. Trabajando con esta combinación de parámetros, los dos primeros modos permiten explicar el 96.82% de la variabilidad de las características morfológicas de las playas estudiadas. La metodología aplicada permite una clasificación más robusta de las playas encajadas respecto a los parámetros utilizados con anterioridad puesto que integra una mayor cantidad de información.*

***Palabras clave:*** *playas encajadas, costa mediterránea, parámetros morfométricos,* Análisis de Componentes Principales (ACP).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Las playas encajadas se caracterizan por estar limitadas lateralmente por barreras físicas como cabos o promontorios, si bien también existen playas encajadas artificiales como respuesta a las obras de protección costera. Se ha sugerido la utilización de varios parámetros para la clasificación de las playas encajadas basados en diferentes criterios (Fellowes et al., 2019). Actualmente, no existe ningún estudio que haya abordado de manera integral la caracterización de las playas encajadas de carácter micromareal, y, en particular, del frente mediterráneo español, aunque son varios los trabajos que describen los parámetros morfométricos de playas encajadas en zonas específicas de la costa mediterránea española: Cataluña (Bowman et al., 2009), Comunidad Valenciana (Expósito, 2019), Región de Murcia (Lambarri et al., 2022) y Baleares (Gómez-Pujol et al., 2013). El objetivo del presente estudio es la determinación de la variabilidad de los parámetros morfométricos de las playas encajadas de Cataluña, Comunidad Valenciana y Región de Murcia mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP) que permita determinar cuáles son los conjuntos de parámetros morfométricos que mejor las caracterizan y compararlos con los parámetros utilizados en trabajos previos.

## 2. Área de estudio

El área de estudio comprende las playas encajadas naturales y artificiales de la vertiente mediterránea peninsular desde Cataluña a la Región de Murcia caracterizada por su régimen micromareal (< 20 cm) (Fig. 1). El estudio abarca 1491 km de línea de costa (IGN, 2024) que incluye 972 playas (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020) de las cuales en este trabajo se han estudiado un total de 203 playas encajadas (53 en Cataluña, 72 en la Comunidad Valenciana y 78 en la Región de Murcia). Estas playas encajadas son las más representativas de la zona de estudio (puntos amarillos de la Fig. 1).

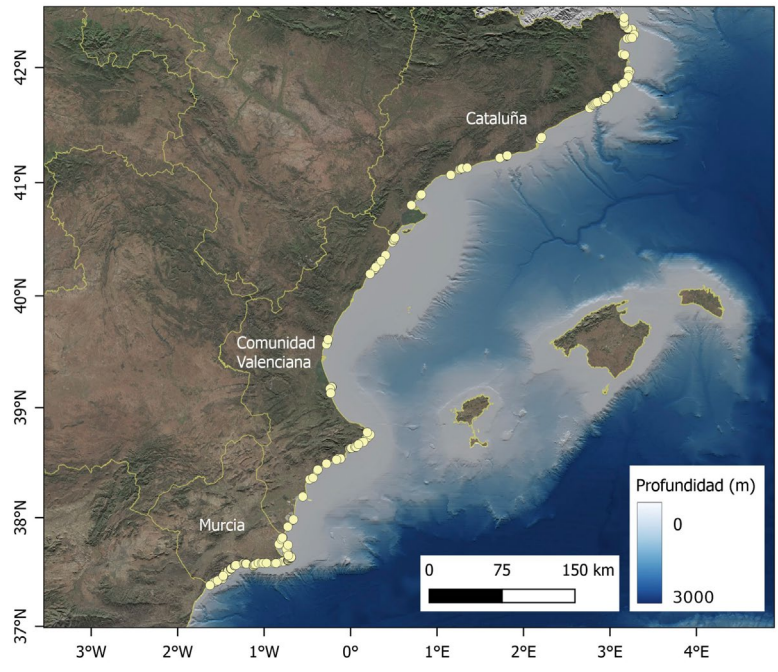



***Fig 1.*** *Zona de estudio. Los puntos amarillos indican la localización de las playas estudiadas. La topografía y ortofoto son del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2024), la batimetría de EMODnet (2024) y la carta batimétrica de El mar Catalano-Balear* (2005).

## 3. Metodología

Los parámetros morfométricos de las playas estudiadas se obtuvieron a partir de imágenes de satélite utilizando las imágenes y herramientas (medida, polígono y brújula) de Google Earth para Cataluña y Comunidad Valenciana

 BY-NC-SA

y el programa de ArcMap 10.4.1.Ink con las imágenes de fotografía aérea del World Imagery Metadata para la Región de Murcia, siguiendo en ambos casos la metodología establecida por Fellowes et al., (2019). El listado de playas se obtuvo del Llibre Verd (Instituto Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2010) para Cataluña, del Estudio de las Ecocartografía del Litoral para la Comunidad Valenciana (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2006) y de la Guía de playas (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020) para la Región de Murcia.

Para cada playa se obtuvieron las siguientes medidas (Fig. 2): distancia entre promontorios ($R_0$), longitud de la playa (*Xd*), hendidura de la bahía (*a*), longitud total de línea de costa de la bahía ($S_l$), y área total de la bahía incluyendo el área de la playa (*Ae*). La combinación de estas medidas genera los parámetros morfométricos que se utilizan en el análisis.

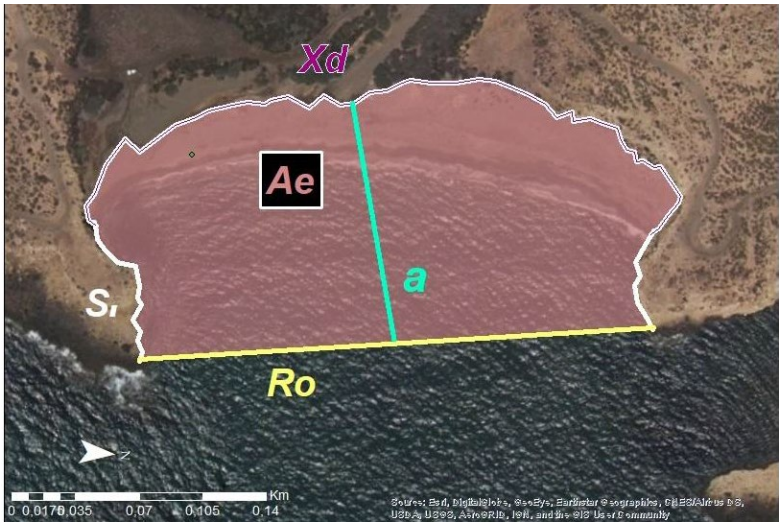



***Fig 2.*** *Parámetros morfométricos analizados.*

Para aplicar el Análisis de Componentes Principales se aplicó previamente un análisis dimensional de forma que las cinco medidas dimensionales pueden reducirse a ciertos conjuntos de cuatro grupos adimensionales. Entre los posibles grupos adimensionales que pueden formarse y que se analizaron aparecen de forma natural: $Si/R_0$ de Spagnolo et al. (2008), el índice de relleno sedimentario *Xd*/*Si* de Bowman et al., (2009), el parámetro morfométrico $\gamma_e = a/\sqrt{Ae}$ de Fellowes et al., (2019) o el parámetro adimensional $a/S_l$. La combinación de estos cuatro parámetros permite: (1) caracterizar la interacción de los diferentes agentes que actúan mediante el parámetro $S_l/R_0$ permitiendo conocer la variabilidad espacial dentro de un tramo costero (a mayor variabilidad de este parámetro, más agentes actuando); (2) identificar las zonas con carencias sedimentarias mediante mediante $Xd/S_l$ (si es menor a 0.5 sugiere un déficit sedimentario); (3) el grado de indentación mediante el parámetro $\frac{a}{\sqrt{Ae}}$ (a mayor valor de este parámetro, mayor grado de indentación/encajamiento).

## 4. Resultados y discusión

Del total de playas analizadas, 124 son playas naturales y 79 artificiales. De forma general, las playas encajadas artificiales presentan una mayor extensión tanto en longitud como en área.

**Tabla 1.** *Valores promedio de los parámetros morfométricos de las playas encajadas*

| Tipo de playa encajada | $R_0$(m) | *a* (m) | *Xd* (m) | $S_l$ (m) | $\sqrt{Ae}$ (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| Natural | 344.59 | 176.79 | 398.02 | 710.41 | 205.77 |
| Artificial | 435.35 | 234.63 | 580.46 | 923.64 | 299.42 |
| Todas | 379.91 | 199.30 | 469.02 | 793.80 | 242.22 |

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Los resultados obtenidos del ACP para las diferentes combinaciones de cuatro parámetros morfométricos adimensionales se presentan en la tabla 2. La combinación formada por $S_l/R_0$, $Xd/S_l$ ,$\frac{a}{\sqrt{Ae}}$ y $a/S_l$ es la que mejor explica la variabilidad de las playas estudiadas. El primer modo (o componente) explica el 83.32% de la variabilidad, el segundo el 13.5%, el tercero 2.81% y el cuarto 0.38%. Así, entre el modo 1 y el modo 2 estos cuatro parámetros permiten explicar el 96.82% de la variabilidad de las características morfológicas de las playas estudiadas. Cabe señalar que el índice de la forma en planta ($a/R_0$) de Hsu et al., (1989) combinado con los otros tres índices no mejoraba (96.23%) los resultados obtenidos con la combinación anterior (Tabla 2).

**Tabla 2.** *Variabilidad explicada, en porcentaje, para las diferentes combinaciones analizadas de parámetros morfométricos adimensionales para cada modo (o componentes).*

| | Modo 1 | Modo 2 | Modo 3 | Modo 4 |
|---|---|---|---|---|
| $\frac{S_l}{\sqrt{Ae}}$, $Xd/S_l$, $a/S_l$ $a/R_0$ | 87.2% | 7.11% | 4.95% | 0.74% |
| $S_l/R_0$, $Xd/S_l$, $\frac{a}{\sqrt{Ae}}$, $a/S_l$ | 83.32% | 13.5% | 2.81% | 0.38% |
| $S_l/R_0$, $Xd/S_l$, $\frac{a}{\sqrt{Ae}}$, $a/R_0$ | 79.18% | 17.05% | 3.49% | 0.28% |
| $S_l/R_0$, $\frac{Xd}{\sqrt{Ae}}$, $a/S_l$, $a/R_0$ | 48.58% | 35.19% | 14.55% | 1.68% |

Por tanto:

$$S_l\ /R_0, Xd/S_l\ , \frac{a}{\sqrt{Ae}}, a/S_l\ = \ media\ +\ c_1 \cdot modo\ 1\ + c_2 \cdot modo\ 2 \qquad (1)$$

De esta manera, a partir de los valores promedio, los valores de los modos 1 y 2 (tabla 3) y sus correspondientes coeficientes obtenidos para las diferentes playas estudiadas se pueden clasificar según los coeficientes $c_1$ y $c_2$ tal y como se observa en la Fig. 3.

**Tabla 3.** *Parámetros adimensionales: valores promedio y primer y segundo modo.*

| | $S_l/R_0$ | $Xd/S_l$ | $\frac{a}{\sqrt{Ae}}$ | $a/S_l$ |
|---|---|---|---|---|
| Media | 1.405 | 2.133 | 0.876 | 0.586 |
| Modo 1 | -0.256 | 0.929 | 0.079 | 0.256 |
| Modo 2 | -0.953 | -0.223 | -0.187 | -0.085 |

En la Fig. 3 se presentan los coeficientes $c_1$ y $c_2$ para los cuatro parámetros adimensionales seleccionados, destacándose en amarillo las playas naturales. Como se puede observar en la figura, no existen grandes diferencias entre las playas encajadas artificiales y naturales. Además, la distribución de la mayoría de las playas respecto a los dos coeficientes presenta una cierta continuidad, salvo el caso de cuatro playas encajadas artificiales: la playa La Fragata (Sitges, Barcelona), la playa de las Fuentes (Alcalá de Xivert, Castellón) y la Playa de l'Estany de Cullera, playas con un grado de encajamiento muy elevado, y, en el otro extremo, la Cala de las Melvas (Cartagena, Murcia) (Fig. 3).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

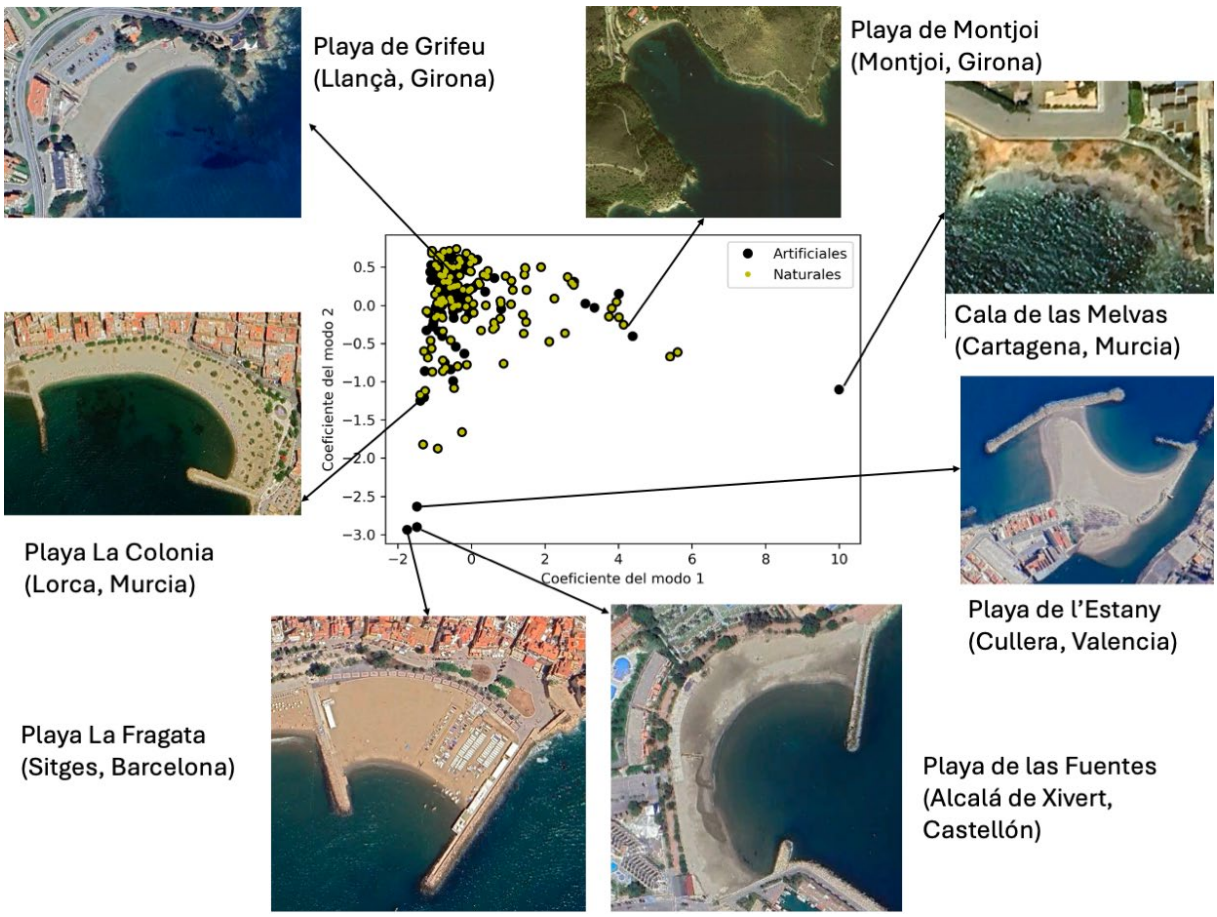



***Fig 3.*** *Representación de las playas encajadas respecto a los coeficientes del modo 1 y del modo 2.*

## 5. Conclusiones

El Análisis en Componentes Principales permite clasificar las playas encajadas a partir de su aplicación a una combinación de cuatro parámetros morfométricos adimensionales. En el caso de las playas encajadas (artificiales y naturales) de la costa mediterránea peninsular (Cataluña, Comunidad Valenciana y Región de Murcia), la combinación $S_l/R_0$, $Xd/S_l$ ,$\frac{a}{\sqrt{Ae}}$ y $a/S_l$ es la que permite capturar de forma óptima la variabilidad existente. Los coeficientes de los modos 1 y 2 (variabilidad del 96,23%) obtenidos para cada una de las playas, muestran una distribución continua de las playas entre los dos coeficientes, no observándose diferencias notables entre las playas artificiales y naturales, a excepción de cuatro playas artificiales con un grado de encajamiento de valores extremos. La aplicación de esta metodología ha permitido determinar de forma eficiente cuales son los parámetros óptimos para la clasificación de las playas encajadas en la costa mediterránea peninsular.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos "Resolviendo carencias de conocimiento críticas para mejorar las proyecciones morfodinámicas de costas bajas en el siglo XXI: observaciones (MOLLY-OBS)". Agencia Estatal de Investigación, Proyectos I+D+i «Proyectos de Generación de Conocimiento» en el marco del Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023 (PID 2021-124272OB-C21) y del proyecto SOLDEMOR (TED2021-130321B-I00) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades - Agencia Estatal de Investigación y EU "NextGenerationEU/PRTR".

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 7. Referencias

Bowman, D., Guillén, J., & Pellegrino, V. (2009). Planview geometry and morphological characteristics of pocket beaches on the Catalan coast (Spain). *Geomorphology*, 108, 191-199. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.005

El mar Catalano-Balear. (2005). *Mapa batimétrico* http://gma.icm.csic.es/sites/default/files/geowebs/MCB/CBSbats_cat.htm

European Marine Observation and Data Network, EMODnet. (2024). (s.f.). Recuperado el 23 de abril de 204, https://emodnet.ec.europa.eu/en

Expósito, L. (2019). Características morfológicas de las playas encajadas de la Comunidad Valencia. Trabajo Fin de Grado. Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir.

Fellowes, T., Vila-Concejo, A., y Gallop, S. L. (2019). Morphometric classification of swell-dominated embayed beaches. *Marine Geology*, 411, 78-87. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.02.004

Gómez-Pujol, L., Gelabert, B., Fornós J.J., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Segura, F. S., & Onac, B.P. (2013). Structural control on the presence and character of calas: Observations from Balearic Islands limestone rock coast macroforms. *Geomorphology,* 194, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.012

Hsu J.R.C, Silvester, R. & Xia Y.M. (1989). Generalities on Static Equilibrium Bays. *Coastal Engineering,* 12, 353-369. https://doi.org/10.1016/0378-3839(89)90012-4

Instituto Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2010). *Llibre verd de l'Estat de la zona costanera a Catalunya* Recuperado de Libro verde del Estado de la zona costera de Catalunya, 2010. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (icgc.cat)

Instituto Geográfico Nacional Datos Geográficos y Toponimia.(s.f.). Recuperado el 23 de abril de 2024, https://www.ign.es/web/ign/portal/ane-datos-geograficos/-/datos-geograficos/datosGenerales?tipoBusqueda=longCosta

Instituto Geográfico Nacional (s.f.). *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).* Recuperado el 23 de abril de 2024, https://pnoa.ign.es/web/portal/inicio

Lambarri, L., Sancho-García, A. & Guillén, J. (2022). Características morfológicas de las playas encajadas de la Región de Murcia. *XII Jornadas de Geomorfología Litoral*. Santiago de Compostela.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Ecocartografía del litoral de las provincias de Alicante, Valencia y Castellón*. Recuperado el 20 de noviembre de 2020. https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/ecocartografias/

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Guía de playas*. Recuperado el 30 de noviembre de 2020. https://www.idee.es/csw-codsi-idee/srv/spa/catalog.search#/search?resultType=details&sortBy=relevance&any=playas&from=1&to=20

Spagnolo, M., Arozarena, I., Pappalardo, M. & Roberto, P. (2008). A New Approach for the Study of the Coast Indentation Index. *Journal of Coastal Research*, 24(6), 1459–1468. https://doi.org/10.2112/07-0880.1

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

GEOLIT

# SESIÓN 5



XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18667

# Beach response to sea-level rise for equilibrium shoreline modelling: understanding the wave reshaping

**Maurizio D'Anna[a], Sean Vitousek[b], Bruno Castelle[c], Deborah Idier[d], Francesca Ribas[a], Albert Falqués[a], Giovanni Coco[e], Marissa Yates[f] and Goneri Le Cozannet[d]**

[a]Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), , maurizio.d.anna@upc.edu; , francesca.ribas@upc.edu; , albert.falques@upc.edu; [b]US Geological Survey, , svitousek@usgs.gov; [c]University of Bordeaux, , bruno.castelle@u-bordeaux.fr; dBRGM, , [d].idier@brgm.fr, , g.lecozannet@brgm.fr ; [e]University of Auckland, , g.coco@auckland.ac.nz; and [f]Ecole des Ponts ParisTech, , marissa.yates@enpc.fr.

How to cite: D'Anna, M.; Vitousek, S.; Castelle, B.; Idier, D.; Ribas, F.; Falqués, A.; Coco, G.; Yates, M. & Le Cozannet, G. 2024. Beach response to sea level rise for equilibrium shoreline modelling: understanding the wave reshaping. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024.
https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18667

***Abstract***

*With climate change and accelerating sea-level rise (SLR), long-term predictions of shoreline evolution are crucial to assess climate adaptation plans in coastal areas. Meanwhile, knowledge gaps in the physics of shoreline response to the combined action of waves and SLR hinder making reliable long-term shoreline projections. Equilibrium beach theory states that a beach profile shape equilibrates with its local wave and sea-level conditions. In the context of equilibrium beach theory, we present a physical interpretation of beach response to SLR that leads to the identification of two main contributing processes: passive flooding and increased wave-driven erosion efficiency (i.e. wave reshaping effect). Using this new interpretation, we analyze data from existing laboratory studies that measured the equilibrium beach response to controlled SLR and wave conditions. The data indicate a clear relationship among the analyzed variables, corroborating the potential of the proposed concept, and improving the understanding of shoreline response to SLR. Our results support the integration of SLR-driven recession into equilibrium shoreline models for future studies, making a step towards the development of a generalized equilibrium shoreline model.*

***Keywords:*** *Equilibrium shoreline modelling; sea-level-rise-driven shoreline change; wave reshaping; wave-sea level interaction.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

Global mean sea-level rise will accelerate over the next 100 years, exposing many coastal regions to chronic flooding (Magnan et al., 2019). Sandy beaches often act as buffers against coastal flooding, yet they are highly vulnerable to short-term and long-term erosion due to waves and SLR, respectively (Toimil et al., 2020). However, existing knowledge gaps in the physical processes governing shoreline change render shoreline prediction - especially beyond annual time scales - one of the current greatest challenges of coastal science (Ranasinghe, 2020). Shoreline response to SLR occurs on time scales of decades and centuries as a result of the cumulative effects of interactions among SLR and shorter-term hydrodynamic processes (e.g. waves), sediment supply and accommodation space (Cooper et al., 2020). Thus, understanding the complex interactions between SLR and wave action is a fundamental step to improve the predictability of multi-decadal shoreline evolution in the context of climate change.

Equilibrium beach theory states that a beach profile shape equilibrates with its local wave and sea-level conditions, and showed to be a viable approach to model wave-driven cross-shore shoreline change from hourly to multi-decadal time scales (Castelle et al., 2014; D'Anna et al., 2022). Some shoreline models that address such long-term projections rely on the equilibrium beach theory to estimate the effects of waves and SLR. However, so far, the effects of interactions between SLR and wave action are not resolved explicitly.

In this work, we present a novel physical interpretation of the cross-shore beach response to SLR in the context of equilibrium beach theory. Using this concept, we analyze the integration of SLR effects into wave-driven equilibrium shoreline models, while accounting for the interactions between SLR and incident waves. Further, we analyze existing datasets of shoreline response to SLR from three physical modelling studies to further investigate the processes described by our proposed concept.

## 2. Materials and method

The shoreline position (S) is defined as the intersection between the cross-shore beach profile and the mean sea level (MSL). As sea level rises, the upper portion of the beach undergoes passive inundation that produces an instantaneous geometric landward shift of the shoreline position (passive flooding, PF) and an apparent change of the cross-shore shape of the bottom. The latter change affects the energy dissipation of waves propagating across the beach profile, leading to further wave-driven (morphodynamic) shoreline change referred to as 'wave reshaping' (WR) effect. Based on the concepts of long-term (Dean, 1991) and short-term (Wright & Short, 1984) (dis)equilibrium of beaches, the WR effect can be described as the bi-product of the beach/wave disequilibrium induced by SLR (through PF) and incident cross-shore wave energy (Fig.1) (D'Anna et al., 2021).

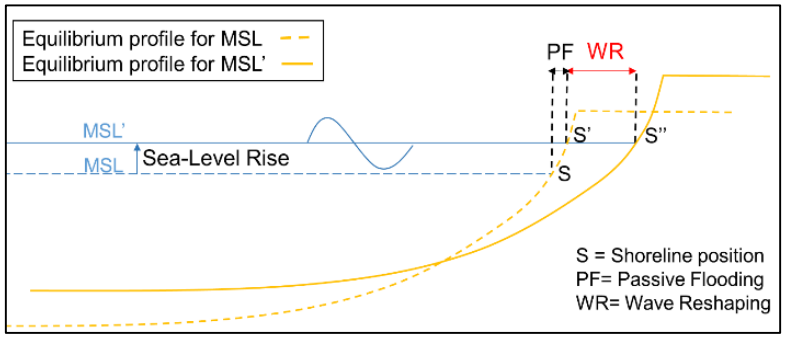



***Fig. 1.*** *Conceptualization of shoreline response to SLR decomposed into passive flooding (PF) and wave reshaping effect (WR). Source: D'Anna et al. (2021)*

Passive flooding (PF, Fig. 1) is estimated as the instantaneous geometric landward shift of the shoreline in response to SLR (Anderson et al., 2018), as follows:

$$PF = \frac{SLR}{tan(\beta)} \quad (1)$$

 BY-NC-SA

where tan(β) is the slope of the beach foreshore (e.g. defined as the intertidal portion of beach). The wave reshaping effect stems from an increase in beach-wave climate disequilibrium induced by SLR.

To model the interaction between these two effects, we couple the passive flooding (Eq. 1) with a cross-shore wave-driven equilibrium shoreline model (ESM, e.g. Yates et al., 2009) to resolve the wave reshaping effect explicitly. The two models are coupled dynamically allowing feedbacks between the modelled processes so that the disequilibrium condition of the ESM is influenced by PF (thus by SLR). As a first step, we test the integrated model on an idealized case, adopting a simplistic assumption about the SLR-driven disequilibrium. In this test case, an instantaneous 30 cm SLR and constant wave energy are applied to an idealized cross-shore transport dominated beach inspired by Truc Vert beach (France). The model results are also compared to the popular Bruun (1962) Rule, which describes both processes implicitly under a number of assumptions.

We further investigate the wave reshaping process analyzing data from physical models produced within three different studies (Atkinson et al., 2018; Bayle et al., 2020; Beuzen et al., 2018). These datasets tracked the beach profile evolution under stationary wave conditions and stepwise increases of mean sea level, allowing the time for partial or full profile relaxation between two SLR steps. Such controlled settings are ideal to investigate the physical relationship between SLR and wave-driven shoreline change at different stages of the beach profile relaxation and therefore isolate the effects of passive flooding and wave reshaping.

From each laboratory experiment, we quantified the effect of wave reshaping by measuring the net shoreline change that occurred after the application of the step-wise SLR (i.e., after the instantaneous passive flooding) until the new equilibrium state was achieved. Then, we analyzed the relationships among SLR, several wave-related hydrodynamic variables (e.g., wave power and dimensionless fall velocity), and the measured wave reshaping effect using scatter plots.

## 3. Main results and discussion

The results of the first idealized model application indicate that the integrated PF and ESM models reproduce the two components of the proposed physical interpretation of SLR-driven shoreline response (Fig. 2). In this idealized case involving an instantaneous 30 cm SLR (Fig. 2a), we observe the immediate shoreline retreat due to passive flooding ($dS_{PF}$) in response to the step-wise SLR (~11 m) and the subsequent wave reshaping effect (Fig. 2b). The latter produces a gradual adjustment of the shoreline during the 3-6 years following the step-wise SLR ($dS_{WR}$), until a new equilibrium condition is achieved (depending on the wave height imposed after SLR). Fig. 2b also shows how for the same amount of SLR and initial shoreline position, different wave energy conditions produce different wave reshaping effects, and for sufficiently low energy conditions (relatively to SLR) may even drive a shoreline advance (negative $dS_{WR}$). The modelled case of low energy waves (Hs =1.25 m, Fig. 2b) shows that after the application of SLR the equilibrium shoreline is located farther offshore with respect to the initial shoreline position, due to the accretive disequilibrium between such wave energy and the initial shoreline position. Hence, in absence of SLR, the final equilibrium shoreline would be located farther offshore. Indeed, the provided amount of SLR is not sufficient to trigger an erosive wave/shoreline disequilibrium but reduces the intensity of the initial accretive state of the beach, highlighting the importance of the interaction between sea level-driven disequilibrium and wave conditions.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

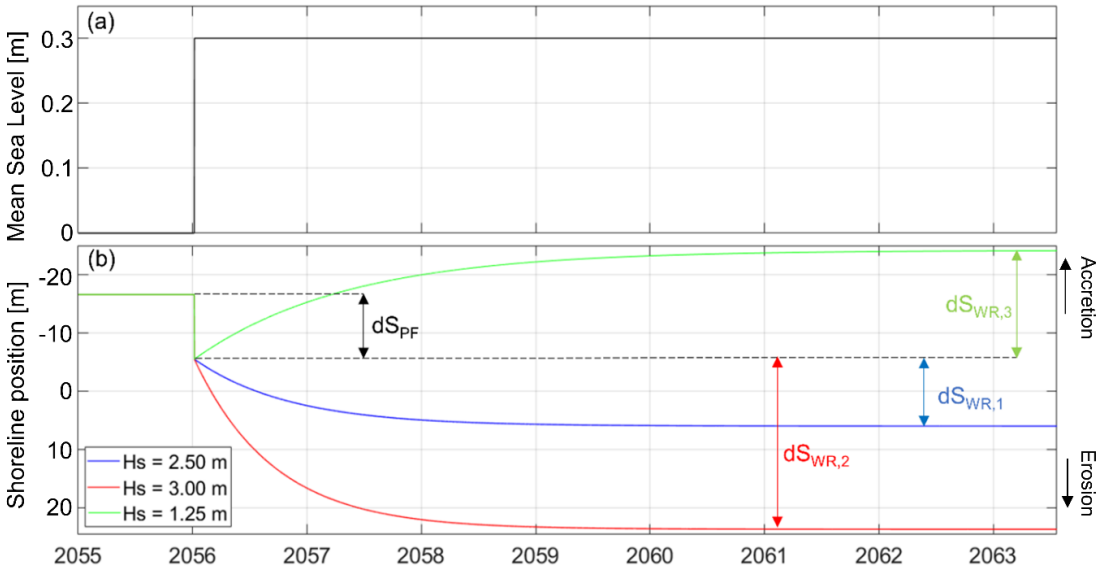



***Fig.2.*** *Application of the integrated model for constant wave energy and a 30 cm instantaneous finite SLR. (a) Mean sea-level time series; (b) shoreline response showing the instantaneous PF ($dS_{PF}$) and the progressive effect of wave reshaping ($dS_{WR}$) for constant mean incident wave height of 1.25 m (green line), 2.50 m (blue line) and 3.00 m (red line).*

A different idealized case application (not shown) showed that, when Bruun's assumptions are satisfied, the integrated PF and ESM models produce a long-term (80 years) shoreline recession consistent with the Bruun model estimate. This suggests that the proposed concept can describe the physical background of the Bruun model, which so far was implicit.

Fig. 3 shows the scatter plots of wave reshaping measured during the different laboratory experiments introduced in Section 2, for the respective SLR and wave conditions. The data indicate a clear positive trend of wave reshaping with increasing SLR (Fig.3a), with negative values (shoreline advance) corresponding to negative SLR and/or very low energy wave conditions. Indeed, the wave reshaping effect also appears to increase for increasing wave power (Fig.3b).

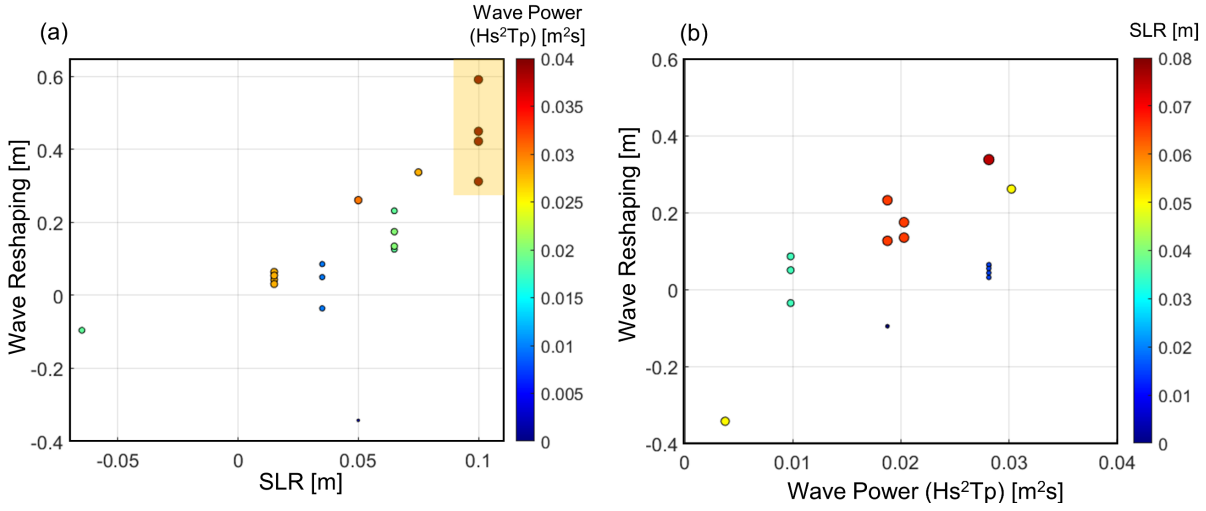



***Fig. 3****. Scatter plot of the wave reshaping measured for all the laboratory experiments. (a) Wave reshaping dependency on SLR with marker size and color proportional to wave power, and yellow shaded area indicating the experiments from Bayle et al. (2020) study. (b) Wave reshaping dependency on wave power with marker size and color proportional to SLR. Here, wave power is defined as $H_s^2T_p$, where $H_s$ and $T_p$ are the incident significant wave height and peak period, respectively.*

Despite the experiments from the Bayle et al. (2020) study were all conducted with the same amount of SLR and wave power, the corresponding wave reshaping show a significant spread (yellow shaded area in Fig.3a). This is due to the larger spatial scale of these experiments compared to the other studies, and the fact that the beach did

 BY-NC-SA

not fully achieved the equilibrium state after the application of SLR. The different spatial scale of Bayle et al. (2020) experiments also implied a much larger wave power compared to Atkinson et al.'s and Beuzen et al. (2018) experiments. Hence, for visualization purposes, Bayle et al. (2020) data were removed from Fig.3b.

While the scatter plots shown in Fig.3 provide valuable insight, the limited amount of laboratory data hinders the robust fit of an empirical functional structure among the three analyzed variable. In order to derive a robust empirical formula relating SLR, wave hydrodynamics and wave reshaping, we are currently complementing the laboratory data with synthetic data generated using the Q*uasi-2Dmorfo* equilibrium-based model (Q2Dmorfo, Arriaga et al., 2017). First, we calibrated and validated the Q2Dmorfo model by reproducing the most representative laboratory experiments. Ongoing work is focused on running the calibrated model for several combinations of SLR and wave conditions that were not explored within the physical modelling studies to generate more synthetic data. In addition, preliminary analytical developments of Dean's (1991) equilibrium beach theory provided a simple formulation expressing the change of wave-driven erosion efficiency, directly as a function of SLR. The ongoing analysis of the integrated data from laboratory experiments and the Q2Dmorfo model will be used to validate or adjust this formulation.

The presented work focuses on the understanding of the WR process to properly integrate the effects of SLR into ESMs, for cross-shore-transport dominated coasts. However, our analysis also holds for the new generation of hybrid models that couple ESM with other processes, such as longshore transport.

## 4. Conclusions

The results support the integration of SLR impact in ESMs for future studies, making a step towards the development of a generalized equilibrium shoreline model. Such approach describes the physics of shoreline response to SLR more explicitly than the most currently used existing models (i.e., Bruun Rule), removing many underlying assumptions of existing equilibrium-based models that limit their applicability to few real cases.

The preliminary analysis of the laboratory data suggests that the proposed conceptualization is able to describe shoreline response to sea level change under controlled laboratory settings, and identify a potential relationship between the wave reshaping effect, and SLR and wave power. The latter relationship is critical to the understanding of the wave reshaping physics and the quantification of SLR-induced disequilibrium required to develop existing equilibrium shoreline models.

Further ongoing work includes a deeper analysis of the laboratory data, complemented with Q2Dmorfo simulations. Later on, the final model will be validated with real-case applications at sites where the wave reshaping is expected to be the dominant process, (i.e., characterized by fast sea level fluctuations and a low-energy wave climate) such as Dune Acre (Lake Michigan, USA), Fereydounkenar Port (Iran) and Hasaki (Japan).

## 5. References

Anderson, T. R., Fletcher, C. H., Barbee, M. M., Romine, B. M., Lemmo, S., & Delevaux, J. M. S. (2018). Modeling multiple sea level rise stresses reveals up to twice the land at risk compared to strictly passive flooding methods. *Scientific Reports, 8(1)*. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32658-x

Arriaga, J., Rutten, J., Ribas, F., Falqués, A., & Ruessink, G. (2017). Modeling the long-term diffusion and feeding capability of a mega-nourishment. Coastal Engineering, 121, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.11.011

Atkinson, A. L., Baldock, T. E., Birrien, F., Callaghan, D. P., Nielsen, P., Beuzen, T., Turner, I. L., Blenkinsopp, C. E., & Ranasinghe, R. (2018). Laboratory investigation of the Bruun Rule and beach response to sea level rise. Coastal Engineering, 136. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.03.003

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Bayle, P. M., Beuzen, T., Blenkinsopp, C. E., Baldock, T. E., & Turner, I. L. (2020). Beach Profile Changes under Sea Level Rise in Laboratory Flume Experiments at Different Scale. Journal of Coastal Research, 95(sp1). https://doi.org/10.2112/SI95-038.1

Beuzen, T., Turner, I. L., Blenkinsopp, C. E., Atkinson, A., Flocard, F., & Baldock, T. E. (2018). Physical model study of beach profile evolution by sea level rise in the presence of seawalls. Coastal Engineering, 136, 172–182. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.12.002

Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Ferreira, S., Parisot, J.-P., Capo, S., Sénéchal, N., & Chouzenoux, T. (2014). Equilibrium shoreline modelling of a high-energy meso-macrotidal multiple-barred beach. Marine Geology, 347. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.003

Cooper, J. A. G., Masselink, G., Coco, G., Short, A. D., Castelle, B., Rogers, K., Anthony, E., Green, A. N., Kelley, J. T., Pilkey, O. H., & Jackson, D. W. T. (2020). Sandy beaches can survive sea-level rise. Nature Climate Change, 10(11). https://doi.org/10.1038/s41558-020-00934-2

D'Anna, M., Idier, D., Castelle, B., Vitousek, S., & Le Cozannet, G. (2021). Reinterpreting the Bruun Rule in the context of equilibrium shoreline models. Journal of Marine Science and Engineering, 9(9). https://doi.org/10.3390/jmse9090974

D'Anna, M., Idier, D., Castelle, B., Rohmer, J., Cagigal, L., & Mendez, F. J. (2022). Effects of stochastic wave forcing on probabilistic equilibrium shoreline response across the 21st century including sea-level rise. Coastal Engineering, 175(May), 104149. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104149

Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. Journal of Coastal Research, 7(1), 53–84.

Magnan, A. K., Garschagen, M., Gattuso, J.-P., Hay, J. E., Hilmi, N., Holland, E., Isla, F., Kofinas, G., Losada, I. J., Petzold, J., Ratter, B., Schuur, T., Tabe, T., & van de Wal, R. S. W. (2019). Cross-Chapter Box 9: Integrative Cross-Chapter Box on Low-Lying Islands and Coasts. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. ([H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer (eds.)]. In Press., Eds.).

Ranasinghe, R. (2020). On the need for a new generation of coastal change models for the 21st century. Scientific Reports, 10(1), 2010. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58376-x

Toimil, A., Losada, I. J., Nicholls, R. J., Dalrymple, R. A., & Stive, M. J. F. (2020). Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review. Coastal Engineering, 156, 103611. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103611

Wright, L. D., & Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. Marine Geology, 56(1–4). https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2

Yates, M. L., Guza, R. T., & O'Reilly, W. C. (2009). Equilibrium shoreline response: Observations and modeling. Journal of Geophysical Research, 114(C9). https://doi.org/10.1029/2009JC005359

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18659

# SEATool: una toolbox de ArcGIS Pro para el análisis de evolución de líneas de costa

*SEA Tool: a new ArcGIS toolbox for coastlines evolution analysis*

**Albert Gallego Jiménez[a], Erica Pellón de Pablo[a], Paula Gomes da Silva[a]**

[a]IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, albert.gallego@unican.es; erica.pellon@unican.es; paula.gomes@unican.es .

How to cite: Gallego, A.; Pellón, E. y Gomes da Silva, P. (2024). SEATool: una toolbox de ArcGIS Pro para el análisis de evolución de líneas de costa. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18659

***Abstract***

*Given the importance of having useful and up-to-date methods for analysing changes in coastal geomorphology, SEATool is presented, a toolbox developed for ArcGIS Pro that enables the analysis of shoreline evolution. The tool comprises several modules that facilitate automatic generation of transects, analysis based on linear regressions, and plotting of results, among others. The description of the tool is accompanied by an example of its application to a study site.*

***Keywords:*** *development, toolbox, ArcGIS Pro, evolution, shorelines.*

***Resumen***

*Debido a la importancia de disponer de métodos útiles y actualizados para analizar los cambios en la geomorfología de las costas, se presenta SEATool, una toolbox desarrollada para ArcGIS Pro que permite el análisis de la evolución de líneas de costa. La herramienta está compuesta por varios módulos que permiten generar de forma automática, desde la creación de los transectos en los que se basa el análisis, hasta el graficado de los resultados, pasando por el propio análisis basado en regresiones lineales. Incluido a la descripción de la herramienta se presenta un ejemplo de su aplicación a un sitio de estudio.*

***Palabras clave:*** *desarrollo, toolbox, ArcGIS Pro, evolución, líneas de costa.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Las costas son áreas dinámicas que experimentan cambios constantes debido a procesos naturales como la erosión, la sedimentación y la acción de las olas, así como a factores antropogénicos como la urbanización. El estudio de los cambios en la morfología costera es muy importante por el impacto que estos procesos pueden tener en diversos aspectos socioeconómicos y ambientales. Comprender y predecir la evolución de la costa es fundamental para la planificación y gestión adecuada de estos entornos, así como para tratar de adaptar y gestionar los riesgos asociados a eventos extremos y al cambio climático.

Una forma de monitorizar la evolución de la costa en un determinado lugar es mediante la observación remota. A través de imágenes capturadas por sensores remotos a lo largo del tiempo, como pueden ser satélites, vuelos fotogramétricos, drones, o video-estaciones, se pueden analizar los cambios en la morfología costera y tratar de comprender cuáles son y cómo se desarrollan los procesos físicos que subyacen a estos cambios.

Para poder cuantificar y evaluar la evolución temporal de la costa de manera sencilla mediante la observación remota mencionada, es necesaria una forma de representar cada estado puntual de la costa en la que se obtiene una medida (*i.e.* una imagen). Una representación común y fácil de comprender es mediante el uso de líneas de costa, es decir, segmentar la interfaz agua-tierra con una línea. Cabe destacar que, si bien la extracción de estas líneas a partir de imágenes puede conllevar desafíos técnicos, como la identificación óptima de esta interfaz agua-tierra, la georreferenciación precisa de las imágenes y las propias líneas, entre otras, la simplicidad en el manejo y la utilidad para realizar análisis de evolución temporal convierten a este tipo de formato en uno de los más usados para este tipo de análisis.

Después de establecer la importancia de comprender la evolución costera y la utilidad de las líneas de costa para analizar estos cambios, en este trabajo se presenta una herramienta que se ha desarrollado y facilita este tipo de análisis constituyendo el tema principal de esta comunicación.

La herramienta se llama *Shoreline Evolution Analysis Toolbox* (SEATool), es *open-source* y está desarrollada como una *Python Toolbox*[1] para el software de escritorio ArcGIS Pro. SEATool está disponible para su descarga y uso a través de un repositorio de código en GitHub[2]. Esta herramienta se diseñó con el objetivo de proporcionar a los usuarios una solución para analizar y cuantificar la evolución temporal de la costa en una zona de interés. A través de una interfaz muy intuitiva, la herramienta permite el análisis de la evolución temporal de las líneas de costa reduciendo el análisis al estudio de transectos equiespaciados, aproximadamente normales a la costa.

## 2. Contexto y motivación

Para entender el contexto en el desarrollo de la herramienta SEATool y la motivación principal de su creación, es indispensable presentar la herramienta *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*[3] (Himmelstoss, 2021) desarrollada por la *United States Geological Survey (USGS)* en base a la cual está fuertemente inspirada. DSAS es una herramienta *open-source* y que está desarrollada como un *add-in* del software ArcMap (10.4-10.7+). Esta herramienta ha sido y es ampliamente utilizada por una gran cantidad de usuarios, siendo un pilar fundamental en el campo del análisis de la evolución del litoral mediante datos de líneas de costa (más de 500 artículos[4]).

No obstante, es importante resaltar que DSAS está desarrollado sobre un software actualmente obsoleto (ArcMap) para el cual la empresa que lo distribuye, Esri, ya no realiza actualizaciones ni parches y dejará de dar soporte a partir de 2026. Esta limitación plantea desafíos significativos para los usuarios de DSAS, ya que podría

[1] Más información en: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/geoprocessing_and_python/a-quick-tour-of-python-toolboxes.htm

[2] Disponible en: https://github.com/AlbertGallegoJimenez/shoreline-evolution-toolbox

[3] Disponible en: https://www.usgs.gov/centers/whcmsc/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas

[4] Dato obtenido buscando las palabras "dsas" y "shoreline" en título y keywords en Scopus: https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=7fcdde92a66468e94463ba19b4f0961f&sot=a&sdt=a&sl=33&s=TITLE-ABS-KEY%28dsas+AND+shoreline%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

afectar su funcionalidad y compatibilidad con futuras versiones de sistemas operativos y hardware. Con el fin de superar estas limitaciones, aprovechar las ventajas que ofrece ArcGIS Pro respecto a ArcMap y mejorar ciertos aspectos como la presentación de resultados, se desarrolla SEATool como una alternativa moderna y compatible para el análisis de la evolución costera.

Uno de los propósitos principales de esta herramienta es su capacidad para implementar nuevas funcionalidades y actualizar los métodos conforme surjan nuevos avances en el estado del arte. En este sentido, es importante destacar que la versión actual de la herramienta en la fecha de redacción de esta comunicación (v1.3.1), que se describe en el capítulo 3. , aún no cuenta con una funcionalidad que permita un análisis más preciso de los entornos costeros macromareales donde la variabilidad espacial debido a las fluctuaciones del nivel del mar es de alta relevancia. Sin embargo, actualmente se está trabajando en su desarrollo y es de esperar que en las próximas versiones de la herramienta esta funcionalidad ya esté incluida.

## 3. Descripción de SEATool

SEATool se basa en el uso de dos tipos de archivos de entrada. Por una parte, las líneas de costa almacenadas como registros en un mismo archivo vectorial de líneas y, por otro lado, una línea de base usada como referencia para analizar los cambios en la costa de forma relativa a ésta.

La herramienta (*toolbox*) está desarrollada enteramente en Python y está estructurada en varios módulos (*tools*) ordenados secuencialmente de la siguiente forma:

I. Generate Transects Along Baseline.
II. Correct Transects.
III. Intersect Shorelines And Baseline With Transects.
IV. Perform The Analysis.
V. Plot The Analysis Results.

Estos módulos hacen uso de funciones programadas en la librería de ArcGIS, Arcpy, así como otras de las librerías más utilizadas en Python como son Pandas (The Pandas Development Team, 2024), Matplotlib (The Matplotlib Development Team, 2024) o Statsmodels (Perktold et.al., 2023), entre otros. A continuación, se describe de forma detallada cada uno de los módulos, proporcionando algunos ejemplos para mejorar la comprensión.

### 3.1. Generate Transects Along Baseline

Este módulo sirve para crear los transectos perpendiculares a la línea de base (*i.e. baseline*) y equiespeciados entre sí, sobre los cuales se realizarán los análisis posteriores. Los parámetros que toma como entrada este módulo son tres: el archivo que contiene la línea de base; la longitud total de los transectos; y la distancia entre transectos. El parámetro de salida es el nombre del archivo resultante de ejecutar la herramienta (es decir, los transectos) (véase Fig. 1).

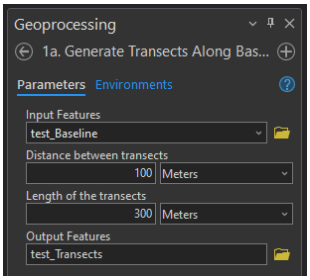



***Fig. 1.*** *Cuadro de diálogo del módulo Generate Transects Along Baseline.*

En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de como se distribuyen los transectos equiespaciados a lo largo de la línea de base.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

### 3.2. Correct Transects

Este módulo sirve para corregir la orientación de transectos que puedan haber resultado poco paralelos en comparación a los contiguos. Por lo tanto, no siempre va a ser necesaria su ejecución. Como se puede observar en la Fig. 2, solo toma un parámetro de entrada, la diferencia máxima de orientaciones (el ángulo, en grados) entre transectos consecutivos. Los transectos que tengan una diferencia en grados mayor a la especificada se corregirán mediante interpolación lineal entre los transectos adyacentes. Los cambios se realizan en el mismo archivo de transectos.

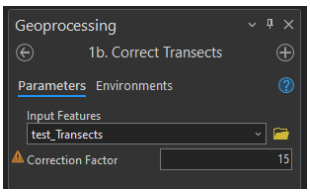
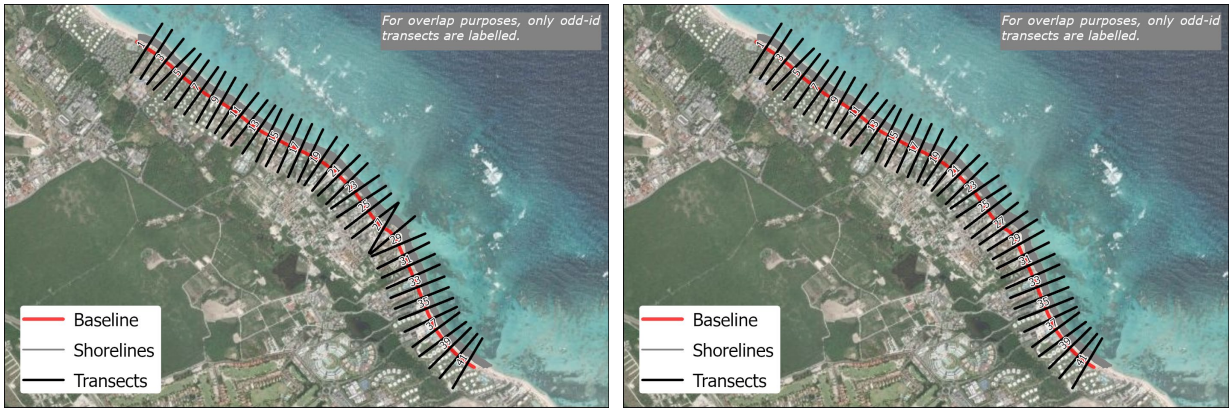



***Fig. 2.*** *Cuadro de diálogo del módulo Correct Transects.*

La Fig. 3 muestra un ejemplo de cómo se orienta finalmente un transecto corregido (transecto 27).




a b

***Fig. 3.*** *Ejemplo de transectos creados con el módulo Generate Transects Along Baseline (a) y corregidos con el módulo Correct Transects (b).*

### 3.3. Intersect Shorelines And Baseline With Transects

Este módulo sirve para crear las intersecciones entre, por una parte, las líneas de costa y los transectos, y por otra parte, la línea de base y los transectos. Este módulo toma como entrada varios parámetros, los cuales son: las líneas de costa; el nombre del campo referente al identificador numérico de las líneas de costa; la línea de base; y los transectos generados. Como parámetros de salida deben especificarse: el archivo con las intersecciones entre líneas de costa y transectos, y el archivo con las intersecciones entre la línea de base y transectos (véase Fig. 4).

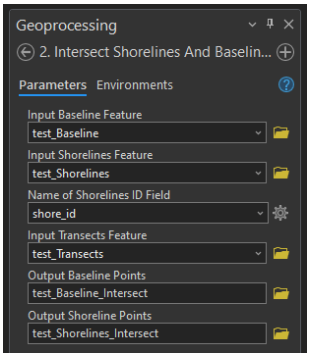



***Fig. 4.*** *Cuadro de diálogo del módulo Intersect Shorelines And Baseline With Transects.*

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Hay que destacar que estas intersecciones se generan en archivos con geometrías de tipo punto. Además, en el archivo de las intersecciones entre líneas de costa y transectos se crea un atributo con el cálculo de la distancia relativa a la línea de base (véase Fig. 5), valor fundamental para el posterior análisis.

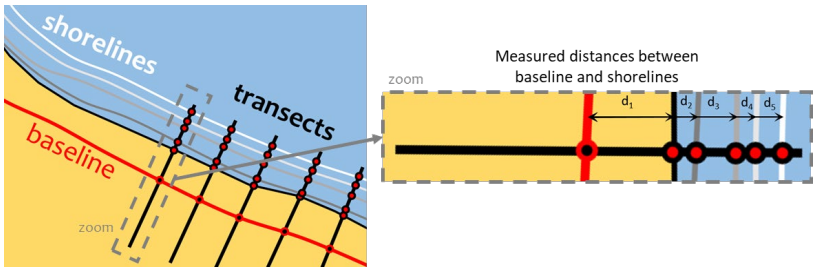



***Fig. 5.*** *Diagrama de ejemplo del cálculo de distancias entre líneas de costa y la línea de base.*

### 3.4. Perform The Analysis

Este módulo sirve para realizar el análisis de evolución temporal a partir de una regresión lineal simple para cada transecto. De este análisis se extraen una serie de métricas estadísticas que se describen a continación:

- *LRR (Linear Regression Rate) [m/year]*: Es una tasa y mide la tendencia en metros por año (pendiente de la regresión lineal entre tiempo y distancias).
- *LCI_low* y *LCI_upp (Lower and Upper Linear Confidence Interval) [m/year]:* Es el intervalo de confianza del 95% del valor de LRR y se expresa como tasas en metros por año.
- *P-value:* Mide la significancia estadística de la regresión lineal.
- $R^2$*:* Es el coeficiente de determinación de la regresión lineal.
- *SCE (Shoreline Change Envelope) [m]:* Mide la distancia máxima entre líneas de costa en metros.
- *NSM (Net Shoreline Movement) [m]:* Mide la distancia entre la primera y última línea de costa en metros.

Este módulo toma como entrada dos parámetros: las intersecciones entre líneas de costa y transectos; y los transectos (véase Fig. 6). No hay parámetros de salida porque las métricas estadísticas de los resultados se incluyen en el mismo archivo de transectos como parte de sus atributos. Paralelamente, se crea una carpeta llamada “Output data” en el directorio de trabajo en la que se guardan dos archivos XLSX con los resultados.

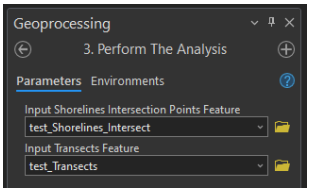



***Fig. 6.*** *Cuadro de diálogo del módulo Perform The Analysis.*

Posteriormente a la ejecución del módulo se aplica una simbología de color y tamaño a los transectos de forma automática de modo que se visualizan diferentes gradientes de categorías para los valores de LRR (véase Fig. 7).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

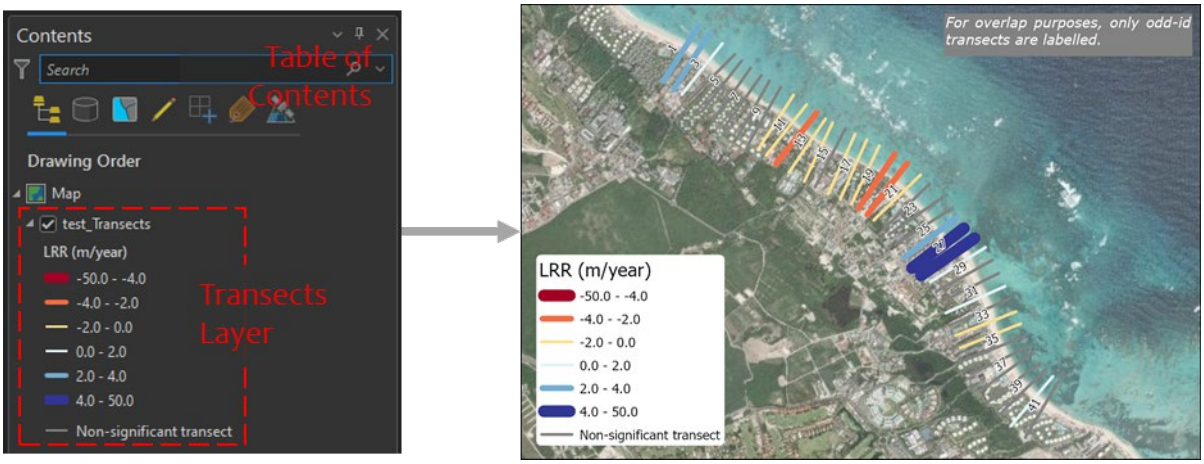



***Fig. 7.*** *Ejemplo de la simbología aplicada al archivo de transectos al ejecutar el módulo Perform The Analysis.*

## 4. Plot The Analysis Results

Este es el módulo que más difiere de la herramienta de USGS, ya que DSAS no genera mapas ni gráficos de manera automática. Esta herramienta sirve para exportar varias figuras y así representar gráficamente los resultados del análisis tomando como entrada tres parámetros: las intersecciones entre líneas de costa y transectos; los transectos; y el ID de los transectos que se quieran representar gráficamente (véase Fig. 8). No hay parámetros de salida, directamente se almacenan los gráficos en imágenes PNG en una carpeta dedicada en el directorio de trabajo. Entre los gráficos generados se encuentran: series temporales de las distancias relativas a la línea base junto con el ajuste lineal para los transectos seleccionados; box-plots mensuales de los valores de distancias relativas a la línea base para analizar la estacionalidad en los transectos seleccionados; mapas de los valores de LRR, SCE y NSM para todos los transectos; y un diagrama de dispersión donde se visualizan las posiciones de las líneas de costa para cada transecto (véase Fig. 9).

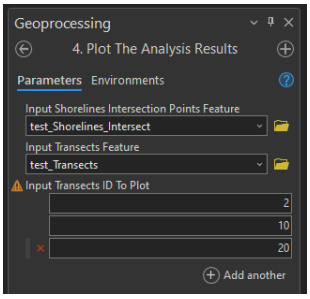



***Fig. 8.*** *Cuadro de diálogo del módulo Plot The Analysis Results.*

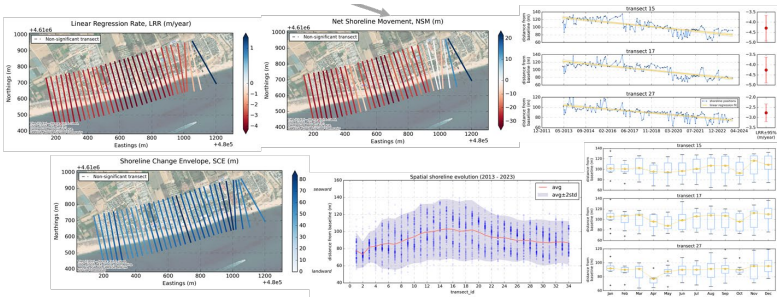


***Fig. 9.*** *Ejemplo de los archivos PNG generados al ejecutar el módulo Plot The Analysis Results.*

 BY-NC-SA

## 5. Conclusiones

Con esta herramienta es posible cuantificar y evaluar los cambios históricos de la costa para una determinada zona de forma automática y ágil debido a que está desarrollada mediante el uso de librerías altamente optimizadas.

Debido al carácter modular de la herramienta, su organización y mantenimiento es sencillo.

A diferencia del mencionado DSAS, esta herramienta está disponible para su uso en el principal software GIS comercial del mercado, ArcGIS Pro. Otro punto fuerte respecto el DSAS, ya que éste carece completamente de ello, es la visualización de los datos relativos a los análisis, no solo por el hecho de exportar los datos a un formato más manejable fuera de un entorno GIS, sino por la generación automática de varios gráficos que ayudan a la interpretación de los resultados.

Es importante mencionar que una limitación significativa de la herramienta en la fecha de redacción de esta comunicación es la falta de una metodología implementada para validar y corregir los análisis de evolución en entornos costeros donde el efecto de las mareas y otras variaciones verticales del nivel del mar afecta significativamente la posición de la línea de costa. No obstante, se prevé que en próximas versiones la herramienta disponga de una metodología eficaz para abordar este problema.

## 6. Agradecimientos

Este estudio forma parte del programa ThinkInAzul, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de Cantabria.

## 7. Referencias

Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., & Farris, A.S. (2021). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091*, 104 p. https://doi.org/10.3133/ofr20211091.

Josef Perktold, Skipper Seabold, Kevin Sheppard, ChadFulton, Kerby Shedden, jbrockmendel, j-grana6, Peter Quackenbush, Vincent Arel-Bundock, Wes McKinney, Ian Langmore, Bart Baker, Ralf Gommers, yogabonito, s-scherrer, Yauhen Zhurko, Matthew Brett, Enrico Giampieri, yl565 & Yaroslav Halchenko. (2023). statsmodels/statsmodels: Release 0.14.1 (v0.14.1). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10378921

The Matplotlib Development Team. (2024). Matplotlib: Visualization with Python (v3.8.4). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10916799

The Pandas Development Team. (2024). pandas-dev/pandas: Pandas (v2.2.1). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10697587

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18726

# Estudio con sonar de barrido lateral de la base del acantilado del Morro de Toix (Calpe, Alicante)

*Side Scan Sonar Study of the Morro de Toix Seacliff base (Calpe, Alicante)*

**Davide Bonomo[a], Juan Leandro Ronda[b], Boualem Youcef Nassim Benabdeloued[c], José Enrique Tent-Manclús[a,d], Estela M. Salcedo-Justicia[d], Javier Alcántara-Carrió[a, e]**

[a]Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio "Ramón Margalef", Universidad de Alicante, davide.bonomo@ua.es; [b] EXTOPOCIEN, Grupo de Espeleología; juanleronda@gmail.com; [c] SISCOVA. Dpto. Física, Ingeniería de sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante, nassim@ua.es; [d] Dpto. de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, je.tent@ua.es; y [e]Dpto. Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid, javier.alcantara@uam.es

How to cite: Bonomo, D.; Ronda, J. L.; Benabdeloued, B. Y. N.; Tent-Manclús, J. E.; Salcedo-Justicia, E. M. y Alcántara-Carrió, J. 2024. Estudio con sonar de barrido lateral de la base del acantilado del Morro de Toix (Calpe, Alicante). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 septiembre 2024.
https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.20024.18726

## *Abstract*

*The Morro de Toix seacliff, located South of Calpe, on the Alicante coast in southeastern Spain, is a 70 to 30 m high seacliff. The western portion is plane and eastern portion of the seacliff is highly karstified and overhanging. The foot is currently submerged. An USV (Unmanned Surface Vessel) platform adapted to be towed by a manned vehicle, a paddle surfboard, has been used, with the aim of studying the geomorphology of the underwater part. To study the submerged bottom of the cliff, an USV (Unmmaned Surface Vessel) platform has been used. It has been adapted to be towed by a crewed vehicle, a paddle surfboard. This is an easy and fast procedure when a short excellent weather conditions windows is found obtaining good side scan sonar, single beam and downscan data. The result of the processed data has shown a metric-blocky seabed near the cliff and the underwater cliff is excavated around 3-4 m in the western portion and irregulary excavated in the eastern part with many cove and caves.*

***Keywords:*** *USV, Side Scan Sonar, Morro de Toix, Seacliff, Calpe.*

## *Resumen*

*El acantilado de Morro de Toix, situado al sur de Calpe, en la costa de Alicante, sureste de España, es un acantilado de 70 a 30 m de altura. La parte occidental es plana y la parte oriental del acantilado está muy karstificada y en extraplomo. El pie del acantilado se encuentra en la actualidad sumergido. Con el objetivo de estudiar la geomorfología de la parte submarina se ha utilizado una plataforma USV (Unmmaned Surface Vessel) adaptada para ser remolcado por un vehículo tripulado, una tabla de paddle surf. Este es un procedimiento fácil y rápido para aprovechar un periodo corto con excelentes condiciones de la mar, obteniendo buenos datos de sonar de barrido lateral, monohaz y* bottomscan*. A partir de los datos procesados se aprecia un lecho marino con grandes bloques cerca del acantilado y el acantilado submarino está excavado alrededor de 3-4 m en la parte plana occidental y excavado de manera irregular en la parte oriental con muchos entrantes y cuevas.*

***Palabras clave:*** *USV, Sonar de barrido lateral, Morro de Toix, Acantilado marino, Calpe.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

En los tiempos recientes se han desarrollado plataformas para investigación como ROVs (remote operated Vehicles) o USVs (Unmanned Surface Vessel) para el estudio de zonas costeras. Nuestro equipo de la Universidad de Alicante ha desarrollado un USV para el estudio de lagunas y zonas costeras (Ronda et al., 2023a; 2023b). El equipo está preparado para condiciones de calma total por lo que las ventanas de oportunidad para utilizarlo son siempre muy cortas. Se trata de un vehículo propulsado por motores T60pro sin escobillas y control electrónico de velocidad (ESC). Manejado por radiocontrol, con dos cámaras, una submarina y otra frontal, para su conducción, que emiten en tiempo real hacia un receptor y se visualiza en un monitor. El equipo se desarrolló con una sonda monohaz Furuno (Ronda et al., 2023a) para luego instalar una sonda Lowrance Elite Fs Active 3 en 1, de sonar de barrido lateral, sonda monohaz y sonda inferior (downscan), con GPS integrado. Con un paquete de baterías diseñado al efecto, la plataforma USV puede adquirir datos y navegar durante aproximadamente una hora. Unas placas solares instaladas permiten extender su autonomía, lo que favorece su recuperación.

Una de las zonas de interés, de nuestro equipo de trabajo, es la zona de surgencias submarinas en el acantilado del Morró de Toix, entre Altea y Calpe (provincia de Alicante), producto de dicho estudio se puede ver el trabajo (Tent-Manclús et al., enviado). Se trata de una zona acantilada, con acantilados de 30 a 70 m de altura, que son de difícil acceso, tanto por mar, como por su parte superior. El punto de partida fue la idea de realizar una sonar de barrido lateral lo más pegado posible al acantilado. Por el mar, con barco, es difícil acercarse al pie del acantilado por los múltiples bloques dispersos que disminuyen el calado. Se planteó utilizar un barco nodriza desde donde lanzar el USV hasta prácticamente tocar el acantilado. La realidad de este planteamiento es que la ventana de oportunidad para realizar la adquisición de datos era muy corta. Producto de lo cual se demoraba la adquisición. El acceso al acantilado se había realizado con anterioridad utilizando una tabla de paddle surf, con lo que se accedía a poder tocar los afloramientos. En una de las campañas de acceso al acantilado se presentó una ventana de mar en calma. Aprovechando la ocasión, se utilizó el USV para ser arrastrado como una plataforma sin propulsión, por la tabla paddle surf. En este trabajo se describe tanto la adaptación para realizar la adquisición, como los resultados de ésta.

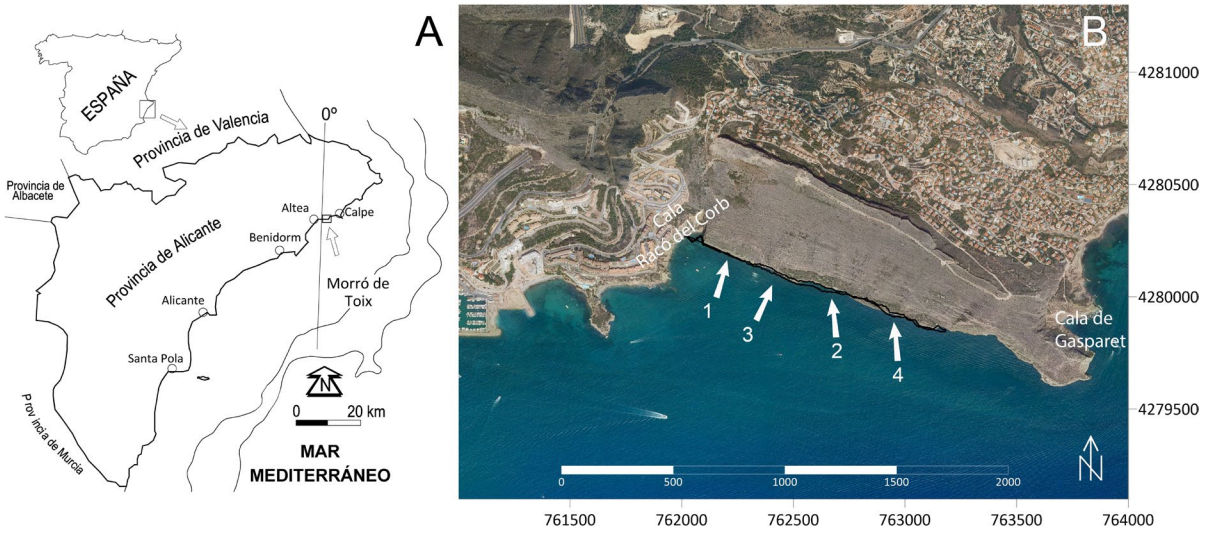



***Fig. 1*** *Situación del área de estudio. A) Localización del Morro de Toix. B) Ortofotografía del año 2007 PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, del IGN) con recorrido (línea negra) de la plataforma USV arrastrada. Las flechas con sus números se refieran a los puntos de la Fig. 3 (el 1 y 2) y de la Fig. 4 (el 3 y 4). Elaboración propia.*

 BY-NC-SA

## 2. Área de estudio

El Morro de Toix, en Alicante (Fig. 1A), es un macizo con rocas del Eoceno Superior-Oligoceno calcáreo masivo (Yébenes et al., 2004), con las capas dispuestas verticales o subverticales, que da lugar a un acantilado marino de más de 2 km de longitud y de 70 a 30 m de altitud (Tent-Manclús et al., enviado). El punto más alto del macizo se encuentra a 340 m. En los extremos se encuentran las calas del Racó del Corb al Oeste y del Gasparet al Este, ambas de complicado acceso. Para este estudio se bajaron los equipos por el camino de acceso a la cala del Racó del Corb desde donde se partió para hacer el recorrido que se muestra en el Fig. 1B.

## 3. Metodología

El USV se utilizó como plataforma remolcada (Fig 2A). Se colocó debajo del USV una video-cámara submarina dirigida perpendicularmente hacia abajo, para obtener imágenes del fondo y poder comparar con el sonar de barrido lateral. La localización GPS se registró mediante la sonda Lowrance. Las baterías alimentaron sólo la sonda Lowrance Elite FS 7 con sonda Active 3 en 1, mientras que las placas solares se utilizaban para recargar las baterías. De esta forma la adquisición de datos tenía autonomía más que suficiente, y factor limitante era la batería de la cámara submarina.

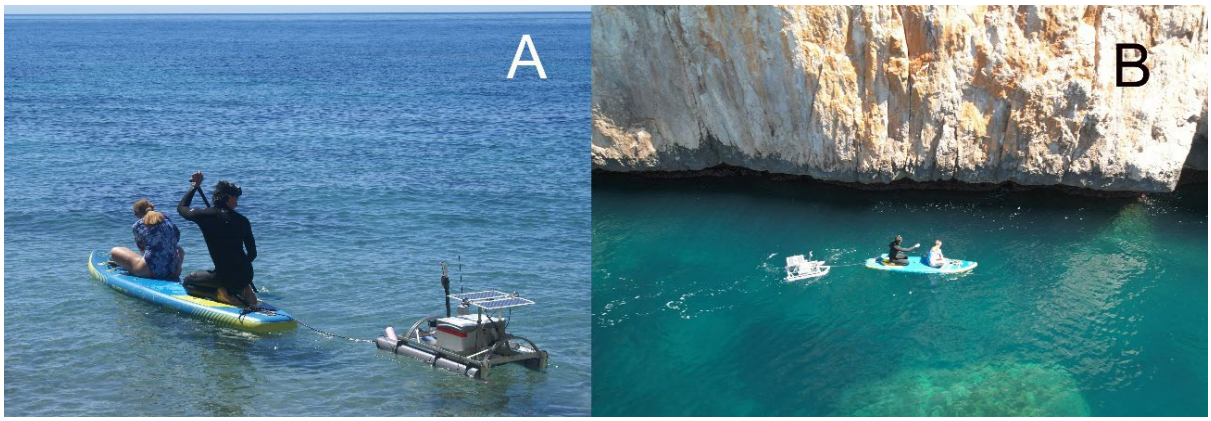



***Fig. 2*** *El USV remolcado por la tabla de paddle surf (3,5 m de longitud). A) saliendo de la Cala del Racó de Corb. B) Bloque correspondiente a la Fig. 4A (punto 3 de la Fig. 1B) en primer término, a 1,2m de profundidad, y el acantilado del Morro de Toix con el importante desarrollo del notch. Fuente: Fotos propias.*

## 4. Resultados

El recorrido de una hora y veinte minutos se realizó pegado al acantilado, a unos 2 m en la ida y separado de él, unos 5 a 20 m a la vuelta. Por tanto, a la ida el acantilado quedaba en el canal de la izquierda del sonar de barrido lateral y al contrario en la vuelta. La cámara submarina grabó casi todo el recorrido, quedando sin batería en la llegada de vuelta a la esquina con la playa del Raco de Corb. La visibilidad era buena hasta unos 7 metros de profundidad. La parte sumergida del acantilado siempre está excavada hacia el interior del macizo. En la parte E, el acantilado coincide con un plano de falla, y es recto, mientras que, a partir del primer tercio de la extensión total, el acantilado cambia de plano, a fuertemente karstificado y extraplomado. Por eso, en el track del GPS de la Fig. 1B parece que el USV navega por tierra. En el acantilado recto se observa claramente como una línea paralela en la Fig. 3C en el canal derecho (a la vuelta en el punto 1 de la Fig. 1B). En el acantilado en extraplomo, más al E, se encuentra karstificado (ver Tent-Manclús et al., enviado), en la Fig. 3F se aprecia en el canal derecho (a la vuelta en el punto 2 de la Fig. 1B), donde aparecen entrantes y cuevas.

El fondo pegado al acantilado está lleno de bloques. Algunos de ellos decamétricos, como el de las Figs. 4A, 4B y 4C y que se muestra sumergido en la fotografía de la Fig. 2B (punto 3 de la Fig. 1B). Dicho bloque se encuentra en la zona del acantilado que comienza a estar karstificado, no apreciándose la cicatriz de desprendimiento en el acantilado desde donde provenga por lo que seguramente debía venir del macizo por encima del acantilado. En el

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

tramo del acantilado en extraplomo, fuertemente karstificado, a veces se ven cicatrices de desprendimiento, y a los pies un bloque, cuyo origen probable debe ser el frente del acantilado. En la parte del acantilado recto, los bloques no deben venir del acantilado sino de más arriba, del macizo de Toix que muestra grandes pendientes. En la Figs. 4D y 4F se observa un "fantasma de bloque" tanto en la sonda monohaz (Fig. 4D) como en el sonar de barrido lateral (Fig. 4F). La clave la da la imagen del downscan (Fig. 4E) que permite distinguir la silueta de un gran bloque lateral que se encontraría al lado opuesto del acantilado (en dicha imagen a la izquierda).

Por último, debemos mencionar, que a los lados de la línea central del sonar en las figuras aparecen unas manchas, 3 o 4 manchas a un lado y luego 3 ó 4 al contrario. Dichos artefactos son producto de las paladas para impulsar la tabla del paddle surf. Ello permite apreciar la calidad del registro, y las buenas condiciones en las que se realizó la adquisición.

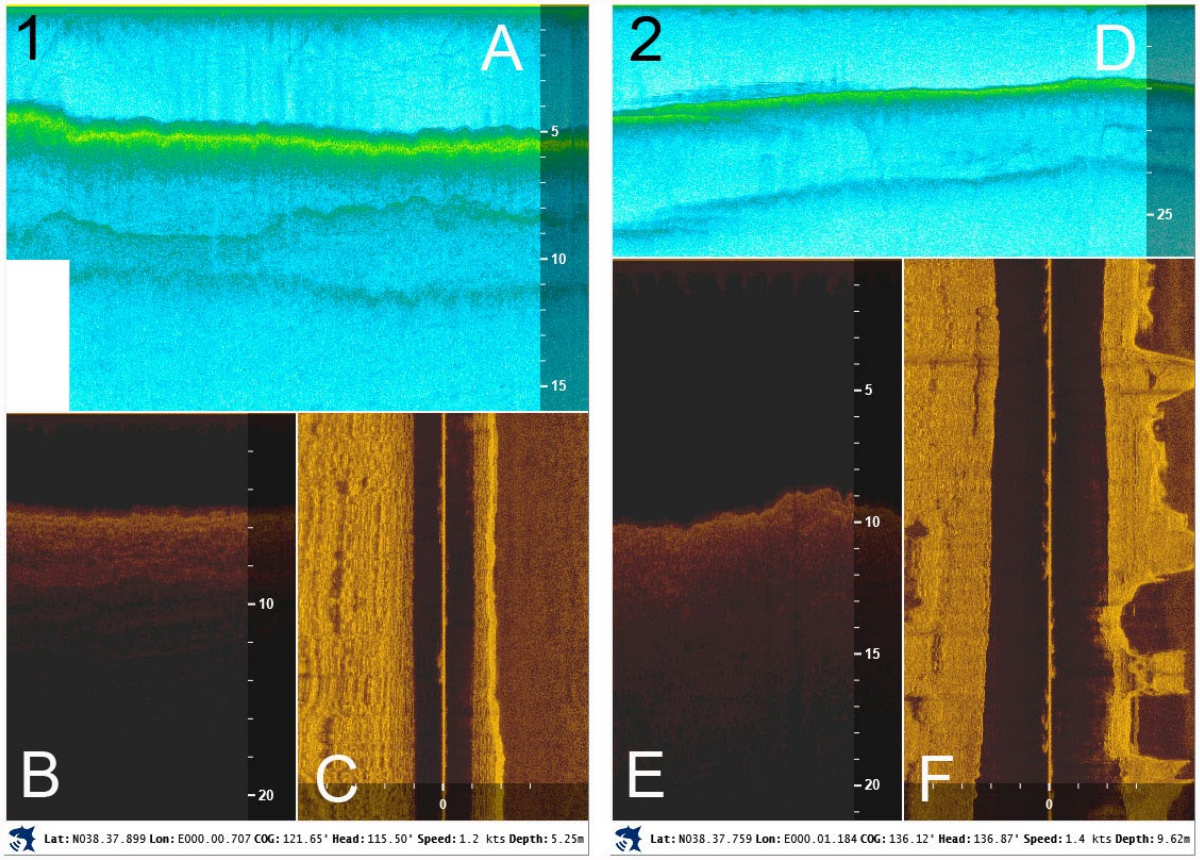



***Fig. 3*** *Diferencias en el acantilado. 1) Representa la cara del plano de falla vertical en la parte más occidental del acantilado. A) Sonda Monohaz; B) Bottom scan; C) Sonar de barrido lateral. El acantilado a la derecha. 2)Representa el acantilado a mitad del recorrido, se observa karstificación que da lugar a entrantes y cuevas submarinas. D) Sonda Monohaz; E) Bottom scan; E) Sonar de barrido lateral. Derecha acantilado. Fuente: Elaboración propia a partir del software ReefMaster.*

## 5. Discusión

De la campaña se han podido reconocer un fondo de bloques pegado al acantilado, lo que contrasta con la batimetría del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (Ecocartografía de Alicante, 2007), que muestra un fondo homogéneo, aumentando su profundidad hacia el E, sin ningún indicio de los grandes bloques. Esto seguramente se debe a que dicha batimetría se realizó a distancia del acantilado, por cuestiones de seguridad y luego interpolando.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

El poder trabajar muy cerca del acantilado permite reconocer los entrantes y cuevas del acantilado en la zona karstificada, mientras que, en la zona recta, la base del acantilado es recta y suele reconocerse entre 3 y 4 m hacia dentro del frente del acantilado. Hay que advertir, que en la zona intermareal se forma una escotadura (*notch)* mareal que incide en la pared unos 2 m, la plataforma inferior de dicho *notch* sobresale unos 70 cm de la máxima incisión (a 1,30 m de profundidad del frente del acantilado, ver Tent-Manclús et al. enviado) y ya debajo del agua el frente se incide más o menos hasta los 3-4 m comentados anteriormente. En la imagen del sonar de la Fig. 3C se observa el acantilado recto en el punto 1 donde el fondo tiene una profundidad de 5,2 m (en la línea central, esquina inferior de la imagen), luego la banda clara es más ancha abajo de la figura (más alejada de la playa del Raco de Corb) y más estrecha hacia arriba, indicaría la excavación lateral decreciente de la base del acantilado desde unos 6 m abajo a unos 3 arriba de la imagen.

En la Fig. 3F, que corresponde al punto 2 de la Fig. 1A, es una zona de unos 10 m de profundidad, prácticamente debajo de la parte alta del acantilado, y que el fondo muestra entrantes de más de 10 m hacia el interior del macizo, mientras que al lado contrario se aprecian dos bloques. Esta figura es un ejemplo de la variabilidad, que se aprecia, en las imágenes del sonar adquiridas en la parte más karstificada del acantilado.

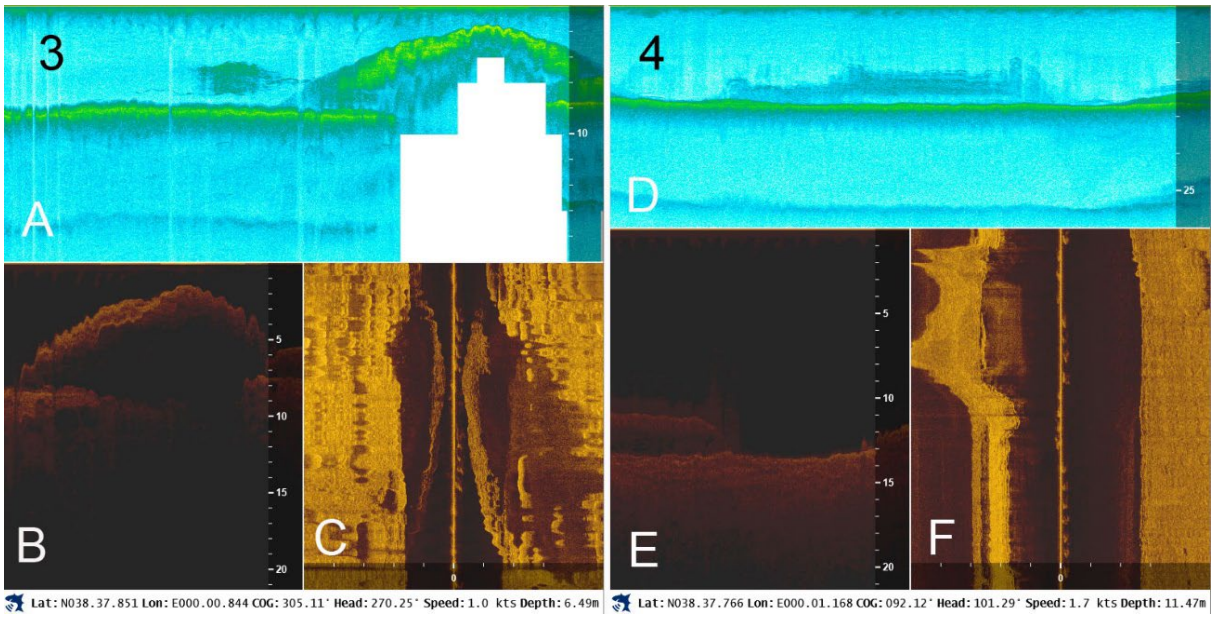



***Fig. 4*** *Bloques submarinos. 3) Bloque representado en la Fig. 2B y punto 3 de la Fig. 1B. Se encuentra a 1,2 m de profundidad. A) Sonda Monohaz B) Bottom scan, C) Sonar de barrido lateral. A la derecha estaría el acantilado. 4) Sombra de bloque situado a la derecha (no se observa) a la izquierda está el acantilado que muestra un entrante submarino. A) Sonda Monohaz con la sombra lateral. B) Bottom scan, la sombra lateral se observa claramente. C) Sonar de barrido lateral. Fuente: Elaboración propia a partir del software ReefMaster.*

## 6. Conclusiones

La utilización de una plataforma USV de desarrollo propio remolcada para realizar un sonar de barrido lateral próximo al acantilado del Morro de Toix ha proporcionado unos registros de sonar de barrido lateral y sonda monohaz de buena calidad. Las plataformas USV son equipos fáciles de transportar y que necesitan de poca infraestructura, son de rápido montaje y permiten realizar la adquisición cuando las condiciones sean las adecuadas. La utilización de un barco nodriza y el USV, sería lo deseable, pero necesita de una preparación y unos horarios rígidos, por lo que a veces no coinciden con buenas condiciones del mar y hay que repetir la adquisición.

La parte sumergida del acantilado marino del Morro de Toix está excavada lateralmente de 3 a 4 m en su tercio occidental, en él, el acantilado emergido es una superficie plana. La parte sumergida también es plana subparalela al acantilado. En la parte oriental, el acantilado muestra una superficie emergida fuertemente karstificada y

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

extraplomada y la parte sumergida es irregular, con múltiples entrantes y cuevas. También suele estar lateralmente excavado, aunque de forma más irregular.

A los pies del acantilado del Morro de Toix existe un campo de bloques, provenientes tanto de desprendimientos del mismo acantilado como probablemente caídos del macizo calcáreo. El tamaño de estos hace que en algunos puntos se formen bajíos que, aunque podrían ser un problema para la navegación, por su cercanía al acantilado, hace que, simplemente guardando la distancia de seguridad con dicho acantilado, pueden ser salvados.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por fondos del programa thinkinazul NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) de la Unión Europea, proyecto de la Generalitat Valenciana GVA-THINKINAZUL/2021/039; el proyecto PID2020-114381GB-I00 de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación y VIGROB21-053 de la Universidad de Alicante. J.A.C. es beneficiario de una "Ayudas para la Recualificación del Sistema Universitario Español" ref. CA2/RSUE/2021-00418.

## 8. Referencias

Ecocartografía de Alicante (2007). *Ministerio de Transición Ecológica y Reto demográfico*. https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/ecocartografias/ecocartografia-alicante.html (consulta, 1/02/2024).

Ronda, J. L., Benabdeloued, B. Y. N. & Tent-Manclús, J. E. (2023a). Desarrollo de una nave superficial autónoma para el estudio de lagunas: ejemplo de las lagunas de Rabasa. *Geogaceta* 74, 115-118. https://doi.org/10.55407/geogaceta98281

Ronda, J. L., Benabdeloued, B. Y. N. & Tent-Manclús, J. E. (2023b). Low cost usv development to study spring ponds. In: J. del Río Fernández, (Ed.), *Instrumentation Viewpoint, News Bulletin Summer 2023, MARTECH 23* 10th International workshop on marine Technology, paper 42.

Tent-Manclús, J. E., Bonomo, D., Alcántara-Carrió, J. & Salcedo-Justicia, E. M. (enviado). Evolución reciente del *notch* del acantilado marino del Morro de Toix (Alicante, SE España). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 septiembre 2024.

Yébenes, A., Estévez, A., López-Arcos, M. & Alfaro, P. (2004). Itinerario Geológico litoral entre Benidorm, Altea y Calpe. In: P. Alfaro, J. M. Andreu, A. Estévez, J. E. Tent-Manclús & A. Yébenes, (Eds.), *Geología de Alicante* (pp. 89-116). Universidad de Alicante.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18747

# Análisis preliminar de la importancia de las características de las playas de Gran Canaria en el desarrollo urbanístico de su entorno

*Preliminary analysis of the importance of the characteristics of the beaches of Gran Canaria in the urban development of its surroundings.*

**Carlos A. Suárez- Pérez [a], Leví García-Romero [a], Abel Sanromualdo-Collado [a], Carolina Peña-Alonso [a] y Luis Hernández-Calvento[a]**

[a]Grupo de Geografía, Medio Ambiente y Tecnologías de la Información Geográfica, Instituto de Oceanografía y Cambio Global, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Parque Científico Tecnológico Marino de Taliarte, 35214 Telde, Las Palmas, España. , avigdor.suarez@ulpgc.es, , levi.garcia@ulpgc.es, , abel.sanromualdo@ulpgc.es, , carolina.pena@ulpgc.es, , luis.hernandez.calvento@ulpgc.es

How to cite: Suárez-Pérez, C.A.; García-Romero, L.; Sanromualdo-Collado, A.; Peña-Alonso, C. y Hernández-Calvento, L. 2024. Análisis preliminar de la importancia de las características de las playas de Gran Canaria en el desarrollo urbanístico de su entorno. En libro de actas: XII Jornadas de Geomorfología Litoral, Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18747

## *Abstract*

*In island environments, littoralization processe is significant due to the limited local resources and the exploitation of sun and beach tourism that is magnifying its impacts. The Canary Islands (Spain) are an example, where the mass tourism has implied strong environmental transformations on the coastal strip. The objective of this work is to identify the use and the degree of urban-tourist occupation that has occurred around the beaches of Gran Canaria and its relationship with the geological characteristics, in order to discuss the socio-environmental factors that produce its transformation. The results show that the physical condition of the beaches influences the type of human occupation, with the colour and sedimentary texture, width and length of the beaches being important parameters in the urban-tourist development. The main contribution of this work lies in the knowledge of the aspects of the nature of the beaches that facilitate urban-tourist development.*

***Keywords:*** *sedimentary nature, urban-tourist development, indicators, conservation, coastal transformation.*

## *Resumen*

*En contextos insulares, el proceso de litoralización es significativo debido a la limitación de recursos propios del lugar y la explotación del turismo de sol y playa que magnifica sus impactos. Canarias (España) es un ejemplo donde el turismo de masas ha implicado fuertes transformaciones ambientales en su franja litoral. El objetivo de este trabajo es identificar el uso y el grado de ocupación urbano-turística que se ha dado en torno a las playas de Gran Canaria (islas Canarias, España) y su relación con las características geológicas, con el fin de discutir los factores socioambientales que han producido su transformación. Los resultados revelan que la condición física de las playas afecta al tipo de ocupación desarrollado, siendo el color y la textura sedimentaria, la anchura, y la longitud de las playas parámetros importantes en su desarrollo urbano-turístico. La contribución principal de este trabajo reside en conocer los aspectos de la naturaleza de las playas que facilitan un desarrollo urbano-turístico.*

***Palabras clave:*** *naturaleza sedimentaria, desarrollo urbano-turístico, indicadores, conservación, transformaciones costera.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

En zonas insulares, el monitoreo de la sostenibilidad costera debe abordarse con urgencia. El desarrollo del turismo de masas, de sol y playa, ha supuesto un impacto severo en las franjas costeras de muchas islas, como sucede en las islas Canarias. Este impacto no se limita solo a la degradación ambiental, sino que también afecta a elementos patrimoniales, incluyendo los paisajísticos meramente geológicos. La litoralización hace que los ambientes costeros insulares, debido a la limitación de los recursos que abastece a estos, sean más vulnerables a los procesos socioecológicos cambiantes que los ambientes en costas continentales (Mimura et al., 2007). Sin embargo se está observando un crecimiento de la problemática que están afrontando algunos destinos tradicionales de turismo de sol y playa debido a la pérdida de turistas y la obsolescencia de sus infraestructuras de ocio. Los nuevos productos y experiencias turísticas están emergiendo tanto en destinos turísticos clásicos como en nuevos destinos, experimentado un declive en el propio modelo de sol-playa.

En este contexto, el patrimonio geológico de las playas toma especial relevancia. Hasta ahora, la geomorfología ha sido considerada principalmente por su valor estético y paisajístico. En este sentido, el color del material que forma la playa es un factor que influye en el paisaje costero (Pranzini y Vitale, 2010), y sus características están asociadas al tipo de mineral y/o a las fracciones de litoclastos presentes (Wiegel, 2006) y a los fragmentos de bioclastos (Calhoun y Field, 2008) que se combinan en diferentes proporciones (Gómez-Pujol et al., 2013). No obstante, se ha demostrado que la geomorfología es también la base de todas las funciones socio-ecológicas en el contexto de las playas, por lo que debe tenerse en cuenta de cara a su gestión (Peña-Alonso et al., 2017).

Este trabajo tiene como hipótesis que el uso de las playas de Gran Canaria (Islas Canarias, España), en un contexto de desarrollo urbano-turístico desde los años sesenta del siglo pasado, no ha sido sostenible con la conservación de su geopatrimonio. En este contexto, se plantea como objetivo principal analizar la distribución de las tipologías de playas en función de sus características sedimentológicas, a escala de playa (color y composición), en la isla de Gran Canaria. Sobre esta base, se analizan las relaciones entre distintas variables socioambientales con el fin de discutir los factores que han podido determinar el desarrollo urbano-turístico de las playas y sus transformaciones asociadas.

## 2. Área de estudio

Gran Canaria (Fig.1) presenta una rica diversidad geológica, debido a los diferentes sustratos geológicos, composiciones y colores de sus sedimentos. Por otro lado, presenta una geomorfología costera diversa, lo que permite medir variables socioambientales en la totalidad de sus playas. Sin embargo, esta riqueza se combina con las problemáticas actuales que enfrenta la isla, siendo una de ellas el alto desarrollo urbano-turístico, que ejerce presión constante sobre las playas más cercanas a los núcleos urbanos, aumentando el riesgo de pérdida de su biodiversidad, geodiversidad y su dinámica costera. La condición de Gran Canaria como isla capitalina tiene varias consecuencias en su configuración costera. Por un lado, es una de las islas, junto a Tenerife, que se comporta como centro económico, político y administrativo del archipiélago, lo que significa que tiene una mayor concentración de población, infraestructuras y servicios. Como resultado, Gran Canaria experimenta una mayor presión urbana sobre el medio natural, con un aumento de la construcción de viviendas, edificios comerciales y turísticos. Además, como resultado de su posición como centro neurálgico del archipiélago, Gran Canaria recibe una gran cantidad de turistas cada año, lo que, si bien es beneficioso para la economía de la isla, también implica un impacto negativo en su medio ambiente, especialmente en la costa y en las áreas naturales protegidas.

## 3. Metodología

La fuente de información base en esta investigación se sustenta en el uso del catálogo general de playas y zonas de baño marítimas de Canarias (CGP y ZBMC) (Gobierno de Canarias, 2023). De esta fuente se extrajo la relación de playas de la isla de Gran Canaria, así como las siguientes variables: i) condiciones del entorno y antropización: asociada a la ocupación por construcción de su entono inmediato y criterios de accesibilidad y servicios de cada

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

playa (natural, semiurbana y urbana), ii) composición: esta información se refiere a un criterio sedimentológico del tipo de material dominante que forma la playa (arena, mixto o rocas), y iii) color: variable que se asocia al color del material dominante que forma la playa (blanca, dorada u oscura).




***Fig.1.*** *Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia.*

Además, se han incluido otras variables para establecer relaciones socioambientales. Las variables de afluencia de usuarios, existencia de bandera azul y existencia de accesos para el publico general se obtuvieron del mismo catálogo general de playas, mientras que variables como la peligrosidad de la playa, la longitud y anchura de la playa en metros, la condición de las aguas de baño, y la existencia de espacios naturales protegidos y figuras de protección de la Red Natura 2000 (ZEC y ZEPA) fueron extraidas de la IDECanarias.

Con el fin de analizar las tipologías según la transformación urbana, el material y el color de las playas y su distribución espacial en la isla, se utilizaron las áreas, frecuencia y porcentajes de cada playa utilizando sistemas de información geográfica (SIG). Finalmente, para el análisis estádistico, se utilizó el método de correlación de Spearman para obtener una matriz que muestre los coeficientes de correlación entre cada par de variables.

## 4. Resultados

### 4.1. Caracterización de las playas: composición, color y antropización

Los resultados obtenidos a través del CGP y ZBMC muestran que el 60% del total de las playas de Gran Canaria, de acuerdo a su composición, son de gravas, cantos o bloques, seguidas de las playas de arena con el 38%, y en menor medida, las playas que combinan arena y bloques (mixtas), las cuales sólo ocupan el 2% del total de playas (Fig.2, A). En lo que respecta al color de las playas, las oscuras representan el 78% de la superficie total de la isla, las playas doradas ocupan el 20% de la superficie, y sólo existen dos playas de color blanco, que son artificiales y se ubican en la playa de Amadores y en el cauce del barranco de La Verga, conocido como Anfi del Mar (Fig.2, B). En cuanto a la antropización, las playas naturales o aisladas ocupan casi la mitad del total de playas de la isla (48%), las playas semiurbanas ocupan el 27% del total, y por último, las playas urbanas representan el 25% restante.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que las playas más antropizadas (urbanas y semiurbanas) están compuestas principalmente por arena (20 y 19 playas respectivamente), mostrando una tendencia negativa hacia las playas más naturales con 14 playas de arena. Estas últimas, están mejor representadas por playas de cantos (50), a diferencia de las playas urbanas y semiurbanas que cuentan con 13 y 19 playas respectivamente, observándose en este segundo caso una tendencia positiva (Figura 2, A).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

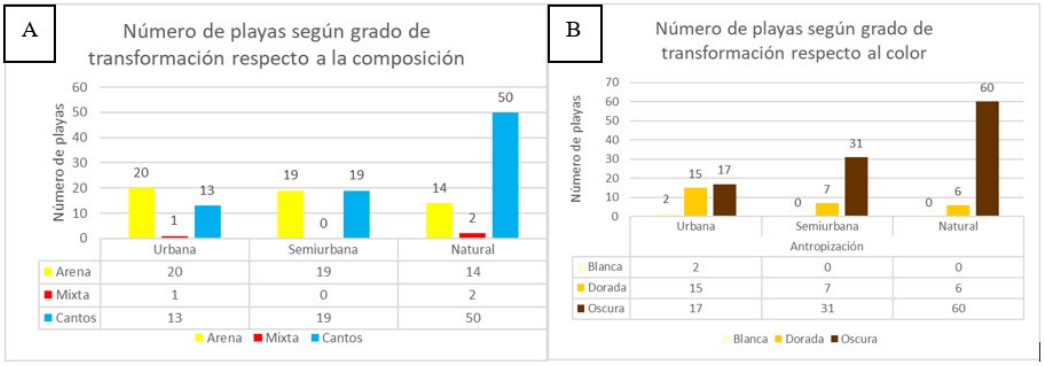



***Fig. 2.*** *Número de playas según la composición (A) y el color (B).*

En cuanto al color (Figura 2, B), se observa estadísticamente un comportamiento similar: las playas antropizadas (urbanas y semiurbanas) tienden a tener un tono de arena dorado (15 y 7 respectivamente) o incluso blanco (las únicas dos playas de color blanco de toda la muestra son consideradas urbanas), observándose de nuevo una tendencia negativa, mientras que las playas más oscuras muestran una tendencia positiva y corresponden a aquellas que se encuentran en un estado más aislado o natural (60) con respecto a las playas urbanas y semiurbanas (17 y 31).

### 4.2. Correlación entre variables

En la Tabla 1 se observa que las playas distiguidas con "Bandera Azul", tienden a ser de arena o mixtas, y tienen tonos dorados o blancos. Además, las playas más urbanas son las que suelen tener "Bandera Azul", mientras que las playas aisladas tienen menos probabilidades. La "Bandera Azul" no se otorga a playas protegidas por una figura de protección ambiental autonómica o europea. Estas tres últimas relaciones están de acuerdo con los propios criterios para otorgar la "Bandera Azul", especialmente los asociados a la "gestión de residuos" o al "control de calidad del agua", que no suelen cumplir las playas identificadas como naturales.

Con respecto a otras variables estudiadas, se detectan correlaciones significativas entre la longitud y la anchura de las playas, y las playas más urbanizadas tienen más opciones de acceso. En este sentido, se deduce que las playas más anchas suelen ser de arena o mixta, con tonos dorados, y tienen condiciones más óptimas y seguras para el baño. También suelen ser más urbanas y no se encuentran en ZEPA. La composición de la playa también está relacionada con las condiciones: las playas tranquilas y de baño seguro suelen ser de arena, mientras que las playas mixtas o bloques suelen ser más moderadas o incluso peligrosas. Además, el acceso es más sencillo en las playas de arena. Finalmente, se confirma, según la Tabla 1, que las playas más urbanizadas no suelen estar en Espacios Naturales Protegidos, también como la ZEC o ZEPA, porque no cumplen con los requisitos necesarios.

## 5. Discusión

El desarrollo urbanístico, en gran medida vinculado al turismo, ha sido el responsable de la alteración de gran parte de los ecosistemas sedimentarios costeros en Canarias (García-Romero et al., 2016). Paradójicamente, esta actividad puede haber contribuido al deterioro de las playas como escaparate turístico. En este sentido, se ha comprobado que el color y la composición de la playa es un factor que influye en el paisaje costero (Pranzini y Vitale, 2010), especialmente cuando se asocia a los paisajes más transformados. Por consiguiente, el color y la composición de los sedimentos de las playas son factores considerados para evaluar la adecuación de los tramos costeros para el desarrollo de construcciones urbanas y turísticas. En algunos estudios, se ha demostrado que los turistas tienen preferencias y optan por el uso de playas de arena blanca y dorada (Williams y Micallef, 2009), con un descontento por playas que adquieren una arena de color más oscuro (Pranzini y Vitale, 2010). En el caso de Gran Canaria, se confirma que no todas las playas han despertado el mismo interés para el desarrollo urbano-turístico. Los resultados de este estudio indican que las playas de color blanco y dorado, compuestas principalmente de arena, son las que han sido más transformadas por este tipo de desarrollo.

 BY-NC-SA

***Tabla 1.*** *Correlaciones entre las diferentes variables. Fuente: elaboración propia.*

**Correlaciones**

| | | | Banderaazul | Longitudmetros | Anchurametros | Composición | Color | Condiciones | Antropización | Acceso | ENP | ZEC | ZEPA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Spearman's rho | Banderaazul | Correlation Coefficient | 1,000 | -,225** | -,375** | ,271** | ,431** | ,167 | -,403** | -,048 | -,139 | ,151 | -,125 |
| | | Sig. (2-tailed) | | ,008 | ,000 | ,001 | ,000 | ,065 | ,000 | ,594 | ,103 | ,077 | ,144 |
| | | N | 138 | 138 | 138 | 138 | 135 | 123 | 136 | 125 | 138 | 138 | 138 |
| | Longitudmetros | Correlation Coefficient | -,225** | 1,000 | ,327** | -,161 | -,151 | -,140 | ,228** | ,261** | -,173* | -,094 | ,099 |
| | | Sig. (2-tailed) | ,008 | | ,000 | ,059 | ,081 | ,123 | ,007 | ,003 | ,043 | ,274 | ,247 |
| | | N | 138 | 138 | 138 | 138 | 135 | 123 | 136 | 125 | 138 | 138 | 138 |
| | Anchurametros | Correlation Coefficient | -,375** | ,327** | 1,000 | -,376** | -,469** | -,253** | ,355** | ,065 | ,080 | -,063 | ,255** |
| | | Sig. (2-tailed) | ,000 | ,000 | | ,000 | ,000 | ,005 | ,000 | ,473 | ,352 | ,462 | ,003 |
| | | N | 138 | 138 | 138 | 138 | 135 | 123 | 136 | 125 | 138 | 138 | 138 |
| | Composición | Correlation Coefficient | ,271** | -,161 | -,376** | 1,000 | ,383** | ,299** | -,393** | -,179* | -,151 | ,017 | -,125 |
| | | Sig. (2-tailed) | ,001 | ,059 | ,000 | | ,000 | ,001 | ,000 | ,045 | ,077 | ,840 | ,144 |
| | | N | 138 | 138 | 138 | 138 | 135 | 123 | 136 | 125 | 138 | 138 | 138 |
| | Color | Correlation Coefficient | ,431** | -,151 | -,469** | ,383** | 1,000 | ,342** | -,380** | -,126 | -,194* | ,029 | -,086 |
| | | Sig. (2-tailed) | ,000 | ,081 | ,000 | ,000 | | ,000 | ,000 | ,166 | ,024 | ,736 | ,323 |
| | | N | 135 | 135 | 135 | 135 | 135 | 120 | 133 | 122 | 135 | 135 | 135 |
| | Condiciones | Correlation Coefficient | ,167 | -,140 | -,253** | ,299** | ,342** | 1,000 | -,347** | -,330** | ,035 | -,110 | -,180* |
| | | Sig. (2-tailed) | ,065 | ,123 | ,005 | ,001 | ,000 | | ,000 | ,000 | ,699 | ,226 | ,046 |
| | | N | 123 | 123 | 123 | 123 | 120 | 123 | 123 | 123 | 123 | 123 | 123 |
| | Antropización | Correlation Coefficient | -,403** | ,228** | ,355** | -,393** | -,380** | -,347** | 1,000 | ,148 | ,402** | ,238** | ,402** |
| | | Sig. (2-tailed) | ,000 | ,007 | ,000 | ,000 | ,000 | ,000 | | ,100 | ,000 | ,005 | ,000 |
| | | N | 136 | 136 | 136 | 136 | 133 | 123 | 136 | 125 | 136 | 136 | 136 |
| | Acceso | Correlation Coefficient | -,048 | ,261** | ,065 | -,179* | -,126 | -,330** | ,148 | 1,000 | -,152 | ,037 | ,050 |
| | | Sig. (2-tailed) | ,594 | ,003 | ,473 | ,045 | ,166 | ,000 | ,100 | | ,090 | ,680 | ,579 |
| | | N | 125 | 125 | 125 | 125 | 122 | 123 | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 |
| | ENP | Correlation Coefficient | -,139 | -,173* | ,080 | -,151 | -,194* | ,035 | ,402** | -,152 | 1,000 | ,607** | ,379** |
| | | Sig. (2-tailed) | ,103 | ,043 | ,352 | ,077 | ,024 | ,699 | ,000 | ,090 | | ,000 | ,000 |
| | | N | 138 | 138 | 138 | 138 | 135 | 123 | 136 | 125 | 138 | 138 | 138 |
| | ZEC | Correlation Coefficient | ,151 | -,094 | -,063 | ,017 | ,029 | -,110 | ,238** | ,037 | ,607** | 1,000 | ,348** |
| | | Sig. (2-tailed) | ,077 | ,274 | ,462 | ,840 | ,736 | ,226 | ,005 | ,680 | ,000 | | ,000 |
| | | N | 138 | 138 | 138 | 138 | 135 | 123 | 136 | 125 | 138 | 138 | 138 |
| | ZEPA | Correlation Coefficient | -,125 | ,099 | ,255** | -,125 | -,086 | -,180* | ,402** | ,050 | ,379** | ,348** | 1,000 |
| | | Sig. (2-tailed) | ,144 | ,247 | ,003 | ,144 | ,323 | ,046 | ,000 | ,579 | ,000 | ,000 | |
| | | N | 138 | 138 | 138 | 138 | 135 | 123 | 136 | 125 | 138 | 138 | 138 |

**. La correlación es significativa al nivel 0,01.
*. La correlación es significativa al nivel de 0,05.

En contraste, las playas con cantos y tonalidades oscuras no han sido objeto de intervenciones significativas, probablemente porque no resulten de tanto interés para el sector turístico. Estos resultados preliminares evidencian que el desarrollo urbano-turístico ha tenido un impacto selectivo en las diferentes playas de la isla, priorizando aquellas que cumplen con ciertas características estéticas demandadas por los visitantes y que están relacionadas con su patrimonio geológico (Dóniz-Páez et al., 2020).

En este sentido, las playas canarias tienen una gran relevancia debido a los elevados valores geopatrimoniales derivados de la interacción de geoformas volcánicas y no volcánicas (Dóniz-Páez et al., 2020). Sin embargo, existen contradicciones, ya que los turistas "influidos por los folletos de las agencias de viajes y los documentales de televisión, que asocian estrictamente una playa tropical con arena blanca de coral, se decepcionan con frecuencia al encontrar arena de color oscuro, cuando no completamente negra, derivada de rocas basálticas" (Pranzini y Vitale, 2010). Así, en Gran Canaria, a pesar de que las playas de cantos, gravas y rocas, y además, de color oscuro, representan el 60% y 78% de las playas, respectivamente, el reclamo y la oferta turística se sigue centrando en las otras tipologías minoritarias de playa.

La explotación turística ha generado una presión sobre el patrimonio natural, cultural y arqueológico, que resulta en un debate sobre la necesidad de encontrar un equilibrio entre el desarrollo turístico y la conservación del patrimonio natural de las islas (García-Romero et al., 2016). Es por ello que cabría profundizar en un largo debate donde la oferta turística asociada a playas en la isla de Gran Canaria integrara a todas las tipologías de playas, desde las playas de arena hasta las playas de callaos, gravas y rocas, y desde las playas oscuras a las playas blancas (o artificiales). Es incongruente que las playas de callaos, gravas y rocas, y además de color oscuro, que representan el 60% y 78% de las playas respectivamente no tengan prácticamente protagonismo como un recurso turístico que, en primera instancia, sería interesante para fomentar el geoturismo asociado a playas (Dóniz-Páez et al., 2020).

## 6. Conclusiones

Las transformaciones realizadas en las playas de Gran Canaria, como la construcción de espigones, la aportación de arena y la urbanización de la costa, han afectado a la geodiversidad y al paisaje natural, generando conflictos y

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

desafíos para su gestión y conservación. Es importante destacar que el desarrollo urbano-turístico ha sido selectivo en su impacto, priorizando las playas de color blanco y dorado, compuestas principalmente de arena, mientras que las playas con cantos y tonalidades oscuras han sido menos intervenidas. Esto, entre otras causas, podría ser debido a su menor atractivo para el mercado turístico. Las alteraciones en las playas han afectado a la calidad y a la capacidad de protección de la costa contra los efectos del oleaje y la subida del nivel del mar. Además, se ha observado que las playas más afectadas son las ubicadas en áreas urbanas y semiurbanas (donde se suelen construir infraestructuras que interfieren en la dinámica de las playas), que además optan a galardones como la "Bandera Azul", mientras que las playas protegidas y naturales presentan una mayor estabilidad a largo plazo. Por esta razón, sería conveniente encontrar un equilibrio entre el turismo y la conservación, con el objetivo de proteger estos valiosos recursos costeros y su entorno natural. Esto podría desarrollarse a través de la oportunidad que nos ofrecen alternativas al turismo tradicional, como el geoturismo. El estudio resalta la necesidad de tomar medidas sostenibles para proteger las playas y los ecosistemas costeros de Gran Canaria, garantizando su valor como activo valioso para la isla, su comunidad local y su economía. Para ello, es esencial la gestión responsable y planificada de estos espacios.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto de I+D+i "PID2021-124888OB-I00", financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación y por "FEDER". Carlos A. Suárez-Pérez es contratado predoctoral financiado por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información (ACISII-Gobierno de Canarias) y Fondos FEDER (FPI2024010106). L. García-Romero es contratado postdoctorales del programa Catalina Ruiz del Gobierno de Canarias y Fondo Social Europeo (APCR2022010005).

## 8. Bibliografía

Calhoun, R. S., & Field, M. E. (2008). Sand composition and transport history on a fringing coral reef, Molokai, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 24(5), 1151-1160.

Dóniz-Páez, J., Beltrán Yanes, E., Becerra-Ramírez, R., Pérez, N., Hernández, P. & Hernández, W. (2020). Diversity of volcanic geoheritage in the Canary Islands, Spain. *Geosciences*, 10(390).

García-Romero, L., Hernández-Cordero, A. I., Fernández-Cabrera, E., Peña-Alonso, C., Hernández-Calvento, L., & Pérez-Chacón, E. (2016). Urban-touristic impacts on the aeolian sedimentary systems of the Canary Islands: conflict between development and conservation. *Island Studies Journal*, 11 (1), 91-112.

Gómez-Pujol, L., Roig-Munar, F.X., Fornos, J.J., Balaguer, P., & Mateu, J. (2013). Provenance-related characteristics of beach sediments around the island of Menorca, Balearic Islands (western Mediterranean). *Geo-Marine letters*. 33, 195-208.

Mimura N., Nurse L., McLean R., Agard J., Briguglio L., Lefale P., Payet R. & Sem G. (2007). *Small islands. Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 687–716. 1207.

Peña-Alonso, C., Hernández-Calvento, L., Pérez-Chacón, E., & Ariza-Solé, E. (2017). The relationship between heritage, recreational quality and geomorphological vulnerability in the coastal zone: A case study of beach systems in the Canary Islands. *Ecological Indicators*, 82, 420-432.

Pranzini, E., & Vitale, G. (2010). Beach sand colour: the need for a standardised assessment procedure. *Journal of Coastal Research*, (61 (10061)), 66-69. https://doi.org/10.2112/SI61-001.67

Wiegel, R. L. (2006). Waimea River mouth to Kekaha beach, Kauai, Hawaii: two distinctive natural sands. In *Selected Coastal Engineering Papers of Robert L. Wiegel: Civil Engineering Classics* (pp. 878-885). ASCE.

Williams, A. & Micallef, A. (2009). *Beach Management. Principles and Practice*. Earthscan, London, pp. 445.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18878

# Análisis sedimentológico de las playas del norte del municipio de Telde (Gran Canaria, España): Experiencia didáctica

*Sedimentological analysis of the northern beaches of the municipality of Telde (Gran Canaria, Spain): Educational experience*

**Isabel Montoya-Montes[a], Mª José Sánchez-García[b], Ignacio Alonso[b] y José Mangas[b]**

[a]Facultad de Ciencias del Mar, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (UPGC), , isabel.montoya@ulpgc.es; [b]Departamento de Física, UPGL (, mariajose.sanchez@ulpgc.es; , ignacio.alonso.bilbao@ulpgc.es y , jose.mangas@ulpgc.es).

How to cite: Montoya-Montes, I.; Sánchez-García, M.J.; Alonso, I.; Mangas, J. 2024. Sedimentological analysis of the beaches of Telde (Gran Canaria, Spain): Educational experience. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18878

***Abstract***

*This paper describes a didactic experience developed with the students of the 2nd year of Marine Sciences as part of the subject Marine Sedimentary Environments, in which the analysis of the detrital sediments of three beaches at the north of the municipality of Telde (Gran Canaria Island) is approached, from the acquisition of data in the field, laboratory analysis, interpretation of results and preparation of a poster in congress format for publication. The proposal aims to familiarize students with the analysis of sediments and their relationship with the dynamic agents that control their distribution. The importance of the experience lies in the fact that for the first time in the degree they are studying, students face a scientific challenge in the field of coastal geology that they manage to solve successfully.*

***Keywords:*** *sedimentology, beach morphodynamics, didactics, Marine Sciences, Gran Canaria.*

***Resumen***

*Este artículo describe una experiencia didáctica desarrollada con el alumnado de 2º curso del grado en Ciencias del Mar en la asignatura Medios Sedimentarios Marinos, en la que se aborda el análisis de los sedimentos detríticos de tres playas al norte del municipio de Telde (Gran Canaria), cubriendo varias etapas del método científico, desde el trabajo de campo con la observación, planteamiento de hipótesis y adquisición de datos y muestreos, hasta el análisis en laboratorio, interpretación de resultados y elaboración de un poster en formato de congreso para su publicación. La propuesta pretende familiarizar al alumnado con el análisis de los sedimentos y su relación con los agentes dinámicos que controlan su distribución. La importancia de la experiencia radica en que por primera vez en la titulación que están cursando, el alumnado se enfrenta a un reto científico en el campo de la geología costera que consiguen resolver con éxito.*

***Palabras clave:*** *sedimentología, morfodinámica de playas, didáctica, Ciencias del Mar, Gran Canaria.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

El análisis de los sedimentos detríticos de una playa, así como la observación de la morfología de la misma, constituyen herramientas básicas en cualquier estudio de dinámica litoral, permitiendo determinar los agentes actuantes y comprender los procesos que controlan la distribución de los sedimentos en ese determinado medio sedimentario. En este sentido, el conocimiento y uso de esta técnicas, constituyen una parte esencial en el inicio de los estudios de Ciencias del Mar, de cara a comprender la interacción mar-tierra.

La propuesta es especialmente interesante por el reto que supone para el alumnado, que por primera vez se enfrenta a la resolución de un caso práctico que, por otra parte, será de utilidad en el desarrollo de su carrera profesional como oceanógrafos (rama geológica). Se cubren todas las fases a desarrollar en cualquier estudio científico real, desde la adquisición de datos en campo, como los análisis correspondientes en laboratorio y las posteriores interpretaciones, culminando su trabajo con la elaboración de un poster susceptible de ser presentado en algún foro de debate.

El objetivo de este artículo consiste en establecer puentes de conexión entre el ámbito científico y el ámbito académico, presentando una experiencia didáctica de relativamente bajo coste y que constituye el punto de partida para iniciar al alumnado en geología litoral y marina. Así, en la propuesta se pretende la familiarización del estudiandado con las técnicas básicas empleadas en sedimentología y estratigrafía, así como la adquisición de conocimientos sobre los procesos geológicos externos que tienen lugar en los medios sedimentarios costeros.

## 2. Área de Estudio

La región elegida para esta propuesta se ubica en la zona este de Gran Canaria (Islas Canarias, España), en concreto en la costa norte del municipio de Telde (Fig. 1). Se trata de tres playas muy próximas entre sí pero con características sedimentológicas diferentes, de manera que es posible explorar varios ambientes sedimentarios y energéticos en una extensión relativamente reducida. A continuación se describen las características generales del las playas estudiadas:

- En primer lugar, la playa formada en la desembocadura del Barranco Real de Telde (Fig. 1A), limitada al S por lavas pliocuaternarias y al N por depósitos de la Formación Detrítica de Las Palmas (Mioceno Sup.), y que está constituida por cantos de origen volcánico, de composición máfica y félsica, bastante retrabajados por el oleaje.
- En segundo lugar, la playa de La Restinga (Fig. 1B), limitada al S por depósitos de eolianitas y paleoplayas del Pleistoceno superior, y al N por depósitos volcánicos cuaternarios, es una playa mixta con depósitos eólicos actuales, en el extremo sur de la zona supramareal.
- Por último, la playa de Bocabarranco y desembocadura del barranco de las Goteras (Fig. 1C), limitada al N por dunas fósiles y paleoplayas del Pleistoceno superior, y depósitos de coluviones recientes, y al S por lavas volcánicas cuaternarias, depósitos de bechrock pleistocenos, y niveles de piroclastos holocenos de la erupción volcánica de Bandama (70 años después de Cristo). Es también una playa mixta que convive con la desembocadura del barranco y, por tanto, presenta variabilidad en el tamaño de sus sedimentos detríticos.

El viento dominate en la zona es de componente N-NE. El oleaje más frecuente es del N-NE, al igual que los temporales más energéticos. No obstante, puede haber episodios aislados de oleaje de componente SE.

## 3. Metodología

La propuesta planteada, diseñada para un grupo de unos 40-50 estudiantes que trabajarán en 8 grupos de unas 5 o 6 personas por equipo, y se desarrolla en tres etapas :

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

### 3.1. Trabajo de campo

En la playa de la desembocadura del barranco Real de Telde se propone la realización de un esquema del perfil de la playa, incluyendo elementos morfológicos (cambios de pendiente, ondulaciones, etc.) y la textura sedimentaria. Además, se aborda la caracterización sedimentaria de playas de cantos dividiendo al alumnado en 8 grupos que se distribuyen por la playa (4 grupos en la zona intermareal y otros 4 en la zona supramareal) para medir cada grupo los tres ejes de cada canto, de una muestra de 25 cantos elegidos al azar, en diferentes puntos de la playa y debatir la procedencia de los mismos (Fig. 2A).

En la playa de La Restinga se describe la textura del sedimento, grado de selección, se observa el oleaje y la morfología de la playa. Se esquematiza el perfil de playa incluyendo la distribución de los distintos tamaños de grano de los sedimentos, además de cualquier tipo de morfología en la playa (roturas de pendiente, estructuras sedimentarias, etc.). Se toman muestras de arena superficial de las zonas supramareal e intermareal de la playa, a lo largo de 4 perfiles transversales, almacenádolas en bolsas selladas y etiquetadas para su posterior traslado al laboratorio. Cada punto de muestreo se referenció con GPS de mano.

Por su parte, en la playa de Bocabarranco se repite el procedimiento seguido en La Restinga y, además, se identifican estructuras sedimentarias y se determina el límite entre ambientes sedimentarios.

El trabajo de campo se realizó en una única sesión de unas ocho horas de duración.

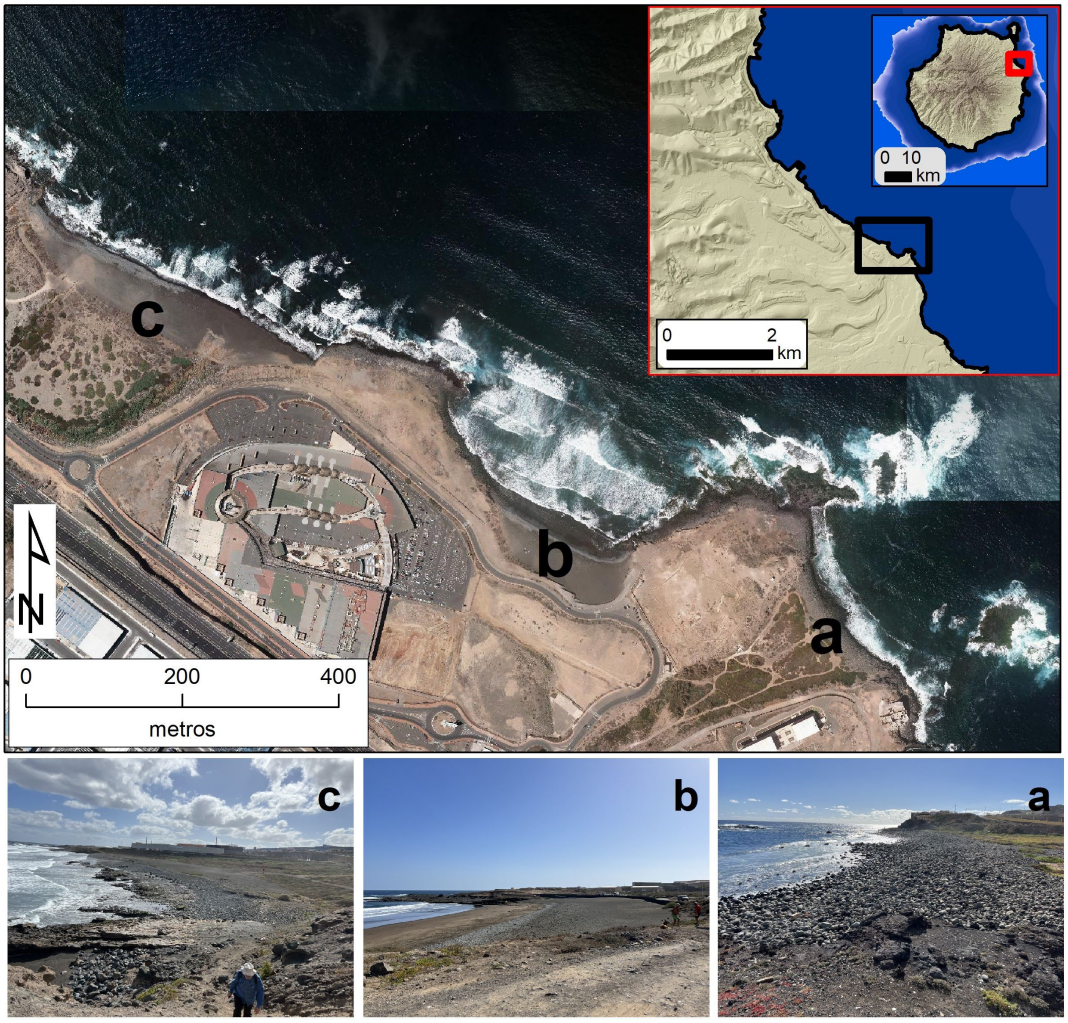



***Fig. 1.*** *Mapa de localización de la zona de estudio. (A) Playa de la desembocadura del Barranco Real de Telde; (B) Playa de La Restinga; (C) Playa de Bocabarranco y desembocadura del Barranco de Las Goteras.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

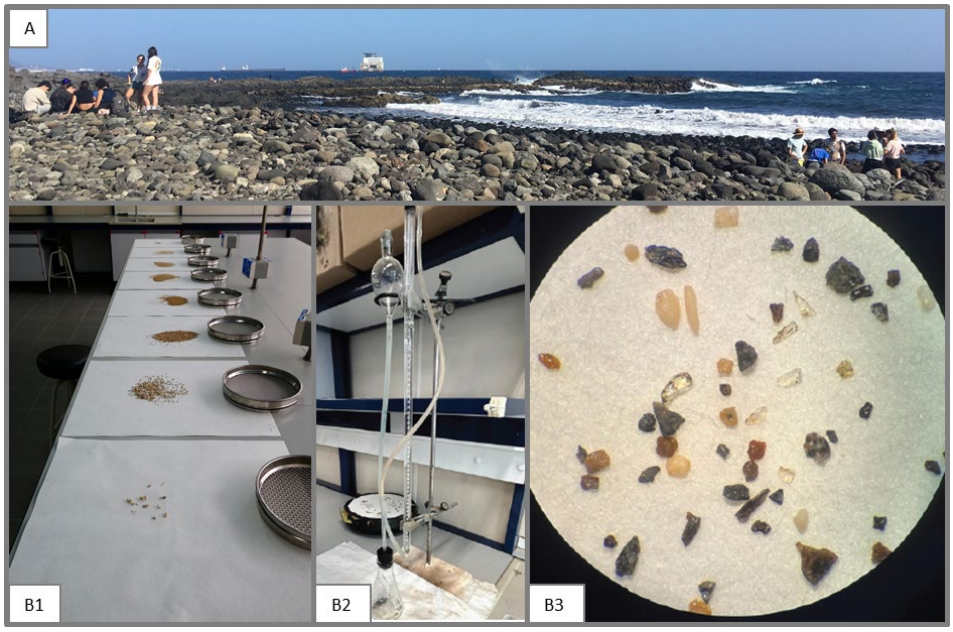



***Fig. 2.*** *(A) Trabajo de campo en la desembocadura del Barranco Real de Telde; (B) Análisis de laboratorio: granulometría (1), calcimetría (2) y morfometría (3).*

### 3.2. Análisis en laboratorio y tratamiento de datos

En laboratorio cada grupo procede al lavado, cuarteo y tamizado de las muestras (2 muestras por grupo) en seco a intervalos de 1ϕ (Fig. 2B). La obtención de los parámetros granulométricos se realizó manualmente por el método gráfico de Folk y Ward (1957), así como mediante el uso de GRADISTAT (v. 9.1) (Blott & Pye, 2001).

El contenido en carbonato de cada muestra se obtuvo mediante la descomposición de los carbonatos por la acción del HCl, con liberación de $CO_2$ gaseoso, medido con el calcímetro de Bernard.

El grado de redondez y esfericidad de una serie aleatoria de al menos 100 granos de cada muestra, se obtuvo a partir de la observación con lupa binocular y la comparación con la escala visual de Powers (1953), Krumbein y Sloss (1955). Simultáneamente a la observación de la forma de los granos, se tuvo en consideración la naturaleza de las partículas.

Los datos tomados en campo con las medidas de los cantos de la playa del Barranco Real de Telde se representan en el diagrama de Sneed y Folk (1958), utilizando la hoja TRI-PLOT (Triangular diagram plotting spreadsheet) de Graham y Midgley (2000).

Cada grupo de estudiantes realiza el análisis de laboratorio y tramiento de datos a lo largo de tres sesiones, de dos horas cada una, en el laboratorio de geología.

### 3.3. Interpretación y presentación de resultados

Los resultados obtenidos en laboratorio y las observaciones realizadas en campo se relacionan con el contexto dinámico y morfológico de la zona, y se analiza su distribución espacial. Se elaboran las figuras y gráficas necesarias y se presentan en un poster siguiendo las normas de cualquier congreso científico. El poster se presenta en una última sesión de evaluación, como colofón a todo el desarrollo práctico llevado a cabo en el desarrollo de la asignatura. Esta etapa se desarrolla a lo largo de cinco horas distribuidas en tres sesiones de gabinete.

## 4. Resultados y Discusión

Los resultados de la experiencia fueron altamente satisfactorios. Si bien, inicialmente el proceso arranca con una fase de confusión, al encontrarse el alumnado haciendo algo completamente nuevo con conceptos que se van

 BY-NC-SA

aprendiendo paralelamente al desarrollo del experimento. Tambien se observa cómo al final del proceso, el estudiantado es capaz de relacionar los diferentes conceptos aprendidos determinando y explicando las causas de las variaciones en el tamaño de grano, grado de selección, composición y forma de los granos. Además, consiguen plasmar los resultados de su investigación en un poster científico (Fig. 3).

La temporalización inicial planeada para el desarrollo completo del ejercicio hubo que adaptarla ligeramente a los ritmos del estudiantado y añadir una hora más para la elaboración y presentación del poster.

Es destacable que la adquisición de datos la realizan justo al comienzo de la asignatura cuatrimestral, es decir, cuando a penas han recibido base teórica específica de Medios Sedimentarios. Tan sólo cuentan con los conocimientos de geología general adquiridos en el primer curso del grado. Dos meses después ya conocen las técnicas básicas de análisis sedimentológico y consiguen establecer conclusiones sobre los agentes dinámicos que controlan la zona. De esta forma, el estudiantado adquiere una serie de conocimientos y competencias de gran utilidad e interés para otras materias que cursarán a lo largo del título.

Las valoraciones de los alumnos sobre la actividad han sido positivas. Aunque describen un gran esfuerzo para alcanzar la última fase, reconocen su satisfacción al haber sido capaces de alcanzar con éxito los objetivos inicialmente planteados.

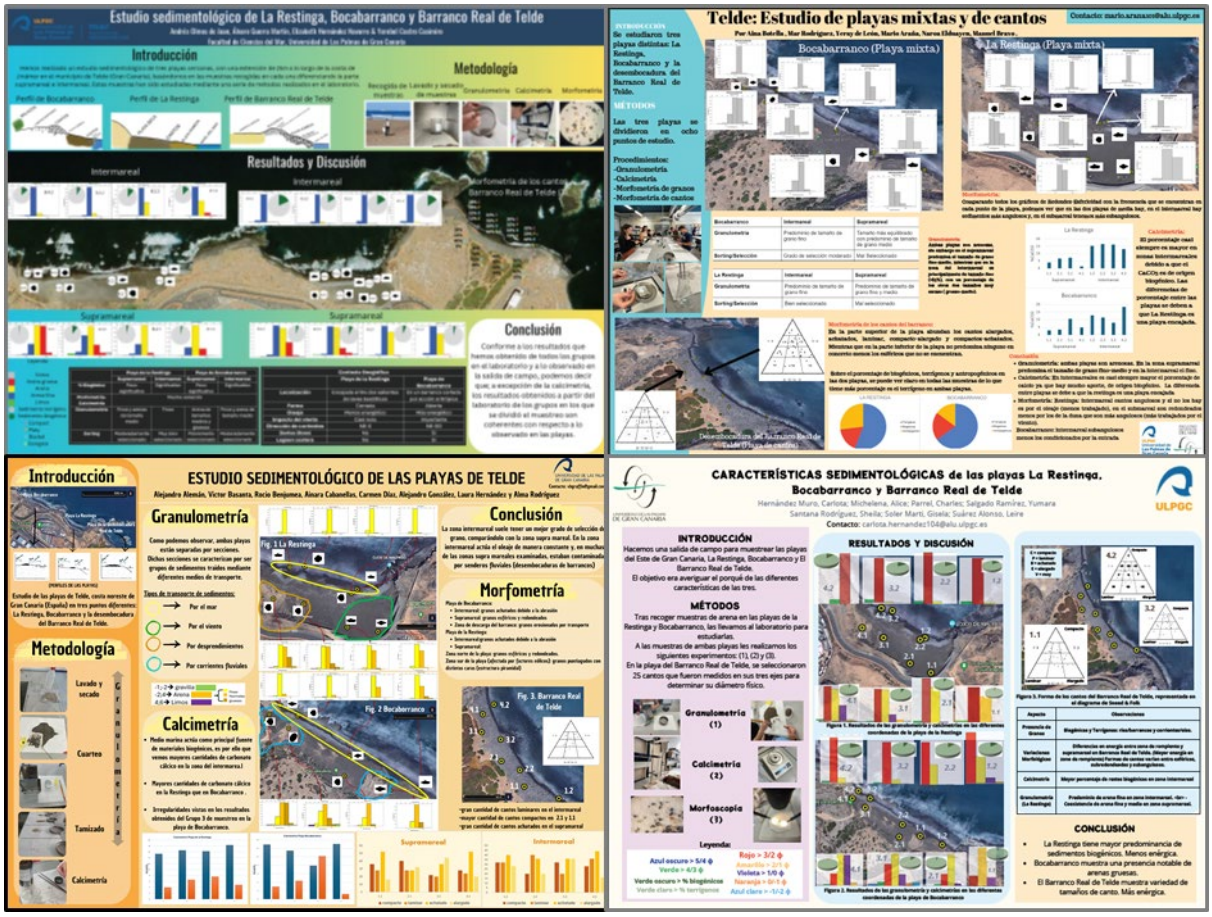



***Fig. 3.*** *Ejemplos de poster resultado del trabajo científico llevado a cabo por el alumnado de 2º curso del grado en CC. del Mar de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria durante el curso 2023-2024.*

## 5. Conclusiones

La metodología práctica aplicada es sumamente positiva para la consecución de los objetivos y competencias propuestos para la asignatura de Medios Sedimentarios Marinos de 2ºcurso de Grado en CC. del Mar.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

La gran ventaja que presenta es que es perfectamente replicable a cualquier otra materia, tanto del grado en CC. del Mar como de cualquier otra titulación.

La adquisición de conocimientos sobre análisis sedimentológico y su distribución en los medios sedimentarios costeros, así como su relación con los principales agentes controladores, está plenamente garantizada con la experiencia didáctica propuesta.

## 6. Agradecimientos

Los autores quieren resaltar el papel protagonista en este trabajo del alumnado de la asignatura Medios Sedimentarios del 2º curso de Ciencias del Mar (2023-24), de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, y asimismo agradecer su inestimable colaboración en el mismo.

## 7. Referencias

Blott, S.J. y Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248. https://doi.org/10.1002/esp.261

Folk, R.L. y Ward, W.C. (1957). A Study in the Significance of Grain-Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26. https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D

Graham, D.J., Midgley, N.G. (2000). Graphical representation of particle shape using triangular diagrams: an Excel spreadsheet method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25 (13), 1473-1477. https://doi.org/10.1002/1096-9837(200012)25:13<1473::AID-ESP158>3.0.CO;2-C

Krumbein, W. y Sloss, L. (1955). *Stratigraphy and sedimentation*, San Francisco, USA, Freeman & Company Powers.

Sneed, E. D. y Folk, R.L. (1958). Pebbles in the Lower Colorado River, Texas: a study in particle morphogenesis. *Journal of Geology*, 66, 114-150. https://doi.org/10.1086/626490

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

GEOLIT

# SESIÓN 6



XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.17046

# Descripción geomorfológica de los sistemas deposicionales en la línea de costa de la isla de Cabrera (Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera, Islas Baleares)

*Geomorphological description of the accumulation systems on the coastline of the island of Cabrera (Maritime-Terrestrial National Park of the Cabrera Archipelago, Balearic Islands)*

**Jaume Servera-Nicolau [a], Guillem X. Pons [a] y Laura del Valle [a]**

[a]Universitat de les Illes Balears, Departament de Geografia, ( jaumeserveranicolau@gmail.com; , guillemx.pons@uib.es; , lauradelvalle.geo@gmail.com).

How to cite: Servera-Nicolau, J.; Pons, G.X. y del Valle, L. 2024. Descripción geomorfológica de los sistemas deposicionales en la línea de costa de la isla de Cabrera (Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera, Islas Baleares). En libro de actas: XII Jornadas de Geomorfología Litoral. València, 25-27 de setiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.17046

***Abstract***

*This article presents the morphometric characteristics and lithological nature of the coastal sedimentary environments of the island of Cabrera (Maritime-terrestrial National Park of the Cabrera Archipelago, Balearic Islands) most of which are difficult to access -only by sea-.. In total, 21 of these depositional systems have been characterized along the coast of the island of Cabrera. Regarding previous data, recent changes have been observed in the granulometry of some of these sedimentary environmental units.*

***Keywords:*** *Cabrera Archipelago, Balearic Islands, coastal geomorphology, beaches, screes, National Park.*

***Resumen***

*En este artículo se dan a conocer las características morfométricas y la naturaleza litológica de los ambientes sedimentarios litorales de la isla de Cabrera (Parque Nacional marítimo terrestre del archipiélago de Cabrera, Islas Baleares), la mayoría de difícil acceso -sólo por mar-. En total a lo largo de la costa de la isla de Cabrera se han caracterizado 21 de estos sistemas deposicionales. Respecto a datos anteriores se han constatado cambios recientes en la granulometría de alguna de estas unidades ambientales sedimentarias..*

***Palabras clave:*** *Archipiélago de Cabrera, Islas Baleares, geomorfología litoral, playas, canchales, Parque Nacional.*

## 1. Introducción

El archipiélago de Cabrera forma parte del dominio público del Estado y está afecto al Ministerio de Defensa desde que en 1916, y por Real Orden de la Presidencia del Consejo de Ministros de 25 de junio, fue declarado de Utilidad Pública y sujeto a expropiación forzosa por motivos de seguridad del Estado. Perteneciente al municipio de Palma de Mallorca, está constituido por dos islas mayores, Cabrera y L'Illa des Conills, y una serie de islotes, sumando en conjunto 1.836 ha de superficie terrestre (datos según Ley 14/1991), más 8.703 ha marinas (datos según Resolución de 7 de febrero de 2019) (los datos de superficies no son los mismos de un BOE a otro, ni con la información del Govern de les Illes Balears, ni de otras publicaciones científicas debido, seguramente, a problemas

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

de escala). Se trata hoy en día de la mayor extensión insular del Mediterráneo que permanece sin urbanizar; constituye el área natural mejor conservada de las Baleares, ya que su afección a la Defensa la ha sustraído íntegramente al uso turístico masificado, y es, asimismo, el mayor de los pequeños archipiélagos españoles, tanto por su extensión geográfica como por el número de islas e islotes que lo forman. Está situado a unos 10 km al suroeste de Mallorca y se extiende a lo largo de un eje N-NW y S-SW, constituyendo la prolongación emergida de las Serres de Llevant, de Mallorca (Ley 14/1991).

El Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera fue declarado en Abril de 1991 se localiza en el Mediterráneo Occidental, siendo el primer parque Nacional Marítimo-Terrestre. Posteriormente fue ampliada su superficie marina con 80.779,05 ha más (Resolución de 7 de febrero de 2019) y actualmente, el Parque tiene una superficie total de 90.800,52 ha. Este sub-archipiélago Balear lo constituyen 19 unidades insulares, las dos mayores son: Cabrera Gran y l'Illa des Conills, la primera con una superficie de 1.139,04 ha y 172,8 m de altura la segunda con una superficie 136,21 ha y 123 m de altura (Ginés y Gómez-Pujol, 2020). El resto, 17 islas e islotes de menores dimensiones, no superan la superficie de una hectárea, a la que hay que añadir unos 142 pequeños escollos y arrecifes inferiores de 0,1 ha. En conjunto y en especial la isla de Cabrera Gran, debido a su historia natural presentan unas características fisiográficas singulares, con una extraordinaria variedad litológica y geológica manifiesta en un espacio relativamente reducido que se puede observar en la costa de todo su perímetro. Este hecho reafirma al conjunto del Parque Nacional de Cabrera como un lugar excelente para la investigación geomorfológica y especialmente en Geomorfología Litoral.

## 2. Área de estudio

El Archipiélago de Cabrera lo forman una alineación de NE a SW de siete islas mayores que ganan dimensión de norte a sur y una docena de islotes que orbitan en su entorno. Para el presente trabajo centraremos nuestra atención exclusivamente en la isla mayor Cabrera Gran, ya que es la única de todas que presenta sectores de línea de costa donde se dan la condiciones ambientales y morfológicas para que se produzcan costas con procesos de acumulación.

Todo el conjunto de tierras emergidas y del relieve batimétrico que enmarca el Archipiélago de Cabrera son el reflejo morfológico de la prolongación en dirección al SSW de las Serres de Llevant de Mallorca (Rodríguez-Perea y Servera, 1993). Así pues, igual que pasa en el Llevant de Mallorca, es de esperar que los materiales que encontramos en Cabrera sean predominantemente naturaleza carbonatada del Mesozoico, aunque también están presentes materiales más jóvenes de la misma naturaleza litológica correspondientes al Eoceno, Mioceno Superior, Pleistoceno y Holoceno.

Describir la fisiografía de Cabrera Gran no es tarea fácil, ya que presenta una compleja topografía y una línea de costa muy recortada con remarcados entrantes y salientes. Este panorama barroco del paisaje de Cabrera Gran se debe fundamentalmente a dos factores:1) su afectación por las dos últimas etapas tectónicas sucedidas en todo el Promontorio: la compresión Alpina y la distensión neógena. La primera etapa, estructura los materiales en pliegues y encabalgamientos con una convergencia mayoritaria al NW. La segunda, etapa distensiva, da lugar a fallas normales con orientaciones NE-SW i NW-SE y que producen el compartimento de las plataformas marinas (Gelabert et al., 2020) dando lugar a la individualización de las diferentes islas. 2) las fluctuaciones del nivel marino como consecuencia de la sucesión de regresiones y transgresiones asociadas a los periodos fríos acaecidos a lo largo del Pleistoceno. Así pues, la configuración actual del relieve de Cabrera hay que interpretarlo en un complejo contexto, donde dialogan simultánea en el marco espacial y temporal, los diferentes dominios de erosión-modelado sobre una amplia diversidad litológica con los diferentes niveles marinos registrados en el Pleistoceno (Ginés y Gómez-Pujol, 2020).

A día de hoy, la línea costa de Cabrera con un recorrido de 45,86 km presenta un alto índice de articulación (IA=3,85) (Ginés y Gómez-Pujol, 2020), donde se definen imponentes salientes, como el Cap de Llebeig, Cap Ventós o la Punta de N'Ensiola entre otros y remarcadas bahías como la del Port de Cabrera, la de Cala Santa Maria o l'Olla entre otras de menores dimensiones y más abiertas. Esta configuración responde en gran parte a la

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

inundación de antiguos valles fluviales, donde, en ocasiones, la penetración marina hoy está instalada en la zona de cabecera de la antigua red de drenaje. Todas estas circunstancias morfológicas tienen su manifestación en el relieve interior de Cabrera que se estructura en tres conjuntos de relieves dispuestos paralelamente y alineados con una dirección NW-SE. El más septentrional entre el Cap des Morobutí y el Cap de sa Carabassa, queda separado del conjunto central entre la Punta de Cala En Donzell y la punta des Codolar con una cota de 156 m de altitud en el Puig de la Miranda, por un estrecho istmo de tan sólo unos 600 m de amplitud. El más meridional y vigoroso desde el punto de vista del relieve, entre el Cap de Llebeig y l'Imperial, presenta las elevaciones más altas de la isla con una cota máxima de 173 m de Na Picamosques.

Desde un punto de vista climático, Cabrera Gran, por su condición de isla pequeña, tiene una capacidad moderada de influir con su presencia sobre el viento, la temperatura o la precipitación. Por su localización en el centro del Mediterráneo Occidental y sin llegar a ser un clima claramente árido, se caracteriza por su aspecto marítimo y ventoso, donde el repartimiento del balance hídrico anual podría justificar su clasificación como un clima mediterráneo de veranos secos (Jansà y Guijarro, 2020). La precipitación total mediana anual se encuentra entorno de los 410 mm y la temperatura media anual entorno a los 17,5ºC.

En referencia al oleaje en el área de Cabrera cabe decir que no se puede caracterizar de una forma afinada debido a la falta de boyas cercanas y, no obstante, los datos disponibles corresponden a simulaciones que lleva a cabo Puertos del Estado. En un 75% de los días el oleaje no supera el metro de altura y, entre los meses de noviembre a marzo, es cuando se registran los valores más altos que pueden superar los 6 m de altura, debido al mayor número de situaciones de tormenta sobre el mar. La dirección del oleaje cambia estacionalmente, en invierno predominan las componentes de W y SW, mientras que en el verano son de E y SE. En las dos estaciones primaverales coexisten ambas situaciones de forma proporcional. Las componentes de N y NE que son las que registran las mayores frecuencias e intensidades en el Mar Balear, no son destacables en Cabrera debido a la protección que ejerce la isla mayor de Mallorca (Gomis et al., 2020).

## 3. Materiales y métodos / metodología

Para la elaboración de la cartografía de los sistemas deposicionales de Cabrera se han realizado dos campañas de campo de 4 días de duración durante los meses de marzo y abril. Además se ha partido de datos previamente anotados en otras visitas a la isla. Se han realizado fotografías de detalle de todos los ambientes sedimentarios, así como la recogida de muestras. Resumiendo, todos estos datos se han representado en forma de mapa digital, utilizando para ello el programa ArcGis 10.5.

## 4. Resultados

Actualmente en el Archipiélago de Cabrera únicamente encontramos costas de acumulación en la isla de Cabrera Gran, concretamente en 21 sistemas deposicionales donde se mantienen con una frágil estabilidad (Fig. 2). En conjunto las acumulaciones (Tabla 1) ocupan una superficie aproximada entre trece y catorce mil metros cuadrados (magnitud variable a lo largo del ciclo anual) y una longitud de línea de costa de unos 1.653 metros, lo que representa tan solo el 3,6% de la línea de costa de toda la isla.

Estas playas, de naturaleza y características muy diferenciadas, se localizan mayoritariamente en las partes más interiores de las medianas bahías de naturaleza fluvio-estructural que configuran la propia isla. En estas zonas de costas más protegidas y con una baja pendiente de la batimetría cercana a la costa, mayoritariamente las playas se establecen en el fondo de calas de naturaleza de base tectónica, donde tienen la desembocadura las pequeñas redes interiores de drenaje superficial. No obstante, hay un segundo grupo que no responden al patrón anteriormente citado, sino que las encontramos en la base de los principales acantilados de Cabrera que se corresponden con una alternancia de litologías blandas y duras de margas y margocalcáreas.

Entre las acumulaciones que corresponden a los fondos de cala (Tabla 1) la mayoría presentan una granulometría de las playas entre arena y gravas. Cabe interpretar este hecho por estar estas acumulaciones sujetas a una doble

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

fuente de alimentación, por una parte a la producción bioclástica de las praderas de *Posidonia oceanica* que aporta la mayoría de la fracción arena y a la erosión de depósitos aluviales que configuran el entorno de la acumulación y aporta la granulometría más gruesa. Son un buen ejemplo, entre otras localizaciones más puntuales, las playas de fondo de la bahía des Port, donde se localiza sa Platgeta que constituye la formación de playa de arena más importante de la isla y que tiene un mayor uso recreativo. Dentro de este tipo de playas de fondo de cala, las correspondientes a la parte más interior de la bahía de Cala Santa Maria, presentan una granulometría mayor, entre gravas y cantos, y a pesar de tener una amplia pradera de *Posidonia oceanica* la fracción de arena se estabiliza en bancos protegidos de la fricción del oleaje en la mitad de la bahía (Fig. 3), debido a la pendiente batimétrica de la zona más cercana a la costa. Finalmente, la zona norte de la bahía de l'Olla repite el mismo ambiente sedimentario que la bahía del Port, proporcionando resultados también de playas de arena o arena y gravas.

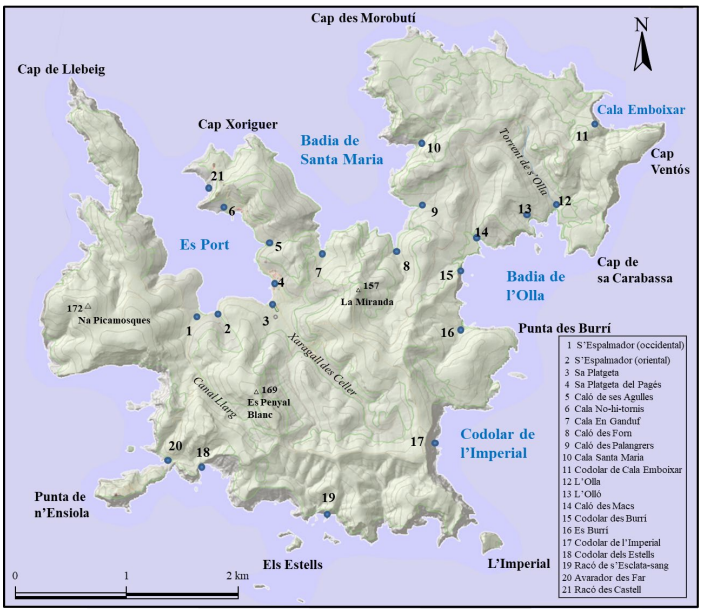



***Fig. 1*** *Isla de Cabrera. Localización de las acumulaciones de las playas analizadas.*

***Tabla 1****. Características morfométricas y naturaleza litológica de los ambientes sedimentarios litorales en Cabrera.*

| Acumulación | Long. | m² sup. | Amplitud | Granulometría | Litología asociada | Edad |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1-S'Espalmador 1** | 77 | 358 | 7 | arena-gravas | depósito aluvial | Pleistoceno |
| **2-S'Espalmador 2** | 17 | 128 | 8 | arena-gravas | dolomías/coluvial | Lías |
| **3-Sa Platgeta** | 82 | 757 | 14 | arena | depósito aluvial | Pleistoceno |
| **4-Sa Platgeta del Pagès** | 49 | 208 | 7 | arena-gravas | depósito aluvial | Pleistoceno |
| **5-Caló de ses Agulles** | 30 | 181 | 10 | arena-gravas | calcarenitas y lutitas | Eoceno |
| **6-Cala No-hi-tornis** | 40 | 173 | 6 | gravas-cantos | margas y margocalcáreas | Cretácico |
| **7-Cala En Ganduf** | 29 | 197 | 9 | gravas-cantos | margas y margocalcáreas | Cretácico |
| **8-Caló des Forn** | 16 | 40 | 3 | gravas-cantos | calcáreas | Lías |
| **9-Caló dels Palangrers** | 7 | 36 | 8 | gravas-cantos | aluvial/calcarenitas y lutitas | Pleistoceno/Eoceno |
| **10-Cala Santa Maria** | 46 | 658 | 21 | arena-gravas | calcarenitas y lutitas | Eoceno |
| **11-Codolar Cala Emboixar** | 212 | 2.354 | 11 | cantos y bloques | margas y margocalcáreas | Cretácico |
| **12-L'Olla** | 32 | 522 | 20 | arena | eolianitas y depósito aluvial | Pleistoceno |
| **13-L'Olló** | 49 | 398 | 12 | arena | calcarenitas y lutitas | Eoceno |
| **14-Caló des Macs** | 20 | 232 | 12 | arena-gravas | aluvial/calcarenitas y lutitas | Pleistoceno/Eoceno |
| **15-Codolar des Burrí** | 416 | 2.970 | 11 | cantos y bloques | margas y margocalcáreas | Cretácico |
| **16-Es Burrí** | 46 | 352 | 12 | arena y cantos | eolianitas y depósito aluvial | Pleistoceno |
| **17-Codolar de l'Imperial** | 89 | 840 | 10 | cantos y bloques | margas y margocalcáreas | Cretácico |
| **18-Codolar dels Estells** | 80 | 125 | 6 | cantos y bloques | margas y margocalcáreas | Cretácico |
| **19-Racó de s'Esclata-sang** | 192 | 1.676 | 16 | cantos y bloques | margas y margocalcáreas | Cretácico |
| **20-Avarador des Far** | 14 | 266 | 24 | gravas-cantos | calcáreas | Lías |
| **21-Racó des Castell** | 72 | 526 | 10 | gravas-cantos | margas y margocalcáreas | Cretácico |
| **TOTAL:** | **1.653 m** | **14.314** | | | | |

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

En referencia al segundo grupo de acumulaciones sus formaciones de playa responden a una granulometría de cantos y bloques formado cantales que localmente se conocen como "codolars". Estas formaciones son el resultado de las aportaciones de ajustes gravitacionales de los acantilados donde afloran margas y margocalcáreas mayoritariamente del Cretácico Inferior. En la base de estos acantilados posteriormente, debido a una batimetría inmediata somera, estos materiales son seleccionados y sometidos por el oleaje a una progresiva abrasión y reducción de sus volúmenes presentando perfiles de las acumulaciones con una cierta organización. Son ejemplos destacables es Codolar des Burrí o el Codolar de l'Imperial, este último supera los 160 m de altura en la parte más elevada de su acantilado.

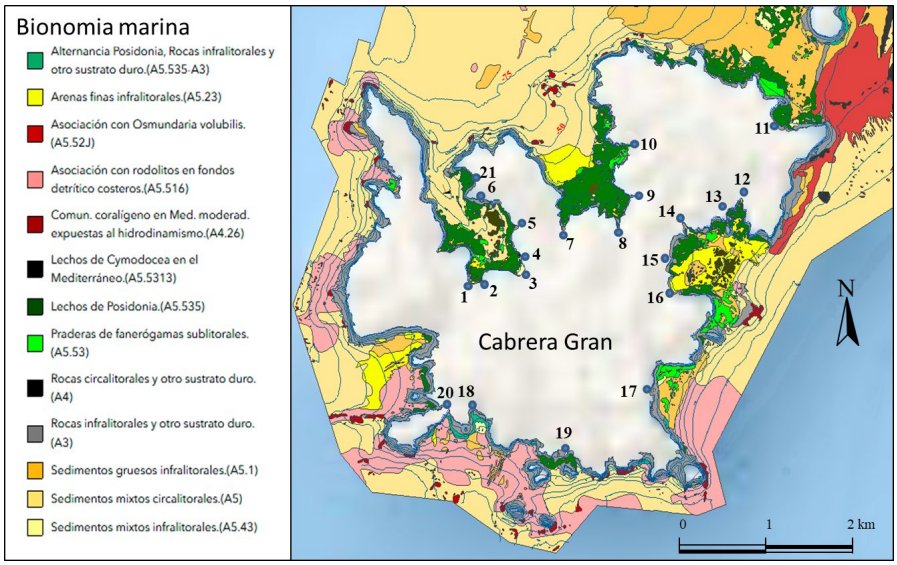



***Fig. 3*** *Bionomía marina y topografía submergida entorno de Cabrera Gran. Fuente: IEO. Visor del Parque Nacional del Archipiélago de Cabrera.*

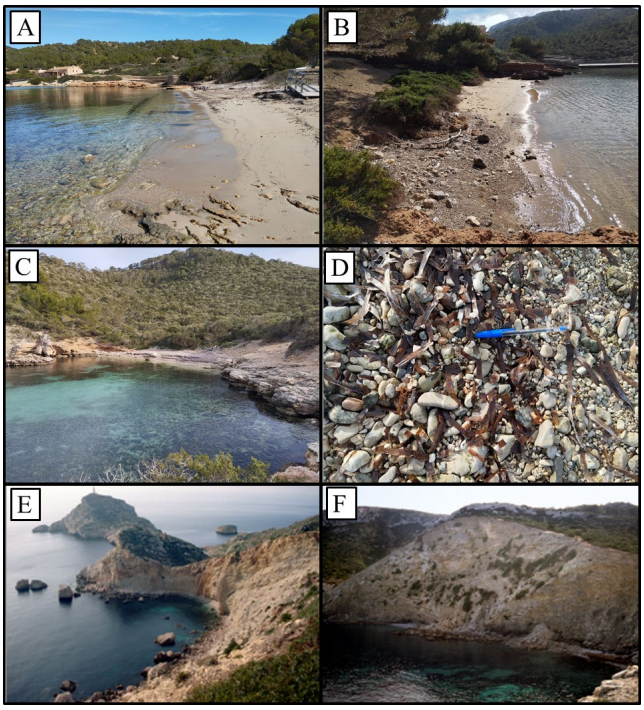



***Fig. 4*** *(A) Playa de arena: la Platgeta. (B) Playa de arena y cantos: la Platgeta del Pagès. (C) Playa de gravas y cantos: Cala Ganduf. (D) Sedimentos del Lías de la playa de Cala Ganduf. (E) Cantal del Codolar dels Estells. (F) Cantal de Cala Emboixar. Conos de acumulaciones por procesos gravitacionales.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 5. Conclusiones

En esta comunicación aparecen descritos y caracterizados 21 ambientes litorales sedimentarios de Cabrera. La mayor parte de ellos están situados en la zona del puerto, la bahía de Cala Santa María y la zona des Burrí-L'Olla. En estas zonas resguardadas y de batimetría escasa abundan las praderas de *Posidonia oceanica*. Es de destacar los cambios que se han desarrollado en los últimos años, pues ambientes de cantales, han quedado enterrados y actualmente son playas, unos arenales de arenas finas y blancas, como ha sucedido en es Burrí. De hecho la toponímia tradicional era denominada "Codolar des Burrí" (Trias, 1993), incluso apareciendo en el fondo de la cala y zonas anexas un ambiente arenoso que ha movilizado recientemente cientos de metros cúbicos de arena.

Para caracterizar mejor esas zonas sedimentarias sería necesario realizar análisis sedimentario particularizado, una topografía submarina de detalle, y caracterizar los hábitats marinos circundantes. Justo se ha iniciado el proyecto del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Organismo Autónomo Parques Nacionales, para evaluar estos y otros aspectos de la geomorfología litoral y Pleistoceno del Parque Nacional.

## 6. Agradecimientos

Hemos de agradecer la ayuda del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Organismo Autónomo Parques Nacionales, para la realización de proyectos de investigación científica en la red de parques nacionales en su convocatoria del año 2023 que lleva por título: "Geomorfología litoral del Pleistoceno-Holoceno del Parque Nacional del archipiélago de Cabrera. Cambio climático y dinámica de su costa". Este trabajo también es una contribución al proyecto de investigación: "Emergencias Crónicas y Transformaciones Ecosociales en Espacios Costeros Turistificados (PID2022-137648OB-C21).
Financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y per "FEDER Una forma de hacer Europa".

A Lluís Carreras, Agente de Medio Ambiente destinado a Cabrera por facilitar algunas de les fotografías utilizadas.

## 7. Referencias

Gelabert, B., Rodríguez-Perea, A., Sàbat, F. i Giménez, J. (2020). L'Arxipèlag de Cabrera dins el context tectònic del Mediterrani Occidental. *In:* Grau, A.M., Fornós, J.J., Mateu, G., Oliver, P.A. i Terrasa, B. (eds.). *Arxipèlag de Cabrera: Història Natural*. Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 30. 131-137. ISBN 978-84-09-23487-5.

Ginés, J. i Gómez-Pujol, Ll. (2020). Fisiografia i geomorfología de l'Arxipèlag de Cabrera. *In:* Grau, A.M., Fornós, J.J., Mateu, G., Oliver, P.A. i Terrasa, B. (eds.). *Arxipèlag de Cabrera: Història Natural*. Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 30. 17-43. ISBN 978-84-09-23487-5.

Gomis, D., Jordà, G., Balbín, R., Reñones, O. i Vázquez, M. (2020). Context Oceanogràfic de l'illa de Cabrera. *In:* Grau, A.M., Edit. Moll. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 2: 25-32.

Jansà, A. i Guijarro, J.A. (2020). Climatologia de l'Arxipèlag de Cabrera. *In:* Grau, A.M., Fornós, J.J., Mateu, G., Oliver, P.A. i Terrasa, B. (eds.). *Arxipèlag de Cabrera: Història Natural*. Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 30. 17-43. ISBN 978-84-09-23487-5.

Jennins, R. i Shulmeister, J. 2002. A field classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology*, 186: 211-229.

Ley 14/1991, de 29 de abril, de Creación del Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera. Jefatura del Estado «BOE» núm. 103, de 30 de abril de 1991.

Martín-Prieto, J.Á., Espinosa, J., Roig-Munar, F.X., Vericad, M., Rodríguez-Perea, A., Torres, N., X. Pons, G.X. i Mir-Gual, M. (2011). Descripció del sistema dunar des Codolar (Eivissa, Illes Balears). *Boll. Soc.Hist. Nat. Balears*, 54: 195-207.

 BY-NC-SA

Martínez, J. M. (2007). Variación morfológica y textural de una playa de cantos adosada a un importante relieve estructural (es Coll Baix, Serra de Tramuntana, N Mallorca). *In:* Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (eds). Investigaciones recientes (2005-2007) en Gemorfología Litoral. UIB, IMEDEA, SHNB, SEG, 95-99.

Resolución de 7 de febrero de 2019, del Organismo Autónomo Parques Nacionales, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 1 de febrero de 2019, por el que se amplían los límites del Parque Nacional Marítimo-Terrestre del Archipiélago de Cabrera por incorporación de espacios marinos colindantes al mismo. BOE núm. m. 43, de 19 de febrero de 2019.

Rodríguez-Perea, A. i Servera, J. (1993). II. Geomorfologia. *In*: Alcover, J.A.; Ballesteros, E. i Fornós, J.J. (eds.). *Història Natural de l'arxipèlag de Cabrera*. CSIC – Edit. Moll. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 2: 33-60.

Rodríguez, R. (ed.) (2018). Parque Nacional Marítimo Terrestre del Archipiélago de Cabrera. Guía Geológica. Edit. Instituto Geológico y Minero de España, Organismo Autónomo Parques Nacionales. *Guías Geológicas de Parques Nacionales*, 12. 204pp. ISBN: 978-84-9138-060-3.

Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.Á., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X. i Mir-Gual, M. (2012). Morfogènesi i dinàmica de la platja des Codolar (Eivissa, Illes Balears). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears,* 55: 47-62. ISSN 0212-260X. Palma de Mallorca.

Servera, J. (1993). I. Generalitats fisiogràfiques. *In*: Alcover, J.A., Ballesteros, E. i Fornós, J.J. (eds.). *Història Natural de l'arxipèlag de Cabrera*. CSIC – Edit. Moll. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 2: 25-32.

Trias, M. (1993). Toponímia bàsica de l'arxipèlag de Cabrera. CSIC – Edit. Moll. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears. Mapa anexo.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18870

# Procesos de recuperación de la playa del Parque Nacional de Doñana después del temporal Emma (2018)

*Recovery processes of the Doñana National Park beach after the Emma storm (2018)*

**Theocharis A. Plomaritis[a], Juan B. Montes Pérez[b], Daniel Jesús Gutiérrez Gálvez[b] y Javier Benavente[b]**
[a]Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias del mar y Ambientales, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, Cádiz, , haris.plomaritis@uca.es; [b]Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del mar y Ambientales, Instituto Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad de Cádiz, 11510 Puerto Real, Cádiz ( , juan.montes@uca.es; , javier.benavente@uca.es)

How to cite: Plomaritis, T.A.; Montes Perez, J.B.; Gutiérrez Gálvez, D.J. y Benavente, J. 2024. Procesos de recuperación de la playa del Parque Nacional de Doñana después del temporal Emma (2018). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfologia Litoral.* Valencia, 25-27 Septiembre. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18870

***Abstract***

*This study analyzes the response of Doñana beach system after the Emma storm (February 2018), using topographic surveys from 2018 to 2021 along Doñana National Park beach. A general recovery was recorded along the beach, both in terms of sand volume and increased slope. The recovery has been more pronounced in the western sectors of the National Park. The profiles reached a maximum volume, 2.5 years (September 2020) after the extreme storm event.*

***Keywords:*** *recovery time, volume, slope*

***Resumen***

*Este estudio analiza la respuesta de la playa de Doñana después del temporal Emma, utilizando levantamientos topográficos desde 2018 hasta 2021 a lo largo de la playa del P.N. de Doñana. Se registró una recuperación generalizada a lo largo de la playa tanto en términos de volumen de arena como en términos de aumento de la pendiente. Esta recuperación ha sido más pronunciada en los sectores occidentales del Parque Nacional. Los perfiles alcanzaron el volumen máximo 2.5 años (septiembre 2020) después del temporal.*

***Palabras clave:*** *tiempo de recuperación, volumen, pendiente*

## 1. Introducción

Las zonas costeras constituyen uno de los enclaves naturales más dinámicos, frágiles y complejos a nivel mundial y concentran todo tipo de actividades económicas, culturales y recreativas. Entre los servicios que ofrecen destacan la protección del litoral frente a episodios energéticos, además de su importancia ecológica y numerosos recursos naturales (Ranasinghe, 2016).

Uno de los elementos naturales que juega un papel fundamental en la protección de las costas arenosas frente a los eventos extremos son las dunas: sistemas dinámicos y complejos que resultan de la interacción entre procesos eólicos y marinos, la vegetación, la morfología del entorno y la presión humana ejercida sobre ellos (Costas et al., 2020). Los cordones dunares actúan como reservorios de arena y constituyen gran parte del área emergida de las playas, desde donde absorben el impacto de los episodios energéticos, retrasando o evitando desbordamientos.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Las características del sistema duna-playa son fundamentales tanto para determinar la respuesta del sistema ante un evento extremo como en su posterior recuperación. La evolución del sistema duna-playa en escalas espaciotemporales de años a décadas está determinada por la disponibilidad del sedimento, la capacidad de trasporte de sedimento, la intensidad de los temporales (Houser & Ellis, 2013) y la vegetación (Ruggeiro et al., 2018). En escalas cortas (de eventos), factores como el fetch y la humedad del sedimento (Delgado-Fernandez, 2011) junto con los parámetros granulométricos (Hoonhout & DeVries, 2016) y la respuesta morfológica de la playa (erosión y recuperación), constituyen un complejo sistema de interacciones y retroalimentaciones (Kombiadou et al., 2023).

La capacidad del sistema duna-playa de recuperarse después de un temporal es un indicativo de su resiliencia y un indicador de su capacidad de respuesta a futuros cambios del nivel del mar (Houser et al., 2015). A pesar de que hay numerosos trabajos enfocados en la erosión e inundación de los sistemas costeros debido a temporales, los trabajos sobre la capacidad y la velocidad de su recuperación son limitados. En el Golfo de Cádiz, el paso del temporal Emma generó daños generalizados en toda la costa, y especialmente en áreas con ocupación. La erosión/inundación fueron generalizadas en la zona, pero el proceso de recuperación fue heterogéneo (Malvarez et al., 2021). El presente trabajo presenta una serie de campañas topográficas, realizadas de forma estacional, que registran la recuperación a lo largo de las playas del P.N de Doñana tras el paso del temporal Emma (26/02-04/03/2018) durante un periodo de 3 años (2018-2021), con el objetivo de analizar los procesos de recuperación de la playa.

## 2. Área de estudio

La playa de Doñana está situada entre Matalascañas y la desembocadura del río Guadalquivir, con una extensión de más de 25 km que se extiende a lo largo de la flecha de Doñana. En todo el tramo costero hay un cambio de la orientación de la playa de 30°, pasando de una orientación NW-SE-128° en su sección occidental, a una orientación NNW-SSE-158° en la sección oriental. En el tramo más occidental la playa es disipativa-intermedia, con un sistema de barras paralela a la costa separada de la playa por un profundo surco. En la zona cercana a la desembocadura, las playas son muy disipativas con una amplia zona de *surf* que incluye barras y una playa amplia y de baja pendiente compuesta de arena media-fina (Del Río et al., 2002).

Las mareas en el área de estudio son semidiurnas y con un rango meso-mareal que alcanza los 3 m durante mareas vivas. El oleaje que predomina en la zona es el característico del Golfo de Cádiz, con un marcado señal estacional tanto en términos de altura significante como de periodo. La altura media mensual es de aproximadamente 1m en los meses de invierno, con una dirección asociada de 250 grados. El aporte de sedimentos principal procede de la erosión del acantilado del Asperillo y de origen fluvial, del río Guadiana. Como resultado de la acción de oleaje, la orientación y el aporte sedimentarios, existe una activa deriva litoral que transporta el sedimento desde el oeste hacia el este, y que ha dado lugar a la formación de grandes flechas litorales ligadas a la desembocadura de los ríos, que crecen hacia el este sin cesar de forma paulatina (Morales *et al.* 2009).

## 3. Metodología

En el marco del proyecto VENUS se llevaron a cabo levantamientos topográficos a lo largo de la playa del P.N. de Doñana entre 2018 y 2021. Se analizó la evolución del límite playa-duna durante este período utilizando la zona dunar como base de los 16 perfiles. Los datos se recopilaron utilizando un sistema RTK-DGPS (Leica900 y Leica GS20). Los perfiles (P1-P16) se levantaron en diferentes secciones de la flecha de Doñana (Fig. 1) para estudiar la variabilidad espaciotemporal de la zona. En este trabajo se presentan los perfiles P5, P10 y P13 (con tres replicas espaciadas 50m) como representativos de los sectores oriental, central y occidental del área de estudio. En todos los perfiles también se tomó la posición (horizontal y vertical) del límite playa-duna.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

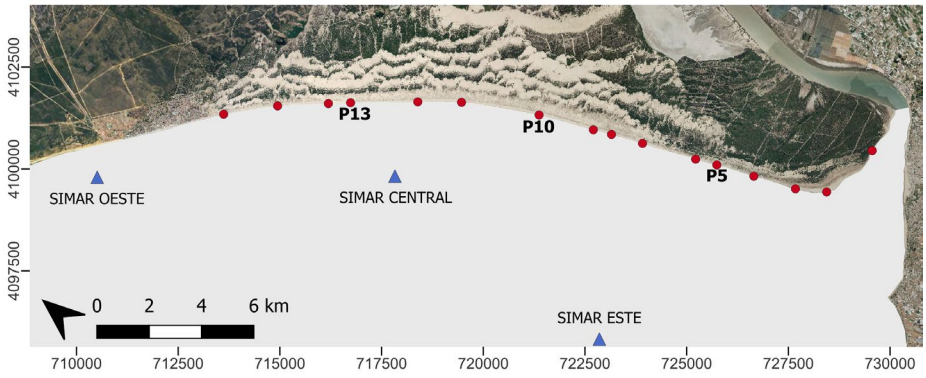



***Fig. 1.*** *Imagen aérea de la flecha de Doñana mostrando la localización de las estaciones de muestreo (puntos rojos).*

Las campañas se llevaron a cabo con una frecuencia estacional en abril y septiembre de 2018, marzo y septiembre de 2019, septiembre y octubre de 2020, y en febrero y abril de 2021. Se produjo una interrupción de un año durante la cual no fue posible llevar a cabo campañas entre septiembre de 2019 y septiembre de 2020, debido al estado de alarma causado por la pandemia de COVID-19. Las campañas topográficas se realizaron en condiciones de bajamar viva asegurando así la máxima cobertura del perfil.

Los datos recogidos se analizaron con un procedimiento estandarizado calculando la distancia y elevación en referencia a una base fija. La referencia de altura se cambió del nivel elipsoidal al nivel medio del mar en cada sector. A continuación, se calcularon el volumen (por metro de costa) y la pendiente intermareal de la playa, así como la anchura de playa seca (desde la base del perfil hasta la berma). Los cálculos de los volúmenes de cada perfil fueron normalizadas con respecto a la primera campaña para determinar el porcentaje de aumento o disminución.

Para el mismo periodo, se analizaron los datos históricos de oleaje utilizando datos del Puertos del Estado los puntos SIMAR más cercanos, uno representativo para cada sección de la playa. Los puntos SIMAR son puntos de características de oleaje basados de simulaciones numéricas. Con ellos se calcularon la atura media de oleaje entre campañas, el número de eventos de alta energía y otros parámetros asociados. La localización de los puntos SIMAR oeste (5035021), SIMAR central (5036020) y SIMAR este (5036019) se puede observar en la Fig.1.

## 4. Resultados

De las 14 estaciones de muestreo en la zona de estudio se presentan los datos para las estaciones P5, P10 y P13 como representativas para los sectores occidental, central y oriental, respectivamente. Estas estaciones fueron las muestreadas sistemáticamente en todas las campañas. El inicio de los levantamientos topográficos comenzó justo después del paso del temporal *Emma* (marzo 2018), que provocó extensos daños en el Golfo de Cádiz (Ferreira et al., 2019; Malvarez et al, 2021). Como consecuencia de este evento, los primeros perfiles de la playa (17/04/2018) se estima que están en un estado erosivo. Como consecuencia de esto se muestra que, a lo largo de diversas campañas, la recuperación del perfil de la playa ha variado espacialmente (Fig. 2). En todos los perfiles iniciales se observan perfiles más disipativos, y en la mayoría con barras en el parte baja del perfil.

El P5 (sector oriental), cercano a la desembocadura del Guadalquivir, mostró un perfil inicial con una barra/surco en la zona intermareal baja. Esta barra se desplazó rápidamente para formar una berma y ampliar la playa supramareal en un periodo de 5 meses. En el resto de las campañas se observó una reducción de la berma, pero un aumento de la cota general de la playa manteniendo el volumen recuperado en la segunda campaña. En términos de pendiente, la parte intermareal (cotas entre 1m y -1m) presenta una pendiente inicial relativamente alta (0.036) que se vuelve más disipativa en las siguientes campañas con un valor medio de 0.02. La pendiente de la playa seca presenta valores más altos (0.08) que permanecen estables, pero con ligeras variaciones. Por último, se calculó el volumen de los perfiles hasta la cota de -1, obteniéndose un valor de 88m$^3$, que disminuyó en la última campaña.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

El P10 (sector central), muestra un comportamiento similar, pero con una recuperación mayor en términos de reconstrucción de la parte alta del perfil. Empezando con un perfil inicial con barra en la parta intermareal baja, se produjo una sucesiva aparición de barras en la parte intermareal alta y la sucesiva construcción de una berma a una altura de 3.8m y un surco que la separaba de la zona dunar, donde se observaron cambios relativamente pequeños. En términos de pendiente, mostró un valor para el intermareal desde 0.02 en la primera campaña que llegan hasta valores de 0.08 al final del periodo de estudio. El volumen de los perfiles comienza con valores de 389 $m^3$, alcanzando valores de 507 $m^3$ antes de empezar a disminuir moderadamente en las últimas campañas.

Finalmente, el P13 (sector occidental), cercano al pueblo de Matalascañas, el perfil inicial tiene una forma marcada de terraza en la cota del nivel medio del mar. En los siguientes perfiles se observa la generación de berma baja y surco que, paulatinamente, se convierte en berma alta (3.8m) y surco. Al mismo tiempo, en este perfil se observa una recuperación en la zona dunar (base de perfil) de 2m. El volumen acumulado en este perfil llega a los 422 $m^3$, presentando una acumulación de 268 $m^3$. Al igual que el perfil de la zona central, las pendientes registradas empiezan en valores de 0.03 y llegan hasta valores de 0.09.

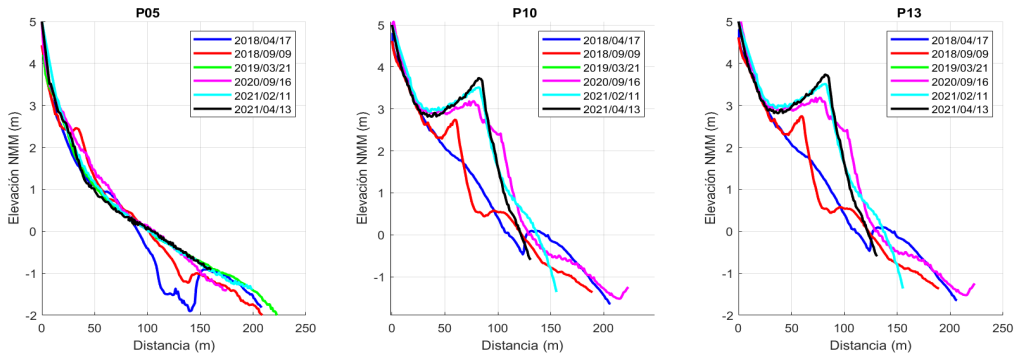



***Fig. 2.*** *Evolución del perfil de la playa a las estaciones P05 (izquierda), P10 (centro) y P13 (derecha), durante el periodo de estudio.*

Los datos de los tres puntos SIMAR analizados presentaron una climatología muy similar, con valores de altura de oleaje superiores a 0.4m durante el periodo de temporales (noviembre-marzo). La dirección y el periodo de pico del oleaje también presentan valores muy similares entre las tres estaciones, con una componente ligeramente más sur (234°) y periodos de pico más grandes, 8s, durante los meses con temporales. En el caso de la altura de ola, dónde Hs>2.5m es el umbral de eventos extremos en el Golfo de Cádiz (**Plomaritis et al., 2015**), la distribución observada mostró más similitud entre en la zona Central y Este, con más del 50% del oleaje proviniendo del SWW mientas en el punto Oeste la orientación fue SWW y WSW (Fig. 3). Al comparar estas direcciones con la orientación de la línea de costa se observa que en la parte Oeste el oleaje incide a la costa con mayor ángulo que en la parte Central y Este.

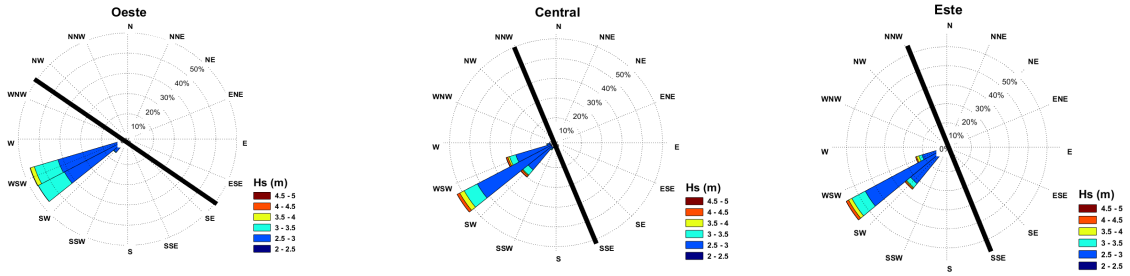



***Fig. 3.*** *Rosas de oleaje para Hs>2.5m (periodo 1958-2022) para los tres puntos SIMAR y la orientación de la linea de costa más cercana (línea negra).*

 BY-NC-SA

En términos de variaciones volumétricas, se observa un mayor volumen en el perfil de la zona Central (P10) que alcanza 500m$^3$/m, mientras el perfil de la zona Oeste (P13) alcanza un volumen máximo de 350m$^3$/m, y el perfil de la zona Este (P05) llega a los 297m$^3$/m (Fig. 4).

En cuanto a la capacidad de recuperación se observa un mayor aumento del volumen para el perfil P13, donde llega a volúmenes 2.4 veces más grandes que el perfil inicial, mientras que los otros perfiles aumentan aproximadamente 1.4 veces el perfil inicial. Las tres réplicas de cada perfil en cada estación muestran pequeñas variaciones, lo que sugiere una pequeña variabilidad longitudinal. La zona más variable es la Oeste (P13). En términos de velocidad de recuperación, P13 muestra la mayor velocidad, y todos los perfiles alcanzan sus valores máximos en la campaña de septiembre de 2020.

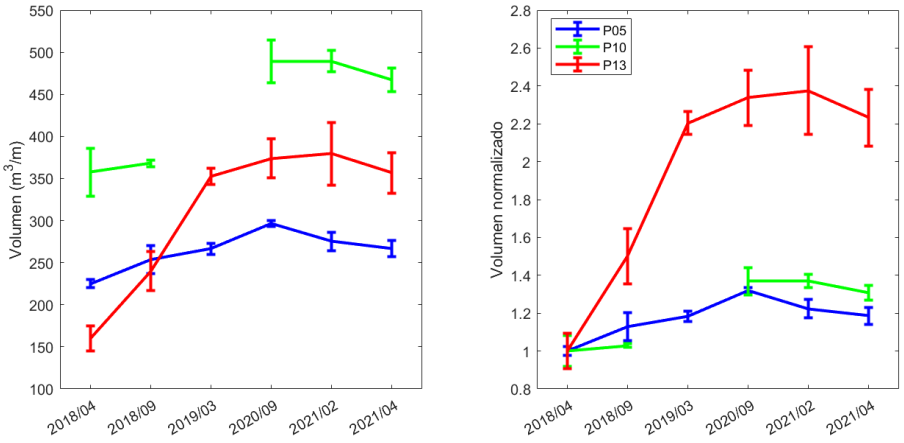



***Fig. 4.*** *Variación del volumen (izquierda) y variación del Volumen normalizado (derecha) a las estaciones P05 (Oeste), P10 (Central) y P13 (Este).*

## 5. Discusión y Conclusiones

El cambio de orientación de la costa en la zona de estudio provoca que el ángulo de aproximación del oleaje disminuya a medida que la desembocadura de Guadalquivir está más próxima, generando una posible variación en el transporte longitudinal. El ángulo de aproximación de la tormenta Emma (Malvarez et al., 2021) era similar a los datos climatológicos de los temporales registrados durante el periodo de estudio (Fig. 2), lo que genera una gradiente en el transporte longitudinal entre la zona Oeste y las zonas Central y Este, tal y como indicaban ya Rodríguez-Ramírez et al. (1997). Al mismo tiempo, durante el periodo de recuperación (9/2020, momento de máxima recuperación) se registró un total de 46 horas de tormenta con un valor máximo de 3.8m, que se pueden considerar una duración de total de temporales muy baja en relación con el promedio de la zona (Plomaritis et al., 2015). En el periodo en el que los volúmenes de los perfiles permanecen estables se observa un registro de duración de tormentas similares al periodo anterior, pero con una altura máxima de 4.6m. El perfil P13, donde se observa el menor volumen inicial, es el perfil que presenta una mayor recuperación y donde también hay indicios de recuperación de las dunas, concordante también con lo expuesto en trabajos previos (Rodriguez Ramirez et al. 2000). Como consecuencia de la falta de perfiles previos al temporal Emma, no es posible establecer si la recuperación fue total o parcial.

## Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del proyecto VENUS (2017-041 / PE / POCTEP), ‘Estudio integral de los bancos naturales de moluscos bivalvos en el Golfo de Cádiz para su gestión sostenible y la conservación de sus hábitats asociados’. Este trabajo es una contribución al grupo de investigación RNM-328 del Plan Andaluz de Investigación (PAI).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 6. Referencias

Costas, S., de Sousa, L. B., Kombiadou, K., Ferreira, O., & Plomaritis, T. A. (2020). Exploring foredune growth capacity in a coarse sandy beach. *GEOMORPHOLOGY*, *371*. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107435

Del Río, L., Benavente, J., Gracia, F. J., Anfuso, G., Martínez del Pozo, J. A., Domínguez, L., ; Rodríguez-Ramírez, A.; Flores, E. ; Cáceres, L.M.; López-Aguayo, F.; Rodríguez-Vidal, J. (2002). The quantification of coastal erosion processes in the South Atlantic Spanish Coast: Methodology and preliminary results. In Littoral 2002: *The changing coast* (pp. 383–390).

Delgado-Fernandez, I. (2011). Meso-scale modelling of aeolian sediment input to coastal dunes. *Geomorphology*, 130(3–4), 230–243. https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2011.04.00

Ferreira, O., Plomaritis, T. A., & Costas, S. (2019). Effectiveness assessment of risk reduction measures at coastal areas using a decision support system: Findings from Emma storm. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, 657, 124–135. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.478

Hoonhout, B., & de Vries, S. (2017). Aeolian sediment supply at a mega nourishment. *Coastal Engineering*, 123, 11–20. https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.03.001

Houser, C., & Ellis, J. (2013). 10.10 Beach and Dune Interaction. *Treatise on Geomorphology*, 10, 267–288. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00283-9

Houser, C., Wernette, P., Rentschlar, E., Jones, H., Hammond, B., & Trimble, S. (2015). Post-storm beach and dune recovery: Implications for barrier island resilience. *Geomorphology*, 234, 54–63. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.12.044

Kombiadou, K., Costas, S., Rita Carrasco, A., Plomaritis, T. A., Ferreira, O., & Matias, A. (2019). Bridging the gap between resilience and geomorphology of complex coastal systems. *EARTH-SCIENCE REVIEWS*, 198. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102934

Malvarez, G., Ferreira, O., Navas, F., Cooper, J. A. G., Gracia-Prieto, F. J., & Talavera, L. (2021). Storm impacts on a coupled human-natural coastal system: Resilience of developed coasts. *Science of the Total Environment*, *768*, 144987. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144987

Morales, J.A., Rodríguez-Ramírez, A., Sedrati, M. (2019). Beaches of Huelva. In: Morales, J.(eds) *The Spanish Coastal Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_15

Plomaritis, T. A. T. A., Benavente, J., Laiz, I., Del Rio, L., & Del Río, L. (2015). Variability in storm climate along the Gulf of Cadiz: the role of large scale atmospheric forcing and implications to coastal hazards. *Climate Dynamics*, 45(9–10), 2499–2514. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2486-4

Ranasinghe, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-Science Reviews*, 160, 320–332. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.011

Rodríguez Ramírez, Antonio; Cáceres Puro, L.; Rodríguez Vidal, Joaquín; Flores, E.; Cantano Martín, M.; Guerrero, V. (1997). Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva (España). *Geogaceta,* 21: 187-189.

Rodríguez Ramírez, A., Cáceres Puro, L.M., Rodríguez Vidal, J., Cantano Martín, M. (2000) "Relación entre clima y génesis de crestas/surcos de playa en los últimos cuarenta años (Huelva, Golfo de Cádiz)". *Cuaternario y Geomorfología*. Vol. 14 (3-4), págs. 109-113. ISSN 0214-1744

Ruggiero, P., Hacker, S., Seabloom, E., & Zarnetske, P. (2018). The Role of Vegetation in Determining Dune Morphology, Exposure to Sea-Level Rise, and Storm-Induced Coastal Hazards: A U.S. Pacific Northwest Perspective. *Barrier Dynamics and Response to Changing Climate*, 337–361. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68086-6_11

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18863

# Sand inputs to embayed beaches: fluvial and longshore transport

*Aportes de arena en playas encajadas: transporte longitudinal y fluvial*

**Ruth Durán[a], Jorge Guillén[a], David Amblas[b], Candela Marco-Peretó[a], Judit Moya[b], Antoni Calafat[b]**

[a]Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, , rduran@icm.csic.es, , jorge@icm.csic.es, , cmarco@icm.csic.es; [b]Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, , damblas@ub.edu, jmoyamar73@alumnes.ub.edu, , antonicalafat@ub.edu.

How to cite: Durán, R.; Guillén, J.; Amblas, D.; Marco-Peretó, C.; Moya, J. & Calafat, A. 2024. Sand inputs to embayed beaches: fluvial and longshore transport. En libro de actas: XII Jornadas de Geomorfología Litoral. Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18863

***Abstract***

*Embayed beaches are laterally bounded by natural barriers such as rocky headlands or by artificial structures on human-altered coasts. They are commonly described as closed compartments because of limited sedimentary connection with other systems. However, this description is not accurate for many embayments, where sediment exchange can occur via headland bypassing. This study investigates natural sand bypassing between two embayed beaches along the Catalan coast, Pals and Sa Riera, and the influence of local stream-delivered sediment based on the analysis of repeated bathymetric surveys and surficial sediment samples. Sa Riera beach is a pocket beach separated from the Pals embayed beach by a rocky headland and characterized by continuous progradation during the last decades. Comparison of bathymetric data spanning nearly two decades reveals sand bypassing between the beaches, supported by backscatter data and bottom sediment samples. Moreover, sediment samples highlight the significant contribution of local streams to sediment inputs at Sa Riera beach.*

***Keywords:*** *Sheltered beaches, Catalan coast, NW Mediterranean, ephemeral streams, fluvial sediment supply, longshore sediment transport, coastal headlands.*

***Resumen***

*Las playas encajadas están delimitadas lateralmente por barreras naturales, como cabos rocosos, o por estructuras artificiales en costas antropizadas. Suelen describirse como compartimentos cerrados debido a su limitada conexión sedimentaria con otros sistemas. Sin embargo, esta descripción no es aplicable a todas las playas encajadas, ya que puede producirse intercambio de sedimentos a través de sus límites. En este trabajo, se investiga el trasvase natural de arena entre dos playas encajadas de la costa catalana, Pals y Sa Riera, y la influencia de los sedimentos aportados por las rieras, a partir del análisis de batimetrías repetidas y muestras de sedimento superficial. La playa de Sa Riera es una playa encajada pequeña, separada de la playa de Pals por un promontorio rocoso y caracterizada por una progradación continua durante las últimas décadas. La comparación de los datos batimétricos que abarcan casi dos décadas revela la existencia de un trasvase de arena entre las playas, también observado en los datos de retrodispersión y las muestras de sedimento del fondo. Además, las muestras de sedimento ponen de manifiesto la contribución de las rieras en la aportación de sedimentos a la playa de Sa Riera.*

***Palabras clave****: Playas encajadas, costa catalana, NO Mediterráneo, rieras, aporte sedimento fluvial, transporte longitudinal de sedimento, afloramientos rocosos costeros.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introduction

Embayed beaches, which constitute approximately half of the world's coastlines (Short & Masselink, 1999), are delineated laterally by natural barriers such as headlands along rocky shores or by man-made structures like groins and breakwaters in urbanized coastal areas. These beach boundaries act as total or partial obstacles to the transport of sediment along the coast, limiting connectivity with adjacent coastal systems (Ojeda & Guillén, 2008; Gallop et al., 2020). Since sediment transport to and/or from neighbouring cells is almost negligible, the sediment balance on these beaches will depend primarily on the balance between sediment inputs from local sources, such as shoreface sediment sources, cliff erosion or inputs from streams (Pranzini et al., 2013). Nonetheless, recent studies suggest that under specific conditions, sedimentary feeding of embayed beaches through the sediment bypass of rocky headlands may occur (Marco-Peretó et al., 2024). Despite the growing interest in understanding the mechanisms of natural headland bypassing in embayed beaches (Valiente et al., 2020), research on the shoreface morphology between these beaches remains limited (Da Silva et al., 2021), and the processes of headland bypassing are still not fully understood.

In this study, we investigate the potential natural sand bypassing between two embayed beaches along the Catalan coast, Pals and Sa Riera, and the influence of local small rivers and streams on the sediment budget of the Sa Riera beach, based on repeated bathymetric surveys and sediment sampling.

## 2. Study site

The Catalan coast in the NW Mediterranean is characterised by abundant natural and artificial bounded embayed beaches (Bowman et al., 2009), among which are Pals and Sa Riera in the Pals Bay (Fig. 1). The Pals beach is a large (6800 m long) embayed beach that extends from the L'Estartit port to Cape Begur (Durán et al., 2016), showing a very low indentation index (Marco-Peretó et al., 2024). It is fed by two rivers, the Ter River (212 km long) and the Daró River (25 km long). Sediment grain size shows high spatial variability with an increasing trend southward. The median grain size (d50) is 230 µm in the north and 1260 µm in the south (CIIRC, 2010).

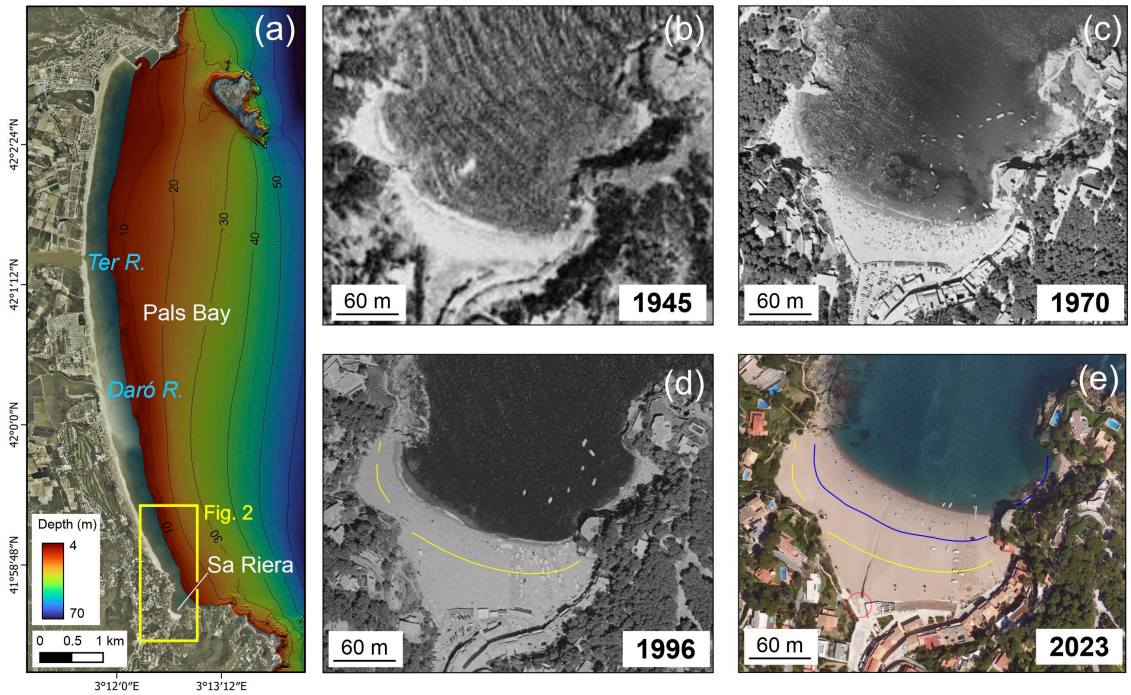



***Fig. 1.*** *(a) Location of the Pals and Sa Riera beaches. (b) to (e) Orthophotos of the Sa Riera beach from 1945, 1970, 1996 and 2023 showing the advance of the shoreline. The shoreline positions in 1970 (in yellow) and 1996 (in blue) are indicated in the orthophotos in 1996 and 2023. Orthophotos provided by Institut Geogràfic i Geológic de Catalunya (ICGC).*

 BY-NC-SA

Sa Riera is a smaller (186 m long) pocket beach with a low-medium indentation index (Marco-Peretó et al., 2024). It is bounded by 45-meter-high cliffs and is characterized by a mean grain size of 1770 µm (CIIRC, 2010). A small stream feeds into its central sector (Pintó et al., 2019). Analysis of the medium-term (decadal) coastal evolution of these beaches between 1945 and 2020 showed a net shoreline retreat in the Pals beach but a significant shoreline advance in Sa Riera (Fig. 1), which tripled its emerged beach area during this period (Marco-Peretó et al., 2024). The shoreline advance in Sa Riera has been attributed to the southwestward longshore drift, which transports sediment from Pals beach, acting as a sediment trap (Pintó et al., 2019; Marco-Peretó et al., 2024).

The Catalan coast is a microtidal environment (tidal range less than 0.2 m). The wave climate exhibits significant seasonality, with the most severe conditions occurring from late autumn to early spring. Wave conditions in the region showed a yearly mean significant wave height (Hs) of 0.77 m (Mendoza et al., 2011), with maximum Hs of 7.9 m. Severe storms predominantly come from the east, while less energetic storms approach from the south. Waves approaching the coast at oblique angles during eastern storms generate a predominant southwestward alongshore sediment transport, ranging from 25,000 to 100,000 $m^3y^{-1}$ (CIIRC 2010).

## 3. Data and methods

Data used in this study consist of repeated bathymetric surveys conducted in September 2004, October 2022, and April 2023, along with bottom sediment samples collected in 2023 (Fig. 2a). Swath-bathymetry data from 2004 was obtained as part of the ESPACE Project "Characteristics of the systematic study of the Spanish continental shelf and upperslope" by the Spanish Institute of Oceanography using a Kongsberg EM-3000D multibeam echosounder. The study site was revisited in 2022 and 2023 aboard the R/V Lluerna, using a Kongsberg EM-3002D equipped with two sonar heads, each providing a swath width of 130°. This system uses 254 beams per head and operates at a frequency of 300 kHz to assure a narrow beam width of 1.5° and a maximum ping rate of 40 Hz, resulting in a depth accuracy of 5 cm root mean square. Sound velocity profiles (SVP) were also collected to correct the acoustic data for variations in water-column sound speed.

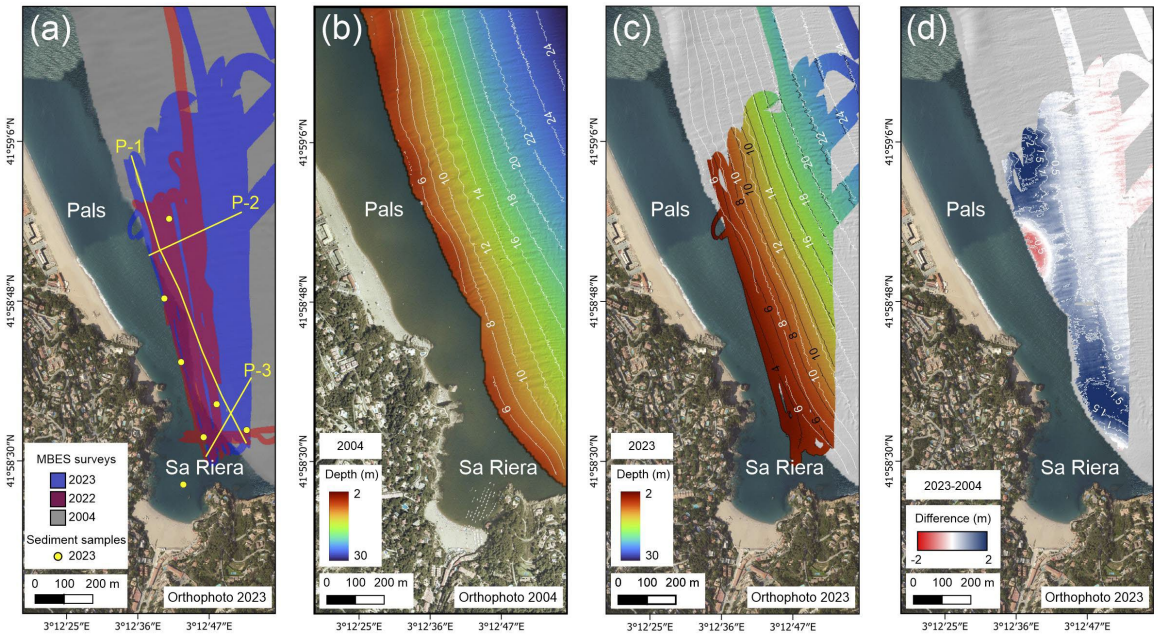



***Fig. 2.*** *(a) Map showing the surveyed area during the three bathymetric cruises (2004, 2022 and 2023), the position of bottom sediment samples, and the bathymetric profiles showed in Fig. 3. (b) Coloured bathymetric map in 2004 including isobaths. (c) Coloured bathymetric map in 2023 superimposed on the shaded relief of 2004, with isobaths in 2004 (white lines) and 2023 (black lines). (d) Difference in elevation between the 2023 and 2004 datasets. Ortophotos provided by ICGC.*

Post-processing of multibeam data was conducted using the Teledyne CARIS HIPS and SIPS TM 11.4 Hydrographic Data Processing System, including correction for heading, depth, pitch, heave and roll. Tidal and

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

sound velocity corrections were applied and erroneous soundings were removed. The filtered soundings were then gridded into 2 m resolution bathymetric surfaces. Variations in bathymetric data between different surveys were analysed using QGIS software. All data were projected into the European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS1989) projected to the Universal Transverse Mercator system (zone31N) and referred to the EGM08D595 geoid.

Bottom sediment samples were collected in 2023 aboard the R/V Lluerna using a Van Veen grab. Grain size fractions were determined using a Coulter LS 230 particle size analyser.

## 4. Results and Discussion

The submerged morphological evolution of the Pals and Sa Riera beaches reveals significant variations over the study period. The morphology of the shoreface of the Pals Beach in the 2004 dataset displays cuspate morphologies extending to a depth of approximately 10 meters (Fig. 2b). These features show continuity with the megacusps observed along the Pals beach, showing wavelengths between 200 and 400 m and relieves of up to 1.5-2 m. Recent bathymetric surveys (2022 and 2023) do not show evidence of the cuspate morphologies in the shoreface. Instead, a homogenization of the seabed morphology is observed down to a depth of 14 m, particularly off the southern sector of the Pals beach, with a significant accumulation of sediment off Sa Riera (Figs. 2c, d). These variations are highly evident when comparing the bathymetric profiles from each period. Figure 3a depicts a bathymetric profile along the 6 m isobath in the 2023 survey. The profile illustrates the bathymetric expression of the cuspate morphologies in 2004 and the disappearance of these morphologies in 2022 and 2023. No significant changes are observed between the latter two dates (2022 and 2023). However, the comparison of the bathymetric profile in 2023 and 2004 reveals sediment losses of up to 1 m in the crest of the cuspate morphologies and an accumulation of up to 2 m in front of Sa Riera (Figs. 3b,c).

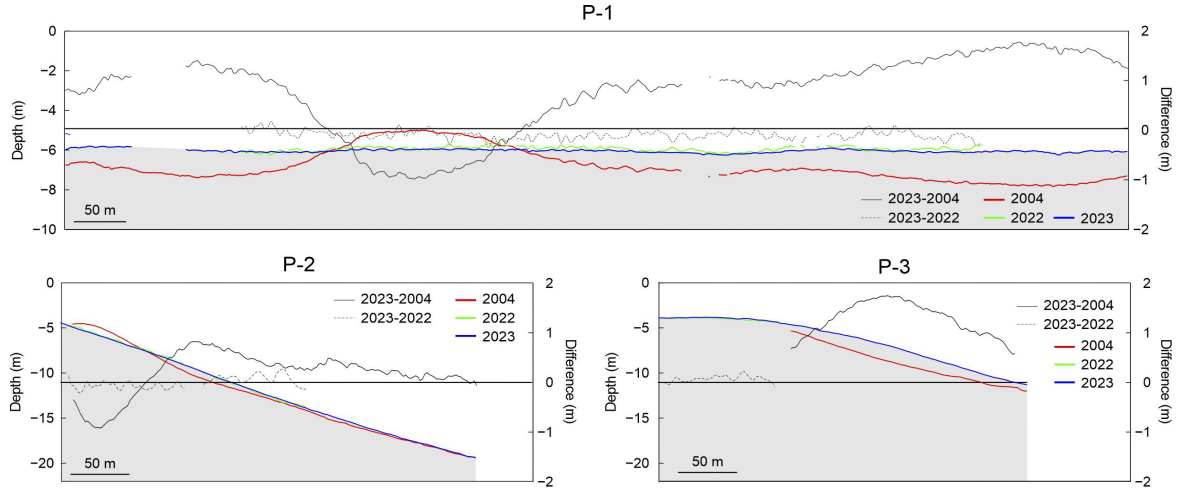



***Fig. 3.*** *Bathymetric profiles showing the bathymetry in 2004, 2022 and 2023, as well as the differences between 2004 and 2023 and between 2022 and 2023. Location of bathymetric profiles in Fig. 2a.*

The preferential accumulation of sediment off Sa Riera provides evidence of a natural sediment bypass from the Pals beach to Sa Riera beyond the rocky headland, as previously suggested (Pintó et al., 2019; Marco-Peretó et al., 2024). The comparison between two bathymetric surveys with a time-span of almost 20 years supports these observations. A sediment gain was up to 156 500 $m^3$ (0.9 $m^3/m^2$) was recorded in the foreshore, between the 4.5 and 14 m water depth, between 2023 and 2004. During this period, the shoreline in Sa Riera beach advanced 22 m, with the subsequent increase in the beach area (24%). The morphological evolution of the submerged area indicates substantial interconnectivity between the two beaches, which is also supported by backscatter data and bottom sediment samples (Fig. 4). The backscatter imagery also shows cross-shore alignments in the seabed sediment sand-mud transition (boundary between high and low backscatter in Fig. 4), located at 22 m water depth, probably related to the escape of offshore sediment during extreme storms (Fig. 4).

 BY-NC-SA

Sediment samples gathered on the shoreface of the Pals and Sa Riera beaches at water depths ranging from 3.5 to 10 m, show similar sediment characteristics with the same grain size (median size between 933 and 997 µm). Only the sample located off Sa Riera is slightly finer (median size of 848 µm). The sediment samples were collected in an elongated area of high backscatter that extends along the shoreface around the headland to a depth of 18-22 metres. The continuity of this coarse sediment domain beyond the headland provides additional evidence of natural sediment bypass between these two beaches.

The dynamics of the cuspated morphology of the shoreface suggests that the primary mechanism of sand bypassing in shallow areas in these headland-bounded beaches may be linked to the dynamics of these features. Orthophotos collected from 1945 to 2023 in the study area also show changes in the morphology and position of the beach cusps over time, with significant displacements in the shoreline position at the southern limit of the Pals beach, updrift of the coastal headland, of up to 50 m. Furthermore, a predominant southwards migration of megacusps along the shoreline was observed after the impact of a severe storm (Durán et al., 2016).

In Sa Riera, sediment samples collected on the shoreface are finer than the surrounding sediment, showing a coarsening trend with increasing water depth (Fig. 4). Sediment is composed of fine sand near the shoreline (median size of 173 µm), but it is coarser (medium size of 848 µm) at 6 m water depth and on the beach (1770 µm). This sediment distribution could be probably associated to the influence of local fluvial inputs into the beach. A small, ephemeral stream flows into the Sa Riera beach that is capable of delivering fine-medium sand sediment to the coast during floods, contributing to the continuous shoreline advance in Sa Riera (Marco-Peretó et al., 2024).

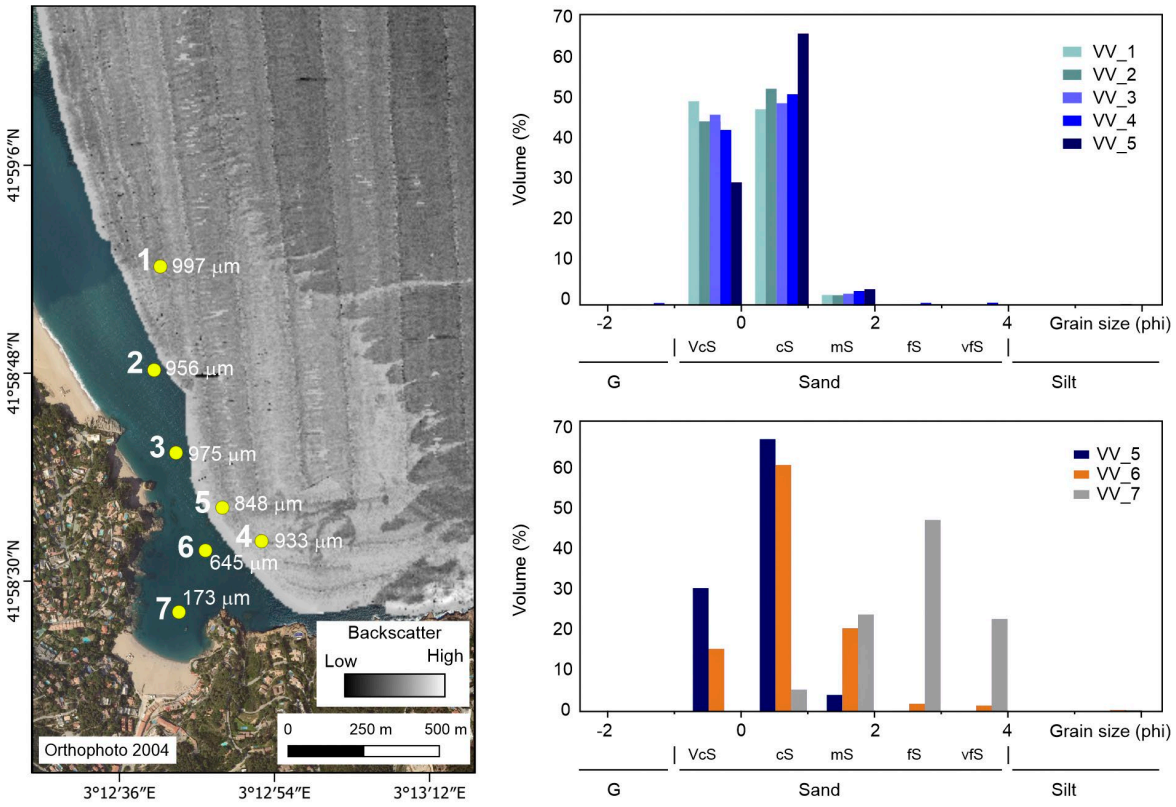



***Fig. 4.*** *Multibeam backscatter imagery of the continental shelf off the southern sector of Pals and the Sa Riera beach in 2004, showing the location and median size of bottom sediment samples. Grain size distributions of surficial sediment samples are grouped following an alongshore (samples VV1 to VV5) and a transverse (VV5 to VV7) profile.*

## 5. Conclusions

The morphological evolution of two headland-bounded beaches highlights the significant role of local sediment contributions, particularly fluvial inputs and natural sand bypassing, in shaping pocked beaches. In the case of the Sa Riera beach, the combination of sediment input from a small local stream flowing into the beach and the feeding

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

of sand from Pals beach through natural bypass processes, along with the high level of protection, has led to continuous beach progradation.

## Acknowledgements

This work has been carried out in the framework of the MOLLY (PID2021-124272OB-C21) and SOLDEMOR (TED2021-130321B-I00) research projects funded by the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities. It is a contribution to the ICM's Severo Ochoa "Centre of Excellence" (CEX2019-000928-S). The authors acknowledge the logistical support of the Direcció General de Política Marítima i Pesca Sostenible of the Generalitat de Catalunya for access to the R/V Lluerna. They also thank the Secretariat General of the Sea (SGP) of the Spanish Ministry of Agriculture, Fisheries and Food and TRAGSA for the 2004 Espace Project bathymetric dataset. C. Marco-Peretó is supported by Spanish FPI grant (PRE2022-101492).

## Referencias

Bowman, D., Guillén, J., Lopez, L. & Pellegrino, V. (2009) Planview geometryand morphological characteristics of pocket beaches on the Catalan coast (Spain). Geomorphology, 108(3–4), 191–199.

CIIRC. (2010) Estat de la zona costanera a Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques.

Da Silva, A. P., Vieira da Silva, G., Strauss, D., Murray, T., Woortmann, L. G., Taber, J., et al. (2021). Headland bypassing timescales: Processes and driving forces. Sci. Total Environ. 793, 148591.

Durán, R., Guillén, J., Ruiz, A., Jiménez, J.A. & Sagristà, E. (2016) Morphological changes, beach inundation and overwash caused by an extreme storm on a low-lying embayed beach bounded by a dune system (NW Mediterranean). Geomorphology, 274, 129–142.

Gallop, S.L., Kennedy, D.M., Loureiro, C., Naylor, L.A., Muñoz-Pérez, J.J., Jackson, D.W., et al. (2020) Geologically controlled sandy beaches: their geomorphology, morphodynamics and classification. Science of the Total Environment, 731, 139123.

Marco-Peretó, C., Durán, R., Toomey, T. & Guillén, J. (2024) Controls on the morphological evolution of embayed beaches: Morphometry versus external forcing. Earth Surface Processes and Landforms, 1–14.

Mendoza, E. T., Jimenez, J. a., and Mateo, J. (2011). A coastal storms intensity scale for the Catalan Sea (NW Mediterranean). Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11, 2453–2462. doi: 10.5194/nhess-11-2453-2011.

Ojeda, E. & Guillén, J. (2008) Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. Marine Geology, 253(1–2), 51–62.

Pintó, J., Garcia-Lozano, C., Roig i Munar, F.X. (2019) Itinerario geomorfológico y paisajístico por la Costa Brava: bahía de Pals y playa de Castell (Palamós). In: Durán, R., Guillén, J. & Simarro, G. (Eds.) Jornadas de Geomorfología Litoral: Libro de ponencias, Castelldefels, pp. 271–292

Pranzini, E., Rosas, V., Jackson, N.L. & Nordstrom, K.F. (2013) Beach changes from sediment delivered by streams to pocket beaches during a major flood. Geomorphology, 199, 36–47.

Short, A.D. & Masselink, G. (1999) Embayed and structurally controlled beaches. In: Short, A.D. (Ed.) Handbook of beach and shoreface morphodynamics. New York: John Wiley and Sons, pp. 230–249.

Valiente, N. G., Masselink, G., McCarroll, R. J., Scott, T., Conley, D., and King, E. (2020). Nearshore sediment pathways and potential sediment budgets in embayed settings over a multi-annual timescale. Mar. Geol. 427, 106270. doi: https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106270.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18881

# Modificación de la red de drenaje de las cuencas bajas de la Costa del Sol Occidental y su implicación en la evolución de la costa

*Changes in the drainage network of lower basins in Western Costa del Sol and their implication for coastal evolution*

**José Luis del Río[a], Fátima Navas[b] y Gonzalo Malvárez[c]**

[a]Servicio de investigación e Innovación. Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria y Pesquera; Junta de Andalucía, , jose.rio@juntadeandalucia.es; [b]Coastal Environments Research Group, RNM911 PAIDI; Universidad Pablo de Olavide de Sevilla, , fnavas@upo.es y [c]Área de Geografía Física; Universidad Pablo de Olavide de Sevilla, , gcmalgar@upo.es.

How to cite: Del Río, J.L.; Navas, F. y Malvárez, G. 2024. Changes in the drainage network of lower basins in Western Costa del Sol and their implication for coastal evolution. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18881

***Abstract***

*Changes in the drainage network of river basins may improve their hydrological efficiency, with sedimentary implications in littoral systems when they occur near the river mouth, especially in Mediterranean watersheds. In the westernmost section of the Mediterranean, the Alboran Sea, a number of river basins flow perpendicular to today's shoreline, feeding delta forms. Given the very close relationship between terrigenous sediment feeding with the formation of coastal features (such as beaches and dunes), these changes in the drainage network near river mouths can affect the pace and position of such coastal features. The injection point of the augmented source in relation to prevailing marine forces will result in new redistribution of sediments. The line of reasoning tackled in this paper is based on the assumption that the modification of those river courses feeding the Marbella and Estepona littoral systems during the upper Holocene might have had decisive sedimentary implications for the current setting of coastal features, paying special attention on the development of the Guadalmina River delta as a major contributor to the rapid infilling of estuaries and its conversion into deltas. Results suggest that the alternating quantity and position of fluvial and marine interactions has generated significant features such as the El Saladillo-Matas Verdes Dunes near Estepona and the infill of the Placer de las Bóvedas as a submerged feature that feeds the massive Cabopino dune complex near Marbella.*

***Keywords:*** *Changes in drainage networks, coastal evolution, coastal features, Marbella.*

***Resumen***

*La modificación de la red de drenaje de cuencas hidrográficas puede mejorar su eficiencia hidrológica, con implicaciones sedimentarias cuando ocurren en zonas de desembocadura, especialmente en cuencas Mediterráneas. En la sección más occidental del Mediterráneo, el Mar de Alborán, varias cuencas fluviales fluyen perpendicularmente a la línea de costa actual, alimentando formas deltaicas. Dada la estrecha relación existente entre la alimentación de sedimentos terrígenos y la formación de ambientes litorales (como playas y dunas), la modificación de la red de drenaje en zonas de desembocadura puede afectar tanto al ritmo como a la posición de estos elementos. El punto de inyección y el aumento en los aportes interaccionan además con las fuerzas marinas predominantes, generando una nueva redistribución de los sedimentos. La*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

*hipótesis de trabajo de este artículo asume que las modificaciones de las redes de drenaje de los cursos fluviales vertientes a las ensenadas de Estepona y Marbella durante el Holoceno podrían haber resultado decisivas en la actual configuración de los cordones dunares y dunas, con especial atención en el desarrollo del delta del río Guadalmina como uno de los principales contribuyentes al rápido llenado de los estuarios y su conversión en deltas. Los resultados sugieren que la cantidad y posición alternas de interacciones fluviales y marinas han generado elementos significativos como las Dunas de El Saladillo-Matas Verdes en Estepona y el relleno del Placer de las Bóvedas, alimentando este último el enorme complejo dunar de Cabopino en Marbella.*

***Palabras clave:*** *Cambios en redes de drenaje, evolución de la costa, ambientes litorales, Marbella.*

## 1. Introducción

La modificación de las redes de drenaje fluviales es un proceso recurrente que ha acontecido paulatinamente a lo largo de la historia geológica de la Península Ibérica y han sido ampliamente documentados en la literatura, en muchos casos catalogados como capturas fluviales (Baena, 2002; Struth et al., 2021; entre muchos otros). Existe un consenso generalizado en la identificación de los fenómenos de erosión remontante e incisión fluvial como los principales agentes desencadenantes de la transformación del perfil de equilibrio de los ríos, cuyo origen puede deberse a procesos climáticos, como por ejemplo las sequías, tectónicos, eustáticos o a episodios marinos de alta energía, como por ejemplo los tsunamis. Baena (2002) apunta, además, como otros mecanismos responsables de los procesos de captura fluvial, a la divagación lateral, propia de grandes cuencas y valles, los derrames, consistentes en la brusca irrupción de cursos fluviales ante fenómenos de cambio climático, y los colapsos kársticos, asociados al hundimiento provocado por el vaciado de cámaras kársticas. La ocurrencia de estos procesos en los Sistemas Béticos cobra especial relevancia durante el Pleistoceno medio y superior (0,78-0,01 Millones de años; M.a.), momento en el que se produce el levantamiento de la Cordillera Bética como consecuencia de la aproximación de la Placa Africana a la Euroasiática, produciéndose el encaje de la red fluvial y dando lugar a cuencas hidrográficas endorreicas que se rellenaron de sedimentos clásticos neógenos y cuaternarios procedentes de la erosión de los entornos colindantes (Vera, 2004). El comportamiento, en términos hidrodinámicos y sedimentarios, de los procesos de captura fluvial dependerá de la configuración de la red fluvial (es decir, si las cuencas son endorreicas o exorreicas), de la litología, la topografía, la tectónica (como la presencia de fallas) y el clima. En el caso de cuencas endorreicas, la predominancia de procesos erosivos frente a sedimentarios puede derivar en la formación de cárcavas, cañones, cañadas y barrancos, caso de la captura de la cuenca de Guadix-Baza por el río Guadalquivir hace aproximadamente 0,5 M.a., mientras que, si la sedimentación predomina frente a la erosión, es frecuente la formación de depósitos de tipo acera aluvial que configuran paisajes de llanuras (García-Tortosa et al., 2007). En cuencas hidrográficas vertientes al mar este patrón de comportamiento es diferente, iniciándose una etapa exorreica caracterizada por una rápida erosión de las partes altas de la cuenca y el consiguiente transporte de sedimentos terrígenos a través de la red fluvial hasta su vertido al mar. Si la pendiente es escasa, gran parte del sedimento terrígeno transportado acabará sedimentando en los márgenes fluviales, mientras que en zonas con pendientes escarpadas el transporte de grandes volúmenes de sedimentos terrígenos puede derivar en la formación de deltas (Struth et al., 2021).

La configuración de la red hidrográfica, así como la litología y la topografía del relieve, es fruto de la geología regional del área de estudio, resultante de la orogénesis alpina que dio origen a los Sistemas Béticos hace 60 M.a. aproximadamente. El área de estudio (Fig. 1) se localiza en la Zona Interna de las Cordilleras Béticas, concretamente en el Dominio de Alborán, superpuesto al Dominio Sudibérico de las Zonas Externas durante su migración hacia el oeste en el Neógeno, hace aproximadamente 23 M.a. (Alonso-Chaves & Orozco, 2007). De las tres unidades tectónicas características del Dominio de Alborán, se documenta en la Hoja 1065 (Marbella) del Mapa Geológico del IGME la presencia de afloramientos de los Complejos Alpujárride y Maláguide. El material predominante son rocas sedimentarias ígneas y metamórficas intensamente deformadas y desplazadas hacia el oeste (Vera, 2004). La distribución de estos materiales es heterogénea a lo largo de la corteza terrestre del área de estudio. Al igual ocurre con la configuración de la red hidrográfica, registrando las cuencas hidrográficas vertientes

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

al tramo occidental de la ensenada (ríos Guadalmina y Guadaíza) una morfología más estrecha y elongada que aquellas situadas en el tramo centro-oriental, las cuales muestran una configuración de tipo lobular con una diferencia notable entre ellas en términos de superficie, siendo la cuenca de mayor y menor tamaño la de los ríos Verde y Real respectivamente (Fig. 1).

Los ríos Guadalmina y Guadaíza discurren por un importante afloramiento de rocas ultramáficas procedentes del manto terrestre, a las que la literatura se refiere frecuentemente como peridotitas de Ronda, características del Complejo Alpujárride en este lugar. También resulta recurrente la presencia de cabalgamientos y pliegues cortados por fallas normales e inversas que denotan intensa actividad tectónica (Sanz de Galdeano et al., 2007). Ello resulta en el abrupto relieve de la sección centro-occidental de la ensenada, conformado por las sierras Bermeja, Real y Blanca situadas a escasos kilómetros de la costa, y en dónde la pendiente desciende rápidamente desde una cota máxima de 1.500 metros en Sierra Bermeja hasta el nivel del mar, generando potentes escorrentías superficiales y transporte de sedimentos terrígenos ante precipitaciones episódicas e intensas características del clima semi-árido del área de estudio (Del Río, 2017). En la desembocadura del río Guadalmina se emplaza el mayor delta de la Costa del Sol Occidental, que junto con el delta del colindante río Guadalmansa al oeste, en Estepona, constituirían los dos únicos depósitos de esta naturaleza en la Costa del Sol Occidental. Prácticamente alineado con la desembocadura del río Guadalmina, y a una profundidad de unos 35-40 metros, se encuentra el Placer de las Bóvedas, un depósito de sedimentos y metales pesados (de probable naturaleza peridotítica) de unos 15-25 metros de potencia. Y muy cercano a él, entre las isobatas de 650 y 100 metros, ésta última marcando la posición del nivel del mar y la desembocadura de los ríos en la última era glacial hace aproximadamente 18.000 años, se localiza la presencia de un cañón submarino conocido como Cañón de las Bóvedas, cuya posición estaría alineada entre los cauces actuales de los ríos Guadalmina y Guadaíza (Fernández & Malvárez, 2015). La orografía de la sección oriental de la Ensenada es notablemente diferente. En lugar de abruptas sierras cercanas al mar y ríos de relativa madurez se aprecian pequeños arroyos inconexos, hoy día extintos por actuaciones antrópicas de diversa índole, así como un manto eólico continuo de unos 12 kilómetros de longitud que finaliza en las dunas de Cabopino, en el extremo oriental de la Ensenada de Marbella. Su origen y evolución durante la última etapa interglaciar estaría vinculado (i) al aporte de sedimentos procedentes de los ríos Guadalmina y Guadaíza y del Placer de Las Bóvedas, (ii) y a su posterior transporte hacia el este a través de una célula de circulación en esta dirección favorecida por las condiciones morfodinámicas de la ensenada de Marbella (Malvárez et al., 2019).

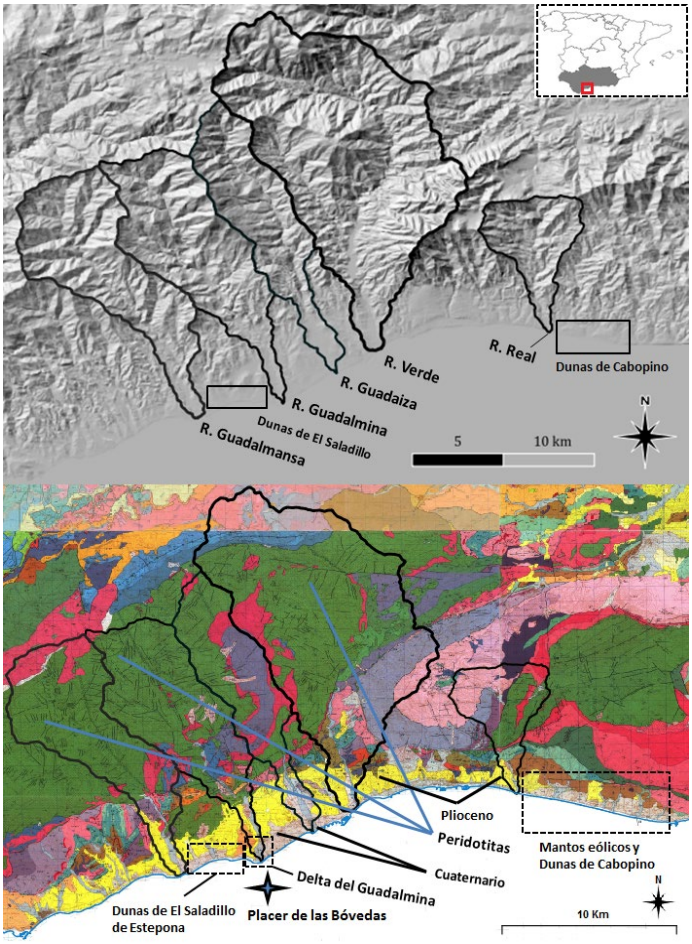



***Fig. 1.*** *Área de estudio. Fuente: Autores. Mapa base de ilustración superior: Modelo Digital del Terreno del Instituto Geográfico Nacional a resolución de 25m. Mapa base de ilustración inferior: Mapa Geológico MAGNA 1:50.000 del IGME. Procesado en QGIS de Hojas 1051 (Ronda), 1064(Cortés de la Fra.), 1065 (Marbella), 1066c*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

La hipótesis de trabajo de este artículo investiga la posible relación de los procesos de modificación de la red de drenaje, en la literatura analizada referidos como capturas fluviales, en el área de estudio, y la formación y evolución de formas litorales y sub-litorales asociadas en las ensenadas de Marbella y Estepona.

## 2. Método

Se ha realizado una revisión bibliográfica y documental exhaustiva de procesos, catalogados en la literatura como de captura fluvial, acontecidos en diferentes unidades geológicas en la Península Ibérica y, en particular, en los Sistemas Béticos, así como una búsqueda significativa de referencias sobre la casuística de este fenómeno para demostrar sus efectos morfosedimentarios en ámbitos fluviales y litorales. Una vez caracterizado y documentado el proceso, se ha utilizado información espacial a través de servicios cartográficos para documentar los procesos de modificación de redes de drenaje fluvial en el litoral de la Ensenada de Marbella desde las bases de Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA; https://tinyurl.com/29mdwwcx), el catálogo de servicios interoperable de la Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía (IDEA; https://tinyurl.com/254w5jtq), y el comparador de servicios WMS de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM; https://tinyurl.com/23pc9bl7).

## 3. Resultados y discusión de la hipótesis de trabajo

La red fluvial exorreica en la ensenada de Marbella está caracterizada por pequeñas cuencas hidrográficas (155,55 $Km^2$ Río Verde *Vs.* 56.978 $Km^2$ Río Guadalquivir) con una disposición controlada por los planos de fracturas y la compleja geología de la zona. Los cursos fluviales tienen comportamientos marcados por discurrir por el enorme batolito peridotítico de Ronda, que domina la parte Oeste de la Ensenada. Los ríos Guadalmina y Guadaíza toman dirección sur al discurrir enteramente por este dominio ultramáfico, mientras que el Río Verde, en el centro de la Ensenada, presenta una litología más heterogénea con su margen derecha discurriendo sobre peridotitas y la izquierda casi enteramente dominada por calizas y mármoles dolomíticos. Este es también el caso de los ríos Real y los arroyos que completan la red vertiente en la sección oriental de la ensenada. La red de esta sección tiene una contribución actualmente más limitada porque sus cuencas son muy cortas y la cabecera de las mismas está dominada por amplios complejos kársticos que reducen considerablemente la escorrentía superficial.



***Fig. 2.*** *Representación de las posiciones de desembocadura del Rio Guadaiza durante el ajuste posterior al máximo Holoceno y tras los encajamientos y posibles capturas del Pleistoceno inferior. Fuente: Autores. Los Rios Guadalmina y Guadalmansa ocupan ahora los valles occidentales, pero habrían intercambiado los cursos medios en las fases de capturas.*

Son las cuencas de los ríos Guadaíza, Guadalmina y Guadalmansa las que han ocupado potencialmente cursos muy variables en la posición en la que hoy desembocan (Fig. 2). Estos ríos, hoy con desembocaduras paralelas, deben haber contribuido a un único curso fluvial todavía representado en el cañón de Las Bóvedas.

Los diversos episodios eustáticos han afectado la trayectoria de los cauces principales, desencadenando modificaciones en la red de drenaje de los tramos bajos y desembocaduras. La posición que ocupa actualmente la línea de costa coincide con una porción del curso alto de estos ríos en varios momentos geológicos significativos, como en el Plioceno superior, cuando la crisis salina del Mesiniense dio paso a la colosal inundación Zancleana, así como en el fin del Pleistoceno, momento en el que el nivel del mar se eleva desde la isobata de 100 metros a un nivel superior al actual, generando una situación de sucesión de profundos estuarios a otros de tipo delta con gran abundancia de aportes y posibles capturas en lo que, de hecho, eran cabeceras de ríos muy caudalosos.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Un análisis detallado de los depósitos demuestra además que en el proceso de ajuste de los cursos en el punto de interacción fluvio-marino y en las posibles capturas de estos cursos altos que, sin embargo, desembocan súbitamente en el mar, se producen inyecciones de materiales significativas que producen depósitos litorales una vez que los agentes marinos comienzan a operar en los depósitos. Mal clasificados, muy heteroclásticos y litológicamente diversos, los depósitos se encuentran en un medio hidrodinámico dominado por oleajes de alta frecuencia y marcada bidireccionalidad en la dinámica de la deriva del entorno del *nearshore*. Así se producirían playas de marcado carácter reflexivo y morfodinámica muy activa que facilitaría que esas posibles capturas fluctuaran, además de por los procesos fluviales, por los marinos en las desembocaduras. En los periodos de *hi-stand* del máximo Holoceno se dotaría al sistema litoral de enormes aportes y, por tanto, de colapso secuencial de las incisivas desembocaduras, resultando también en capturas de arroyos locales de poco recorrido.

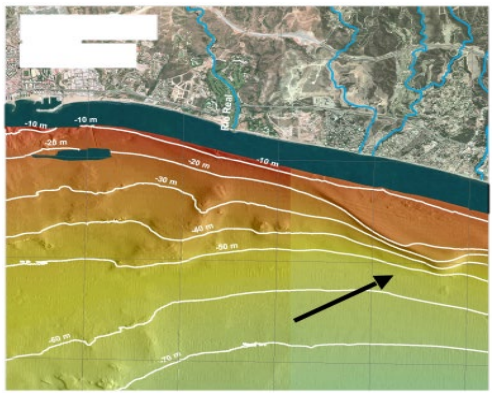



***Fig. 3.*** *Presencia de barras litorales sumergidas al Este de la Ensenada de Marbella. Fuente: Fernández y Malvárez (2015). Las barras que migran hacia el Este desde el Placer de las Bóvedas indican la relevancia del sistema marino una vez que los aportes fluviales ocupan el infralitoral en una posición determinada.*

Bajo la actual línea de costa, el enorme depósito del Placer de las Bóvedas ha colmatado en la fase final de la evolución del sistema (desde el reverso del máximo Flandriense), lo que habría sido un entorno somero dominado por modificaciones en la red de drenaje de las desembocaduras itinerantes en una interacción fluvio-marina intensa. Este gran deposito sirve en la actual configuración morfodinámica para la alimentación de grandes sistemas de barras que, situadas entre 5 y 10 metros de profundidad, están movilizadas por la deriva litoral dentro del margen de la profundidad de cierre actual del sistema litoral (Fig. 3), dotando al sistema playa de abundantes aportes que desencadenaría la expansión del significativo sistema dunar de Cabopino. En cambio, en momentos previos del sistema (Fin del Pleistoceno Superior-Holoceno), cuando la línea de costa se hubo situado en isobatas por debajo de la actual, las condiciones habrían favorecido la confluencia de los cursos bajos de los ríos Guadalmina y Guadalmansa y su conexión con el Cañón de las Bóvedas (Fig. 4). En este escenario, y de nuevo debido a la acusada bidireccionalidad de los vientos y oleajes asociados, la deriva pudo haber contribuido en un punto de inyección hacia la sección occidental, en las inmediaciones occidentales de la actual desembocadura del Río Guadalmansa, que habría intercambiado su curso con el Río Guadalmina, dando origen a una duplicación de la producción de materiales y generando depósitos relacionados con el actual sistema dunar de El Saladillo.

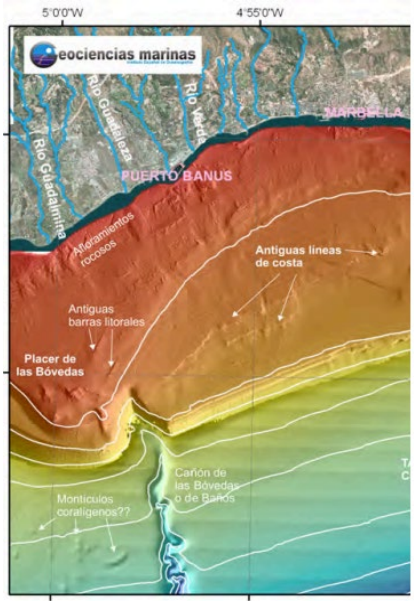



***Fig. 4.*** *Placer y Cañón de las Bóvedas. Fuente: Fernández y Malvárez (2015). Ambos testigos del curso único en el que confluían los tres ríos.*

Sobre la base de trabajos previos que documentan procesos de captura fluvial en el área de estudio (Baena, 2002; Gómez-Zotano et al., 2009), si bien podrían tratarse de modificaciones de las redes de drenaje, este artículo retoma y recalca la importante implicación de los procesos fluviales en la evolución sedimentaria del sistema litoral, en especial en aquellos en los que se produce la convergencia de complejos procesos geológicos, tectónicos y eustáticos en diferentes etapas geológicas. Se propone que la subida del nivel del mar desde su posición a -100 metros hace 18.000 años hasta ± 1 metro en el Holoceno hace 6.000 años (Lario et al., 1993), originaría importantes procesos de erosión remontante responsables de numerosos fenómenos de cambios en las redes de drenaje de los ríos Guadalmansa, Guadalmina y Guadaíza, lo cual produciría un severo aumento en la tasa de producción de sedimentos terrígenos de estas cuencas y el consiguiente depósito en el sistema litoral, dando origen al (i) actual

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Placer de las Bóvedas, (ii) al complejo dunar de El Saladillo-Matas Verdes en Estepona y (iii) a la secuencia de mantos eólicos y dunas de Cabopino.

## 4. Conclusiones

Los procesos de modificación de redes de drenaje de los ríos son de suma importancia en términos geomorfológicos, dado su efecto multiplicador en la capacidad erosiva, de acarreo y de depósito. Cuando estos procesos ocurren en cuencas bajas de tipo exorreica, pueden causar múltiples efectos en el entorno litoral, especialmente en ambientes Mediterráneos. Además del efecto multiplicador de aportes, la dirección del punto de inyección de los aportes en relación a los procesos litorales (deriva litoral, por ejemplo) puede ser determinante para la evolución de la línea de costa, dando lugar a aceleradas colmataciones de estuarios, formaciones de deltas o de grandes depósitos sumergidos que doten al infralitoral de los materiales suficientes para que se produzca un incremento sustancial en el aporte de sedimentos a las playas y, consecuentemente, se originen mantos eólicos o incluso dunas. Este es el caso de las modificaciones de las redes de drenaje que durante los numerosos y violentos cambios del nivel del mar han afectado a los actuales ríos Guadaíza, Guadalmina y Guadalmansa, los cuales contribuirían a un único río muy encajado aún en la plataforma continental del Mar de Alborán, el Cañón de las Bóvedas, y que han configurado depósitos y sistemas playa-duna singulares en el área de estudio.

## 5. Referencias

Alonso-Chaves, F.M. & Orozco, M. (2007). Evolución tectónica de las sierras de Tejeda y Almijara: Colapso extensional y exhumación de áreas metamórficas en el Dominio de Alborán (Cordilleras Béticas). *Revista de la Sociedad Geológica de España, 20*(3-4), 211-228.

Baena, R. (2002). Modificaciones hidrográficas y fenómenos de captura en Andalucía: Estado de la cuestión y nuevas aportaciones desde la geomorfología fluvial. En Universidad de Zaragoza (Eds.), *Aportaciones geográficas en memoria del profesor Miguel Yetano Ruiz* (pp. 19-34). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza.

Del Río, J.L. (2017). *Impacto del uso del suelo y la explotación de los recursos naturales en la dinámica sedimentaria litoral: Estudio interdisciplinar de la evolución reciente en el municipio de Marbella, provincia de Málaga*. Tesis Doctoral. Universidad Pablo de Olavide de Sevilla.

Fernández, L.M. & Malvárez, G. (2015). Plataforma Continental. En G. Malvárez, F. Navas & Guisado-Pintado, E. (Eds.), *Geomorfología de la Ensenada de Marbella* (pp. 25-36). Universidad Pablo de Olavide de Sevilla.

García-Tortosa, F.J., Alfaro-García, P., Medina-Cascales, I. & Martín Rojas, I. (2007). Los badlands del Geoparque de Granada. En F.J. García-Tortosa (Ed.), *Guía Geológica del Geoparque de Granada* (pp. 232-247).

Gómez-Zotano, J., Román-Requena, F., Visozo-Paz, M.T. & Navarro-Luengo, I. (2009). *Dunas litorales y fondos marinos del Saladillo-Matas Verdes (Estepona, Málaga)*. Asociación Grupo de Trabajo Valle del Genal de Málaga.

Lario, J., Zazo, C., Somoza, L., Goy, J.L., Hoyos, M., Silva, P.G. & Hernández-Molina, F.J. (1993). Los episodios marinos Cuaternarios de la Costa de Málaga. *Revista de la Sociedad Geológica de España, 6*(3-4), 41-46.

Malvárez, G., Navas, F., Guisado-Pintado, E. & Jackson, D.W.T. (2019). Morphodynamic interactions of continental shelf, beach and dunes: the Cabopino dune system in southern Mediterranean Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, 1647-1658. DOI: 10.1002/esp.4600

Sanz de Galdeano, C., Galindo-Zaldívar, J., Alfaro, P. & Ruano, P. (2007). El relieve de la Cordillera Bética. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 15*(2), 185-195.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Struth, L., García-Castellanos, D., Rodríguez-Rodríguez, L., Viaplana-Muzas, M., Vergés, J., & Jiménez-Díaz, A. (2021). Topographic, lithospheric and lithologic controls on the transient landscape evolution after the opening of internally-drained basins. Modelling the North Iberian Neogene drainage. *Earth Sciences Bulletin, 192*, 45.

Vera, J.A. (2004). Geología de las Cordilleras Béticas. En P. Alfaro, J. M. Andreu, A. Estévez, J. E. Tent-Manclús, & A. Yébenes (Eds.), *Geología de Alicante* (pp. 17-36), Universidad de Alicante.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

GEOLIT

# SESIÓN 7



XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18548

# Los procesos geomorfológicos como indicadores para evitar la fragmentación de competencias en la gestión de espacios naturales costeros protegidos

*The use of geomorphological processes as indicators to avoid the fragmentation of competences in the management of protected natural areas in the coastal zone*

**Abel Sanromualdo-Collado[a], Nicolás Ferrer[a], Néstor Marrero-Rodríguez[a], Leví García-Romero[a] y Antonio I. Hernández-Cordero[a]**

[a]Instituto de Oceanografía y Cambio Global, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, abel.sanromualdo@ulpgc.es; ,nicolas.fvg@ulpgc.es; nestor.marrero@ulpgc.es; levi.garcia@ulpgc.es; hernandez.cordero@ulpgc.es.

How to cite: Sanromualdo-Collado, A.; Ferrer, N.; Marrero-Rodríguez, N.; García-Romero, L. y Hernández-Cordero, A. I. 2024. Los procesos geomorfológicos como indicadores para evitar la fragmentación de competencias en la gestión de espacios naturales costeros. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18548

## *Abstract*

*The Guguy massif (La Aldea de San Nicolás, Canary Islands, Spain) is the centre of a protected natural area due to its uniqueness and geomorphological, ecological and landscape importance. Since 2021, there has been a proposal to include this area as a maritime-terrestrial National Park. Spanish legislation stipulates that the management of maritime-terrestrial national parks is the responsibility of the Autonomous Communities, provided that ecological continuity between marine and terrestrial ecosystems is demonstrated. To avoid administrative boundaries and the fragmentation of spatial management responsibilities, geomorphological processes in coastal sedimentary systems have been used as indicators to demonstrate ecological continuity between ecosystems. The results of the sediment, wind and marine dynamics analyses showed the existence of a single geodynamic functional unit on the Guguy coast, where marine, wind, fluvial and slope processes are coupled. Based on this evidence, we recommend that the administrative fragmentation of this area be avoided in order to promote integrated management of the ecological processes that make it up.*

***Keywords:*** *Ecological continuity, National Park, Integrated Coastal Zone Management, Beach-dune system, Aeolian sedimentary dynamics.*

## *Resumen*

*El macizo montañoso de Guguy (La Aldea de San Nicolás, Islas Canarias, Spain) es el centro de un espacio natural protegido debido a su singularidad e importancia geomorfológica, ecológica y paisajística. Desde el año 2021 existe una propuesta para incluir dicho espacio bajo la figura de Parque Nacional. La legislación española establece que la gestión de los Parques Nacionales marítimo-terrestres será competencia de las comunidades autónomas siempre que se demuestre la continuidad ecológica entre los ecosistemas marino y terrestre. Con el fin de evitar las fronteras administrativas y fracturación de las competencias en la gestión del espacio, se han usado los procesos geomorfológicos en los sistemas sedimentarios costeros de Guguy como indicadores para demostrar la evidencia de la continuidad ecológica entre ecosistemas. Los resultados de los análisis sedimentarios y de dinámica eólica y marina, evidencian la existencia de una sola unidad funcional geodinámica en la costa de Guguy, donde se acoplan procesos marinos, eólicos, fluviales y de vertientes. A partir de estas evidencias, aconsejamos evitar la fragmentación*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

*administrativa de este espacio de cara a promover una gestión integrada de los procesos ecológicos que lo constituyen.*

***Palabras clave:*** *Continuidad ecológica, Parque Nacional, Gestión Integrada de Zonas Costeras, Sistema playa-duna, Dinámica sedimentaria eólica.*

## 1. Introducción

Los procesos físicos que interaccionan en la costa hacen compleja la gestión de los espacios naturales costeros protegidos, especialmente en los casos en los que existen distintas administraciones involucradas en la toma de decisiones (O'Hagan et al., 2020). Con el objetivo de evitar conflictos en las competencias entre administraciones, que puedan tener distintos intereses y de generar fronteras administrativas en la gestión de estos espacios, es esencial asegurar la gestión integrada de los mismos (Yue et al., 2023). A pesar de la tendencia hacia la gestión integrada de las zonas marítimo-terrestres, siguen existiendo conflictos de competencias en la toma de decisiones debido a la división de las jurisdicciones marinas y terrestres.

En el caso de los parques nacionales marítimo-terrestres, es necesario demostrar la continuidad ecológica entre el medio marino y el terrestre para transferir las competencias de gestión a una única administración y lograr de esta forma una gestión integrada. En particular, la legislación española establece que "la gestión y organización de los parques nacionales corresponde directamente a las comunidades autónomas en cuyos territorios estén situados, incluidos los marítimo-terrestres cuando exista continuidad ecológica del ecosistema terrestre con el marino, lo cual deberá estar avalado por la mejor evidencia científica existente y estar así reconocido expresamente en la ley declarativa" (Ley 30/2014, de 3 de Diciembre, de Parques Nacionales).

El macizo de Guguy se propuso como espacio protegido por primera vez en el año 1975, como elemento en el Inventario de Espacios Naturales de Protección Especial del ICONA. En 1987 se propuso su inclusión como Reserva Integral en el Plan Especial de Protección de los Espacios Naturales de Canarias y se clasificó como Parque Natural del Macizo del Suroeste. En el año 1994 se declaró la Reserva Natural Especial de Guguy dentro de la Red de Espacios Naturales de Canarias. Además, el ámbito terrestre fue declarado Lugar de Interés Comunitario, y la Red Natura 2000 lo incluyó, en el ámbito terrestre, como Zona de Especial Conservación de Güigüi, y en el ámbito marino, como Zona de Especial Conservación de los Sebadales de Güigüi. En el año 2021 se propuso al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico su declaración como Parque Nacional, albergando una superficie total de 10.119 Ha, de las cuales 2.899 Ha son terrestres (actual RNE) y 7.219 Ha son marinas (actual ZEC).

El objetivo principal de este trabajo es usar los procesos geomorfológicos presentes en el sistema sedimentario costero del espacio propuesto para el Parque Nacional de Guguy como indicadores que permitan demostrar la continuidad ecológica del ecosistema terrestre y marino, y avalar una gestión integrada del espacio sin fragmentación de las competencias administrativas.

## 2. Área de estudio

El macizo montañoso de Guguy se localiza en el oeste de la isla de Gran Canaria (islas Canarias, España), en el municipio de La Aldea de San Nicolás. Con una altitud mínima de 0 m y máxima superior a 1000 m, alberga varias de las comunidades vegetales principales existente en la isla de Gran Canaria, incluyendo el cinturón halófilo costero y diversas comunidades semiáridas y termófilas, con numerosos endemismos vegetales y especies de fauna de especial interés, así como diferentes taxones protegidos. En los fondos marinos someros próximos a la costa se localizan extensiones de sebadales, praderas que sirven como hábitat a un amplio rango de especies acuáticas, donde la especie que las caracteriza (*Cymodocea nodosa*) está amenazada y protegida.

Geomorfológicamente, muestra una estructura singular en abanico, con profundos barrancos, interfluvios en cuchillos y acantilados costeros de gran altura (de hasta 500 m). Dos grandes barrancos, cuyas desembocaduras

 BY-NC-SA

están colgadas varios metros sobre el nivel del mar, vierten sobre las playas por medio de escarpes rocosos. Al pie de los acantilados se desarrollan taludes de derrubios de varios metros. En la costa sedimentaria se desarrollan tres playas denominadas, de norte a sur, Güigüi Chico, Playa de Enmedio y Güigüi Grande. En marea alta las tres playas forman arcos abiertos al oeste separados por salientes rocosos, mientras que en marea baja las playas se conectan formando un solo cuerpo sedimentario. Asociada a la playa de En medio se desarrolla una duna rampante, de las pocas existentes en la isla de Gran Canaria. El área de estudio se limita a este sistema sedimentario costero que se desarrolla en el litoral central del macizo, donde podrían ser particularmente evidentes las dinámicas de intercambio de energía y materia entre los sistemas marino y terrestre (Fig. 1).

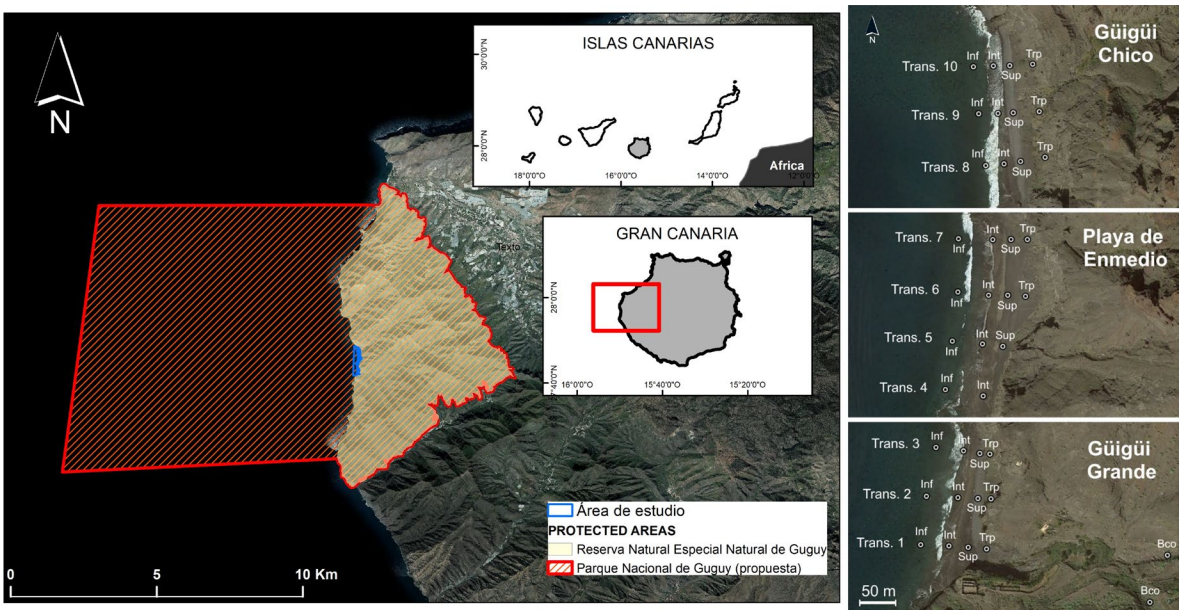



***Fig. 1*** *Localización del área de estudio, delimitación los espacios protegidos actual (RNE) y propuesto (PN), y diseño de muestreo para la campaña de toma de datos. Base cartográfica: GRAFCAN – Gobierno de Canarias.*

## 3. Metodología

Se llevó a cabo una campaña de campo en el sistema sedimentario costero de Guguy con varios objetivos: i) la observación directa del área de estudio para ayudar a la constatación de las unidades geomorfológicas identificadas por fotointerpretación; ii) la realización de un levantamiento topográfico para comparar con los LiDAR disponibles de los años 2009 y 2015; iii) la recogida de muestras de sedimento para su caracterización granulométrica y calcimétrica; iv) la adquisición de datos de viento para la determinación de la dinámica sedimentaria eólica en el área de estudio. Además, se determinó la profundidad de cierre del sedimento según la metodología de Hallermeier (1980) para los últimos 65 años.

Se tomaron muestras de sedimento en 10 transectos (Fig. 1) de las franjas inframareal (Inf), el intermareal (Int), el supramareal (Sup) y la trasplaya (Trp). Adicionalmente, se tomaron dos muestras en el lecho del barranco de Güigüi Grande (Bco). En los puntos localizados en el intermareal y el supramareal se recogieron simultáneamente datos de velocidad y dirección de viento a intervalos de 2 segundos durante más de 30 minutos. Estos resultados se integraron y normalizaron con los datos recogidos en una estación de control localizada en el frente de playa sin obstáculos (Delgado-Fernández et al., 2013). Los resultados se interpolaron e integraron para trazar un modelo conceptual de los procesos marinos, eólicos, fluviales y de vertientes que rigen la dinámica del sistema sedimentario costero de Guguy.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 4. Resultados

A partir de la información recopilada, se identificaron las distintas unidades geomorfológicas presentes en el espacio natural y se caracterizó la dinámica sedimentaria, identificando los intercambios entre la zona emergida, intermareal y sumergida.

El análisis de diferencias topográficas para el periodo 2009-2023 (Tabla 1) mostró la variabilidad volumétrica del sedimento y la existencia de intercambio sedimentario mar-tierra producido por el oleaje y las corrientes, con diferencias volumétricas significativas para toda el área de estudio. En los datos se observa una tendencia erosiva en todos los subambientes, a excepción del intermareal arenoso de Güigüi Chico y Güigüi Grande.

***Tabla 1.*** *Volumen neto total de diferencias detectado en las diferentes zonas morfodinámicas.*

| **Zona morfodinámica** | **Diferencia neta de volumen (m³)** | | |
|---|---|---|---|
| | 2009-2015 | 2015-2023 | 2009-2023 |
| Área de estudio (Total) | -191,16 | -14307,72 | -14584,8 |
| Intermareal arenoso (Güigüi Grande-Enmedio) | 1066,04 | -793,17 | 215,91 |
| Supramareal arenoso (Güigüi Grande) | -56,83 | -217,76 | -270,79 |
| Supramareal de cantos (Güigüi Grande) | 144,31 | -2265,86 | -2082,8 |
| Supramareal arenoso (Enmedio) | -533,45 | -1241,47 | -1737,16 |
| Formación dunar (Enmedio) | -344,24 | -2390,09 | -2759,91 |
| Intermareal arenoso (Güigüi Chico) | 223,04 | 742,53 | 941,78 |
| Supramareal de cantos (Güigüi Chico I) | -315,85 | -7593,58 | -7883,71 |
| Supramareal de cantos (Güigüi Chico II) | 39,81 | -248,59 | -222,66 |

El análisis sedimentológico de las muestras recogidas permitió reconocer un patrón continuo desde el submareal hasta el supramareal, formado mayoritariamente por arenas finas (Fig. 2, A). Esta continuidad se extiende, en la Playa de Enmedio, hasta la trasplaya (o playa seca), donde las arenas finas están sometidas a la acción eólica, dando lugar al desarrollo de una duna rampante de más de 18 m de altura. Por el contrario, el supramareal de las playas de Güigüi Grande y de Güigüi Chico está compuesto por fracciones más gruesas de sedimento, con cordones de guijarros de más de 8 mm y cantos.

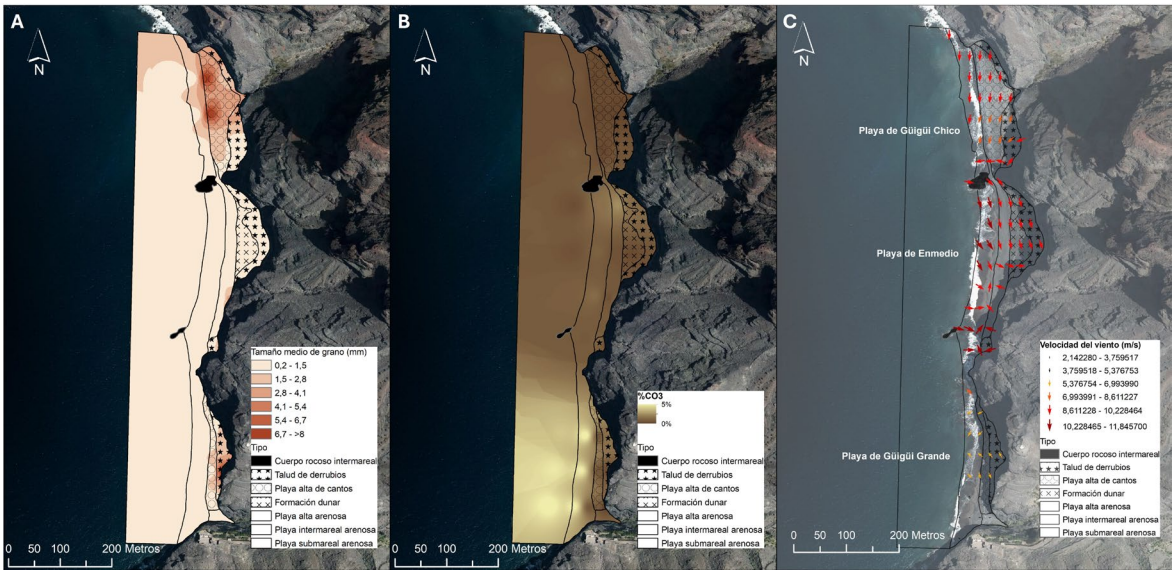



***Fig. 2*** *Distribución espacial del tamaño de grano del sedimento (A), porcentaje de carbonatos (B) y flujo de viento para una velocidad en la estación de control de 8,5m/s y componente N-NE (C). Base cartográfica: GRAFCAN – Gobierno de Canarias.*

 BY-NC-SA

La proporción de carbonatos encontrada en las muestras de playa ha resultado ser baja, siempre inferior al 4,5% (Fig. 2, B). Dado que el contenido en carbonatos de las dos muestras recogidas en el lecho del barranco es nulo, se puede afirmar, por lo tanto, que el aporte mayoritario de sedimentos terrígenos a las playas de Guguy, por mecanismos de erosión del macizo, es complementado con aportes de arena organogénica procedente del medio marino. Este aporte de arena organogénica, pese a ser escaso, evidencia procesos de transporte transversal efectivos desde el medio marino hacia los subambientes de playa y trasplaya.

Por su parte, la distribución espacial de velocidad y dirección del viento en condiciones generales para la zona (vientos de 8 m/s procedente del N-NE) permitió identificar un patrón de transporte sedimentario de norte a sur por acción del viento (Fig. 2, C).

Para la movilización de arenas submareales se obtuvo un valor teórico de profundidad de cierre de 8,30 m (Fig. 3). Esta profundidad se localiza en Guguy a 200-300 metros de la costa y marca la extensión del intercambio de sedimento entre la playa sumergida, intermareal y emergida. Parte de las praderas de *Cymodocea nodosa* se localizan a partir de esta profundidad, contribuyendo a la retención transversal de sedimento de deriva que, posteriormente, puede ser removilizado por el oleaje.

## 5. Discusión

La integración e interpretación de los resultados obtenidos permiten identificar el patrón de transporte sedimentario y dinámicas de conectividad tierra-mar en Guguy. Los datos confirman la existencia de continuidad sedimentaria de la playa de Guguy desde el submareal hasta el supramareal (Fig. 3). Los análisis granulométricos muestran la presencia de arenas finas desde el intermareal hasta el submareal, en concordancia con la Ecocartografía del litoral sur de Gran Canaria realizada por el MITERD en el año 2000. La presencia de carbonatos en el sedimento es indicadora de aportes de sedimentos subacuáticos a las playas, ya que su producción en Canarias es exclusivamente de origen marino (Montoya Montes et al., 2017). La principal fuente de sedimentos del sistema es la erosión del macizo. Los sedimentos son canalizados por la red de barrancos y depositados en la franja costera, donde se mezclan con la fracción de sedimentos bioclásticos y son removilizados por la dinámica marina hasta una profundidad de 8 m. Los sedimentos que llegan a la playa alta son transportados por el viento tierra adentro formando depósitos eólicos en forma de dunas rampantes.

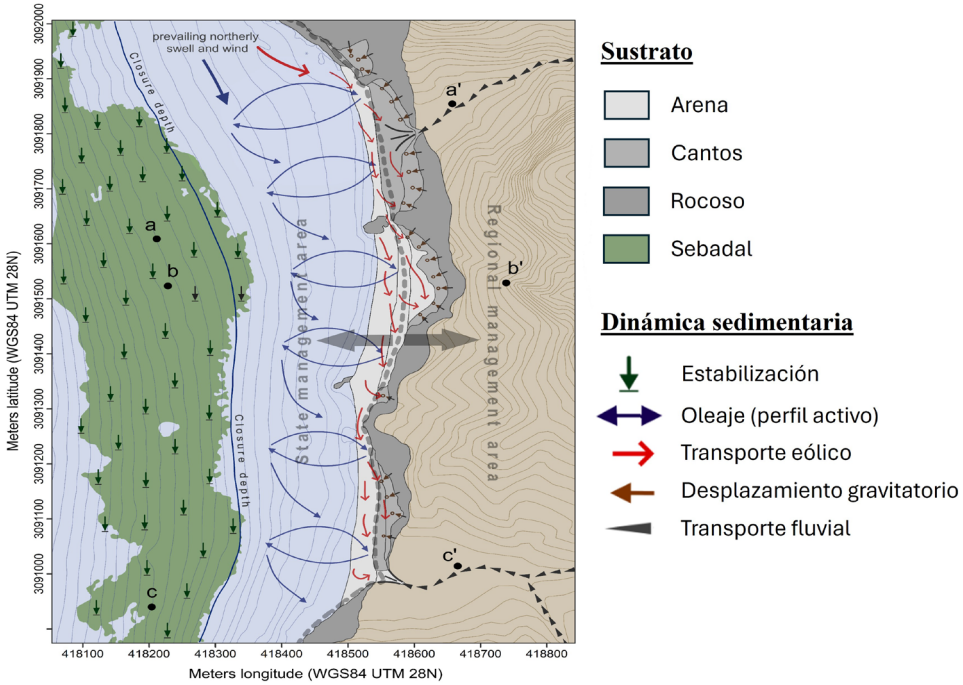



***Fig. 3*** *Modelo conceptual de funcionamiento de la dinámica sedimentaria en el sistema costero del Parque Nacional de Guguy. Nótese la representación de la profundidad de cierre (closure depth) en la batimetría.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Las evidencias empíricas permiten deducir un modelo de dinámica activa de intercambio de sedimento entre los ecosistemas terrestre y marino, y confirmar la continuidad ecológica entre ambos ambientes en Guguy. Esto aconseja la gestión integrada del espacio, con el objetivo de proteger, no únicamente la geomorfología singular del lugar, sino también las geodinámicas naturales que sustentan los ecosistemas vivos.

## 6. Conclusiones

Los procesos geomorfológicos pueden ser utilizados como indicadores para evaluar la continuidad ecológica en espacios naturales costeros protegidos y evitar la creación de fronteras administrativas que puedan comprometer la gestión integrada del espacio. Esto se ha comprobado en el caso de la propuesta de Parque Nacional de Guguy en la isla de Gran Canaria, donde la conectividad marino-terrestre de sus sistemas sedimentarios se ha establecido analizando la evolución topográfica reciente, el origen de los sedimentos, y las dinámicas eólicas y costeras. La constatación de la continuidad ecológica entre los ecosistemas marino y terrestres en Guguy confirma la incongruencia de generar una frontera administrativa tierra-mar, que fragmente la posible gestión integrada del espacio, y aconseja su gestión integrada por parte de una única administración.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del proyecto de I+D+i PID2021-124888OB-I00, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación y por "FEDER, Una manera de hacer Europa". Ha sido realizado gracias a un contrato entre la Fundación Parque Científico Tecnológico de la ULPGC y la empresa pública GESPLAN S.A. Los Drs. García-Romero y Ferrer son beneficiarios de contratos postdoctorales del programa Catalina Ruiz del Gobierno de Canarias y el Fondo Social Europeo (APCR2022010005 y APCR2021010018/6431001, respectivamente). El Dr. Marrero-Rodríguez es beneficiario de un contrato postdoctoral Margarita Salas financiado por el Ministerio de Universidades y por la Unión Europea a través de fondos Next Generation. Los autores agradecen a Ignacio Alonso Bilbao y al grupo de Geología Aplicada y Regional (GEOGAR) de la ULPGC su colaboración en la investigación.

## 8. Referencias

Delgado-Fernández, I., Jackson, D. W. T., Cooper, J. A. G., Baas, A. C. W., Beyers, M., & Lynch, K. (2013). Field characterization of three-dimensional lee-side airflow patterns under offshore winds at a beach-dune system. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *118*(2), 706–721. https://doi.org/10.1002/jgrf.20036

Hallermeier, R. J. (1980). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, *4*(C), 253–277. https://doi.org/10.1016/0378-3839(80)90022-8

Ley 30/2014, de 3 de diciembre, de Parques Nacionales, (2014).

Montoya Montes, I., Alonso Bilbao, I., Sánchez García, M. J., Marrero, N., Casamayor, M., & Rodriguez, S. (2017). Patrones de distribución del sedimento superficial en la plataforma insular de Gran Canaria (España). *Geotemas*, *17*, 335–338. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6398595&info=resumen&idioma=SPA

O'Hagan, A. M., Paterson, S., & Tissier, M. Le. (2020). Addressing the tangled web of governance mechanisms for land-sea interactions: Assessing implementation challenges across scales. *Marine Policy*, *112*, 103715. https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2019.103715

Yue, W., Hou, B., Ye, G., & Wang, Z. (2023). China's land-sea coordination practice in territorial spatial planning. *Ocean and Coastal Management*, *237* (February), 106545. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106545

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18568

# Aproximación cronológica de la formación de los cordones de dunas de la barrera al sur del río Xúquer durante época histórica

*Chronological approximation of the formation of the dune ridges of the barrier south of the Xúquer River during historical times*

**María-Luisa Acosta-Real**[a]

[a]Departamento de Geografía, Universitat de València, , Maria.L.Acosta@uv.es

How to cite: Acosta-Real, M.L. 2024. Aproximación cronológica de la formación de los cordones de dunas de la barrera al sur del río Xúquer durante época histórica. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral*. Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18568

***Abstract***

*In the south of the Xuquer's river mouth extends a wide prograding sandy barrier that is part of a barrier-lagoon system. The combined use of historical documentation and cartography, DEM LIDAR topography, the photointerpretation and location of reference elements such as coastal watchtowers (16th century) and demarcation system (14th century), provides relevant information to make a proposal about the evolution of the barrier and its dune ridges in historical times. Inside the barrier, a central dune ridge is identified connected to an ancient interior delta of the Xuquer. To the south of the Xeraco's river mouth a dune field has been located that, according to historical cartography, coincides with the antique "Dehesa de Gandia". On the coast, there is a coastal dune ridge. The most recent geomorphological processes in historical times are studied, relating them to the last climatic period known as the Little Ice Age (14th-19th centuries) and its possible destabilization during the current climatic context.*

***Keywords:*** *Barrier-lagoon system, coastal progradation, dune ridge, dune field.*

***Resumen***

*Al sur de la desembocadura del río Xúquer se extiende una amplia barrera arenosa progradante que forma parte de un sistema de barrera-laguna. El uso combinado de documentación y cartografía histórica, topografía MDT LIDAR, la fotointerpretación y ubicación de elementos de referencia como torres vigía costeras (siglo XVI) y sistema de amojonamiento (siglo XIV), aporta información relevante para realizar una propuesta acerca de la evolución de la barrera y sus cordones dunares en época histórica. En el interior de la barrera, se identifica un cordón central conectado al antiguo delta interior del Xúquer. Al sur de la desembocadura del riu Xeraco se ha localizado un campo de dunas que, según cartografía histórica, coincide con la antigua "Dehesa de Gandia". En la costa, se registra un cordón litoral. Se estudian los procesos geomorfológicos más recientes en época histórica relacionándolos con el último período climático conocido como Pequeña Edad de Hielo (siglos XIV-XIX) y su posible desestabilización en el contexto climático actual.*

***Palabras clave:*** *Sistema barrera-laguna, progradación costera, cordón de dunas, campo de dunas.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción y área de estudio

La barrera arenosa del río Xúquer forma parte de un sistema de barrera-laguna que se formó durante los últimos milenios del Holoceno. Un antiguo delta interior del Xúquer (*Allargats*, 4050 BP, 4010 ± 60 BP) se extendía hacia el sur del cauce actual del río en una posición más continental (Ruiz & Carmona, 2005). A partir de este delta, se inició la progradación de la barrera arenosa siguiendo la dirección de la deriva N-S que aisló de la influencia marina a un sistema de laguna que, posteriormente, se transformó en un ambiente palustre. En la restinga (o barrera) se identifican la desembocadura del río Xúquer, L'Estany de Cullera y la desembocadura del riu Xeraco. Existe un prominente cordón central cartografiado parcialmente en el mapa geológico y descrito como "dunas subfósiles y arenas doradas" (Goy et al., 1982, IGME) que desaparece al norte de la desembocadura del riu Xeraco. Un sondeo en el entorno de la desembocadura del Xeraco (XE02) muestra la estratigrafía y evolución morfológica de este sector del litoral del Pleistoceno y el Holoceno (García-Blázquez et al., 2008). En este mismo sondeo se analiza el paleoambiente a través del estudio de los foraminíferos (Usera et al., 2017) para contextualizar la evolución holocena y los procesos geomorfológicos más recientes de época histórica. En la actualidad, la barrera experimenta procesos de erosión y una fuerte presión demográfica y turística, lo que ha motivado la regeneración de vastas extensiones de playas con arenas desde mediados de 1980 (Pardo, 1991; Pardo & Sanjaume, 2019).

El **objetivo principal** de este trabajo consiste en analizar las formas y procesos geomorfológicos de este sistema de barrera-laguna al sur de la desembocadura del río Xúquer y sus cordones de dunas en época histórica (durante la Pequeña Edad de Hielo o PEH, siglos XIV-XIX) y su posterior desestabilización en el contexto climático actual (siglos XX-XXI).

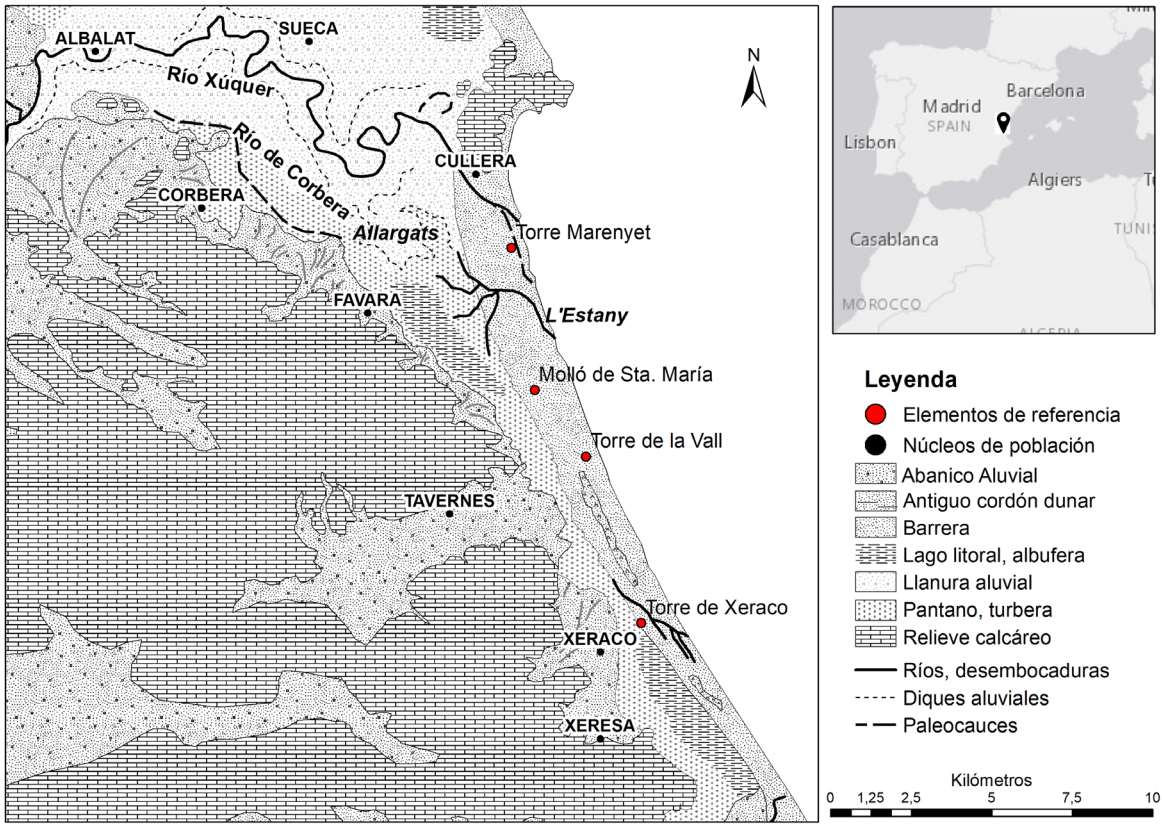



***Fig. 1*** *Mapa geomorfológico y de localización. Fuente: Elaboración propia.*

## 2. Materiales y metodología

Para analizar las formas y los procesos de este sistema al sur de la desembocadura del Xúquer en época histórica (durante la PEH) nos hemos apoyado en la documentación y la cartografía disponible de Edad Medieval y Moderna combinada con la información de datos MDT LIDAR (ICV), la fotografía aérea del vuelo americano de 1945, la

 BY-NC-SA

ortofoto de 1956-57 y la de 2021 (PNOA) del IGN (o CNIG). Estos datos los hemos tratado en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10) y hemos elaborado un MDT con equidistancia de curvas de nivel de 1 m.

Con el objeto de analizar su topografía y presentar una aproximación a la estratigrafía, se realizan varios perfiles trasversales a la barrera usando como base el MDT. Se utilizan elementos patrimoniales para aportar cronologías: torres vigía construidas en la costa durante el siglo XVI y el Molló de Santa María, construido a principios del siglo XIV. Finalmente, se realizará un análisis del estado actual de las formas identificadas (cordones de dunas) y su desestabilización reciente.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. La barrera del Xúquer y sus cordones de dunas

La barrera del Xúquer se representa claramente a partir del MDT como una franja de 1 – 2 msnm (figura 2) que se extiende desde su desembocadura hasta el Barranc de Beniopa unos 19 km frente al Mar Mediterráneo con orientación NW-SE. Ocupa una superficie de poco más de 25 km$^2$ y presenta un estrechamiento desde el sur de la desembocadura del Xúquer (donde su anchura media es de 1.500 m) hasta el final de nuestra área de estudio (anchura media de 700 m). Por detrás de la barrera, se localiza el humedal (0 – 1 msnm).

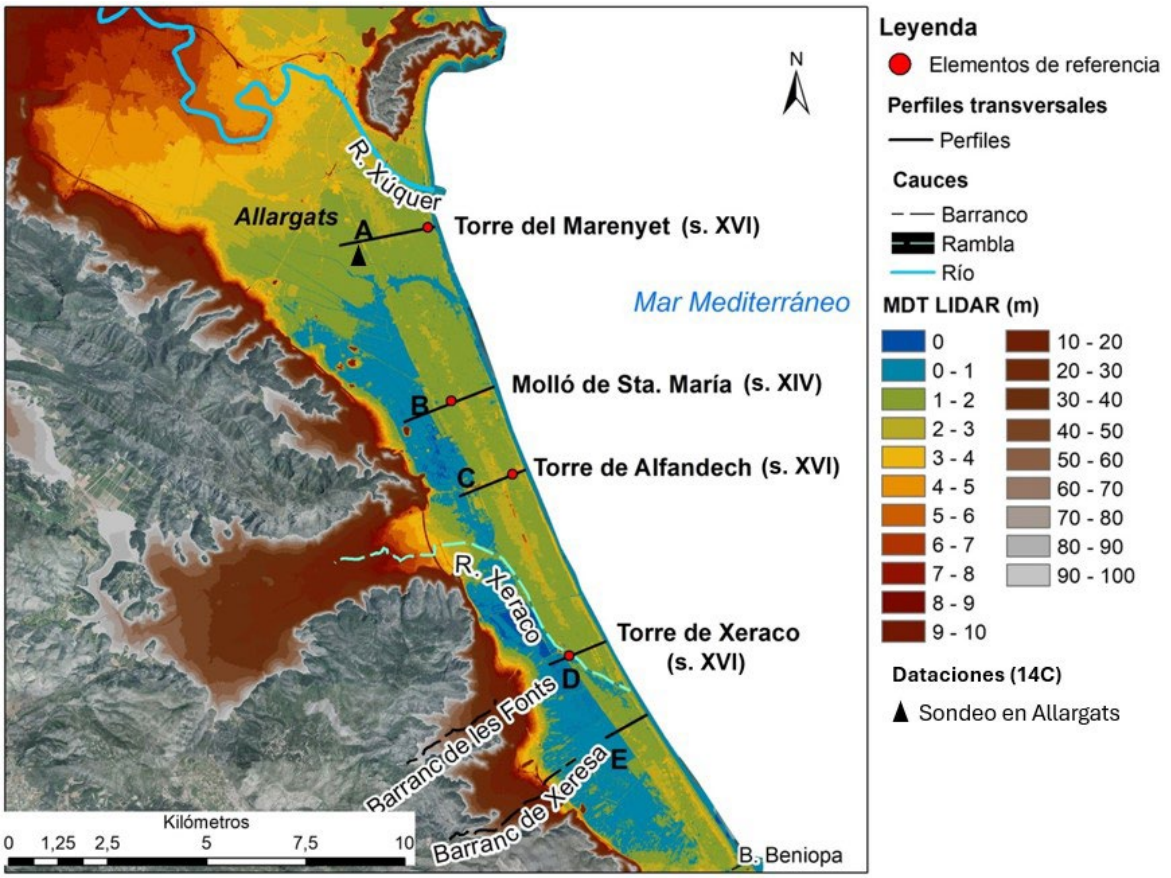



***Fig. 2*** *Localización de los cinco perfiles transversales a la barrera sobre MDT. Fuente: Datos LIDAR (ICV) y ortofoto del año 2021 (CNIG).*

Dentro de esta barrera de altitud media 2 msnm, encontramos elevaciones que corresponden a dos tipos de cordones arenosos: el *cordón litoral* y el *cordón central*. Respecto del primero, cabe señalar que entre la desembocadura del Xúquer y la del Xeraco se identifica un cordón litoral cuya altitud media es de unos 3,5 msnm. Al sur del Xeraco existe un pequeño tramo de costa que permanece poco alterado por la intervención antrópica y muestra una doble alineación separada por una depresión interdunar de 1,5 msnm. La anchura media del cordón interior (15 m) es considerablemente más estrecha que la del cordón exterior (33 m). En el sector central de la

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

barrera al sur del Xúquer, se identifica un largo y ancho cordón de trazado longitudinal (*cordón central*) con una altitud media de 3 msnm que puede alcanzar, puntualmente, valores máximos de 6 msnm. Este cordón arenoso o dunar se extiende más de 12 km siguiendo la orientación general de la restinga y cabe destacar que topográficamente está conectado con una cresta aluvial (2-3 msnm) (antiguo delta de Allargats). Ambos mantienen cotas entre 2 y 3 msnm. La anchura de este cordón central va perdiendo entidad de forma generalizada, tal y como evidencian los bordes geométricos resultantes de la nivelación del terreno y la delimitación de parcelas agrícolas hasta desaparecer al norte de la desembocadura del Xeraco. Por otra parte, al sur de la desembocadura del Xeraco se identifica un antiguo campo de dunas de orientación transversal a la barrera de 2-3 msnm (y hasta 4 msnm).

### 3.2. Aproximación estratigráfica y cronológica de los cordones dunares: perfiles transversales

Se han realizado cinco perfiles transversales a la barrera (figura 3). Cuatro de ellos comprende elementos datados por referencias históricas como torres vigía (siglo XVI) o mojones de términos municipales (s. XIV). La simbología que representa las torres y el mojón medieval no hacen referencia a su altura, pero sí refleja su ubicación exacta en la barrera. Un último perfil transversal se ha realizado donde, según la cartografía histórica, debió situarse la Dehesa de Gandia. El MDT (fig. 2) permite la diferenciación de tres ambientes siguiendo la secuencia: humedal – barrera – Mar Mediterráneo. En el humedal, los materiales que constituyen este ambiente palustre son limos orgánicos, limos pardos oscuros, limos grises de albufera y turba.

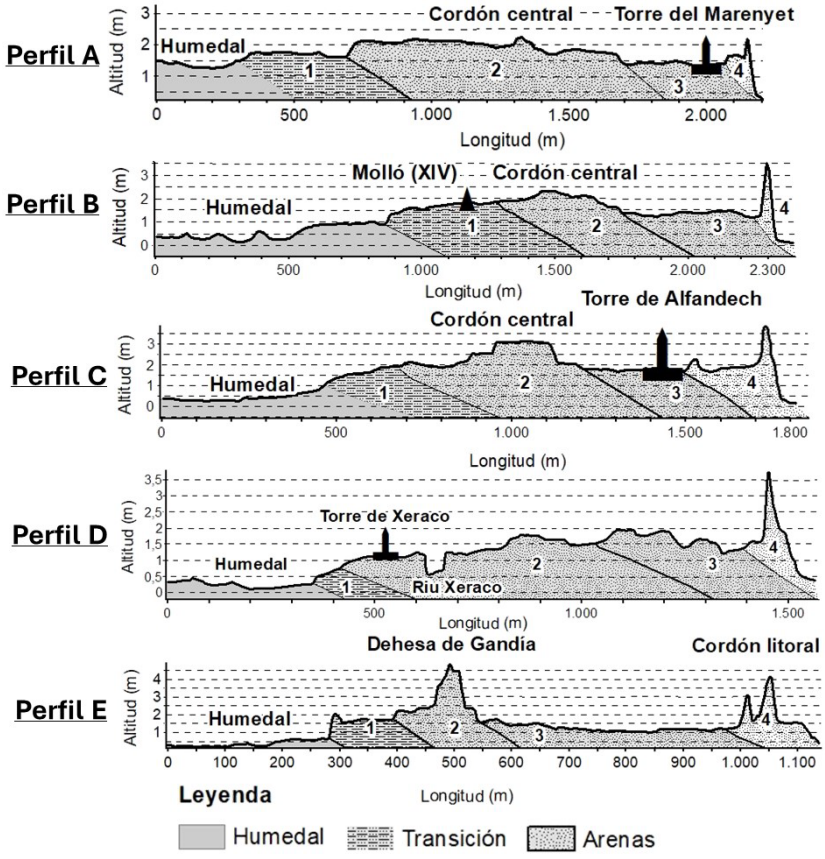



***Fig. 3*** *Levantamiento de los perfiles transversales. Fuente: Elaboración propia a partir de MDT LIDAR (ICV).*

A través del mapa geológico, fotointerpretación, datos altitudinales y elementos cronológicos de referencia, hemos diferenciado hasta cuatro unidades estratigráficas en la barrera. Los contactos entre unidades y su anchura son siempre supuestos (Fig. 3). Existe un ambiente de transición entre el humedal y la barrera (unidad 1) en el que alternan materiales de tipo aluvial, arenas y limos. En contacto con el ambiente de transición y en dirección hacia la costa, la barrera está constituida por arenas de diferentes períodos. El tramo Xúquer-Xeraco está representado por los perfiles A, B y C. A partir de los elementos de referencia, podemos asumir que la unidad 1 ya existía en el

 BY-NC-SA

siglo XIV dado que el Molló de Santa María (perfil B) fue construido sobre esta unidad. En los tres perfiles se identifica claramente el cordón central (unidad 2) registrando cotas por encima de 2 msnm. Usando como referencia las torres vigía de los perfiles A y C, sabemos que la unidad sobre la que fueron construidas (unidad 3) ya estaba formada en el siglo XVI. Por lo tanto, la unidad precedente (unidad 2, cordón central) también debió formarse con anterioridad al siglo XVI. Por el contrario, suponemos que el cordón litoral (unidad 4) que se localiza por delante de las torres debió formarse después de su construcción (siglo XVI), ya que para cumplir con su función defensiva debían localizarse próximas a la línea de costa y estar libres de elementos (arquitectónicos o naturales) que obstaculizasen la vista panorámica al mar. Esto no hubiese sido posible en presencia del cordón litoral actual, que registra cotas de más de 3 msnm.

El tramo de barrera del entorno del riu Xeraco viene representado por los perfiles D y E. En el perfil D la torre vigía de Xeraco construida en la orilla del riu en 1575 se encuentra a casi 1 km de la costa actual. Por delante de ella, el perfil muestra el cauce del riu Xeraco (unidad 2) y algunas vaguadas y elevaciones que se corresponden con los trazados de los sucesivos cauces y sus correspondientes flechas progradantes (entre 1,5 y 2 msnm). En este caso, podría indicar que las sucesivas flechas progradantes del cauce se habrían consolidado con posterioridad al siglo XVI. Al sur de la desembocadura del Xeraco, el perfil E representa un cordón de dunas (unidad 2) que registra un valor máximo de 4,5 msnm. Atendiendo a la cartografía histórica, estas dunas servirían de asiento para el desarrollo de la actualmente desaparecida Dehesa de Gandia. Este tramo de la barrera se encuentra en una posición ligeramente más avanzada hacia el mar que la Torre de Xeraco. Por lo tanto, debió formarse durante (o con posterioridad) al siglo XVI. La cartografía histórica sitúa la Dehesa por detrás de una zona de playa y nos indica que ya estaría consolidada en el siglo XVIII.

### 3.3. Estado actual del cordón central del Xúquer y del campo de dunas de Xeraco

La cartografía histórica representa parcelas agrícolas en el entorno de la desmbocadura del Xúquer. Suponemos que el cordón central de dunas lleva cultivado desde el siglo XIX. Actualmente está casi desaparecido y sólo es posible identificar sus restos a partir del LIDAR (Fig 2), ya que ha sido profundamente modificado por la nivelación del terreno para su uso agrícola desde época histórica. Por ello, no representamos su secuencia temporal.

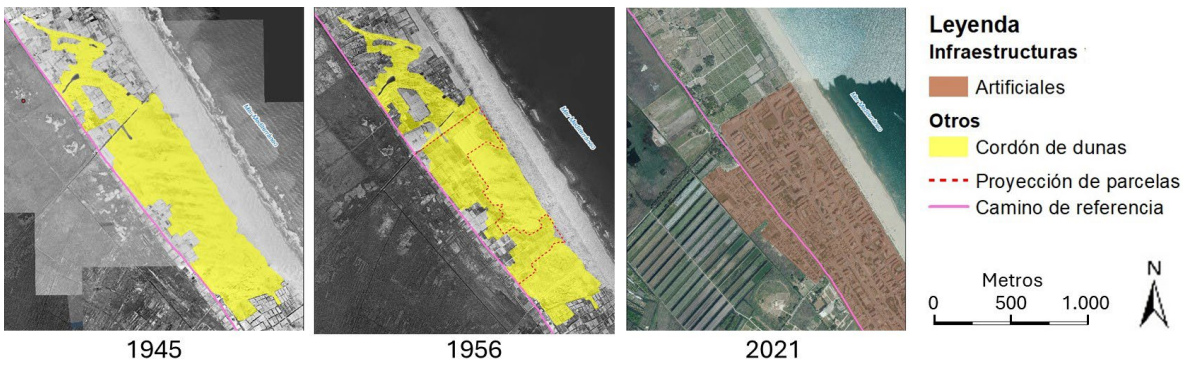



***Fig. 4*** *Localización aproximada de la antigua Dehesa de Gandia en diferentes fechas. Fuente:Fotos aéreas de 1945, Ortofotos de 1956 y 2021 (CNIG).*

La secuencia de imágenes al sur del riu Xeraco (Fig. 4) muestra un campo de dunas transversales a la barrera (en amarillo) parcialmente cultivado en 1945 que correspondería al espacio donde, según la cartografía histórica, se desarrollaba la vegetación (pinar) de la Dehesa de Gandia, ya desaparecida en 1945. En la década de 1950, el campo de dunas se ha reducido sustancialmente y se observa el trazado de parcelario destinado a la urbanización (línea discontinua roja). Actualmente, el campo de dunas ha desaparecido completamente bajo la urbanización y la expansión agrícola y sólo es posible identificar sus restos en un tramo no cultivado a partir del MDT LIDAR.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 4. Conclusiones

La información cruzada de datos del mapa geológico, cartografía histórica, topografía MDT LIDAR, la fotointerpretación y la identificación de unidades estratigráficas en los perfiles proporciona información útil para realizar una propuesta acerca de la evolución de la barrera en época histórica. El elemento de referencia más antiguo es el Molló de Santa María (s. XIV). Deducimos que la unidad (1) sobre la que se construyó debió estar consolidada en el siglo XIV. Según la división de términos municipales original del 5 de marzo de 1306 sabemos que por delante del Molló de Santa María había más mojones (al menos uno sobre tierra denominado *mojón quinto, en los montalars, a la entrada de el mar*), con lo que es posible que el cordón central correspondiera a los denominados *montalars* y ya existiera en el siglo XIV. Se plantea la hipótesis de que este cordón se formó durante la Anomalía Climática Medieval (ACM, siglo XI), que registró periodos de alta frecuencia y magnitud de inundaciones. Del mismo modo, las torres vigía del siglo XVI nos indican que el cordón litoral representado en los perfiles septentrionales es posterior a su construcción, coincidiendo con los periodos de alta frecuencia y magnitud de inundaciones de la PEH (posteriores al s. XVI). La posición de la torre de Xeraco, muy alejada de la costa actual, plantea la hipótesis de que las series de flechas y vaguadas de la desembocadura del riu Xeraco se formaron con posterioridad al siglo XVI, ya que progradan hacia el mar por delante de la torre y en sentido longitudinal siguiendo la dirección de la deriva litoral N-S. Asimismo, según la cartografía histórica, en la barrera al sur del Xeraco aparece el topónimo de "Dehesa de Gandia". La posición de esta dehesa coincide con el amplio campo de dunas cuyos restos se identifican en el MDT y en las fotografías aéreas de 1945 y 1956 donde se observa que se trata de dunas transversales. No podemos relacionar esta formación de dunas con el cordón central identificado en los perfiles septentrionales, ya que no tienen la misma disposición y no están conectados morfológicamente. Finalmente, destacamos que el prominente cordón central de dunas fue totalmente colonizado por el cultivo. Su anchura se redujo considerablemente y se remodeló su morfología adaptándola a un parcelario agrícola. Sólo es visible en la topografía del MDT y en la evidente alineación longitudinal N-S de las parcelas. La ortofotografía actual demuestra la expansión de la presión urbanística al norte del puerto de Gandia, convirtiendo en zona residencial el antiguo campo de dunas al sur de la desembocadura del Xeraco, del cuál sólo se identifican algunos restos en el MDT LIDAR. Actualmente, la histórica Dehesa de Gandia ha desaparecido y de este topónimo sólo queda el nombre que recibe una de las calles que vertebran el último tramo de la restinga.

## 5. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a una beca predoctoral (**ACIF 2018** de la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte) y se inserta en dos proyectos I+D+i (**CSO 2016-78204-P** del Ministerio de Economía y Competitividad y **PID 2019-105209 GB-I00** del Ministerio de Ciencia e Innovación).

## 6. Referencias

García-Blázquez, A.M., Goy, J.L., Zazo, C., Dabrio, C., Usera, J., Yll, R., Luque, L., Cabero, A. & Bardaji, T. (2008). Cold-warm spells peaking the last ~100 ka at Xeraco lagoon (Western mediterranean, Spain). *Fifth IGCP 495 Meeting, Quaternary Land-Ocean Interactions: Driving Mechanisms and Coastal Responses, Faro,* 49-50.

Goy-Goy, J. L., Zazo-Cardeña, C., Ríos-Aragües, L. M., Beltrán-Cabrera, F. J. & Zapatero-Rodríguez, M. A. (IGME) (1982). *Memoria del Mapa Geológico Nacional (MAGNA),* (Hoja 770) [E 1:50.000], 30 pp.

Pardo-Pascual, J. E. (1991). *La erosión antrópica en el litoral valenciano*. Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transport, Generalitat Valenciana, 240 pp.

Pardo-Pascual, J. E. & Sanjaume, E. (2019). Beaches in Valencian Coast. In Morales, J. A. (ed.): *The Spanish Coastal systems. Dynamic Processes, Sediments and Management*. Springer, 209-236.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Ruiz, J. M. & Carmona, P. (2005). La llanura deltaica de los ríos Júcar y Turia y la Albufera de Valencia. *Separata* de *Geomorfologia Litoral i Quaternari, Homenatge al profesor Vicenç M. Rosselló i Verger*. Universitat de València, 399-418.

Usera, J., Guillem, J., Alberola, C. & García, I. (2017). Benthic foraminifera and environmental changes in the Quaternary of the western Mediterranean coast: the core of Xeraco, Valencia, Spain. *Spanish Journal of Palaeontology, 32* (1), 79-94.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi:https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18632

# El efecto de las hamacas de playa en la dinámica sedimentaria eólica de un campo de dunas árido:un estudio evolutivo Pre y Post-COVID-19

*Effects of beach sunbeds on the aeolian sedimentary dynamics of an arid dune field: an experimental study Pre and Post-COVID-19*

**Eduardo M. Marrero-Mena[a], Germán Flor-Blanco[b], Abel Sanromualdo-Collado[c], Manuel Viera-Pérez[c], Carolina Peña-Alonso[c] y Leví García-Romero[c]**

[a]Facultad de Geología de la Universidad de Oviedo, España, , uo270154@uniovi.es; [b]Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, UNESCO IGCP Group 725 Forecasting coastal change, España, , florgerman@uniovi.es; [c]Grupo de Geografía, Medio Ambiente y Tecnologías de la Información Geográfica, Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, ULPGC, España, , abel.sanromualdo@ulpgc.es, , viera.manolo@gmail.com, , carolina.pena@ulpgc.es, , levi.garcia@ulpgc.es.

How to cite: Marrero-Mena, E.M.; Flor-Blanco, G.; Sanromualdo-Collado, A.; Viera-Pérez, M.; Peña-Alonso, C. y García-Romero, L. 2024. El efecto de las hamacas de playa en la dinámica sedimentaria eólica de un campo de dunas árido:un estudio evolutivo Pre y Post-COVID-19. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18632

***Abstract***

*The dune system of Maspalomas (Gran Canaria) has exposed to a strong human impact since the middle of the last century, due to the urban-touristic development. In 2020, due to the social confinement of the COVID-19 pandemic, there was a temporary interruption of human activity in the Special Natural Reserve of the Dunes of Maspalomas. During this period, the high number of daily tourists was reduced and beach services were suspended (except for certain tasks). This temporary pause in anthropogenic pressure made it possible to detect, characterize and quantify the effects of the subeds lots located on El Inglés beach on the wind and sediment transport from the beach to the interior of the dune system. For this purpose,the historical evolution of the dune surface (1961-2021) was analysed, together with field work to study and characterize the wind and sediment under pre-COVID-19 conditions (normal sunbeds activity) and post-Covid-19 conditions (without sunbeds).*

***Keywords:****Gran Canaria, coastaldune, hammocks, COVID-19, environmental impact.*

***Resumen***

*El sistema dunar de Maspalomas (Gran Canaria) ha estado expuesto a un fuerte impacto humano desde mediados del siglo pasado por el desarrollo urbano turístico. En 2020, debido al confinamiento social derivado de la pandemia de COVID-19,se produjo una interrupción temporal de la actividad humana en la Reserva Natural Especial de las Dunas de Maspalomas. Durante este periodo, se redujo el elevado número de turistas diarios y cesaron los servicios de playa (a excepción de determinadas labores). Esta pausa temporal de la presión antrópica permitió detectar, caracterizar y cuantificar los efectos que producen los lotes de hamacas localizados en la playa de El Inglés sobre el viento y el transporte de sedimento desde la playa hacia el interior del sistema dunar. Para ello, se ha analizado la evolución histórica de la superficie dunar (1961-2021), junto con trabajo de campo para el estudio y la caracterización del viento y del sedimento en condiciones pre-COVID-19 (con actividad normal del servicio de hamacas) y post-Covid-19 (sin hamacas).*

***Palabras clave:****Gran Canaria, duna costera, hamacas, COVID-19, impacto ambiental*

BY-NC-SA 2024, EditorialUniversitatPolitècnica de València

## 1. Introducción

Los sistemas playa-duna se ven afectados por la acción humana, la cual afecta a la formación de dunas y genera alteraciones sedimentarias (Nordstrom, 1994). Estas acciones consisten principalmente en construcciones urbanas, aparcamientos, estructuras de acceso a las playas y otros servicios para actividades recreativas (Curr et al., 2000). Los servicios de playa, como el alquiler de hamacas y sombrillas o la limpieza de playas también afectan a la dinámica de los sistemas playa-duna (Roig-Munar et al., 2012). Además, muchos sistemas dunares en diferentes partes del mundo se han visto afectados por la pérdida de superficie de *foredune* o de vegetación asociada como consecuencia de estos servicios (Liddle y Grieg-Smith, 1975), lo que a menudo provoca una disminución del transporte eólico de sedimentos hacia el interior de los sistemas (Jackson y Nordstrom, 2011).

El objetivo de este estudio es caracterizar y cuantificar los efectos de los servicios de la playa, especialmente los asociados a los lotes de hamacas, sobre la dinámica sedimentaria eólica de un campo de dunas. Las medidas adoptadas durante la pandemia mundial del virus SARS-COV-2 implicaron la interrupción del servicio de alquiler de hamacas en la playa del Inglés entre los años 2020 y 2021, principal sistema de entrada de sedimento del campo de dunas de Maspalomas (islas Canarias, España), lo cual brindó la oportunidad de analizar cómo funciona el transporte sedimentario eólico del lugar en ausencia de este servicio. Para ello se diseñó y ejecutó un experimento de toma de muestras de sedimento y de datos de viento en un sector determinado de dicha playa (Fig. 1, B).

## 2. Área de estudio

El sistema de dunas de Maspalomas se desarrolla en el sur de Gran Canaria (Fig. 1, A), en la desembocadura del barranco de Fataga, tratándose de un espacio protegido con la categoría de Reserva Natural Especial (RNE). Maspalomas, según la clasificación de Hesp y Walker (2011) es un campo de dunas transgresivo que presenta una precipitación anual inferior a 100 mm y una temperatura media estable de 21 ˚C, mostrando un clima árido (Hernández-Cordero et al., 2019). Las geoformas eólicas se producen, en una primera fase, por la captación de la arena transportada por el viento y retenida parcialmente por la vegetación, especialmente por la especie vegetal *Traganum Moquinii* (Balancón). Así, el sedimento, compuesto tanto por fracciones de origen marino como de material volcánico queda fijado. Este proceso se desarrolla principalmente en el sistema de entrada de sedimentos al sistema, que se encuentra en su playa oriental (Playa del Inglés) (Figura 1, A), formándose en el *backshore* de esta playa la duna costera (foredune). Posteriormente, el transporte sedimentario eólico principal, de dirección ENE-OSO, devuelve el sedimento al mar por el sur del sistema, concretamente por la playa de Maspalomas, considerada el sistema de salida (Máyer-Suárez et al., 2012).

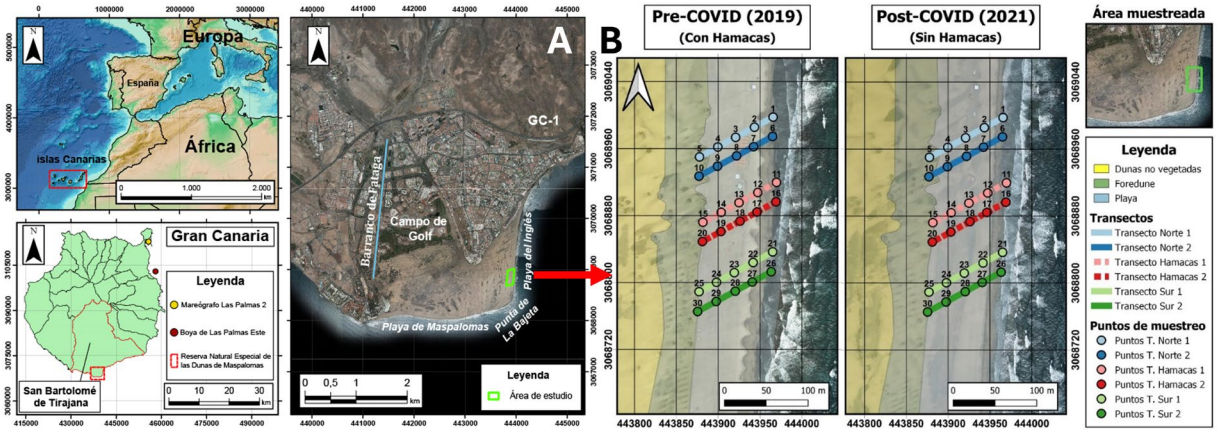



***Fig. 1**. Zona de estudio (A) y distribución de los transectos y puntos de muestreo utilizados en el experimento con condición Pre-COVID (con hamacas), y condición Post-COVID (sin hamacas), observándose en las ortofotos de 2019 y 2021 (B).*

2024, EditorialUniversitatPolitècnica de València BY-NC-SA

## 3. Metodología

### 3.1.Trabajo experimental en el campo

La recolección de muestras de arena se realizó en dos campañas de campo en las que la presencia/ausencia de los lotes de hamacas fue la variable diferencial. La primera campaña (con condiciones Post COVID- 2019 y sin hamacas) fue el 31 de octubre de 2021. El 14 de febrero de 2022 se instalaron de nuevo los lotes de hamacas en la playa y se reactivó el servicio, cumpliendo las medidas y protocolos de seguridad sanitaria que implicaba mantener una distancia de seguridad. Tras un periodo de 2 meses con las hamacas instaladas, se procedió a efectuar la segunda campaña de recogida de muestras el 13 de abril de 2022 (a priori en condiciones pre COVID-2019). Este muestreo consistió en 6 transectos separados entre ellos 20 metros de norte a sur (Figura 1, B), orientados en dirección al transporte sedimentario eólico del sistema E-NE (Máyer-Suárez et al., 2012) y cada uno formado por 5 puntos de muestreo separados 25 metros entre sí dispuestos desde la playa hasta la duna costera. En los puntos de muestreo se tomaron muestras de sedimento, velocidad y dirección del viento (60 muestras, 30 por campaña).

Para capturar los datos de viento (velocidad y dirección) se emplearon los sensores descritos en Domínguez-Brito et al. (2020) en dos campañas de medición con condiciones climáticas similares y en los mismos puntos de muestreo de sedimento. Así, la primera campaña (sin hamacas en la playa) se llevó a cabo el 11 de noviembre de 2021 mientras que la segunda tuvo lugar el 11 de noviembre de 2022, con las hamacas ya instaladas desde febrero del mismo año (coincidiendo que también fue instalada alrededor de las hamacas estudiadas, una malla cortaviento), y ambas con condiciones similares de viento con la componente predominante de vientos efectivos E-NE que dan lugar al transporte sedimentario hacia el interior del sistema dunar (Máyer-Suárez et al., 2012).

### 3.2. Laboratorio

Las muestras de arena fueron llevadas al laboratorio del grupo de investigación FECYT, ISYMA para obtener cuatro variables granulométricas (media (mm), calibrado (φ), centil (mm) y carbonatos (%)), sin embargo, debido a las limitaciones de espacio del presente documento, solamente se muestran los resultados correspondientes a la media (mm). Para ello, se realizó un ensayo granulométrico previo al secado en una mufla a temperatura constante de 25 ºC y toma de 100 g de sedimento, empleando una tamizadora electromagnética digital CISA (modelo Ba 200N) y 11 tamices recogidos según la Norma ISO-3310.1, con tamaños comprendidos entre 1,40 mm y 45 μm.

### 3.3. Trabajo de gabinete

Se realizó una cartografía de detalle mediante SIG, con ortofotos del PNOA con una resolución espacial de 12,5 cm/píxel, del área de estudio en 2019 y 2021, para analizar la evolución morfosedimentaria durante la pandemia del COVID-19. Paralelamente, se realizó el procesado de los datos de viento a través del procedimiento planteado por Delgado-Fernández et al. (2013), consistente en escoger 5 minutos del registro temporal de los sensores, que registran datos cada 2 segundos, y realizar el promediado de los datos y la dirección cada 30 segundos. Finalmente, se normalizaron los datos de los diversos sensores en los diferentes puntos de muestreo (con o sin alteración antrópica dependiendo del experimento) con los provenientes de la estación de control (localizada en un entorno donde los vientos no son alterados, es decir, sin obstáculos) y se seleccionaron aquellos instantes donde se detectaron similitudes de dirección entre el punto de muestreo y la estación de control.

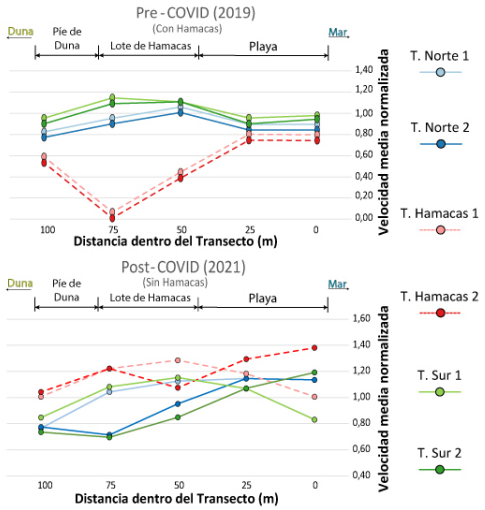
## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Experimentación de campo a corto plazo: Datos del viento

La comparación de los datos obtenidos de las velocidades medias normalizadas del viento, tanto gráfica como numéricamente (Figura 2), permite apreciar como, en condiciones de funcionamiento normal (pre COVID-19 con las hamacas situadas en la playa en el año 2022), los transectos que coinciden con lotes de hamacas muestran una considerable reducción de la velocidad del viento, llegando a valores cercanos a cero en la parte posterior del lote. Sin embargo, este comportamiento no se detecta en los transectos aledaños, que no se ven influidos por el lote de

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

hamacas (T. Norte 1 y 2; T. Sur 1 y 2). A cierta distancia del conjunto de tumbonas, más cerca de la duna costera, la velocidad del viento aumenta hasta alcanzar valores similares a los que muestran sus homólogos al norte y al sur del lote, lo que puede estar indicando una reconducción del viento a esa distancia. Estos transectos, que se sitúan fuera del área de influencia del lote estudiado, presentan una velocidad media del viento casi constante en la franja de playa que da paso a un aumento moderado entre los 50 y 75 metros desde la orilla seguido por una reducción de la misma hacia el pie de la duna (Figura 2).




| Pre-COVID (2019) | | Velocidad media del viento normalizada | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T. Norte 1 | T. Norte 2 | T. Hamacas 1 | T. Hamacas 2 | T. Sur 1 | T. Sur 2 |
| Distancia dentro de los transectos | 0 metros | 0,90 | 0,84 | 0,80 | 0,74 | 0,98 | 0,95 |
| | 25 metros | 0,90 | 0,84 | 0,80 | 0,75 | 0,96 | 0,90 |
| | 50 metros | 1,06 | 1,01 | 0,44 | 0,39 | 1,11 | 1,11 |
| | 75 metros | 0,95 | 0,90 | 0,07 | 0,01 | 1,15 | 1,09 |
| | 100 metros | 0,82 | 0,77 | 0,59 | 0,53 | 0,95 | 0,90 |

| Post-COVID (2021) | | Velocidad media del viento normalizada | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T. Norte 1 | T. Norte 2 | T. Hamacas 1 | T. Hamacas 2 | T. Sur 1 | T. Sur 2 |
| Distancia dentro de los transectos | 0 metros | 1,14 | 1,14 | 1,01 | 1,38 | 0,83 | 1,19 |
| | 25 metros | 1,15 | 1,15 | 1,18 | 1,29 | 1,07 | 1,07 |
| | 50 metros | 1,13 | 0,95 | 1,29 | 1,08 | 1,15 | 0,85 |
| | 75 metros | 1,04 | 0,71 | 1,22 | 1,22 | 1,08 | 0,70 |
| | 100 metros | 0,77 | 0,77 | 1,01 | 1,04 | 0,85 | 0,74 |

***Fig. 2.*** *Comparativa de la velocidad media normalizada del viento recogido con hamacas y en condiciones Pre-COVID 2019 (gráfico y tabla superior con datos tomados en 2022) y sin hamacascon condiciones Post-COVID-19 (gráfico y tabla inferior, datos tomados en 2021).*

### 4.2. Experimentación de campo a corto plazo: características del sedimento (media)

El tamaño medio del sedimento tomado en 2022 en condiciones pre COVID-19 (Figura 3, superior) está comprendido entre 0,20 y 0,29 mm. Se pueden identificar dos patrones: un descenso del tamaño medio de las partículas en los primeros 25 metros del transecto (Playa) y un aumento significativo hacia la parte posterior del mismo, cerca de las dunas. En ambos extremos, los transectos que atraviesan los lotes de hamacas presentan una media superior, desmarcándose del resto, mientras que en el tramo donde se encuentran las hamacas, en concreto las muestras situadas en el metro 50 del transecto (área de influencia del lote), presentan un tamaño medio de sedimento inferior al de la mayoría de los transectos en el mismo punto.

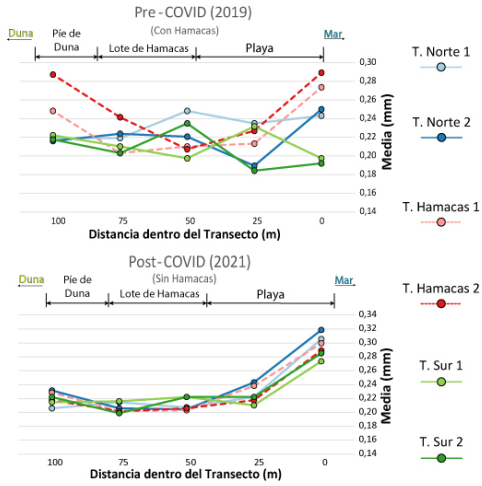
En 2021 (Figura 3, inferior), el tamaño medio del sedimento osciló entre 0,21 y 0,31 mm. En estas condiciones todos los transectos presentan una distribución y comportamiento prácticamente homogéneo. En este sentido, el tamaño medio del sedimento disminuye los primeros 25 metros en la playa, sucedido por descenso gradual y finalmente un aumento poco significativo en el pie de la duna costera. Estos resultados muestran un comportamiento entre natural y semi-natural, acorde con un descenso de tamaño descrito entre la zona intermareal y el inicio del campo dunar (Namikas, 2003). Se puede concluir que el cambio en el comportamiento que presenta la media desde una distribución grano decreciente hacia la duna costera, se ve alterado cuando los lotes de hamacas (con malla cortaviento bordeándolo) están instalados, e incluso se detecta un comportamiento anómalo de los transectos que cruzan las hamacas en 2019 (transectos rojos, Pre COVID-19), con respecto al resto.

### 4.3. Evolución morfosedimentaria del sistema dunar a corto plazo

Durante el periodo 2019-2021, en el que tuvo lugar la pandemia de COVID-19, en el área donde se realizó el estudio se documentó un ligero decrecimiento de aproximadamente el 2 % de la franja de playa. La zona activa también mermó su superficie cerca de unos 9.000 $m^2$ (un 12 %) como consecuencia del aumento de las áreas de deflación y de la extensión de la duna costera. Las superficies de deflación, visibles en la cartografía realizada en detalle, vienen marcadas por el afloramiento del sustrato aluvial sobre el que se encuentran las dunas, las cuales

2024, EditorialUniversitatPolitècnica de València BY-NC-SA

se forman en relación a la migración de estas hacia el interior del sistema, así como por las zonas erosivas generadas por la presencia de obstáculos en la playa como los kioscos, contenedores de residuos y/o los lotes de hamacas, en la dirección del transporte del sedimento (Sanromualdo-Collado et al., 2021).




| Pre - COVID (2019) | | Media (mm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T. Norte 1 | T. Norte 2 | T. Hamacas 1 | T. Hamacas 2 | T. Sur 1 | T. Sur 2 |
| Distancia dentro de los transectos | 0 metros | 0,24 | 0,25 | 0,27 | 0,29 | 0,20 | 0,19 |
| | 25 metros | 0,23 | 0,19 | 0,21 | 0,23 | 0,23 | 0,18 |
| | 50 metros | 0,25 | 0,22 | 0,21 | 0,21 | 0,20 | 0,23 |
| | 75 metros | 0,22 | 0,22 | 0,20 | 0,24 | 0,21 | 0,20 |
| | 100 metros | 0,22 | 0,22 | 0,25 | 0,29 | 0,20 | 0,22 |

| Post - COVID (2021) | | Media (mm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T. Norte 1 | T. Norte 2 | T. Hamacas 1 | T. Hamacas 2 | T. Sur 1 | T. Sur 2 |
| Distancia dentro de los transectos | 0 metros | 0,31 | 0,32 | 0,30 | 0,29 | 0,27 | 0,29 |
| | 25 metros | 0,22 | 0,24 | 0,24 | 0,22 | 0,21 | 0,22 |
| | 50 metros | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,21 | 0,22 | 0,22 |
| | 75 metros | 0,21 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,22 | 0,20 |
| | 100 metros | 0,21 | 0,23 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,22 |

**Fig 3.** Comparativa de la media de la granulometría recogido recogido con hamacas y en condiciones Pre-COVID 2019 (gráfico y tabla superior con datos tomados en 2022) y sin hamacascon condiciones Post-COVID-19 (gráfico y tabla inferior, datos tomados en 2021).

Las superficies de deflación aumentan (alrededor de un 71%), apreciándose su distribución espacial en la figura 4. En primer lugar, se detecta una mayor concentración de estas superficies (tanto en 2019 como en 2021) a sotavento de los transectos que coinciden con la instalación de lotes de hamacas. Además, hay un incremento que podría explicarse por la migración de las geoformas dunares, pues los surcos erosivos que fragmentan la duna costera en 2019 probablemente son generados por los lotes de hamacas usados en el experimento, y esa fragmentación, prácticamente desaparece una vez removidos dichos lotes. Esta puede ser la razón del aumento de aproximadamente el 20% del área correspondiente a la duna costera. Esto concuerda con la conclusión de Sanromualdo-Collado et al. (2021) de que estas superficies de deflación producidas por obstáculos no muestran una recuperación a largo plazo, sino que se mantienen y migran hacia el interior del sistema.

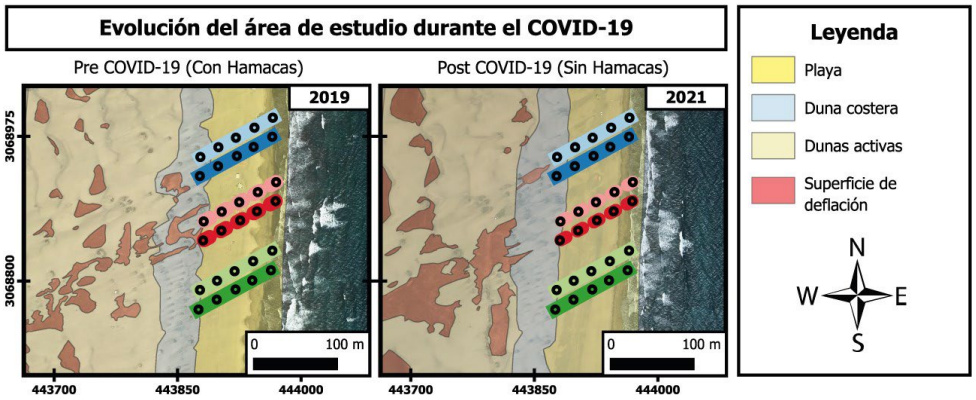



**Fig4.** Evolución de las geoformas eólicas en la zona de estudio durante el COVID-19.

## 5. Conclusiones

Este trabajo presenta el estudio sobre el impacto de la actividad humana en las dunas de Maspalomas, con especial enfoque en los efectos inducidos por los lotes de hamacas situados en la playa de El Inglés, que impiden el correcto transporte de la arena hacia el sistema dunar. En la evolución del área estudiada, en condiciones previas y posteriores la pandemia de COVID-19, se observó que con la retirada del grupo de tumbonas, se produjo una

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

reducción del efecto derivado de este servicio. En condiciones normales (con hamacas) los efectos observados fueron: i) disminución de la velocidad del viento dentro del lote de hamacas; ii) modificación de la distribución y transporte del sedimento, experimentándose un cribaje selectivo de la fracción fina del sedimento (disminución del tamaño medio de partícula); y iii) un comportamiento heterogéneo en los diversos parámetros granulométricos del sedimento en los transectos Hamacas 1 y 2 que no se muestran reflejados en sus homólogos norte y sur pese al encontrarse bajo las mismas condiciones. Todo ello sumado a la erosión del sector de duna costera situado inmediatamente detrás de las tumbonas, donde aparecen superficies de deflación. Con la retirada de los lotes de la playa se produjo una modificación en dichos comportamientos con la que se redujo el impacto erosivo en la duna costera, homogeneizándose al reducirse las superficies de deflación que la fragmentaban.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto de I+D+i "PID2021-124888OB-I00", financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación / Agencia Estatal de Investigación y por "FEDER". L. García-Romero es beneficiario de un contrato postdoctorales del programa Catalina Ruiz del Gobierno de Canarias y el Fondo Social Europeo (APCR2022010005).

## 7. Referencias

Curr, R.H.F., Koh, A., Edwards, E., Williams, A.T., & Davies, P. (2000). Assessing anthropogenic impact on Mediterranean sand dunes froma erial digital photography. *Journal of Coastal Conservation*, 6 (1), 15–22.

Delgado-Fernandez, I., Jackson, D. W. T., Cooper, J. A. G., Baas, A. C. W., Beyers, J. H. M., & Lynch, K. (2013). Field characterization of three-dimensional lee-side airflow patterns under offshore winds at a beach-dune system, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*,118, 706–721.

Domínguez-Brito, A. C., Cabrera-Gámez, J., Viera-Pérez, M., Rodríguez-Barrera, E., & Hernández-Calvento, L. (2020). A DIY low-cost wireless wind data acquisition system used to study an aridcoastal foredune. *Sensors*, 20 (4), 1064.

Hernández-Cordero, A. I., Peña-Alonso, C., Hernández-Calvento, L., Ferrer-Valero, N., Santana-Cordero, A. M., García-Romero, L., & Espino, E. P. C. (2019). Aeolian sedimentary systems of the Canary Islands. In : *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management*, pp. 699-725.

Jackson, N.L., & Nordstrom, K.F. (2011). Aeolian sediment transport and landforms in managed coastal systems: a review. *Aeolian research*, 3 (2), 181-196.

Hesp, P.A., & Walker, I.J. (2011). Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Aeolian Research* 3, 389–399.

Liddle, M.J., & Grieg-Smith, P. (1975). A survey of tracks and paths in a sand dune ecosystem. II. *Vegetation. J. Appl. Ecol*., 909–930

Máyer-Suárez, P., Perez-Chacon Espino, E., Cruz-Avero, N., & Hernandez-Calvento, L. (2012). Características del viento en el campo de dunas de Maspalomas (Gran Canaria, islas Canarias, España). *Nimbus*, 29–30, 381–397.

Namikas, S.L. (2003). Field measurement and numerical modelling of aeolian mass flux distributions on a sandy beach. *Sedimentology*, 50, 303– 326.

Nordstrom, K.F. (1994). Beaches and dunes of human-altered coasts. *Prog. Phys. Geogr.*18 (4), 497–516.

Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Gelabert, B., & Mir-Gual, M. (2012). Risk assessment of beach–dune system erosion:beach management impacts on the balearic islands. *Journal of Coastal Research.,* 285, 1488–1499.

2024, EditorialUniversitatPolitècnica de València BY-NC-SA

Sanromualdo-Collado, A., García-Romero, L., Peña-Alonso, C., Hernández-Cordero, A. I., Ferrer-Valero, N., & Hernández-Calvento, L. (2021). Spatiotemporal analysis of the impact of artificial beach structures on biogeomorphological processes in an arid beach-dune system. *Journal of Environmental Management*, 282, 111953.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18729

# Evolución reciente del *notch* del acantilado marino del Morro de Toix (Alicante, SE España)

*Recent Notch Evolution in the Morro de Toix Seacliff (Alicante, SE Spain)*

**José Enrique Tent-Manclús[a,b], Davide Bonomo[b], Javier Alcántara-Carrió[c,b] Estela M. Salcedo-Justicia[a]**

[a]Dpto. Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente, Universidad de Alicante, je.tent@ua.es; [b]Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio "Ramón Margalef", Universidad de Alicante, davide.Bonomo@ua.es; Dpto. Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid, javier.alcantara@uam.es.

How to cite: Tent-Manclús, J.E.; Bonomo, D.; Alcántara-Carrió, J. y Salcedo-Justicia, E.M. 2024. Evolución reciente del *notch* del acantilado marino del Morro de Toix (Alicante, SE España). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 septiembre 2024.https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18729

***Abstract***

*The Morro de Toix massif, located between Altea and Calpe, on the Alicante coast in southeastern Spain, features a seacliff coinciding with two almost perpendicular vertical fault planes, one NNE-SSW and other WNW-ESE. The western sector shows a vertical plane up to 70 m high above mean sea level, while the eastern sector shows an overhanging up to 30 to 50 m high. Along the cliff a well-developed tidal notch can be found with incision up to 3-m-deep, coincident with today sea level. To the East the coastal erosion is forming a small beach were the fresh NNE-SSW fault plane is being exposed thus the tidal notch also is starting to form, as the incision is greater away from the beach coastline. This notch shows mostly the same upper and lower extends while in the longer of the WNW-ESE seacliff, the lower extend is shorter between 0.7 to 1.7 m. Coastal spring freshwater is proposed to be the cause of the high incision relative to other Mediterranean notches. The lower shorter extend indicate a local sea-level increase before today stable level. The notch has been estimated that may be developed in the last 2000 years.*

***Keywords:*** *Morro de Toix, Seacliff evolution, Alicante Coast, notch, Calpe.*

***Resumen***

*Entre las poblaciones del litoral alicantino de Altea y Calpe se alza el macizo del Morro de Toix. En su vertiente sur, se desarrolla un acantilado marino caracterizado por dos planos de falla verticales casi perpendiculares entre si, uno NNE-SSW y otro WNW-ESE. El sector occidental del acantilado muestra un plano vertical de hasta 70 m por encima del nivel del mar, mientras que el oriental es extraplomado de 30 a 50 m de alto. A lo largo de este se aprecia un* notch *mareal con una incisión que llega en algunos puntos a 3 m de profundidad, coincidente con el nivel del mar. Hacia el E la erosión costera excava una pequeña playa y deja al descubierto el plano de falla NNE-SSE fresco, observándose como el* notch *comienza a formarse en él, al aumentar la incisión al alejarse de la costa. Este* notch *muestra la misma extensión en los bordes superior e inferior, sin embargo, el que se desarrolla en el plano WNW-ESE, el borde inferior presenta una extensión menor entre 0,7 y 1,7 m. La causa del gran desarrollo relativo de este* notch *respecto a otros del Mediterráneo puede deberse a los manantiales de agua dulce. La extensión menor del borde inferior en gran parte del acantilado indica un aumento del nivel del mar local antes de la estabilización actual. Se ha estimado que se ha formado en los últimos 2000 años.*

***Palabras clave:*** *Morro de Toix, Evolución acantilado marino, Costa de Alicante,* notch*, Calpe.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Un *notch* o escotadura es una incisión en un acantilado costero coincidente con el nivel medio del mar. Se distinguen dos tipos: los *notch* mareales (*tidal notch*, en inglés) presentan un perfil de forma triangular cuya parte más incidida coincide con el nivel medio del mar, mientras que la parte amplia es ligeramente mayor que la variación mareal, y los de techo, que son aquellos tienen forma de cornisa hacia el mar y cuyo cambio de pendiente de horizontal a vertical coincide con el nivel medio del mar. En la actualidad predominan los *notch* mareales que se producen cuando el nivel del mar se mantiene estable relativamente respecto al acantilado (Antonioli et al., 2015). Mientras que los *notch* de techo se producen cuando el nivel del mar sube relativamente respecto al acantilado. Si el nivel baja los *notch* quedan emergidos y por tanto dejan de ser activos.

Suelen estar desarrollados sobre rocas carbonatadas y los factores que se mencionan para su formación es la disolución química de carbonatos, la bioerosión y los ciclos de mojado y secado de la zona intermareal (Trudgill, 1985; Antonioli et al., 2015). Marcan con gran precisión el nivel medio del mar. No pueden ser datados directamente, deben hacerse estimaciones utilizando métodos indirectos. Los niveles antiguos son unos excelentes indicadores de la altura del nivel del mar. En el Mar Mediterráneo muestran un importante desarrollo, favorecido por la abundancia de acantilados carbonatados y la baja amplitud de mareas (Antonioli et al., 2015). En los últimos años se ha sugerido que los *notch* van a desaparecer a nivel global debido al cambio climático (Evelpidou et al., 2012), sin embargo, otros autores observan que se siguen formando en equilibrio con el nivel medio del mar (Antonioli et al., 2015). En este trabajo, se muestra un *notch* mareal actual estable y coincidente con el nivel del mar, que muestra una incisión mayor a los descritos hasta ahora para el Mar Mediterráneo.

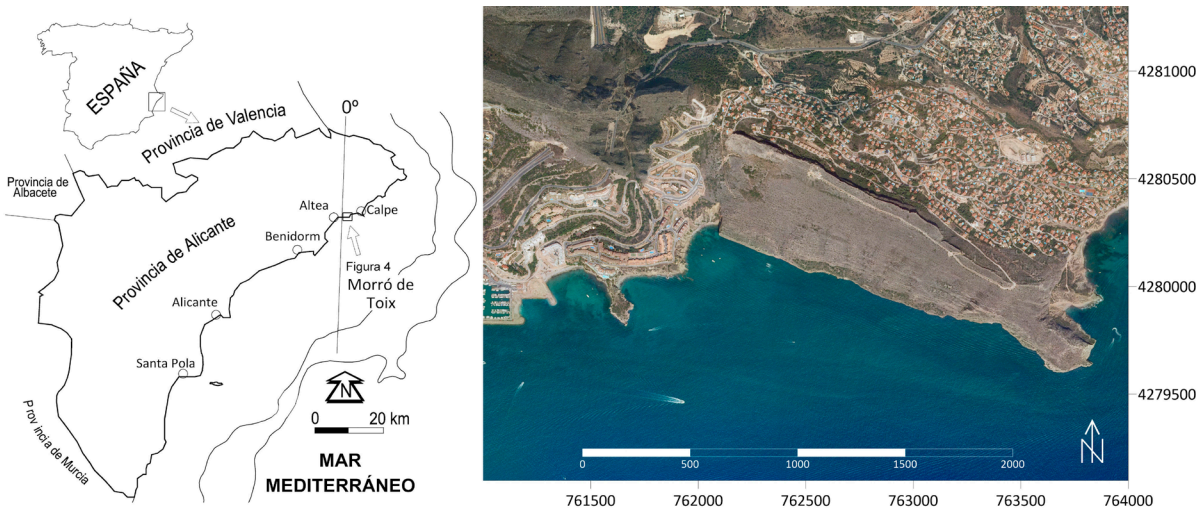



***Fig. 1*** *Situación del Morro de Toix en la provincia de Alicante y ortoimagen del acantilado del Morro de Toix. Al Oeste se observa la pequeña cala del Racó de Corb. Elaboración propia.*

## 2. Área de estudio

El Morro de Toix, situado en el límite sur del municipio de Calpe (Alicante, Fig. 1), es un macizo calcáreo que presenta un acantilado marino de más de 2 km de longitud y de 75 a 30 m de altitud, constituyendo la prolongación de la Sierra de Bernia hasta el Cabo de Toix. Este macizo es uno de los principales hitos de la costa, por su característica silueta. En el acantilado marino, las capas del Eoceno Superior están de verticales a 85º. Está formado por calizas algales masivas con *Lepidocyclina* (y *Nummulites* en la parte inferior), con un espesor de 370 m y de edad Eoceno Superior al Oligoceno Inferior. Discordantemente sobre ellas se sitúa un nivel glauconítico, que marca la base del Mioceno Inferior (Stoklosa, 2002). El punto más alto del macizo se encuentra a 340 m. A los extremos se encuentran las calas del Racó del Corb al Oeste y del Gasparet al Este, ambas de complicado acceso.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Entre el Morro de Toix y la Sierra de Bernia se encuentra el Barranco del Mascarat, por donde discurre la nacional (N-332), la vía del tren de vía estrecha (*trenet*) y la autopista (AP-7). A unos metros de la desembocadura de dicho barranco se encuentra el puerto Marina Greenwich Campomanes, cuyo nombre hace referencia a que se encuentra a la longitud del meridiano de Greenwich.

El acantilado al sur del macizo se originó por una falla paralela a la estratificación y orientación N110º (WNW-ESE), que separaba los materiales de calizas masivas que forman dicho macizo, de las margas eocenas con *Nummulites* estratigráfícamente inferiores, las cuales aflorarían en el bloque sur y actualmente afloran en la cala del Racó del Corb (Yébenes et al., 2004). Al W el acantilado está limitado por otra falla (NNE-SSW), casi perpendicular al acantilado (y a la falla anterior) de salto en dirección dextra con desplazamiento hectométrico (op. cit.) y que hunde el bloque del E (el del Morro de Toix). Esto último permite que se conserve en el bloque opuesto (W) las margas anteriormente mencionadas. En el extremo oriental del acantilado del Morro de Toix también se observa otra falla perpendicular al acantilado de iguales componentes.

En la parte oriental del acantilado su traza es coincidente con la falla WNW-ESE mostrando una superficie plana como se ve en la Figura 2. A lo largo de esta ladera se puede observar una hombrera marcada con flechas en la Figura 2 que interpretamos como la intersección entre el macizo y el abanico aluvial que bajaría desde la playa del Racó del Corb. Hacia el Sureste, alejándose de dicha playa se aprecia un cambio (marcado por una línea discontinúa blanca en la Figura 2), ya que el acantilado muestra una fuerte karstificación, siendo su pared predominantemente extraplomada hacia el mar, con gran desarrollo de formas kársticas. La parte sumergida va aumentando su profundidad hacia el sureste llegando hasta casi los 30 m según las isobatas del levantamiento del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (Ecocartografía de Alicante, 2007).




***Fig. 2*** *Extremo oriental del acantilado del Morro de Toix imagen tomada desde drone. Las flechas negras marcan la hombrera interpretada como la intersección entre el acantilado y el abanico aluvial de la playa del Racó de Corb (ver Fig. 4). La línea blanca discontinua marca el cambio de acantilado vertical a extraplomado hacia el fondo de la fotografía. Elaboración propia.*

Es interesante mencionar que en la crónica de Escolano (1611) se menciona un gran río de agua dulce que surgía del acantilado y vertía al mar. En la actualidad la captación de las aguas subterráneas ha hecho desaparecer la posible surgencia pero en la parte sumergida se han contabilizado 23 surgencias de aguas freáticas (Departamento de Ciclo Hídrico, 2007). Entre ellas, el Sumidero de Toix, cuya entrada, de 1,5 m de alto por 1 m de ancho, se encuentra a 8 m por debajo del nivel del mar. Se llama sumidero por su comportamiento hidrogeológico particular, ya que en la mayor parte del año succiona agua de mar, mientras que en otros momentos funciona como surgencia (Departamento de Ciclo Hídrico, 2007).

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 3. Metodología

La metodología de estudio de los *notch* costeros se realiza mediante fotografías perpendiculares a la sección del acantilado, utilizando una regla graduada de escala. De la fotografía, corrigiendo la distorsión por la perspectiva cuando no es totalmente perpendicular, se dibuja su sección. Varias fotografías son necesarias, aprovechando las variaciones debidas a las olas para dibujar la parte sumergida. Esta metodología es sencilla si el acceso a la zona es fácil, lo que no ocurre con en el Macizo de Toix, de dos km de extensión. Por lo que se ha utilizado una tabla de paddle surf para acceder al acantilado y poderlo medir. Extremándose las medidas de seguridad ya que las mediciones sólo se pueden realizar en condiciones de mar en calma.

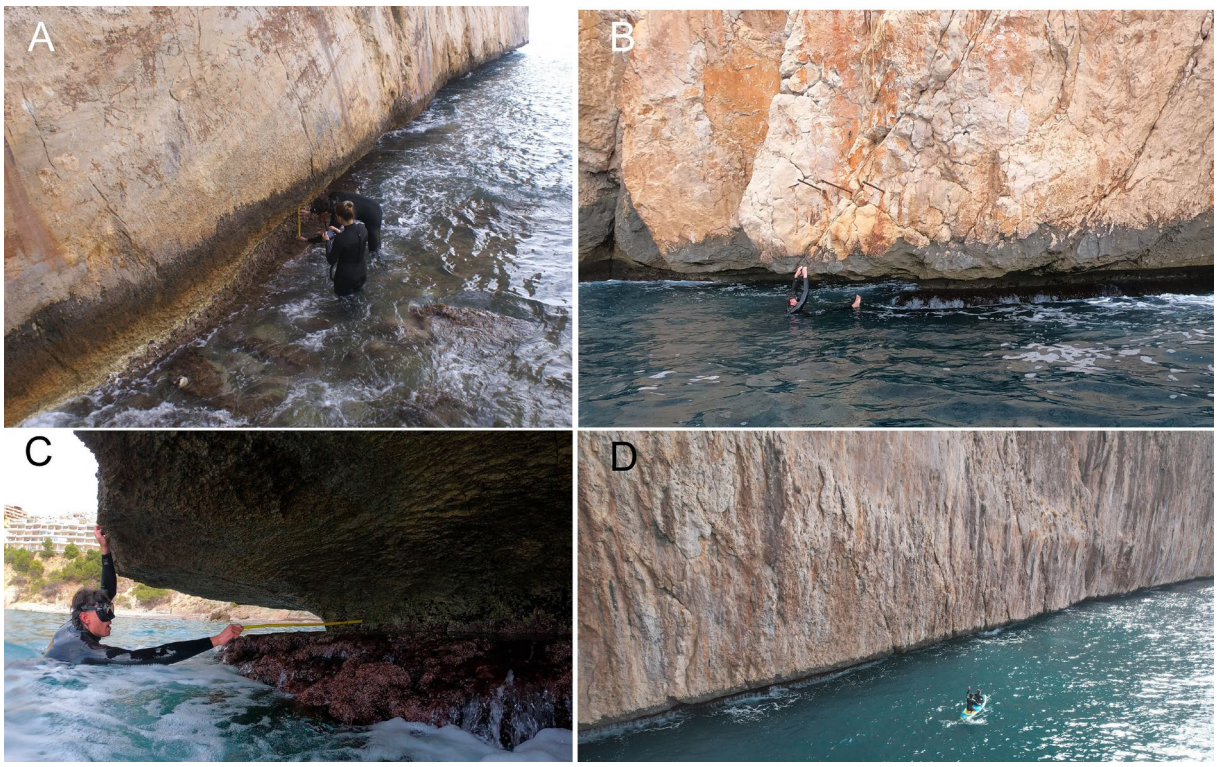



**Fig. 3.** *Panel general de los diferentes notches en el Morro de Toix. A) El avance del notch en el plano de falla NNE-SSE de la playa de Racó del Corb. B) Máxima profundidad de notch encontrada, alrededor de 3m, cerca de la cueva de los Palomos. C) Medición del notch en la esquina de los dos planos de falla NNE-SSW y WNW-ESE, la escala es de un metro más la longitud del brazo, por lo que el notch sería alrededor de 1,70 cm. D) Foto aérea desde drone donde se aprecia el aspecto del acantilado recto. La tabla de paddle surf =3,5m. Elaboración propia.*

## 4. Resultados

En el acantilado destaca el *notch* que marca el nivel del mar actual, desde la cala del Racó del Corb hasta la del Gasparet. En la primera, el *notch* aumenta su excavación de la pared del acantilado desde la playa (Fig. 3A) hacia la arista que separa los dos planos de falla, donde se ha medido una incisión de 1,70 cm (Fig 3C). La profundidad máxima llega a los 3 metros (Fig. 3B) e incluso en algunos sectores de la zona karstificada, en salientes puntiagudos, la incisión es mayor. Desde la arista hacia el E del acantilado la incisión suele sobrepasar el 1,5 e incluso amplias zonas los 2 m. En la pared que da a la playa del Racó de Corb el *notch*, menos incidido, muestra los bordes superior e inferior, que marcan su máxima amplitud, con un avance similar. Sin embargo, desde unos 9 m de la arista, antes mencionada, hasta ella, el inferior es menos extendido. En la arista, como se muestra en la Fig. 3C la parte inferior llegaría a 1,10 cm respecto a la mayor incisión mientras que la superior se prolongaría a los 1,70 cm mencionados. A lo largo de todo el acantilado principal (WNW-ESE) el *notch* muestra una menor prolongación en la parte inferior (Fig. 3D).

 BY-NC-SA

## 5. Discusión

El *notch* de Toix es similar a otros reconocidos sobre calizas a lo largo del Mediterráneo (Antonioli et al., 2015). En sección estos acantilados siempre muestran la máxima excavación del acantilado coincidente con el nivel medio del mar, la sección por encima, que podemos llamar "emergida", forma una cúpula cóncava, mientras la inferior, "sumergida", suele ser menos cóncava, más plana y ligeramente inclina hacia mar y tener una extensión menor hacia el mar. Esto puede ser interpretado con que el nivel relativo del mar subió erosionando la pared y luego se estabilizó dando lugar al *notch* mareal actual.

Antonioli et al. (2015) describen 73 *notches* en el Mediterráneo dando unas incisiones máximas de 2 m con una variación de más menos 10 cm, y 7 de zonas tropicales, para comparar, con incisiones máximas de 4 m en Zanzibar (Tanzania). Comparado con estos datos, el Morro de Toix muestra la mayor incisión de los *notches* para el Mediterráneo. Según dichos autores la presencia de surgencias de aguas dulces favorece la disolución de los carbonatos, ya que el agua dulce puede estar infrasaturada en carbonatos y al ser menos densa queda en superficie (Antonioli et al., 2015). La antigua descripción de Escolano (1611) apuntaría a que dicha surgencia de agua dulce (que ya no se reconoce) podría ser la responsable del amplio desarrollo de *notch* mareal del Morro de Toix.

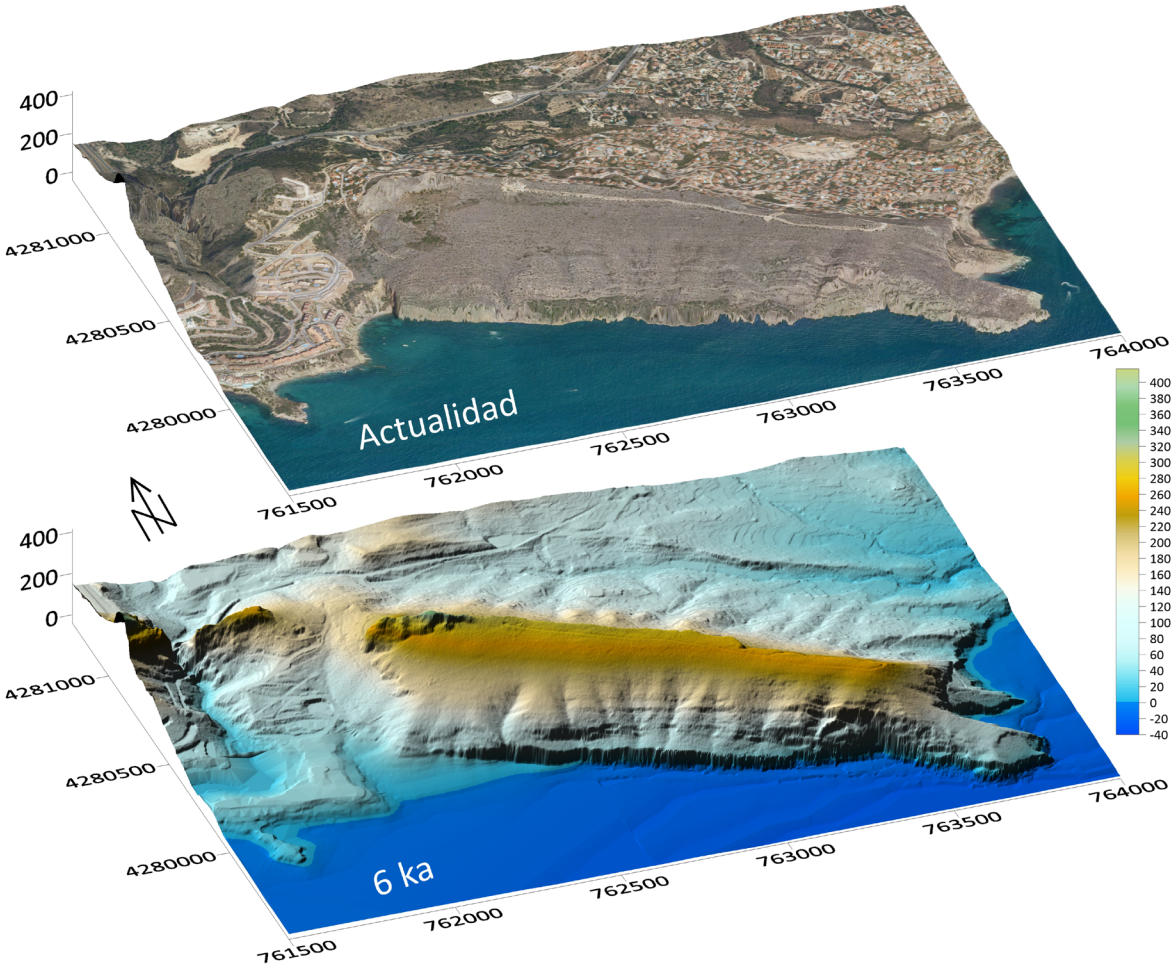



***Fig. 4*** *Arriba: modelo digital de elevaciones actual con la ortofotografía del año 2007 (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, del IGN). Abajo: reconstrucción del posible modelo digital de elevaciones con el abanico aluvial del Racó de Corb hace 6000 años cuando el nivel del mar alcanzó una posición similar a la actual. La erosión costera ha producido la desaparición del abanico, la formación del acantilado costero occidental y la aparición de la playa del Racó de Corb. Elaboración propia.*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

La extensión del abanico aluvial reconstruida en la Figura 4 abajo, nos permite hacer una estimación de el tiempo que tarda en incidirse el *notch* actual. Si consideramos una erosión del abanico es lineal desde hace 6000 años, cuando el nivel del mar dejó de subir rápidamente tras la glaciación, y la subida relativa es por el hundimiento generalizado de las plataformas continentales. Entonces desde la intersección del abanico con la superficie actual hay 125 m hasta la arista entre las dos fallas y 45 m hasta la línea de costa en la playa del Racó del Corb. Si se considera, que la tasa de retroceso es el doble, una vez pasada la arista, porque no sólo tiene que erosionar hacia el W sino también hacia el N. Tendríamos que en 45+45 +125 m = 215 m lineales de erosión en 6000 años. Si consideramos que el *notch* se estabiliza cuando se observa que ambos vértices (emergido y sumergido) dejan de ser iguales (9 m antes de la arista, 36 m desde la costa). Haciendo una estimación para cuanto corresponden los 72 m (36 x 2 m lineales) de erosión lineal que son unos 2010 años antes de la actualidad.

## 6. Conclusiones

El acantilado del Morro de Toix muestra un *notch* mareal con una incisión de 2 m en la parte del acantilado plano, coincidente con una falla, y de hasta 3 m en el sector más oriental que presenta una importante karstificación. Es producto de la erosión del mar con la posición del nivel actual. La formación del *notch* en todo el acantilado seguramente ha sido favorecido por la presencia de surgencias de agua dulce en la zona. Se ha estimado que la incisión pudo haberse formado en los últimos 2000 años.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por fondos del programa thinkinazul NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) de la Unión Europea, proyecto de la Generalitat Valenciana GVA-THINKINAZUL/2021/039 y el proyecto PID2020-114381GB-I00 de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación. Es una aportación del grupo de investigación de la VIGROB21-053 de la Universidad de Alicante. J.A.C. es beneficiario de una "Ayudas para la Recualificación del Sistema Universitario Español" ref. CA2/RSUE/2021-00418.

## 8. Referencias

Antonioli, F., Lo Presti, V., Rovere, A., Ferranti, L., Anzidei, M., Furlani, S., Mastronuzzi, G., Orru, P.E., Scicchitano, G., Sannino, G., Spampinato, C.R., Pagliarulo, R., Deiana, G., de Sabata, E., Sansò, P., Vacchi, M. & Vecchio, A., (2015). Tidal notches in Mediterranean Sea: a comprehensive analysis. *Quaternary Science Reviews*, 119, 66–84. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.016

Departamento de Ciclo Hídrico. Diputación de Alicante, (2007). *Los manantiales provinciales. Segunda parte*, Diputación de Alicante.

Escolano, G., (1611). *Segunda Parte de la Decada primera de la Historia de la Insigne, y Coronada Ciudad y Reyno de Valencia*. Imprenta Pedro Patricio Mey.

Ecocartografía de Alicante, (2007). *Ministerio de Transición Ecológica y Reto demográfico*. https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/ecocartografias/ecocartografia-alicante.html (consulta, 1/02/2024).

Stoklosa, M. L., (2002). *Evaluation of controls on carbonate platform morphology, facies and diagenetic variability: an Oligocene example from southeast Spain*. Ph D. Thesis Univerisity of Wisconsin-Madison.

Trudgill, S., (1985). Limestone Geomorphology. Geomorphology Texts 8. Longman, London, 196 p.

Yébenes, A., Estévez, A., López-Arcos, M. & Alfaro, P., (2004). Itinerario Geológico litoral entre Benidorm, Altea y Calpe. In: P. Alfaro, J. M. Andreu, A. Estévez, J. E. Tent-Manclús & A. Yébenes, (Eds.), *Geología de Alicante* (pp. 89-116). Universidad de Alicante.

 BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18868

# Numerical and geomorphic approach to the characterization of tsunami deposits on the southern coast of Mallorca (western Mediterranean)

*Aproximación numérica y geomórfica a la caracterización de los depósitos de tsunami en la costa sur de Mallorca (Mediterráneo occidental)*

**Francesc Xavier Roig-Munar[a], Bernardí Gelabert[b], Lluís Gómez-Pujol[c] y Àngels Fernández-Mora[d]**

[a]Independent Researcher, xiscoroig@gmail.com; [b]Earth Sciences Department, Universitat de les Illes Balears, Departament de Ciències de la Terra, bernadi.gelabert@uib.es; [c]Earth Sciences Department, Universitat de les Illes Balears, Departament de Ciències de la Terra, lgomez-pujol@uib.cat; [d]Beach Monitoring Facility, Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System, mafernandez@socib.es.

How to cite: Roig-Munar, F. X.; Gelabert, B.; Gómez-Pujol, L. y Fernàndez-Mora, A. 2024. Aproximación numérica y geomórfica a la caracterización de los depósitos de tsunami en la costa sur de Mallorca (Mediterráneo occidental). En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024.
https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18868

***Abstract***

*Tsunami blocks deposits offer insights into past seismic activities and their coastal impacts. These deposits feature unique anomalous boulder placements, and microfossils indicating sudden marine incursions. Studies of tsunami boulders globally, from the Mediterranean to the Pacific, help reconstruct historical tsunami frequency, magnitude, and effects, extending understanding beyond written records. Analyzing tsunami boulders aids in refining models predicting future tsunami risks. However, distinguishing tsunami from storm deposits on cliffs is debated, as similar features can arise from both. This controversy necessitates a multi-disciplinary approach, combining geomorphological data, historical tsunami records, and modern modeling to accurately identify tsunami boulders emplacement and deposition. This study focuses on cliff-top boulder deposits at the southern cliff coast of Mallorca Island. Preliminary results demonstrate that the formation mechanism of the cliff-top boulder deposits in the southern part of Mallorca is directly related to the approach of tsunami waves, supporting the previous findings based on morphological and sedimentological features.*

***Keywords:*** *Tsunamis, boulders, cliff, Balearic Islands, wave modelling*

***Resumen***

*Los depósitos de bloques de tsunami ofrecen información sobre actividades sísmicas pasadas y sus impactos en las zonas costeras. Estos depósitos presentan ubicaciones de bloques anómalas y microfósiles que indican incursiones marinas súbitas. Los estudios de este tipo de depósitos a escala global, desde el Mediterráneo hasta el Pacífico, ayudan a reconstruir la frecuencia, magnitud y efectos de los tsunamis históricos, ampliando la comprensión más allá de los registros escritos. El análisis de bloques de tsunami ayuda a refinar los modelos para predecir futuros riesgos de tsunamis. Sin embargo, distinguir los depósitos de tsunami, de los de tormentas en las crestas de los acantilados es un tema polémico, ya que ambos tipos de registros pueden compartir características similares. Esta controversia requiere un enfoque multidisciplinario que combine datos geomorfológicos, registros históricos de tsunamis y modelos numéricos para identificar con precisión la formación de depósitos y su emplazamiento. Este estudio se centra en los depósitos de*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

*bloques que aparecen en la cresta de los acantilados en la costa sur de la isla de Mallorca. Los resultados preliminares demuestran que el mecanismo de formación de los depósitos de bloques en la parte sur de Mallorca está directamente relacionado con la aproximación de ondas de tsunami, apoyando los hallazgos previos basados en observaciones morfológicas y sedimentológicas.*

***Palabras clave**: Tsunamis, bloques, acantilados, Islas Baleares, modelización*

## 1. Introduction

Paleo-tsunamis, ancient tsunami events, have left behind geological evidence known as tsunamites, which are sedimentary deposits that provide invaluable insights into past seismic activities and their impacts on coastal regions. These deposits are typically characterized by unique sediment layers that can include a mix of marine and terrestrial materials, anomalous boulder placements, and microfossils that indicate sudden marine incursion onto land. Studies of cliff-top boulders around the world, from the Mediterranean to the Pacific rims, have enabled scientists to reconstruct the frequency, magnitude, and effects of historical tsunamis, extending our understanding of these phenomena beyond the limits of written records.

Ultimately, the analysis of cliff-top boulders not only helps in the historical understanding of tsunamis but also aids in refining current models used for predicting potential future tsunami risks.

The formation of cliff-top boulder deposits is a subject of ongoing debate among geologists and oceanographers, primarily concerning the differentiation between deposits left by tsunamis and those created by other high-energy events like storms. Critics argue that certain geological features attributed to tsunamis deposits, such as the size, the sorting of sediments or the imbrication of larger clasts, can similarly result from storm surges, making it challenging to definitively attribute such layers to tsunami activity without additional contextual evidence. This controversy emphasizes the need for a multi-disciplinary approach that combines geomorphological data with historical tsunami records and contemporary modeling to accurately identify and attribute tsunamitic cliff-top boulders.

In this work, we focus on cliff-top boulder deposits at the southern cliff coast of Mallorca Island (Balearic Islands, Western Mediterranean Sea)

## 2. Data and Methods

### 2.1. Study Area and Morphometric Analysis

Es Bancals study site, located on the SW coast of Mallorca, corresponds to a sector of plugging cliffs, which on their crest have a series of terraces. From a geological perspective, Bancals belongs to the Marine Reef Unit of Llucmajor, characterized by reef bioconstructions attributed to the upper Tortonian-Messinian (Barón, 1977; Pomar, 1991), which are horizontally arranged on a platform showing no evidence of subsidence. This structure is topped by Pleistocene materials. Cuerda and Sacarés (1992) described the Es Bancals area as a marine erosion platform located 22 meters above sea level. On the top of these terraces-platforms appear boulders, both isolated and in the form of imbricated chains.

Morphometric analysis has been conducted to identify the largest boulders along the platform (Figure 2). For each boulder, values for the three axes (A, B, and C), their orientation, elevation above sea level, and distance from the cliff edge have been obtained. The morphometric values of each boulder have been calibrated using the triangulation method (Roig-Munar et al., 2015).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

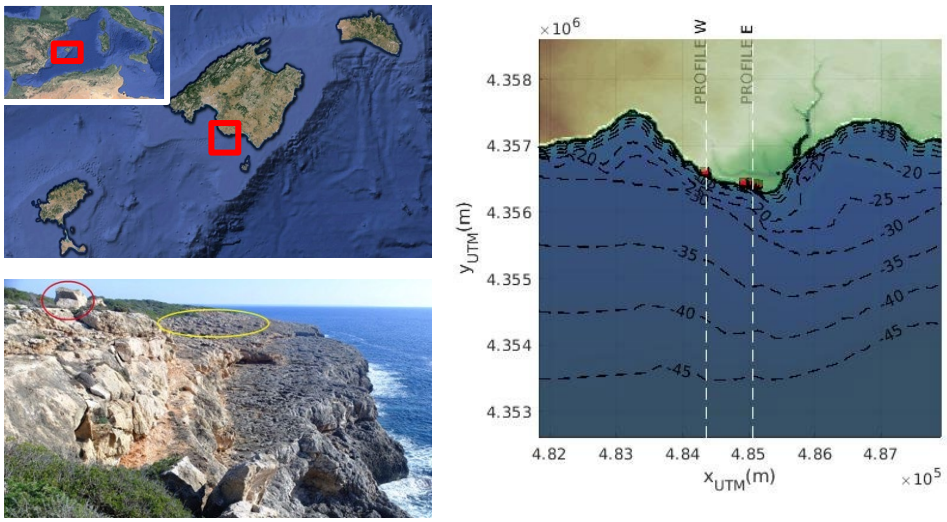



***Fig. 1.*** *a) Study area; b) Computational domain and bathymetry. Red squares stand for the position of the observed tsunamite blocks.*

In addition, the wave height dislodge/mobilization threshold (Engels and May, 2012) has been computed for each observed boulder considering both tsunami ($H_t$) and storm waves ($H_w$):

$$H_t = \frac{(P_b - P_w)V(\cos\theta + \mu \sin\theta}{2\, P_w\, C_l\, a\, b} \quad (1)$$

$$H_s = \frac{(P_b - P_w)V(\cos\theta + \mu \sin\theta}{0.5\, P_w\, C_l\, a\, b} \quad (2)$$

or to displace a previously torn aerial block:

$$H_t = \frac{0.5\, \mu\, V\ P_b\, V}{C_d\, a\, c\, P_w} \quad (3)$$

$$H_s = \frac{2\, \mu\, V\ P_b\, V}{C_d\, a\, c\, P_w} \quad (4)$$

Here, $P_b$ and $P_w$ represent the densities of the block and seawater, respectively; $V$ is the block volume; $\theta$ denotes the platform slope; $\mu$ stands for the friction coefficient; $C_l$ represents the lift coefficient; $C_d$ stands for the drag coefficient; and $a$, $b$, and $c$ denote the axes of each block.

### 2.2. Numerical modeling and setup

The FUNWAVE-TVD (Fully Nonlinear Boussinesq Wave model with Total Variation Diminishing scheme), developed by Shi et al. (2012), is a numerical model designed for the comprehensive simulation of fully nonlinear and dispersive water wave phenomena. The model accurately represents a range of wave conditions, including interactions with complex coastal bathymetry, shoaling, and breaking. Widely utilized in coastal engineering and research, FUNWAVE-TVD is particularly effective in studying nearshore processes, providing insights into coastal morphodynamics, sediment transport, and wave-induced changes in coastal areas. Notably, its utilization extends to tsunami research, where its robust capabilities contribute to understanding and modeling the complexities of tsunami wave propagation and inundation dynamics.

The computational domain embraces 6075x6000 m with an equispaced grid of 10x10 m (Figure 1). Topobathymetry has been generated by considering the high-resolution 2.5x2.5m LIDAR digital terrain model (DTM) topography (IGN, 2015) and the bathymetry from the Balearic Islands Territorial Information System.

BY-NC-SA 

Since we focus on the high-resolution solution of the tsunami waves propagation towards the coast, accounting for shallow water conditions and physical processes (i.e. dissipation, refraction, diffraction, reflection and wave breaking), the model is forced considering different tsunami solitary wave types in terms of wave height, period and incoming direction at the off-shore boundary of the computational domain (50 m depth). Significant wave height $H_s$ ranges from 5 to 20 m, wave period T from 300 to 1800 s, and the incoming wave direction $\theta$ ranges from 0 (S) to 45º (SW), resulting in 240 combinations of wave forcing and matching the direction of potential tsunamis forcing origin (Álvarez-Gómez et al., 2010).

In addition, extreme storm propagation has been simulated, considering the wave conditions of the area. For this purpose, the applied off-shore wave forcing consists of regular waves with significant wave height of 5 m. and a period of 15 s., at a depth of 20 m.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Morphometric Analysis

Table 1 shows the main characteristics of the boulders. These have been divided into two areas (profiles) corresponding to different levels on the cliff (West and East profiles). The boulders are located at an average height of 26.4 m. (profile W) and 19.8 m. (profile E) above present mean sea level, with an average distance from the cliff edge of 37.1 m. and 49.08 m., respectively. Most of the boulders show imbrication, both as solitary boulders and as aligned blocks. There are considerable differences in boulder volumes between zones, with smaller volumes observed in the west profile.

***Table 1.*** *Average boulder characteristics at the two locations of the study area.*

| Profile | Mean boulder dimensions (m) | Mean boulder orientation and dip (º) | Mean emplacement height (m) | Mean distance to sea (m) | Mean boulder volume ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| West | a = 1.08 ± 0.34<br>b = 0.70 ± 0.27<br>c = 0.33 ± 0.11 | Orientation = 220 ± 39<br>Dip = 33.5 ± 21 | 26.4 ± 1.2 | 37.1 ± 7.2 | 0.29 ± 0.28 |
| East | a = 2.03 ± 0.77<br>b = 1.36 ± 0.54<br>c = 0.52 ± 0.22 | Orientation: 220 ± 52<br>Dip = 27 ± 14 | 19.8 ±3.4 | 49.1 ± 16.1 | 1.73 ± 1.67 |

Boulder directions range from 185 to 286º, with negligible differrences between profiles. Since wave refraction processes are relevant on wave propagation, and considering the current bathymetry of the area, these are relevant to assess the potential incoming direction of tsunamis. This phenomena is explored by means of simulations of tsunami waves propagation.

### 3.2. Tsunami wave propagation and impact

Tsunami wave propagation has been studied in terms of water surface level and flooding for the combinations of wave heights, periods and directions. Figure 2 shows the tsunami wave propagation at different time-steps of simulations for a tsunami offshore wave height of 15 m, 300 s period and 190º incidence.

The wave height at the wave-block impact point has been studied across the full range of simulations. Considering the average wave height threshold for block mobilization at both profiles ($H_t$~22 m. for the western profile and $H_t$~20 m. for the eastern profile), preliminary results show that this threshold is exceeded for offshore tsunami waves with heights from 15 meters and periods of 300 seconds. This occurs for approach angles between 190º (S) and 225º (SSW).

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Considering the orientation of the blocks and the off-shore incident angles, simulations contribute to demonstrate that these conditions, along with the modeled propagation processes (especially wave refraction), are consistent with the potential tsunami generation origins identified by Alvarez et al., 2010.

Additionally, on analyzing regular storm wave forcing (with offshore wave heights of 5 m. and peak periods of 15 s.), it is found that the waves do not reach the top of the cliff.

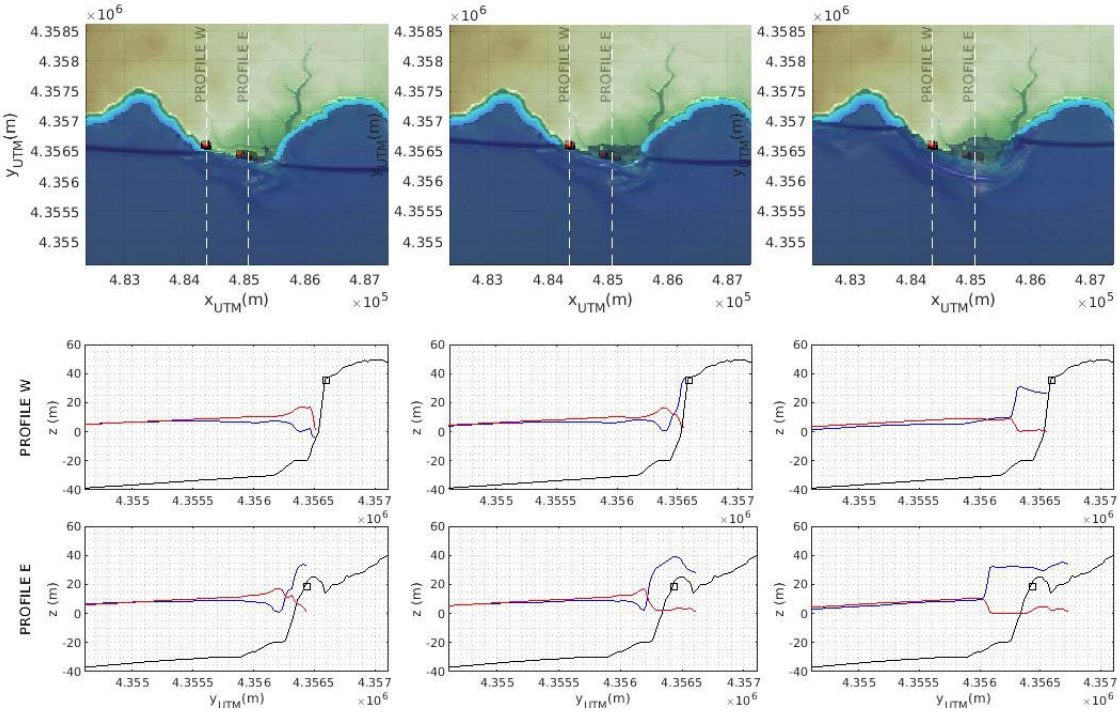



***Fig. 2.*** *Simulation results from case H 15 m, T 300, θ 90º at different time-steps: upper panels; bidimensional tsunami surface wave propagation; lower panels, tsunami sea surface (blue), depth-averaged cross-shore velocity (red), bottom elevation (black) at the western and eastern areas respectively. Left panels stand for impact time-step at the eastern profile; middle panels, impact time-step at the western profile; right panels, maximum flooding time-step.*

## 4. Conclusions

In this communication, we are exploring the potential tsunami forcing processes of boulder cliff-top deposits on the southern coast of the Mallorca Islands using a multidisciplinary approach: observational morphometric analysis and non-linear wave propagation modeling.

Preliminary results demonstrate that the formation mechanism of the cliff-top boulder deposits in the southern part of Mallorca is directly related to the approach of tsunami waves, supporting the previous findings of Roig-Munar (2016) and Martín-Prieto et al. (2018).

## 5. References

Álvarez-Gómez, J. A., Olabarrieta, M., González, M., Otero, L., Carreño, E. & 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. https://doi.org/10.3906/yer-0812-7

Barón, A. (1977). E*studio estratigráfico y paleontológico del Mioceno medio y superior postorogénico de la Isla de Mallorca*. Premio Ciudad de Palma, Palma, 190 pp.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

Cuerda, J. & Sacarés, J. (1992). *El Quaternari al Migjorn de Mallorca.* Conselleria de Cultura, Educació i Esports. Govern de les Illes Balears, Palma, 130 pp

Engel, M. & 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. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.12.011

Martín-Prieto, J., Roig Munar, F., Rodríguez-Perea, A., Bernardí, G. & Vilaplana, J. M. (2018). Acumulación de bloques en la costa acantilada del sur de Mallorca (Es Bancals): Evidencia de tsunamis procedentes de Argelia. In: C. García, L. Gómez-Pujol & E. Morán (Eds.), *Geomorfología del Antropoceno. Efectos del cambio global sobre los procesos geomorfológicos. Actas de la XV Reunión Nacional de Geomorfología* (p. 165-168). UIB - SEG.

Pomar, L. (1991). Reef geometries, erosion surfaces and high-frequency sea-level changes, Upper Reef Complex, Mallorca, Spain. *Sedimentology*, 38 (2), 243-269. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1991.tb01259.x

Roig-Munar, F. X. (2016). *Blocs de tempesta i tsunami a les costes rocoses de les Illes Balears. Anàlisi geomorfològica i morfomètrica*. Tesis doctoral. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. 410 pp

Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D., & Grilli, S. T. (2012). A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Modelling*, 43–44, 36–51. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.12.004

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18622

# Monitorización de la anchura de las playas de Orpesa: 1984-2022

*Beach width monitoring in Orpesa from 1984 to2022*

**Josep E. Pardo-Pascual[a], Jaime Almonacid-Caballer[a], Carlos Cabezas-Rabadán[a], Ausiàs Roch-Talens[a] y Jesús Palomar-Vázquez[a]**

[a]Grupo de Cartografía Geoambiental y Teledetección, Dpt. Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, jepardo@cgf.upv.es, jaialca@upv.edu.es, carcara4@upv.edu.es, aurocta@ upvnet.upv.es, jpalomav@upvnet.upv.es

How to cite: Pardo-Pascual, J.E.; Almonacid-Caballer, J.; Cabezas-Rabadán; Roch-Talens, A. C. y Palomar-Vázquez, J. 2024. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral.* Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18622

## *Abstract*

*The beaches of Orpesa (Castellón, E Spain) are facing severe erosion problems due to a regional sediment deficit worsened by coastal storms such as the Storm Gloria in 2020. This study examines four beaches in Orpesa using 993 satellite derived shorelines from 1984 to 2023. Spatial-temporal Models (STM) were created to evaluate beach width and its changes. The findings indicate significant sediment losses, especially after the Storm Gloria, adversely affecting beaches with high recreational use. The STMs prove to be effective tools for understanding the evolution of beaches and the impact of extreme events.*

***Keywords:*** *Coastal erosion, sediment deficit, coastal storms, Spatial-temporal Models, satellite-derived shorelines (SDS).*

## *Resumen*

*Las playas de Orpesa (Castellón) enfrentan graves problemas de erosión debido a un déficit sedimentario, agravado por temporales costeros como el temporal Gloria de 2020. Este estudio analiza cuatro playas de Orpesa utilizando 993 líneas de costa extraídas de imágenes de satélite entre 1984 y 2023. Se crearon Modelos Espacio-Temporales (MET) para evaluar la anchura de playa y sus cambios. Los resultados muestran pérdidas significativas de sedimento, especialmente tras el temporal Gloria, afectando negativamente a playas con alto uso recreativo. Los MET se muestran como herramientas eficaces para comprender la evolución de las playas y el impacto de eventos extremos.*

***Palabras clave:*** *Erosión costera, déficit sedimentario, temporales costeros, Modelos Espacio-Temporales (MET), Líneas de costa derivadas de satélite*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 1. Introducción

Son muchas las playas en la costa mediterránea española que están teniendo problemas erosivos. Esto provoca una fuerte preocupación en la sociedad que se expresa en múltiples quejas, denuncias en prensa, formación de asociaciones de vecinos que pretenden que se atienda a estas cuestiones políticamente. Uno de los lugares donde se ha observado recientemente esta realidad social son las playas de Orpesa (Castellón) donde se está viviendo de forma muy acusada.

La erosión es un fenómeno complejo que puede asociarse a distintas causas si bien una cuestión clave es la existencia de un déficit sedimentario, es decir, una menor disponibilidad de sedimentos en las playas de lo que ha habido históricamente (Dean, 1991). El efecto de falta de sedimento se evidencia con mayor crudeza durante los grandes temporales costeros (Coco et al., 2014) en los que oleaje arrastra materiales -arenas y gravas- mar adentro dejando parte de ellos más allá de la parte activa del perfil por lo que los procesos de recuperación de carácter cíclico no logran reequilibrar el sistema de playa.

Los procesos erosivos devienen un problema social cuando afectan a playas con un elevado uso recreativo, pudiendo dar lugar no sólo a la pérdida de superficie de la playa sino también a una alteración muy marcada de la pendiente de la playa. La anchura de playa es uno de los indicadores clave para medir el estado morfológico de una playa y constituye un elemento valorado por los usuarios (Cabezas-Rabadán et al., 2019a). Ligado a ello, se han establecido umbrales de anchura de playa para poder reconocer cuando un tramo está en situación problemática. En el caso del Mediterráneo, la anchura mínima adecuada para no interferir con el disfrute recreativo de la playa se establece en unos 30 m (Cabezas-Rabadán et al., 2019b). En este trabajo se pretende monitorizar sistemáticamente de la evolución de la anchura de las playas situadas dentro de una misma célula sedimentaria litoralpara reconocer la manera en que se produce la evolución de diferentes tramos costeros

## 2. Zona de estudio

Centramos nuestro trabajo en las cuatro grandes playas de Orpesa del Mar, la cuales se extienden entre el límite norte del término municipal de Orpesa y su puerto deportivo. Ello incluye de norte a sur la playa de Torre de la Sal, de les Amplàries, del Morro de Gos y de la Conxa (Fig. 1). Así, el estudio comprende algo más de 5 km de playa, separadas por pequeños obstáculos (como les Roquetes del Pagre, la desembocadura del Riu Xinxilla o por estructuras significativamente mayores como el cabo de Orpesa). La mayor parte de estas playas son colindantes con áreas urbanizadas. Así, al norte se encuentra la urbanización Marina D'Or y al sur el área urbana de la Platja de Orpesa, con una densa ocupación urbana. Sólo quedan sin urbanizar los 750 m situados al sur de la desembocadura del Riu Xinxilla.

La textura sedimentaria de las playas varía de norte a sur. En la parte septentrional dominan las arenas muy gruesas, mientras que hacia el sur aparecen arenas, primero gruesas y después medias. Así, en la playa de la Conxa domina la arena de tamaño medio (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019).

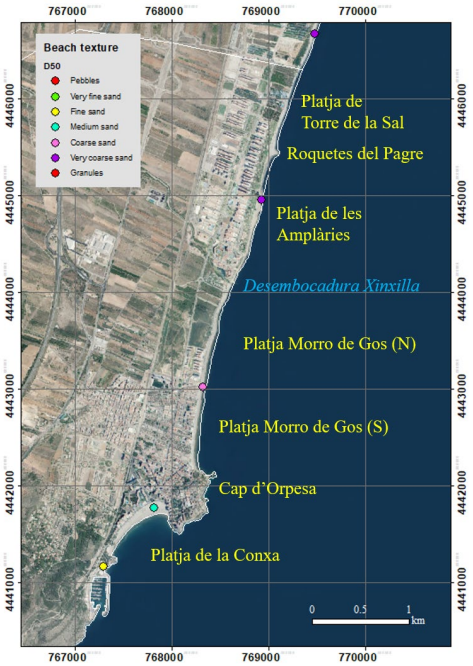



***Fig. 1.*** *Zona estudio y textura de las playas.*

El oleaje habitualmente es poco energético (Hs media es de 0,6m y el periodo medio es de 5,6 segundos) aunque durante los temporales las olas pueden alcanzar alturas de hasta 5,7 m, como sucedió en enero de 2020 con el temporal Gloria. Dadas las condiciones generales del oleaje y la disposición de la costa, el transporte longitudinal dominante es de norte a sur.

En la zona de estudio se han realizado múltiples actuaciones humanas orientadas a frenar los procesos erosivos. Entre otras muchas, destacan, por una parte, la construcción de una pequeña barrera dentro del cabo, en el lugar conocido como la Illeta, con la que se unió con escollera una pequeña isla al continente. Esa unión quedó destruida

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

por el temporal Gloria y se ha sugerido que tenía un papel clave en la estabilidad de la playa del Morro de Gos por lo que existe un proyecto para reconstruirla. Otra acción significativa fue el aporte de materiales granulares hecho en 2015 en la playa de les Amplàries por la Dirección General de Costas y el Mar.

## 3. Materiales y métodos

El estudio se ha fundamentado en el análisis de los cambios en la posición de 993 líneas de costa derivadas de satélite (*Satellite-Derived Shorelines*, SDS) obtenidas automáticamente utilizando el programa de extracción SHOREX e imágenes Landat (5, 7, 8 y 9) y Sentinel-2 adquiridas entre el 1 junio de 1984 y el 19 de febrero de 2023 (Cabezas-Rabadán et al., 2021). Cada una de las SDSs fue definida como un conjunto de puntos localizados cada 5 m (en el caso de imágenes S2) o 7,5m (en el caso de las Landsat). La precisión de las SDSs así obtenidas en estas playas micromareales se estima que ha de ser de alrededor de 4 m (EMC) según las evaluaciones previas realizadas en otros entornos mediterráneos (Sánchez-García et al., 2020).

Partiendo de las SDSs, se ha realizado un análisis de los cambios de anchura de playa registrados a lo largo de ese tiempo. Para ello se ha seguido la metodología descrita por Cabezas-Rabadán et al. (2019c) por la que se ha creado un Modelos Espacio-Temporal (MET) de anchura de playa y otro de sus cambios. Así, se ha definido una línea de referencia localizada en el borde interior de la playa actual que se ha dividido en segmentos de 50 m de longitud. Posteriormente, se ha medido la distancia de cada uno de los puntos que definen cada SDS respecto al segmento más cercano del borde interior de la playa, y se ha promediado una anchura media de playa para cada segmento en cada fecha con registro. Dicha información ha sido organizada en un sistema cartesiano en el que los ejes X e Y definen el tiempo y la posición geográfica respectivamente. A cada posición XY se le asigna una anchura de playa correspondiente a un determinado segmento y fecha. Una vez se disponen de todas las mediciones de anchura éstas se interpolan creando el MET de anchura de playa (Fig. 2). De esa información se puede derivar un segundo producto que es el MET de cambios de anchura que se genera a partir de las diferencias de anchuras entre cada fecha respecto a lo que se establece como anchura original. En este caso, como anchura original se ha usado el promedio de la anchura de playa a lo largo del primer año analizado, 1984. Por tanto, en el MET de cambios de anchura se muestra el sentido (positivo o negativo) y la magnitud de los cambios registrados en cada lugar a lo largo de los 38 años analizados.

A partir de los MET se pueden derivar nuevos productos como la longitud o el porcentaje de área estudiada que presenta una anchura problemática (menor o igual a 30m) en cada momento del periodo estudiado. Asimismo, también se puede derivar la evolución promediada para un tramo más amplio de playa -por ejemplo, toda la playa de la Conxa- a lo largo del tiempo.

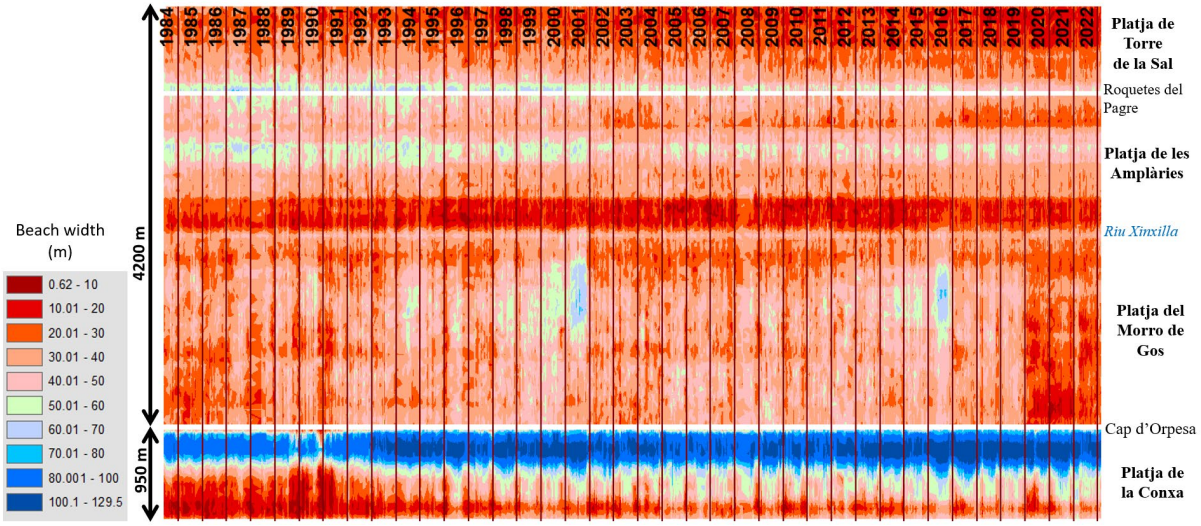



***Fig. 2.*** *MET de anchura de playa a lo largo de todo el periodo estudiado*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 4. Resultados

En la figura 2 se presenta el MET de anchura de playa. En tonos rojos se han señalado las situaciones en que la playa es más estrecha y en azules cuando es más ancha. En la figura 3 se presenta el MET de los cambios de anchura de playa respecto al promedio de 1984. Este gráfico permite advertir muy claramente cómo hay determinados periodos en que se da un cambio radical en la evolución del sector. Así, es posible observar como en la playa de la Conxa, a partir de 1992 se produce un claro y progresivo aumento de la anchura de playa. Es también remarcable que la playa del Morro de Gos aprecia una tendencia a aumentar su anchura y que esta tendencia se detiene bruscamente a finales de 2001. La parte norte de esta playa se mantuvo con pérdidas tras ese periodo, pero hacia 2013 mejoró detectándose un fuerte avance en 2016 que, de nuevo, se cortó bruscamente a finales de 2017. Esas pérdidas también se detectan claramente en las playas de Torre de la Sal y de les Amplàries. Finalmente, tras el temporal Gloria (enero 2020) las pérdidas son generales y muy marcadas en la Platja del Morro de Gos.

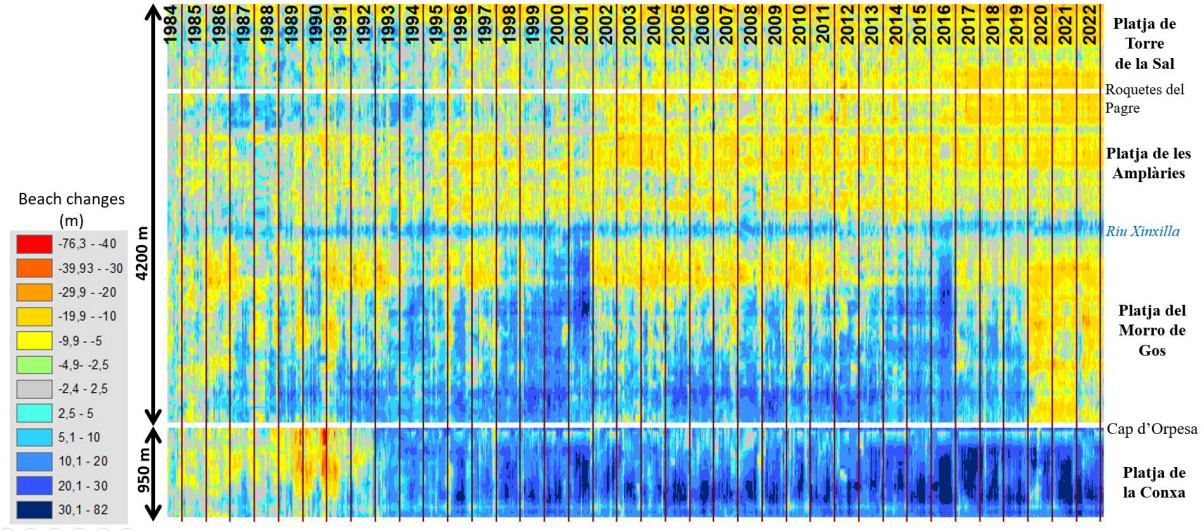



***Fig. 3.*** *MET de cambios de anchura respecto a 1984.*

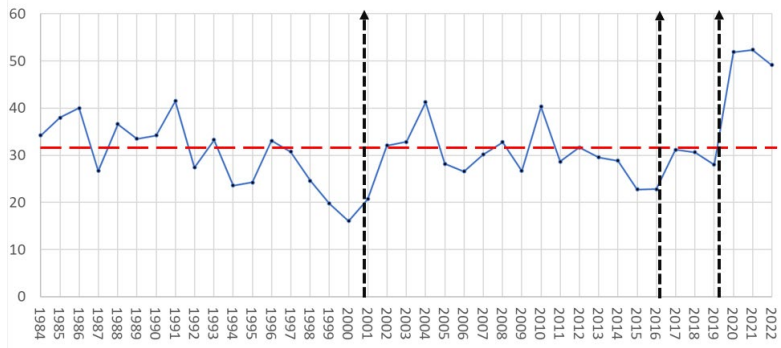



***Fig. 4.*** *Porcentaje de segmentos o tramos de costa con ancho menor a 30m promediados a escala de años. Las flechas negras señalan los momentos en que se producen los principales temporales costeros que han afectado a la zona*

En la figura 4 se muestra el porcentaje de tramos que presentan anchuras problemáticas -inferiores a 30 m- promediados a escala anual. El gráfico evidencia, por una parte que de media (línea roja discontinua), el 31,7% de la costa analizada presenta anchuras problemáticas. Por otra, remarca los periodos con mayor número de tramos de playa con problemas, es decir, con anchuras inferiores a 30m.

En la figura 5 se presenta la comparación de la evolución de tres tramos de playa de forma que se puede reconocer la diferente evolución de todos ellos. Con flechas de color amarillo se ha resaltado tres hechos asociados a la acción humana. La primera (A, entre 1990 y 1991) es la construcción de una barrera en la zona de la Illeta (dentro del cabo de Orpesa) que se entiende que puede haber frenado la deriva de sedimentos hacia el sur. La segunda (B, 1992) es la finalización del puerto deportivo de Orpesa. Y la tercera, la aportación artificial de material granular hecho por el Ministerio en la playa de les Amplàries que, como se aprecia, va asociada a una fuerte repercusión en


BY-NC-SA

las playas del Morro de Gos. Por otra parte, también se presenta con flechas negras las fechas aproximadas de los tres principales temporales que han afectado a esta costa en este periodo.

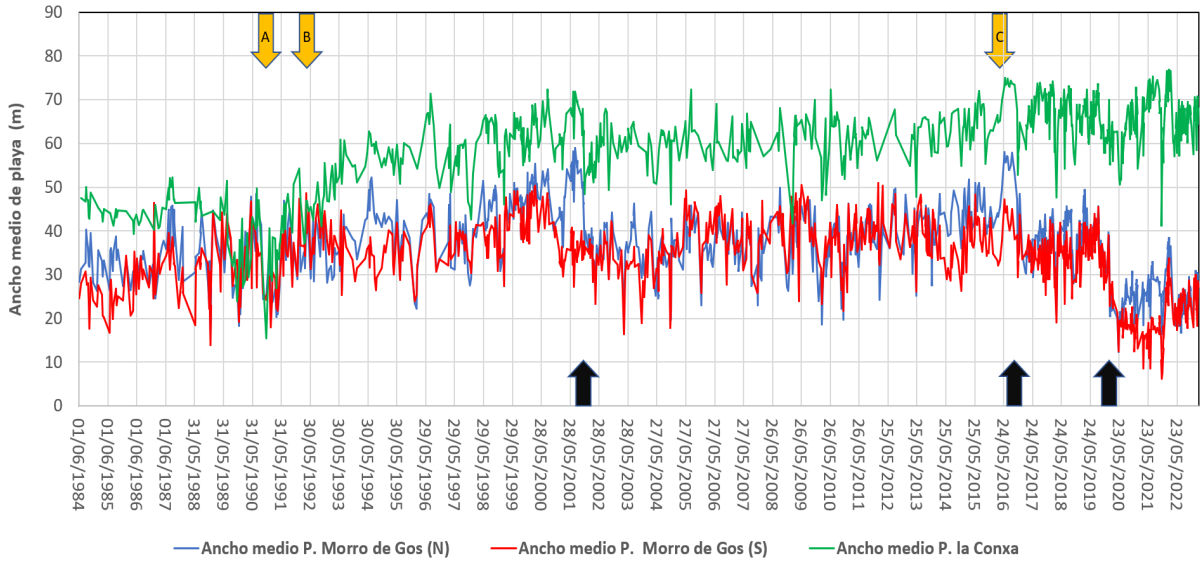



***Fig. 5.*** *Evolución de la anchura media de la playa Morro de Gos en sus tramos norte y sur y el de la playa de la Conxa.*

## 5. Discusión y conclusiones

Los resultados aportados evidencian que las playas analizadas, en su gran mayoría, al menos las situadas al norte del Cabo de Orpesa, tienen una anchura muy limitada. El elevado porcentaje de segmentos de costa que presentan una anchura problemática es digno de consideración dado que se trata de unas playas con un elevado uso recreativo (Cabezas-Rabadán et al., 2019b). Teniendo esto en cuenta, no es raro que estos espacios se encuentren con situaciones problemáticas que, a su vez, provoquen un fuerte malestar social .

Los resultados también prueban que, si bien el cabo ha dejado de actuar como una trampa significativa al transporte longitudinal -que en todo caso debe ser bastante débil-, no es así en el caso del puerto deportivo. Éste último sí ha favorecido la ampliación progresiva de la playa de la Conxa aunque desde 2000 prácticamente no se han observado avances significativos.

En las playas al norte del cabo, los grandes temporales provocan fuertes retrocesos de la anchura que tardan mucho en recuperarse. Así, se muestra que durante los grandes temporales que han afectado a la zona de estudio en este periodo (noviembre de 2001, enero de 2017 y de 2020) han tenido un claro impacto agravando el retroceso ya mencionado. El efecto del temporal Gloria -el más energético de todos ellos- ha resultado especialmente dramático, provocado que, en los años siguientes (hasta 2022), hasta el 50% de las playas analizadas tuvieran una anchura de playa menor a los 30m (fig. 3).

Todo ello prueba que este tramo está sometido a un fuerte déficit sedimentario. Es muy llamativo que justamente la zona inmediatamente al norte del cabo de Orpesa -que tradicionalmente ha actuado como trampa natural de sedimentos- en la actualidad esté teniendo importantes problemas. Este hecho se ha visto también en otros tramos del Golfo de Valencia como la playa norte del cabo de Cullera (Pardo-Pascual et al., 2022a y 2022b) y sugiere que, buena parte de la arena -durante los momentos de máxima energía del temporal Gloria- ha migrado a profundidades donde el retorno a la parte emergida es muy poco probable. Ello implicaría una pérdida real para el sistema litoral. Esta realidad sólo podrá demostrase con estudios batimétricos detallados.

Queda probado el potencial analítico que el empleo de los METs generados a partir de imágenes de satélite y sus derivados aportan para la conocer la evolución a corto y medio plazo de las playas en entornos como el que aquí se ha estudiado, en el que los cambios morfológicos de las playas pueden tener consecuencias sobre la importante función recreativa que ellas sustentan.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

## 6. Agradecimientos

Este estudio se ha financiado con el proyecto SIMONPLA del programa Thinkinazul apoyado por el MCIN con fondos de la Unión Europea Next GenerationEU (PRTR-C17.I1) y la Generalitat Valenciana; el contrato de M. Salas (Programa de Re-cualificación) de CCR del Ministerio de Universidades financiado UE - NextGenerationEU y su ayuda Primeros Proyectos de Investigación (PAID-06-22) del Vicerrectorado de Invest. de la UPV.

## 7. Referencias

Cabezas-Rabadán, C., Rodilla, M., Pardo-Pascual, J. E., & Herrera-Racionero, P. (2019a). Assessing users' expectations and perceptions on different beach types and the need for diverse management frameworks along the Western Mediterranean. Land use policy, 81, 219-231.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., & Rodilla, M. (2019b). Detecting problematic beach widths for the recreational function along the Gulf of Valencia (Spain) from Landsat 8 subpixel shorelines. Applied Geography, 110, 102047.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Fernández-Sarría, A. (2019c). Characterizing beach changes using high-frequency Sentinel-2 derived shorelines on the Valencian coast (Spanish Mediterranean). *Science of the Total Environment*, *691*, 216-231.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., & Palomar-Vázquez, J. (2021). Characterizing the relationship between the sediment grain size and the shoreline variability defined from sentinel-2 derived shorelines. *Remote Sensing*, *13*(14), 2829.

Coco, G., Senechal, N., Rejas, A., Bryan, K. R., Capo, S., Parisot, J. P., ... & MacMahan, J. H. (2014). Beach response to a sequence of extreme storms. *Geomorphology*, *204*, 493-501.

Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of coastal research*, 53-84.

Pardo-Pascual, J. E., & Sanjaume, E. (2019). Beaches in Valencian coast. *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management*, 209-236.

Pardo Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2022a). Estudio de los cambios de posición de la línea de costa en las playas del segmento València-Cullera (1984-2020) a partir de imágenes de satélite de resolución media de libre acceso. Cuadernos de Geografía de la Universitat de València (Online), 108(1), 79-104.

Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J. M., & Cabezas-Rabadán, C. (2022b). Analysis of the morphological changes of the beaches along the segment València-Cullera (E Spain) from satellite-derived shorelines. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, *48*(2), 309-324.

Sánchez-García, E., Palomar-Vázquez, J. M., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., & Gómez-Pujol, L. (2020). An efficient protocol for accurate and massive shoreline definition from mid-resolution satellite imagery. Coastal Engineering, 160, 103732.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

XII Jornadas de Geomorfología Litoral
25-27 de septiembre de 2024. Valencia
Doi: https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18879

# Dinámica eólica en la interfaz playa-duna de un blowout

*Aeolian Dynamics at the Beach-Dune Boundary of a Trough Blowout*

**Irene Delgado-Fernández[a] y Nicholas O'Keeffe[b]**

[a]Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Cádiz, , irene.delgado@uca.es; [b]Geography Department, Edge Hill University, UK, nickok@live.co.uk

How to cite: Delgado-Fernández, I. & O'Keeffe, N. 2024. Dinámica eólica en la interfaz playa-duna de un blowout. En libro de actas: XII Jornadas de Geomorfología Litoral. 25-27 de septiembre de 2024. Valencia. https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18879

## *Abstract*

*Coastlines characterised by the presence of blowouts at the beach-dune interface may operate differently from those with an alongshore constant foredune height. Blowouts are highly effective transport pathways, facilitating the landward movement of beach and foredune sediment. However, the dynamics of aeolian sediment transport governing their evolution are poorly understood. Although there is good understanding of topographically induced airflow behaviour, studies involving synchronous measurement of both flow and sediment movement inside blowouts are rare. This study illustrates aeolian dynamics at a beach-dune interface characterisd by the presence of a trough blowout. An array of 3D sonic anemometers, positioned alongside transport sensors, was deployed at Sefton Dunes (NW England). Results presented here focus on two, 5-min runs of instantaneous flow and transport dynamics at the back beach, the adjacent upwind foredune, and within the blowout's throat. Within the blowout throat, airflow and transport exhibited significant spatial and temporal variability. Airflow accelerated near the upwind blowout wall but decelerated near the exposed (downwind) blowout wall. Sediment transport, measured in counts per minute and Activity Parameter, showed low correlation with various wind variables, including wind speeds and TKE. Transport intensity followed a pattern inverse to wind speeds, with lower intensities near the upwind blowout wall and higher intensities near the downwind blowout wall. Numerous topographically-forced flow modifications were observed, particularly in the blowout throat, where even minor directional shifts of 10-20° led to substantial variations in flux intensity. The results provide detailed temporal and spatial insights into the complex patterns of beach sediment transport into the blowout throat and dune area.*

***Keywords:*** *Blowouts, beach-dune sediment exchange, flow dynamics.*

## *Resumen*

*Las costas caracterizadas por la presencia de "blowouts" en la interfaz playa-duna pueden funcionar de manera diferente a aquellas con una altura constante de duna a lo largo de la costa. Los "trough blowouts" actúan como depresiones topográficas que interseccionan el sistema dunar y son vías de transporte altamente efectivas, facilitando el movimiento tierra adentro de sedimentos de la playa y la duna frontal. Esta dinámica es, sin embargo, poco conocida. Aunque existen estudios sobre la interacción entre el flujo eólico y la topografía, hay pocos experimentos que involucren la medición simultánea del viento y el movimiento de sedimentos dentro de los blowouts. La presente investigación ilustra la dinámica eólica en la interfaz de un sistema playa-duna afectado por la presencia de un "trough blowout". El trabajo de campo consitió en la co-localizarion de anemómetros sónicos 3D y sensores de transporte en la costa de Sefton (NO de Inglaterra). Los resultados presentados aquí se centran en dos períodos de 5 minutos de dinámica*

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

*eólica en detalle, en las zonas de playa trasera, duna delantera, y dentro de la garganta del blowout, donde el viento y el transporte mostraron una variabilidad espacial y temporal significativa. El viento aceleró cerca de la pendiente dunar a barlovento, pero desaceleró en las proximidades de la pared expuesta (a sotavento) del blowout. El transporte de sedimentos, medido en "counts per minute" y Parámetro de Actividad, mostró baja correlación con variables eólicas como TKE. De hecho, la intensidad del transporte siguió un patrón inverso a la velocidad del viento, con menor transporte cerca de la pendiente de barlovento y mayor transporte cerca de la zona norte a sotavento. La topografía ejerció un papel principal en la modificación del viento, particularmente en la garganta del blowout, donde incluso pequeños cambios direccionales de 10-20° llevaron a variaciones sustanciales en la intensidad del transporte. Los resultados proporcionan detalles sobre los complejos patrones espaciales y temporales de transporte de sedimentos de la playa hacia la duna en la presencia de un blowout.*

***Palabras clave**: "blowouts", intercambio de sedimento playa-duna, dinámica eólica.*

## 1. Introducción

Los "blowouts" son depresiones en forma de cuenco o canal, comunes en superficies arenosas, originadas por deflación y erosión eólica. Se encuentran tanto en sistemas de dunas costeras como continentales y en diversas latitudes. Estas formaciones comprenden una zona de erosión a barlovento, una cuenca de deflación y una zona de deposición a sotavento. Su topografía modifica el flujo de aire, facilitando el transporte continuo de sedimentos en varias direcciones, lo que los convierte en corredores de transporte eficientes. Los blowouts suelen estar asociados a tramos litorales con balance de sedimentos negativo y se clasifican como formas de relieve erosivas (Carter *et al*., 1990; Hesp and Walker, 2013; Smyth *et al*. 2014). Los blowouts se desarrollan y agrandan mediante tres mecanismos principales: 1) expansión vertical por erosión basal, limitada por vegetación, sedimentos gruesos o nivel freático; 2) expansión lateral por erosión de las paredes, con socavamiento y deslizamiento de arena, introduciendo más sedimento en la cuenca para deflación y transporte; 3) crecimiento longitudinal, transportando material de la zona de barlovento a la de sotavento. Estos procesos, junto con la dinámica del viento, ayudan a extender y migrar el lóbulo deposicional (Gares and Nordstrom, 1995; Hesp, 2002).

Aunque la dinámica de vientos en blowouts ha sido estudiada ampliamente, el transporte de sedimentos no ha recibido la misma atención. Las observaciones suelen ser indirectas, basadas en cambios topográficos, con pocas investigaciones centradas en mediciones de viento y transporte simultáneas, y generalmente todas realizadas en blowouts dentro del campo dunar, sin conexión con la playa (ver, por ejemplo, Smyth *et al*., 2014, Delgado-Fernandez *et al*., 2018). Por ello, la dinámica de transporte eólico en blowouts es poco comprendida, especialmente en dunas frontales y su papel en el transporte de sedimentos desde la playa al campo dunar. Este artículo analiza la compleja interacción entre topografía, características del viento, e intensidad del transporte eólico a microescala, usando intervalos de 5 minutos para observar estos procesos en detalle.

## 2. Área de estudio

Las dunas de Sefton (Fig. 1) son el campo de dunas costeras más grande de Inglaterra, extendiéndose 16 km a lo largo de la costa y cubriendo un área de 2,100 ha con dunas de más de 30 m de altura. La costa tiene un régimen macromareal semidiurno y un sistema de playa con múltiples barras de arena fina rica en cuarzo (Esteves *et al*., 2021). La zona cuenta con varias designaciones de conservación nacionales e internacionales, incluyendo sitios Ramsar y SAC. Históricamente, la influencia humana ha sido significativa, con actividades como agricultura, silvicultura, extracción de arena y presión turística (Delgado-Fernandez *et al*., 2019). En la zona de Formby Point, el límite playa-duna retrocede a una tasa promedio de ≈ 4 m por año, mientras que en otras áreas, como Ainsdale y Hightown, las dunas avanzan hacia el mar. El blowout estudiado está en una sección de la costa

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

menos accesible, en una zona de conservación de Natural England, con menor presión de visitantes. La garganta del blowout mide aproximadamente 10 m de ancho, flanqueada por dunas frontales empinadas de unos 15 m de altura, y se extiende 25 m tierra adentro antes de expandirse a un canal más amplio de 65 m. La duna frontal está orientada de SSO a NNE.

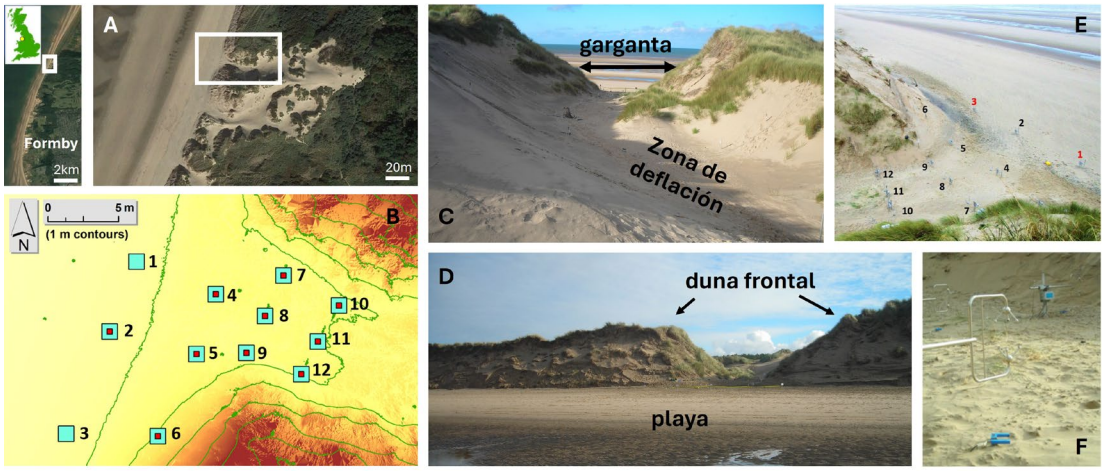



***Fig. 1.*** *Área de estudio. A) localización del blowout; B-E) distribución de anemómetros (cuadrados azules) y LPCs (cuadrados rojos); C-D) fotografías del blowout; F) UA y LPC.*

## 3. Metodología

### 3.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo se llevó a cabo en octubre de 2016 y se centra en dos intervalos de 5 minutos de datos tomados durante un evento de viento moderado del suroeste que duró aproximadamente 90 minutos. Los resultados presentados se basan en estos intervalos cortos para permitir una descripción detallada de los procesos físicos. Se midió de manera sincrónica con 12 anemómetros ultrasónicos tridimensionales (UAs) y 10 contadores de partículas láser Wenglor (LPCs; Davidson-Arnott *et al*., 2009), ubicados en la parte trasera de la playa, en la interfaz playa-duna y en el canal del blowout (Fig. 1). La red de instrumentos cubrió un área de aproximadamente 300 m². Los anemómetros se montaron a 0,4 m sobre la superficie, con un rango de registro de 0-45 m/s para la velocidad y de 0-359° para la dirección, y se registraron datos a 50 Hz. El transporte de sedimentos se midió con LPCs posicionados horizontalmente a 20 mm sobre la superficie, registrando datos a 1 Hz. Los puntos de muestreo se distribuyeron en cuatro filas perpendiculares a la costa, con una fila en la parte trasera de la playa, una en la interfaz playa-duna y dos dentro del canal del blowout.

### 3.2. Procesamiento de datos

La velocidad del viento (U) se derivó de los tres componentes del flujo medidos por los UAs:

$$U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (1)$$

donde *u* es el flujo horizontal en el eje x, *v* es el flujo horizontal transversal y *w* es la componente vertical. La *u* de todos los UAs se alineó con el norte geográfico, y la dirección del viento (a) se calculó:

$$a = atan^2(u, v) - 180° \quad (2)$$

El coeficiente de variación (CV, expresado como un porcentaje) se usó para normalizar la desviación estándar (SD) de cada UA (Smyth *et al*. 2014), y así permitir la comparación entre ubicaciones de sensores:

$$CV = \frac{SD}{U} * 100 \quad (3)$$

La energía cinética turbulenta (TKE, por sus siglas en inglés) describe el grado de desviación de la media, y por lo tanto es un indicador de la intensidad de la turbulencia del aire (Delgado-Fernandez *et al*. 2018):

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

$$TKE = ½ ((\sigma u^2) + (\sigma v^2) + (\sigma w^2)) \quad (4)$$

Los conteos de sedimento (c) registrados por cada LPC y el Parámetro de Actividad (AP) fueron calculados utilizando intervalos de 1 minuto (Smyth *et al*., 2014). Los valores de AP varían entre 0.0 (sin transporte) hasta 1.0 (transporte continuo). Este parámetro permite cuantificar la proporción de tiempo en que el transporte de sedimentos estuvo activo en diferentes puntos de muestreo (Davidson-Arnott *et al*., 2012).

## 4. Resultados

### 4.1. Descripción general del evento

El anemómetro en A3 se utilizó como referencia (Fig. 1), y como *proxy* para el viento incidente cerca de la superficie y antes de entrar al blowout. La dirección del viento en A3 fue relativamente estable alrededor de 210° (Fig. 2) durante la primera parte del evento. Un viento de ≈ 200° estaría alineado con las dunas frontales en el lugar de estudio. La dirección del viento se volvío relativamente más perpendicular durante la parte final del evento, alcanzando un pico de 225°. La velocidad del viento se mantuvo constante durante el período de estudio con un rango de solo 1.29 m s-1 y un promedio de 6.5 m s-1. Para un análisis en detalle, se seleccionaron dos intervalos (I) de 5 minutos cada uno, representativos de las dos direcciones del viento diferentes: I1, a las 16:10, con vientos más paralelos a la foredune, y I2, a las 17:07, coincidiendo con el cambio de dirección del viento hacia más oblícuo-perpendicular.

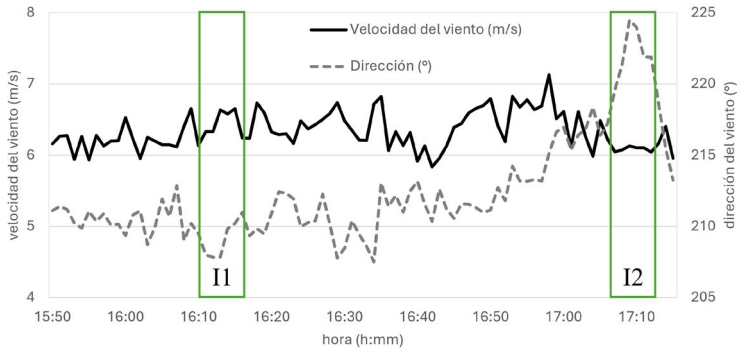



***Fig. 2.*** *Velocidad y dirección del viento en A3 durante el evento y los dos intervalos de detalle.*

### 4.2. Complejidades en la dinámica eólica derivadas de la presencia del blowout

Los resultados durante los intervalos I1-2 permiten la comparación de dinámica eólica durante 2 momentos con una velocidad media de viento incidente comparable pero con una dirección del viento ligeramente diferente.

#### *4.2.1. Vientos "alongshore"*

Durante I1, la dirección del viento de referencia en A3 estuvo aproximadamente paralela a la duna frontal. La velocidad del viento U disminuyó en > 1 m/s hacia el N de la playa trasera (entre A3 y A1). El viento viró hacia tierra en la zona sur de la garganta del blowout, resultando en vientos relativamente más fuertes en comparación con la zona norte de la garganta. Las velocidades en A6, A5, A9 y A12 fueron todas marginalmente más altas que el flujo incidente en A3, mientras que todas las demás ubicaciones fueron más bajas. La energía cinética turbulenta (TKE) aumentó hacia el norte y hacia tierra, y el mayor CV se registró en A7 hacia la zona norte. Las intensidades de transporte más elevadas dentro del blowout se encontraron en A7 y A10, lugares donde se midieron las velocidades de viento más bajas y los valores de TKE más altos. A pesar de que los vientos más fuertes ocurrieron a lo largo de la zona sur del blowout, A9 y A12 registraron los valores de transporte más bajos en cuanto a conteos por minuto.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

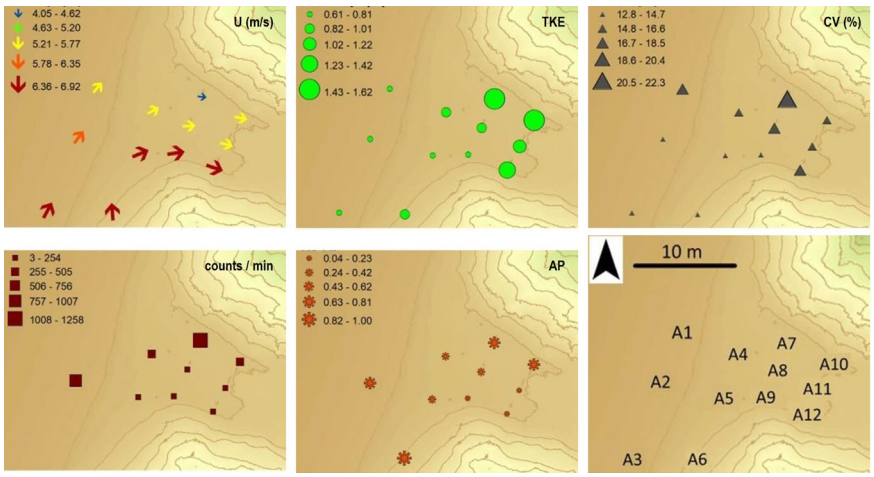



***Fig. 3.*** *Patrones de características del viento y transporte de sedimentos durante I1.*

### *4.2.2. Vientos oblícuos "onshore"*

El intervalo I2 se caracterizó por una dirección del viento en A3 más alineada con el eje principal del blowout (es decir, hacia tierra adentro). Aunque aún altamente oblícuo, la relativamente pequeña variación en la dirección del viento incidiente conllevó un incremento de velocidades dentro del blowout. Durante I2, la gran mayoría de los vientos medidos en la garganta y la cuenca fueron más fuertes en comparación con los registrados durante I1. El transporte durante I2 fue considerablemente más elevado que duratne I1. La zona central del blowout experimentó un aumento de intensidad de transporte en cuanto a conteo por minuto y a AP, lo que podría reflejar una mayor entrada directa desde la playa durante este período.

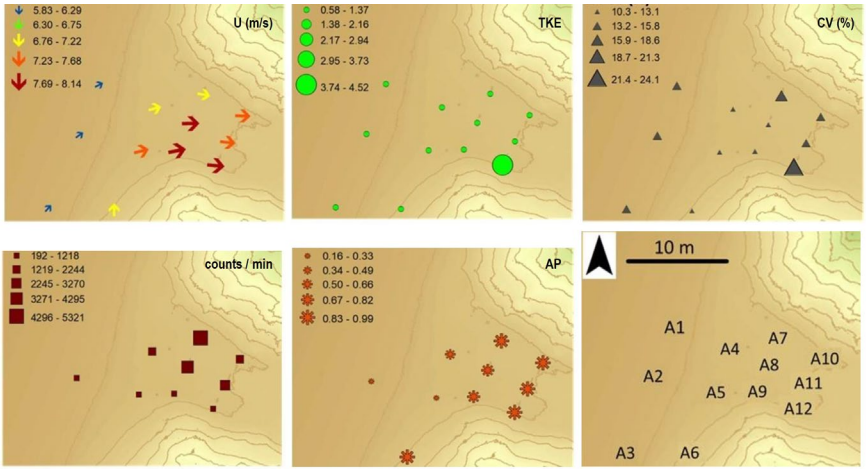



***Fig. 4.*** *Patrones de características del viento y transporte de sedimentos durante I2.*

## 5. Discusión

La premisa principal de las ecuaciones de transporte ha sido tradicionalmente que la velocidad del viento está correlacionada positivamente con el transporte de sedimento (véase Bagnold, 1941). Esta asunción ha sido criticada, porque normalmente no hay un suministro ilimitado de sedimento, y las superficies sobre las que sopla el viento no son ideales (Bauer *et al*., 2013). La gran cantidad de controles ambientales en el litoral sobre el transporte eólico hace que tales modelos sean inadecuados para resolver la dinámica del transporte en entornos costeros. En este estudio, presentamos evidencia sobre la falta de relación existente entre el viento y el transporte dentro de un espacio complejo y a distancias de solo unos pocos metros. La variabilidad espacio-temporal en las medidas de flujo y transporte fue compleja en toda la red de instrumentos, y no se puede explicar utilizando las mediciones 'puntuales' para cada ubicación del sensor de forma aislada. En el blowout, las ubicaciones con los

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València

vientos más fuertes, y por lo tanto más capaces de transporte, registraron las magnitudes de transporte más bajas, y viceversa (es decir, magnitudes de transporte relativamente altas registradas en zonas con algunos de los vientos más débiles). Las bajas intensidades de transporte en ubicaciones sujetas a vientos fuertes pueden explicarse por la influencia local de factores limitantes de suministro de sedimento, o por la posibilidad de que las trayectorias del transporte de sedimento sean sean diferentes a los vectores de viento. Por otro lado, la existencia de velocidades de viento bajas pero transporte relativo alto (por ejemplo, A7) sugiere que la turbulencia puede jugar un papel relevante, y/o que (probalmente más importante en este caso) haya aporte de sedimento en suspensión traído desde otras localizaciones a barlovento. Ambas posibilidades debería estudiarse a fondo en futuras investigaciones.

## 6. Conclusiones

Este estudio presenta un ejemplo de mediciones de flujo de aire y el transporte eólicos sincronizados, a través de un despliegue en cuadrícula de instrumentos en una interfaz duna-playa interseccionada por un blowout. Los resultados muestran que la dinámica eólica es altamente compleja, y que la presencia del blowouts resultó en una fuerte divergencia entre los vectores de viento y el transporte. Los patrones espaciales de la velocidad del viento, en relación con la intensidad del transporte, demostraron una relación fuertemente inversa, lo que sugiere que los modelos tradicionales son inadecuados para predecir el transporte eólico situaciones tan complejas.

## 7. Agradecimientos

Agradecemos a Susana Costas, Derek Jackson, Eugene Farrell, Nye O'Neil, y Thomas Smyth, su valiosa ayuda durante el trabajo de campo. Gracias también a Derek Jackson y Andrew Cooper por su apoyo con material.

## 8. Referencias

Bagnold, R.A., 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Marrow.

Bauer, B., Walker, I., Baas, A., Jackson, D., Mckenna-Neuman, C., Wiggs, G., and Hesp, P., 2013. Critical reflections on coherent flow structures in aeolian geomorphology. In: Venditti, J.G., Best, J.L., Church, M. and Hardy, R.J. (Eds.). Coherent Flow Structures at Earth's Surface. London: Wiley. pp. 111-134.

Carter, R.W.G., Hesp, P. A., and Nordstrom, K. F. 1990. Erosional landforms in coastal dunes. In: Nordstorm, K.F., Psuty, N., Carter, R.W.G. (Eds.) *Coastal Dunes: Form & Process*. Chichester: Wiley. pp. 217-250.

Davidson-Arnott, R.G.D., Bauer, B., Walker, I.J., Hesp, P.A., Ollerhead, J., and Delgado-Fernandez, I., 2009. Instantaneous and mean aeolian sediment transport rate on beaches: an intercomparison of measurements from two sensor types. *Journal of Coastal Research*. SI (56) pp.297-301.

Davidson-Arnott, R.G.D., Bauer, B., Walker, I., Hesp, P., Ollerhead, J., and Chapman, C., 2012. High-frequency sediment transport responses on a vegetated foredune. *Earth Surface Proc. & Land.*. 37, 1227-1241.

Delgado-Fernandez, I., O'keeffe, N., and Davidson-Arnott, R.G., 2019. Natural and human controls on dune vegetation cover and disturbance. *Science of the Total Environment.* 672 pp. 643-656.

Delgado-Fernandez, I., Smyth, T.A.G., Jackson, D.W.T., Smith, A.B., and Davidson-Arnott, R.G.D., 2018. Event-Scale Dynamics of a Parabolic Dune and Its Relevance for Mesoscale Evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. (123) pp.3084-3100.

Esteves, L.S., Brown, J.M., Williams, J.J., and Lymbery, G., 2012. Quantifying thresholds for significant dune erosion along Sefton Coast, Northwest England. *Geomorphology.* (143-144) pp.52-61.

Gares, P.A. and Nordstrom, K.F., 1995. A cyclic model of foredune blowout evolution for a leeward coast: Island Beach, New Jersey. *Annals of the Association of American Geographers*, *85*(1), pp.1-20.

2024, Editorial Universitat Politècnica de València BY-NC-SA

Hesp P.A. and Walker I.J., 2013. Coastal Dunes. In: Shroder, J.F. (Ed.). *Treatise on Geomorphology.* Volume 11 pp.328-355. San Diego: Academic Press.

Hesp, P.A., 2002. Foredunes & blowouts: initiation, geomorphology & dynamics *Geomorphology* 48, 245-268.

Smyth, T.A.G., Jackson, D.W.T., and Cooper, J.A.G., 2014. Airflow and aeolian sediment transport patterns within a coastal trough blowout during lateral wind conditions. *Earth Surf. Proc. Land*. 39 (4) 1847-1854.

BY-NC-SA 2024, Editorial Universitat Politècnica de València