

XVII JORNADAS ESPAÑOLAS DE INGENIERÍA DE

COSTAS Y PUERTOS

Eivissa, 8 y 9 de mayo del 2024

— PALACIO DE CONGRESOS - SANTA EULÀRIA DES RIU —



www.costasypuertos2024.com

Organizadores



Patrocinador Platino



Patrocinador Oro



Patrocinador Plata



Patrocinadores



www.costasypuertos2024.com

XVII Jornadas españolas de ingeniería de Costas y Puertos

Ibiza, 8 y 9 de mayo de 2024

Editora científica

M. Esther Gómez-Martín

Congresos UPV

XVII Jornadas españolas de ingeniería de Costas y Puertos

Editora científica

M. Esther Gómez-Martín

Editorial Universitat Politècnica de València, 2025

www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6776_01_01_01

ISBN: 978-84-1396-251-1

DOI: <https://doi.org/10.4995/CyP.2025.677601>

© de los textos: los autores

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a edicion@editorial.upv.es



XVII Jornadas españolas de ingeniería de Costas y Puertos / Editorial Universitat Politècnica de València

Se permite la reutilización de los contenidos mediante la copia, distribución, exhibición y representación de la obra, así como la generación de obras derivadas siempre que se reconozca la autoría y se cite con la información bibliográfica completa. No se permite el uso comercial y las obras derivadas deberán distribuirse bajo la misma licencia que regula la obra original.



XVII JORNADAS ESPAÑOLAS DE INGENIERÍA DE

COSTAS Y PUERTOS

Eivissa, 8 y 9 de mayo del 2024

— PALACIO DE CONGRESOS - SANTA EULÀRIA DES RIU —

COMITÉS

Comité Permanente

Secretario Permanente: Raúl Medina Santamaría, Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria

Ana Patricia García Fletcher, Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar

Gonzalo Gómez Barquín, Puertos del Estado

M. Esther Gómez Martín, Universitat Politècnica de Valencia

José Manuel González Herrero, ACCIONA Ingeniería, S.A.

José María Grassa Garrido, CEDEX

Josep Ramon Medina Folgado, Universitat Politècnica de Valencia

Adolfo Uriarte Villalba, Dirección de Patrimonio Natural y Cambio Climático

Comité Organizador

Presidentes

Almudena Domínguez Garcés, Demarcación de Costas en Illes Balears

Javier Sanz Fernández, Autoridad Portuaria de Baleares

Vocales

Lluís Gomez-Pujol, Universitat de les Illes Balears

Sara Lobato Rubio, Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Illes Balears

Antonio Ginard López, Autoridad Portuaria de Baleares

Alejandro Orfila Förster, IMEDEA

Joaquín Tintoré Subirana, SOCIB

Ana Yáñez Chapinal, Demarcación de Costas en Illes Balears



XVII JORNADAS ESPAÑOLAS DE INGENIERÍA DE

COSTAS Y PUERTOS

Eivissa, 8 y 9 de mayo del 2024

— PALACIO DE CONGRESOS - SANTA EULÀRIA DES RIU —

TEMAS

Para el Comité Organizador Permanente de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, es un honor daros la bienvenida a la XVII edición, que tiene lugar en Ibiza los días 8 y 9 de mayo de 2024.

La gestión de las zonas costeras requiere de unos conocimientos técnicos cada vez más complejos de manera que se garantice la sostenibilidad de sus recursos. La planificación de los usos y recursos es, por lo tanto, una responsabilidad que comparten Administraciones públicas, Autoridades portuarias, Consultoras, Constructoras, Centros de I+D y Universidades.

Las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos que se celebran desde 1992 bienalmente, reúnen a los mejores expertos, nacionales e internacionales tanto de las universidades como de las administraciones y empresas. Se abordan, a través de ponencias y sesiones de posters, temas de máximo interés relacionados con las infraestructuras portuarias y con la gestión y protección del litoral.

Estamos seguros de que estas XVII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos serán un evento que todos recordaremos tanto por las novedades técnicas que se presentarán como por todas las personas que con sus comunicaciones, presentaciones y colaboraciones harán del mismo un hito inolvidable.

Bienvenidos a las XVII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos.

Clima marítimo y oceanografía física

Medio Ambiente, vertidos y calidad del agua marina

Obras y estructuras marítimas

Procesos litorales y actuaciones en la costa

Planificación y gestión de puertos

Gestión integrada del litoral y planificación espacial marina

Cambio climático y medidas de adaptación en puertos y costas

Energías renovables marinas



XVII JORNADAS ESPAÑOLAS DE INGENIERÍA DE

COSTAS Y PUERTOS

Eivissa, 8 y 9 de mayo del 2024

— PALACIO DE CONGRESOS - SANTA EULÀRIA DES RIU —

PROGRAMA

MIÉRCOLES 8 DE MAYO 2024

- 08:00h. Recogida de documentación
- 08:30-09:30h. Conferencia Inaugural. Homenaje a D. Miguel A. Losada Rodríguez
- 09:30-11:10h. **Sesión 1** (5 ponencias de 20' en 5 salas paralelas)
- 11:10-11:40h. Pausa Café
- 11:40-13:40h. **Sesión 2** (6 ponencias de 20' en 5 salas paralelas)
- 13:40-16:00h. Comida
- 16:00-17:40h. **Sesión 3** (5 ponencias de 20' en 5 salas paralelas)
- 17:40-18:00h. Pausa Café
- 18:00-19:00h. **Sesión 4** (3 ponencias de 20' en 5 salas paralelas)

JUEVES 9 DE MAYO 2024

- 09:00-11:00h. **Sesión 5** (6 ponencias de 20' en 5 salas paralelas)
- 11:00-11:30h. Pausa Café
- 11:30-13:30h. **Sesión 6** (6 ponencias de 20' en 5 salas paralelas)
- 13:30-14:00h. **Conferencia de Clausura. Entrega de premios**
- 14:00-16:00h. Comida
- 16:00-18:00h. **Visita Técnica. Puerto de Ibiza**

www.costasypuertos2024.com

ÍNDICE

Un manual para el control de obras de regeneración de playas	1
<i>Patricio Poulet, Antonio Contreras, Patricia López, Francisco Contreras, Pilar Díaz, Bismarck Jigena, Juan J. Muñoz</i>	
Solución innovadora para el refuerzo y profundización del muelle de la terminal de contenedores APMT para albergar la 2ª generación de portacontenedores Triple-E.....	12
<i>Pablo Sánchez, Pedro Vila, Lucas Herrero, Francesc Candel, Agnès Vila, Toni Cerra</i>	
Muelle de Raos 6. Pantalla de tablestacas en terrenos deformables con escasa capacidad portante	28
<i>Natividad Sánchez López, Santiago Carrillo Alonso, Rubén Suárez López, Christian Manrique Valdor, Daniel Zamora Serrano, José Manuel González Herrero</i>	
Proyecto de ejecución de un nuevo muelle de hidrocarburos en la Ría de Huelva- Muelle Sur (Tartessos).....	42
<i>Mª Piedad Herrera, Rodrigo Ortiz, Natalia Fernandez, Jesús Cáceres, Roberto Pillado</i>	
Daño por fatiga en las conexiones de diques flotantes modulares.....	51
<i>Alejandro Cebada Relea, Mario López Gallego, Manuel Aenlle López</i>	
Modelo de transferencia de viento a escala local: aplicación a la estación de Tarifa y la duna de Valdevaqueros	69
<i>Félix P. Martínez García, Antonio Contreras de Villar, Juan J. Muñoz Pérez</i>	
REBECOS: método numérico 3D para la construcción realista de diques.....	87
<i>Josep R. Medina, Jorge Molines, M. Esther Gómez-Martín</i>	
Valor característico de los parámetros geotécnicos en los métodos de fiabilidad. Aplicación al diseño del nuevo muelle en Nigg Bay-Escocia	98
<i>Alvaro Sanz de Ojeda, Manuel Jesús Bueno Aguado, Félix Escolano Sánchez</i>	
Sistema de monitorización de la calidad del aire y plataforma ambiental inteligente de la APB	119
<i>Jorge Martín Jiménez, Edurne Ibarrola-Ulzurrun, José Manuel Vellón Graña</i>	
Influencia del cambio climático en el oleaje de diseño. Aplicación a proyectos de ingeniería costera	121
<i>M. Velasco Carrau, J. M. Garrido Checa, M. Figueres Moreno, A. Pérez Bardal</i>	
Estudios de inundación de zonas costeras como consecuencia de la acción de temporales.....	135
<i>José Manuel de la Peña Olivas, José María Medina Villaverde</i>	
Ecosistemas marinos y costeros en el Reglamento de la Unión Europea sobre Restauración de la Naturaleza de 2024: una perspectiva jurídica.....	143
<i>Francisco Javier Sanz Larruga</i>	
Diseño de estructuras flotantes antirreflejantes de ecohormigón.....	158
<i>G. Argente Garrido, M. Velasco Carrau, M. Figueres Moreno, J. M. Garrido Checa</i>	

Integración de AI, ML y modelización numérica para el mantenimiento predictivo en diques de escollera: aplicación a la costa Cantábrica.....	172
<i>Mireia López Paredes, Corrado Altomare, Bonaventura Tagliafierro, Manuel Viñes, Xavier Gironella, Antonio Tomás, César Vidal, Iván Martínez-Estévez, José M. Domínguez, Alejandro Crespo, Moncho Gómez-Gesteira, Lohitzune Solabarrieta, Delia Regueira Muñiz, Manuel González, Mario Hernández, Agustín Sánchez-Arcilla</i>	
Almacenamiento de Hidrógeno Verde Offshore en plataformas marítimas tipo GBS en el marco del Proyecto OCEANH2	186
<i>José Manuel González Herrero, Natividad Sánchez López, Jon Martínez Fontecha, Daniel Zamora Serrano</i>	
Dispersión del material de descarga en el puerto de Santander	201
<i>María Jesús Martín, Alberto Rodríguez, Obdulio Serrano</i>	
Ingeniería marítima en tramos en los que el transporte transversal es predominante	211
<i>Leonardo Monzonís Forner, Fernando Pérez Burgos, María Josefa Solernou Sanz, Miguel Angel Aragón Babiloni, David Aragón Balague.</i>	
Pedagogía de la costa a ingenieros de agua dulce y secano	220
<i>Vicente Ibarra Damiá</i>	
Problemas y soluciones para el secado de muestras de arena en microondas.....	227
<i>Patricia Lopez-Garcia, Juan J. Muñoz-Perez, Antonio Contreras, Francisco Contreras, Jeanette Romero-Cozar, Pilar Diaz-Carrasco, Bismarck Jigena-Antelo</i>	
Los problemas del ábaco de James y una solución alternativa	244
<i>Enzo Pranzini, Giorgio Anfuso, Juan J. Muñoz</i>	
La gobernanza del litoral: ejemplo de aplicación en la desembocadura del río Bidasoa	250
<i>Cristina Maíllo Fernández, Juan Pérez Martínez</i>	
Nuevo dique exterior del puerto de Génova (Italia).....	260
<i>Elena Quevedo Baquerizo, Laia Ortego Valencia, Daniele Maroni, Antonio Lizzadro, Marco Vaccari</i>	
Infraestructura de conexión eléctrica a ferries en el muelle de Paraires, en el puerto de Palma	274
<i>Jorge Martín Jiménez, Borja Zamácola Feijoó</i>	
Control y erradicación de plantas exóticas invasoras: el caso de <i>Baccharis Halimifolia</i> en la costa asturiana.....	286
<i>Fernando de La Torre-Fernández, Miguel Á. Reyes-Merlo, Laura Fernández-Fernández, David Alonso-Medina</i>	
El proyecto de dragado y programa de vigilancia ambiental de la Ría de O Burgo	304
<i>Carlos Gil Villar, Rafael Eimil Apenela, Ricardo Babío-Arcay, Ana Lloret Capote, Miguel Nieto Matamoros, Antonio Durán Maciñeira, Victoriano de la Torre-Cancelo, José Antonio Martínez Prieto</i>	

Programa de vigilancia ambiental integral de las obras de estabilización de la playa en Premià de Mar (Maresme, Barcelona).....	316
<i>Ferran Vallespinós, Roberto Pillado, Asterio Recio, Ana María Castañeda</i>	
Adaptación costera frente al cambio climático: implementación de metodologías de inteligencia artificial con un enfoque probabilístico	328
<i>Nerea Portillo, Javier Olalde, Vicente Negro, Peter Troch</i>	
Análisis de tráfico marítimo en la demarcación levantino Balear y en la demarcación Marina Canaria Año 2022	337
<i>Marta S. Jiménez Saavedra, José María Grassa Garrido, Elvira M. García-Bellido</i>	
Proyecto “Bosque Marino Autoridad Portuaria de Cartagena. 2022-2025”	347
<i>Alberto Echeita Díez</i>	
Estudio para la resiliencia de zonas costeras en las provincias de Cádiz y Málaga, ante el desafío del cambio climático. Caso práctico playa de la Hierbabuena en Barbate (Cádiz)	349
<i>Antonio Contreras de Villar, Juan José Muñoz Pérez, Francisco Contreras de Villar, Juan Manuel Vidal, Cristina Pérez-Moreno, Jose Juan Alonso del Rosario, Cristina Torrecillas, Patricia López-García, Bismarck Jigena</i>	
Plataformas portuarias flotantes para la producción industrial de turbinas eólicas marinas.....	365
<i>Cristian Menéndez-Fernández, Alderic Blanc, Mario López</i>	
Evaluación del desplazamiento costero y la salud ecosistémica en la Bahía de Tumaco mediante Delft3D, CoastSat y aprendizaje automático	377
<i>Andrés M. Enríquez-Hidalgo, Andrés Vargas-Luna, Marc Mestres, Jorge Escobar-Vargas, Manuel Espino Infantes, Andrés Torres</i>	
Seguimiento de la calidad de las aguas y los sedimentos en una zona afectada por extracciones de arena para rellenos portuarios (Puerto de Bilbao)	390
<i>Raúl Castro, María Jesús Belzunce-Segarra, Javier Franco, Manuel González, Joana Larreta, Iratxe Menchaca, José Germán Rodríguez, Oihana Solaun</i>	
Aplicación de la visión por ordenador para un sistema de gestión de vertidos en puertos. El proyecto SPILLCONTROL.....	392
<i>Mariano Morell, Pedro Portau, Manuel Espino, Manel Grifoll, Carlos Garau</i>	
Estimación del campo de velocidades generadas por tsunamis con el software PIVlab	402
<i>Paula Dasí, Enrique Ripoll, Jorge Molines, Josep R. Medina, Colin Whittaker</i>	
Estudio del parámetro alternativo de similaridad modificado en fórmulas de remonte	410
<i>Miguel Santamaría, Fanny Baena-Ramírez, Ángel Molina-Salas, María Clavero, Antonio Moñino</i>	
Fracaso de una regeneración costera: caso del Portet de Moraira.....	417
<i>Ignacio Toledo Sepulcre, Luis Aragonés Pomares, Antonio José Tenza Abril</i>	

Un manual para el control de obras de regeneración de playas

Patricio Poulet^a, Antonio Contreras^b, Patricia Lopez^b, Francisco Contreras^b, Pilar Díaz^b, Bismarck Jigena^b y Juan J. Muñoz^b

^aDemarcación de Costas de Andalucía Atlántico, Marianista Cubillo 7, 11071, Cádiz ppoulet@miteco.es

^bGrupo de investigación de Ingeniería Costera, Universidad de Cadiz, Antonio.contreras@uca.es, Patricia.lopez@uca.es, Francisco.contreras@uca.es, Pilar.diaz@uca.es, Bismarck.jigena@uca.es, juanjose.munoz@uca.es

How to cite: Poulet, P., Contreras-de-Villar, A., Lopez-García, P., Contreras-de-Villar, F., Diaz-Carrasco, P., Jigena-Antelo, B., & Muñoz-Perez, J.J. (2024). Un manual para el control de obras de regeneración de playas. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

The necessity of a Manual for the control of beach nourishment works is established, and a detailed and justified list of the points that should be included is presented. Additionally, the link to the online location where anyone can check a comprehensive copy of said manual and download it for free is provided.

The Manual is designed to help novice technicians when carrying out this type of maritime works. However, it is not considered exhaustive and professionals from various sectors (administrations, construction and consulting firms, universities, stakeholders and end-users) are encouraged to criticize it. Their shared experiences and suggestions are more than welcome. Moreover, their respective contributions will help to improve and modify the document.

Keywords: Beach nourishment, maritime works, control, dredges, monitoring

Resumen

Se establece la necesidad de un Manual para el control de las obras de regeneración de playas y se presenta una lista detallada y justificada de los puntos que deben incluirse. Además, se proporciona el enlace on-line donde cualquier persona puede consultar una copia completa del borrador de dicho manual y descargarlo de forma gratuita.

El Manual está diseñado para ayudar a los técnicos noveles a la hora de realizar este tipo de obras marítimas. Sin embargo, no se considera exhaustivo y se anima a profesionales de diversos sectores (administraciones, empresas constructoras y consultoras, universidades, partes interesadas y usuarios finales) a que lo critiquen. Sus experiencias y sugerencias compartidas son más que bienvenidas. Además, sus respectivas contribuciones ayudarán a mejorar y modificar el documento.

Palabras clave: regeneración de playas, obras marítimas, control, dragas, seguimiento.

1. Introducción

Las obras de Regeneración de Playas (RdP) gozan de unas características especiales que implican una gran especialización de las tareas de control de las mismas. Desde el dragado del placer de arena que no debe realizarse fuera de la zona autorizada hasta el vertido en zonas acotadas en la playa, pasando por la medición en cántara y el análisis de la granulometría de las arenas durante el trayecto desde un punto a otro. Igualmente, dado que la regeneración suele compatibilizarse con el disfrute vacacional de los usuarios de la playa, deben tenerse en cuenta medidas de seguridad específicas diferentes en gran medida de las de otros tipos de obra civil. Todo ello justifica la elaboración de un manual cuyo objetivo sea la redacción de una guía para el control de obras de dragado para RdP.

No se trata de abordar los trabajos de diseño o proyecto de una RdP, o los de seguimiento de la evolución de la playa tras su regeneración. Para ello existen ya algunos textos (nunca completos del todo) sobre el tema. Sin ánimo exhaustivo podríamos indicar por ejemplo el libro de Dean (2003), los manuales del USACE (1984, 2002) o del CUR (1987), o algunas directivas del Ministerio de Medio Ambiente (2008, 2010), hoy MITECO.

El trabajo propuesto consiste en una descripción de los aspectos teóricos a tener en cuenta en el control cuantitativo y cualitativo durante la obra, complementada con explicaciones prácticas y anejos con la documentación a utilizar. Aunque en los últimos tiempos no se hayan realizado muchas regeneraciones de playas, sí se ha seguido investigando. Baste como ejemplo la variabilidad de la granulometría dentro de la cántara o la influencia de los diferentes sistemas de tamizado (Poullet et al., 2019a, 2019b). Todo ello sin quitar la gran experiencia acumulada durante casi 40 años. En esta época de transferencia del conocimiento, los que hemos tenido la ventura de participar en este tipo de obras, deberíamos poner por escrito ese saber hacer, ese know-how y pasarlo a las nuevas generaciones. Ese conocimiento debe incluir diferentes puntos de vista. No sólo el *savoir faire* del empresario dragador/constructor sino el de los técnicos de las Administraciones competentes, así como consultores y académicos.

2. Objetivos

Por todo lo comentado previamente, se presenta en este foro un primer documento borrador cuyo objetivo es proporcionar un texto de partida, base de discusión y, por supuesto, susceptible de complementos y mejoras. Entre los puntos a tratar, destacamos:

- Tareas de control en el buque (Equipo de dragado, Posicionamiento, Mediciones de la cántara, Partes de carga, Metodología del muestreo, análisis granulométrico a bordo, Informes, Rendimientos y plazos de ejecución...)
- Tareas de control en playa (zonas de vertido, recolocación de arena, riesgos y medidas de seguridad, vigilancia arqueológica y ambiental...)
- Monitorización de los trabajos, material necesario para el control, estadillos...

A lo largo de las páginas siguientes, desglosaremos estos puntos. Dado que la extensión está limitada aquí, sólo se presenta un índice detallado. Aquellos profesionales interesados en el tema pueden consultar el borrador de manual completo en Poullet et al. (2024). Se trata de un documento abierto por lo que rogamos que aquellas ideas que piensen que complementarían o mejorarían el manual se remitan por email a cualquiera de los autores de esta ponencia para su consideración y posterior inclusión.

3. Desarrollo del documento

3.1 Tareas de control en el buque

3.1.1 Equipo de dragado

Introducción de las dragas autoportantes de succión en marcha y de los factores que influyen en su selección: la capacidad de cántara junto con las limitaciones por calado, el plazo de ejecución, la disponibilidad, o el sistema de vertido (bombeo, cañón o fondo). Deben de considerarse también las limitaciones de esta metodología como oleaje y batimetría para evitar que el equipo sufra daños. Asimismo, para posibilitar el transporte del sedimento por tubería, se precisa convertirlo en un fluido. Los porcentajes de arena y agua permiten al dragador optimizar el rendimiento (Fig. 1)



Fig. 1. Vista de una draga de succión en marcha con el brazo extendido (izq.) y del vertido de la mezcla de arena y agua en la playa (der.)

3.1.2 Posicionamiento del buque durante el dragado

En primer lugar, se estudia y establece la zona idónea de dónde extraer la arena adecuada para la regeneración de playa. Después de balizar la zona, se obtienen los permisos pertinentes de extracción de las Administraciones competentes. Así, es imprescindible el comprobar que se drague en todo momento dentro del polígono asignado, dado que dragar fuera de esta zona podría resultar tanto en la extracción de una arena poco adecuada como en una denuncia ambiental. En ese caso, habría que verter la arena en un vertedero autorizado, no en cualquier sitio, con la consiguiente pérdida económica y de tiempo.

Existen sistemas de control independientes del propio de la draga para garantizar la independencia de los datos de posicionamiento. Uno de ellos, donde se comprueba en continuo la situación de la draga, se define en el borrador del Manual (Fig. 2).



Fig. 2. Ejemplo de la ruta seguida por una draga durante el dragado en la zona de préstamo

3.1.3 Mediciones de la cántara de la draga. Partes de carga

La metodología que se sigue para medir el volumen de arena que hay en cada cántara consiste en medir las alturas de vacío utilizando un escandallo unido por un extremo a un peso con forma plana. Esta forma plana permite su apoyo sobre la superficie y evita su penetración. El número mínimo de alturas de vacío es de cuatro a babor y cuatro a estribor.

El volumen en cántara correspondiente a cada altura media se consulta en la tabla de arqueo (o ullage chart) de la draga que debe ser comprobada por el controlador. En un parte para cada cántara (Figura 3), se anotan las alturas de vacío, su media y el volumen de arena en cántara que corresponda. Una vez relleno el parte, se le pide al representante del contratista que lo firme y lo selle. Inmediatamente después se le remite al Ingeniero Director en tierra. El proceso detallado, con los estadillos a utilizar y con un ejemplo práctico puede consultarse en el Manual (Poullet et al., 2024).

Un sistema portátil de control del peso real de la arena contenida en la cántara, diferenciándola del peso del agua, fue desarrollado por Muñoz-Pérez et al. (2003) y comprobado en un caso real, resultando una diferencia de medición con respecto a la relación valorada de alrededor del 5%.

Regeneración de la Playa de *Sancti Spiritus*
T.M. de *La Piedad*

VIAJE N°	2 / 16/2018
FECHA	8 / 16 / 2018
COORDENADAS INICIO	N 36° 11' 20.5"
	W 6° 47' 31.7"
COORDENADAS FIN	N 36° 11' 03.13"
	W 6° 47' 31.5"
HORAS DE DRAGADO	1h 30m
COORDENADAS DESCARGA	N 36° 25' 24.4"
	W 6° 17' 28.7"

CUBICACIÓN DE LA ARENA EN CÁNTARA

Alturas de vacío	
1	0.73
2	0.54
3	0.46
4	0.25
5	0.25
6	0.17
7	0.67
8	0.45 / 0.96
9	0.45 / 0.46
Media	0.54
Volumen de arena en cántara	19.8730 m ³

Observaciones:

El representante del contratista



El controlador del dragado



Fig. 3. Ejemplo de estadillo de medición de una cántara

3.1.4 Metodología del muestreo en la cántara de la draga

Durante los dragados realizados para efectuar regeneraciones de playas, es imprescindible la realización a bordo de ensayos granulométricos de la arena acumulada en la cántara del buque. Parámetros como la mediana (el D50) y la desviación típica (σ) son imprescindibles para comprobar si la arena de préstamo es adecuada para sustituir a la nativa perdida debido a la erosión (James, 1975; Pranzini et al., 2018) o para estimar el volumen de arena preciso para la regeneración de una playa (USACE, 2002). Por tanto, se necesita una rápida obtención de los parámetros granulométricos de manera que se puedan dar los resultados al Ingeniero Director, para que éste pueda tomar decisiones sobre la ubicación de los vertidos.

La realización de granulometrías a bordo de los buques dragadores sufre determinadas limitaciones, como son las de espacio, material disponible, aceleraciones del buque, variaciones de la tensión eléctrica, y tiempo. Es por ello que, a diferencia de los laboratorios en tierra, los tamizados suelen realizarse de forma manual en vez de con tamizadora mecánica, secado en microondas en vez de mufla, y con tamices de diámetro inferior al habitual (10 cm en vez de 20 cm). Para considerar la importancia y repercusión de cada una de estas “simplificaciones” debe acudir a bibliografía especializada que se incluye en el anejo correspondiente. Más en concreto, Poulet et al. 2019a, Lopez-García et al. 2024, y Lopez-García et al. 2021, respectivamente.

Una vez terminado el dragado, y con el permiso del capitán, se baja a la cántara a tomar una muestra de arena, desaconsejándose el uso de la cuchara Van Veen.

En principio, basta con una muestra por cada cántara, puesto que se ha observado que hay una gran homogeneidad en toda la superficie de la cántara (Pouillet et al., 2019a). Sin embargo, se ha demostrado que el tamaño del grano crece con la profundidad (Pouillet et al., 2019b).

Mejor sería tomar la muestra directamente con una pala desde la superficie puesto que ello nos permitiría eliminar la primera capa externa de conchas. Apartando los dos primeros cm es suficiente.

3.1.5 Metodología del análisis granulométrico a bordo

A continuación, se procede a realizar la granulometría siguiendo por ejemplo el procedimiento descrito por Román-Sierra et al. (2013). Los pasos a seguir pueden encontrarse en el Manual (.....).

Para el secado de la muestra en microondas, puede acudirse a la bibliografía (López-García et al., 2024). Para el pesaje se utiliza una balanza romana de tres brazos previamente calibrada a bordo de la draga. No puede utilizarse ningún tipo de dinamómetro dadas las aceleraciones que experimenta el buque producidas por el oleaje. Para una mayor comprensión del proceso, ver <https://www.youtube.com/watch?v=LG8aVCZNk0>. En cuanto al diámetro de los tamices, al tamaño de su malla, al tiempo de tamizado y al error cometido por el tamizado manual frente al mecánico, acúdase al Manual (Pouillet et al., 2024) o a López-García et al. (2021). También es conveniente estimar visualmente el porcentaje de conchas que quedan en los tamices de mallado de 2 y 1 mm.

Una vez obtenidos los pesos de todos los tamices, se introducen los datos en una hoja Excel que nos permitirá calcular el D50 de cada muestra, con y sin conchas, obteniendo una plantilla como la que puede apreciarse en la Figura 4, realizada con el programa desarrollado por el Grupo de Investigación Costera de la Universidad de Cádiz. También puede utilizarse algún otro tipo de software libre como el GRADISTAT (Blott and Pye, 2001).

3.1.6 Informes de resultados

Todos los datos son almacenados en el ordenador y en un repositorio virtual por internet (google drive por ejemplo) para el acceso a éstos del personal autorizado desde cualquier dispositivo. Las muestras se guardan en bolsas de plástico etiquetadas para llevarlas a tierra (Figura 2.11). Los datos, que se escribirán con rotulador indeleble, incluirán el día, la hora, el número de la cántara o del viaje, y los nombres de la draga y de la playa donde se ha vertido la arena. El D50 de cada muestra y el porcentaje de conchas se comunican al responsable de la obra en tierra inmediatamente después de obtenerse. Para un control continuo de cómo va la regeneración, se realiza una tabla resumen que se va actualizando con los resultados de cada carga de cántara.

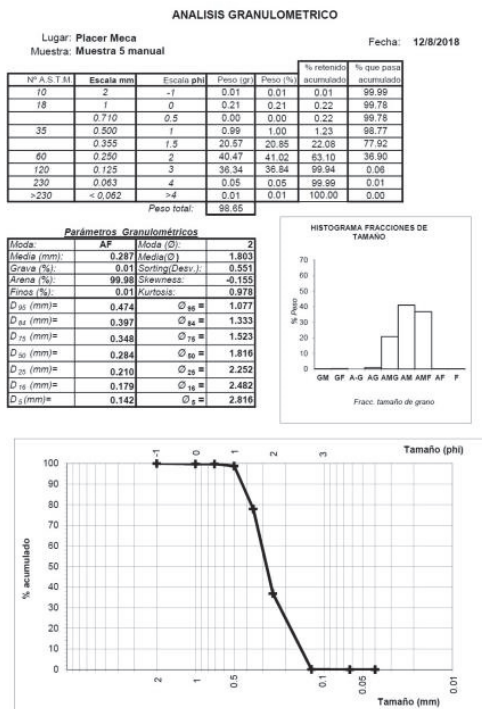


Fig. 4. Hoja de cálculo de los parámetros granulométricos

3.1.7 Rendimientos y plazos de ejecución

Se anota la duración de los ciclos de dragado-transporte-vertido-regreso para estimar la duración real aproximada de la obra. Igualmente, se apuntan los incidentes que paralizen el dragado. Ejemplos prácticos pueden consultarse en Manual (Poulet et al., 2024).

3.2 Tareas de control en playa

3.2.1 Coordinación/elección zonas de vertido

En el caso hipotético de que una cántara tenga un tamaño de arena inferior al compatible con la arena nativa de la playa, el Ingeniero Director puede optar entre su desecho a vertedero autorizado o en la propia playa. El punto de vertido autorizado por Capitanía Marítima suele estar relativamente lejos y a una profundidad considerable por lo que sólo se utiliza cuando el porcentaje de fangos o limos es superior a lo que la Administración considere aceptable en cada caso particular. En otro caso, suele verse en la playa, pero intentando hacerlo a una cota tal que pueda enterrarse con arena de calidad superior procedente de cántaras posteriores.

3.2.2 Recolocación de arena por la playa

Recordemos que, en la fase de diseño y proyecto, se calculó una dotación de arena (m^3/ml) mediante la comparación del perfil actual del momento con el perfil teórico de Dean desplazado una distancia horizontal a la altura de la pleamar o de la playa seca. Una dotación del orden de pocas veces (3 a 4) la erosión anual puede conducir a tasas de erosión inferiores a las de grandes regeneraciones (Muñoz-Perez et al., 2001).

Las ventajas (mayor acumulación de sedimento en la parte aérea) y desventajas (mayor coste por extendido) del uso del caballón en el vertido en playa se detallan en el Manual (Poullet et al., 2024).

3.2.3 Riesgos y medidas de seguridad

Además de los riesgos generales inherentes a cualquier obra civil, existen otros muy específicos derivados de las características de este tipo de obras. Entre estos últimos cabe destacar el fenómeno conocido como arenas movedizas. Tanto el proceso físico de hundimiento como las medidas de seguridad a adoptar se muestran en el manual.

3.2.4 Vigilancia arqueológica y de impacto ambiental

En lugares donde se prevea la aparición de restos arqueológicos, el contratista con el apoyo de la Dirección de obra presentará un plan de vigilancia de acuerdo a las instrucciones recibidas de la Consejería de Cultura de la respectiva comunidad autónoma (visitas esporádicas o a tiempo completo tanto en la playa como a bordo de la draga, colocación de reja desbastadora, ubicación de mallas para tamizar en la zona de vertido, ...). Estos costes pueden llegar a ser de tanta consideración que precisan habitualmente de una partida específica en el presupuesto del proyecto (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

De modo similar a la vigilancia arqueológica, también se llevará a cabo una tutela ambiental para observar el cumplimiento de las medidas dictadas en el proyecto para la protección del medio ambiente (protectoras, cautelares y/o compensatorias).

Aunque, en algunos casos particulares, se ha demostrado que la turbidez del agua producida por el dragado (Figura 5) tiene una duración inferior a los 10 minutos (Román-Sierra et al., 2011) con escasas o nulas consecuencias, conviene monitorizar el medio marino para disponer de datos con los que responder a posibles denuncias.

La autorización en su caso de Medio Ambiente (Estatal y Autonómica) suele contemplar un estudio previo y otro final tanto de la zona de dragado como de vertido. Obviamente, este tipo de trabajos debe de llevarlo a cabo una empresa (pública/académica o privada) con la suficiente experiencia y credibilidad por parte de todos los sectores.



Fig. 5. *Vista aérea de la pluma de turbidez generada por una draga (Román-Sierra et al., 2011)*

3.3 Monitorización antes, durante y después de la RdP

3.3.1 Muestreos de arena en la playa

En primer lugar, consideramos una serie de perfiles transversales cuyo número será función de la longitud de la playa y de su posible heterogeneidad. Una regla general es una equidistancia de 500 metros entre perfiles, con un número mínimo de tres, en los extremos y el centro de la playa. Una vez estudiada la heterogeneidad longitudinal de la arena tras dos campañas estacionales (verano e invierno), puede estudiarse la reducción de perfiles.

Los diferentes puntos de la superficie en los que se tomarán las muestras a lo largo del perfil de playa serán: playa seca, zona intermareal, bajamar y playa sumergida. Las muestras en la zona sumergida deberían de ser dos como mínimo incluyendo las barras en la rompiente y algo más lejos pero siempre antes de la profundidad de cierre. Se recomiendan los servicios de un buzo, admitiendo una cuchara Van Veen siempre y cuando se tenga en cuenta su problemática (la pérdida de finos y el excesivo porcentaje en conchas, que redundan en un D50 ficticio superior). Igualmente, en tierra, deberá de eliminarse la capa superficial de conchuela.

3.3.2 Muestreos de arena del préstamo o placer

Al igual que en la parte sumergida del perfil de playa, en la zona de préstamo también es preferible la toma por un buzo. Para el número de muestras a tomar, puede usarse el criterio definido por el CEDEX (1994, 2021)

3.3.3 Metodología del análisis granulométrico en laboratorio de tierra

La metodología utilizada para el estudio granulométrico de las muestras de las playas nativas es la general descrita por Syvitski (1991), adaptada para arena de playas por Román-Sierra (2013).

Los detalles de tiempo de secado, pesado de muestras, tamizado, pesado, conservación, etc. se caracterizan en el Manual (Poulet et al., 2024). Por otra parte, la metodología recomendada para el seguimiento granulométrico, aunque no sencilla, puede observarse en Santos-Vendoiro (2021).

3.3.4 Levantamiento perfiles de playa topo-batimétricos

Aunque la medición del volumen de arena dragado se realiza a bordo del buque (incluyendo un parte firmado por ambas partes para evitar discusiones en la posterior relación valorada, apartado 3.1.3), es conveniente realizar levantamientos topo-batimétricos antes y después de la regeneración para comparar volúmenes, estudiar pendientes naturales y antrópicas, y coleccionar datos para un posterior seguimiento. En el Manual (Poulet et al., 2024) se recomiendan la distancia entre perfiles transversales, la profundidad de las batimetrías y su periodicidad, sistemas para detectar errores, precisiones en la medición, zonas de solape, nivel de referencia, etc. Para determinar la equidistancia óptima desde el punto de vista económico para un error admisible determinado, puede seguirse el método expuesto por Muñoz-Pérez et al. (2012) para el que se precisa una única batimetría.

En cuanto al uso de drones para el levantamiento de la parte aérea de la playa, Contreras et al. (2020) han estudiado los problemas inherentes y posibles soluciones, exponiendo una metodología para la elección adecuada de todos los parámetros intervinientes (la altura del vuelo, los solapes transversales y longitudinales de la fotogrametría, y el número adecuado de puntos de apoyo en tierra).

3.4 Listado de material necesario para el control. Asesoramiento para su compra

En el Manual se concreta el material mínimo necesario tanto a bordo de la draga, como en el laboratorio en tierra y la toma de muestras en la playa.

3.5 Anexos

En los anexos del manual (Pouillet et al., 2024) se adjunta un modelo tipo de Pliego de prescripciones técnicas sobre el que trabajar para adaptarlo a cada proyecto en particular de RdP, un cuadro de precios unitarios para el control de obras de RdP, así como estadillos tipo para los partes de carga y uso de la tabla de arqueo.

Conclusiones

Tras establecer la necesidad de un manual de control de obras de RdP, se presenta un índice detallado y justificado de los puntos que debería de incluir. Además, se indica la dirección online donde consultar un borrador extenso de dicho Manual y bajar el documento de manera gratuita.

El Manual está diseñado para el uso de técnicos noveles en este tipo de obras. Sin embargo, no se considera completo y se anima a los profesionales de los distintos sectores (Administraciones, Empresas constructoras y consultoras, y Universidades) a compartir su experiencia, planteando dudas y críticas constructivas, que acompañadas de sus respectivas aportaciones sirvan para la modificación y mejora del documento.

Referencias bibliográficas

- BLOTT, S. J., & PYE, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- CEDEX (1994). Recomendaciones para la gestión del material dragado en los puertos españoles (RGMD).
- CEDEX (2021). Directrices para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo-terrestre. Comisión Interministerial de Estrategias Marinas.
- CONTRERAS-DE-VILLAR, F., GARCÍA, F. J., MUÑOZ-PEREZ, J. J., CONTRERAS-DE-VILLAR, A., RUIZ-ORTIZ, V., LOPEZ, P. & JIGENA, B. (2020). Beach leveling using a Remotely Piloted Aircraft System (RPAS): problems and solutions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1),19.
- CUR (1987). Manual on artificial beach nourishment. Centre for Civil Research Codes and Specifications, Recommendation report 130. Rijkswaterstaat/Delft Hydraulics (The Netherlands)
- DEAN R.G. (2003). Beach Nourishment: Theory and Practice. Advanced Series on Ocean Engineering no.18, World Scientific Pub. <https://doi.org/10.1142/2160> |
- JAMES, W. R. (1975). Techniques in evaluating suitability of borrow material for beach nourishment (No. 60). US Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center.
- LOPEZ-GARCIA, P., MUÑOZ-PEREZ, J. J., CONTRERAS, A., VIDAL, J., JIGENA, B., SANTOS, J. J., & CONTRERAS, F. (2021). Error on the Estimation of Sand Size Parameters When Using Small Diameter Sieves and a Solution. *Frontiers in Marine Science*, 8, 738479.
- LOPEZ-GARCIA, P., MUÑOZ-PEREZ, J. J., CONTRERAS, A., JIGENA, B., & CONTRERAS, F. (2024). Microwave sand drying method before sieving to reach accuracy on sand size parameters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 370.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2008). Directrices sobre actuaciones en playas. www.miteco.gob.es/en/costas/publicaciones.html

- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO (2010). Instrucción técnica para la gestión ambiental de las extracciones marinas para la obtención de arena. Disponible en www.miteco.gob.es/en/costas/publicaciones.html
- MUÑOZ-PEREZ, J.J., LÓPEZ, B., GUTIERREZ-MAS, J.M., MORENO, L., & CUENA, G.J. (2001). Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Coastal Engineering*, 42(2), 143-153.
- MUÑOZ-PEREZ, J.J., GUTIÉRREZ-MAS, J. M., MORENO, J., ESPAÑOL, L., MORENO, L., & BERNABEU, A. (2003). Portable meter system for dry weight control in dredging hoppers. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 129(2), 79-85.
- MUÑOZ-PEREZ, J.J., PAYO, A., ROMAN-SIERRA, J., NAVARRO, M., & MORENO, L. (2012). Optimization of beach profile spacing: An applicable tool for coastal monitoring. *Scientia Marina*, 76(4), 791-798.
- POULLET, P., MUÑOZ-PEREZ, J.J., POORTVLIET, G., MERA, J., CONTRERAS, A., & LOPEZ, P. (2019a). Influence of different sieving methods on estimation of sand size parameters. *Water*, 11(5), 879.
- POULLET, P., MUÑOZ-PEREZ, J.J., LOPEZ, P., GARCÍA-LOPEZ, S., MARTELL, R., SILVA, R., & MORENO, L. (2019b). Sand size variability inside the hopper of a trailing suction dredger for beach nourishment purposes. *Geo-Marine Letters*, 39, 513-520.
- POULLET P., CONTRERAS A., CONTRERAS F., DIAZ P., LOPEZ P., JIGENA B. y MUÑOZ J.J. (2024). Manual para el Control de Obras de Regeneración de Playas. Repositorio Universidad de Cadiz. <http://hdl.handle.net/10498/33888>
- PRANZINI, E., ANFUSO, G., & MUÑOZ-PEREZ, J.J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, 139, 32-35.
- ROMAN-SIERRA, J., NAVARRO, M., MUÑOZ-PEREZ, J.J., & GOMEZ-PINA, G. (2011). Turbidity and other effects resulting from Trafalgar sandbank dredging and Palmar beach nourishment. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 137(6), 332-343.
- ROMÁN-SIERRA, J., MUÑOZ-PEREZ, J.J., & NAVARRO-PONS, M. (2013). Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology*, 60(6), 1484-1497.
- SANTOS-VENDOIRO, J.J., MUÑOZ-PEREZ, J. J., LOPEZ-GARCÍA, P., JODAR, J.M., MERA, J., CONTRERAS, A. & JIGENA, B. (2021). Evolution of Sediment Parameters after a Beach Nourishment. *Land*, 10(9), 914.
- SYVITSKI, J. P. (Ed.). (1991). Principles, methods, and application of particle size analysis (Vol. 388). Cambridge: Cambridge University Press.
- USACE (1984). US Army Engineer Waterways Experiment Station. Coastal Engineering Research Center. Shore Protection Manual. US Government Printing Office.
- USACE (2002). Coastal Engineering Manual. EM 1110-2-1100, www.publications.usace.army.mil

Solución innovadora para el refuerzo y profundización del muelle de la terminal de contenedores APMT para albergar la 2ª generación de portacontenedores Triple-E

Innovative quay wall upgrade to operate 2nd-generation triple-E containerships at Barcelona's APM terminal

Pablo Sánchez^a, Pedro Vila^b, Lucas Herrero^a, Francesc Candel^a, Agnès Vila^a y Toni Cerra^a

^aDept. de Puertos, TYLin EU/Latam, pablo.sanchez@tylin.com

^bAPM Terminals Spain Gateways, pedro.vila@apmterminals.com

How to cite: Sanchez, P.; Vila, P.; Herrero, L.; Candel, F.; Vila, A. & Cerra, T. (2024). Solución innovadora para el refuerzo y profundización del muelle de la terminal de contenedores APMT para albergar la 2ª generación de portacontenedores Triple-E. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

This paper addresses the challenges faced by existing harbours in adapting to the evolving dimensions of next-generation containerships, particularly the increased draught and beam. Focused on the Port of Barcelona, the project aims to reinforce and deepen 1,000 meters of an existing quay, allowing it to accommodate one of the world's largest containerships (20,568 TEU), and larger STS cranes that ensure their compatibility with the vessel's increased beam. The innovative solution involves passing piles through the quay's caissons, connecting them with a cope beam, and therefore enabling dredging at the quayside for greater draught. The stability improvement is achieved through pile design providing shear and flexural resistance and redirecting operational loads to deep dense sands. A 3D geotechnical-structural finite element model analyses the entire design, considering interfaces, pile geometry, and elastic-plastic resistance. Constructability is assessed through field surveys and piling tests. The results confirm that the proposed piles effectively distribute vessel and crane loads to the foundation, ensuring overall geotechnical stability. The innovative vertical deepening solution preserves the quay's alignment, maximizing crane reach and allowing use of existing cranes, resulting in cost savings. Additionally, the proposal includes the electrification of the dock through Onshore Power Supply (OPS).

Keywords: quay wall, dredging, deepening, piles, innovative solution.

Resumen

Este documento aborda los retos a los que se enfrentan los puertos existentes para adaptarse a la evolución de las dimensiones de los portacontenedores de nueva generación, en particular el aumento del calado y la manga. Centrado en el Puerto de Barcelona, el proyecto pretende reforzar y profundizar 1.000 metros de un muelle existente, permitiéndole acoger uno de los portacontenedores más grandes del mundo

(20.568 TEU), y grúas STS más grandes que garanticen su compatibilidad con la mayor manga del buque. La solución innovadora consiste en ejecutar pilotes a través de los cajones del muelle, conectándolos con una viga, y permitiendo así el dragado en el muelle para conseguir mayor calado. La mejora de la estabilidad se consigue mediante los citados pilotes, que proporcionan resistencia a cortante y a la flexión y redirigen las cargas operativas a las arenas densas profundas. Un modelo de elementos finitos geotécnico-estructural en 3D analiza todo el diseño, teniendo en cuenta las interfaces, la geometría de los pilotes y la resistencia elástico-plástica. La constructibilidad se evalúa mediante estudios de campo y pruebas de pilotaje. Los resultados confirman que los pilotes propuestos distribuyen eficazmente las cargas del buque y la grúa a la cimentación, garantizando la estabilidad geotécnica global. La solución innovadora de profundización vertical preserva la alineación del muelle, maximizando el alcance de la grúa y permitiendo el uso de las grúas existentes, con el consiguiente ahorro de costes. Además, la propuesta incluye la electrificación del muelle mediante suministro eléctrico en tierra (OPS) para conectar los buques a la red eléctrica terrestre durante su estancia en puerto.

Palabras clave: muelle, dragado, profundización, pilotes, solución innovadora.

1. Introducción

El muelle objeto de estudio forma parte de la terminal de contenedores de APMT Barcelona. Con una longitud de 1.161 m, está compuesto por tres tipos de cajones con geometrías y calados diversos. Esta heterogeneidad se deriva del crecimiento orgánico de la terminal. Así, la primera alineación (Tramo 1), construida en 1986, tiene una longitud de 469 m y está formada por cajones cimentados a 14 m por debajo del nivel del mar y de 22 m de eslora. El segundo (Tramo 3A), finalizado en 1994, tiene una longitud de 594 m y está constituido por cajones de aproximadamente 25 m de eslora y cimentados a -16 m. Finalmente, en 2012, el muelle se amplió en casi 100 m con un tercer tramo (Tramo 3B) construido mediante cajones de 30 m de eslora, también cimentados a -16 m (Figura 1).

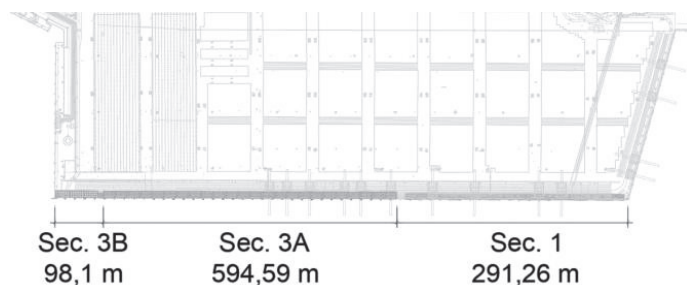


Fig. 1. Planta de la terminal y descripción de las secciones actuales. Fuente: Sánchez P. et al. [4]

El proyecto pretende cumplir los objetivos de APMT de profundizar el calado del muelle, mejorar y reforzar sus instalaciones para dar servicio a las nuevas generaciones de portacontenedores y soportar las cargas de las nuevas grúas STS necesarias para la carga y descarga de estos buques. En concreto, el objetivo del proyecto es alcanzar un calado nominal de -15,00 m en la sección 1 (S1) y de -17,00 m en las secciones 3A y 3B (S3A y S3B).

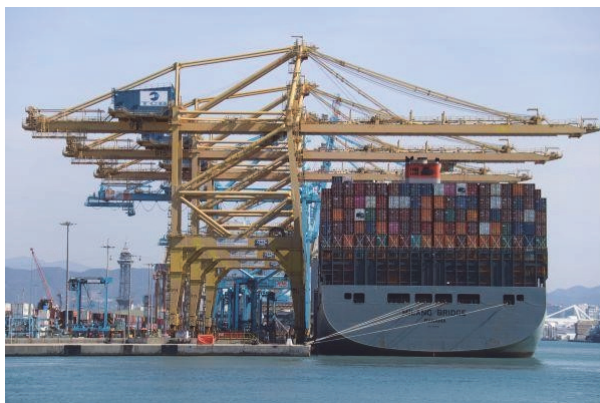


Fig. 2. Operativa de la terminal de APMT Barcelona. Fuente: Martí, A. (2022)

Dado el bajo nivel de seguridad actual del muelle en las condiciones de trabajo existentes y la necesidad imperiosa de profundizar el muelle e instalar nuevas grúas, es esencial aplicar medidas de refuerzo de la cimentación para garantizar su estabilidad geotécnica hasta un nivel de seguridad adecuado.

2. Objetivos

En fases anteriores del proyecto, se realizó un amplio estudio de alternativas, identificando la solución de refuerzo más adecuada, muy influenciada por aspectos constructivos y de control de ejecución. Como resultado, la alternativa seleccionada propone estabilizar y reforzar el muelle mediante la ejecución de pilotes a través de las celdas de cajones, refuerzo que permitirá el posterior dragado del muelle.

Se instalará un pilote en el interior de cada celda de la primera fila de celdas de cajones a lo largo de todo el muelle. Además, en S1, debido a su antigüedad y mal estado, es necesario añadir una segunda línea de pilotes en la fila de celdas del lado de tierra. En ambos casos, los pilotes se conectan a través de la viga cantil. La optimización de esta estructura ha derivado en una solución basada en pilotes cimentados a -27 m, con diámetros de 1,20 m en S1 y 1,50 m en S3A y S3B (Figura 3 y Figura 4).

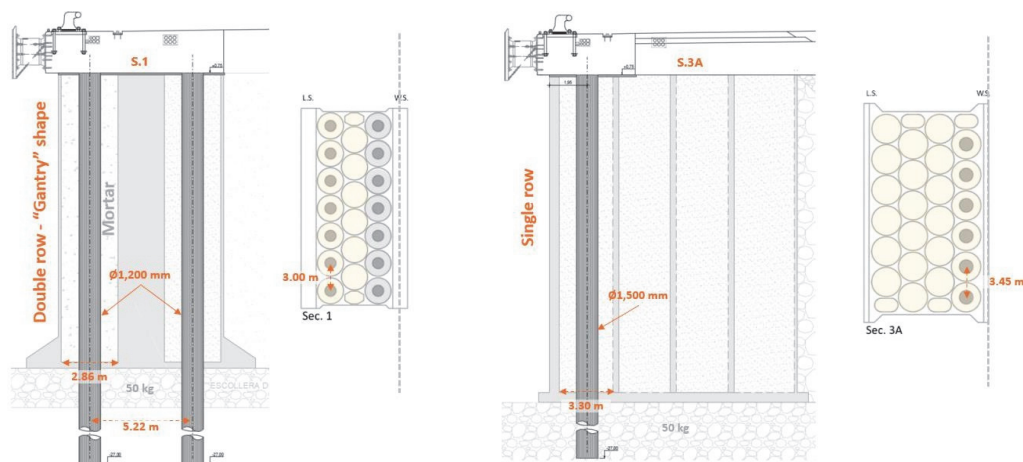


Fig. 3. Sección tipo de la solución diseñada para S1 (izquierda) y S3A (derecha). Fuente: Sánchez P. et al. [4]

Solución innovadora para el refuerzo y profundización del muelle de la terminal de contenedores APMT para albergar la 2ª generación de portacontenedores Triple-E

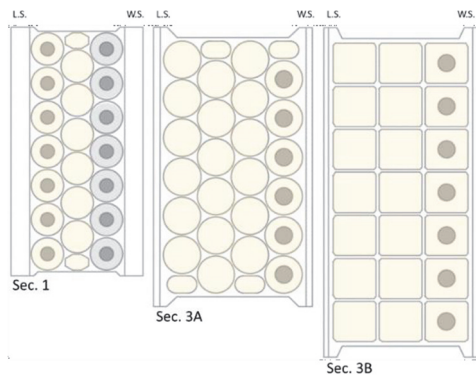


Fig. 4. Distribución de los pilotes en los cajones de S1, S3A y S3B (de izquierda a derecha). El color gris indica las celdas rellenas de mortero, mientras que el tono amarillo claro denota las celdas rellenas de arena. Fuente: Sánchez P. et al. [4].

Aunque los pilotes suelen ser estructuras de cimentación profunda diseñadas para transmitir cargas verticales al terreno portante, en este caso concreto su función principal es diferente. Los pilotes de la solución propuesta tienen como objetivo interceptar y mitigar las superficies de rotura geotécnica bajo los cajones. Por lo tanto, su diseño debe garantizar la resistencia a los esfuerzos de flexión, axiales y cortantes generados por este fallo geotécnico. Además, los pilotes deben resistir los modos de fallo típicos asociados a estos elementos, que se abordan en el proyecto. Sin embargo, su diseño se adaptará específicamente para cumplir la condición de estado límite último geotécnico antes mencionada.

Adicionalmente, los pilotes cumplen un propósito secundario, más convencional: transfieren una parte de las cargas verticales hacia las arenas densas situadas en profundidad, con el objetivo de minimizar las acciones verticales ejercidas sobre el cajón por los apoyos de la grúa. La geometría global y la rigidez del sistema pilote-viga-cajón determinan cuánta carga vertical recibe el cajón y cuánta se transporta a través de los pilotes en cada condición de carga.

Además, estos pilotes, contrariamente a la práctica habitual, no sólo están sometidos a cargas verticales, sino también a importantes fuerzas horizontales debidas a los elevados tiros de bolardo ejercidos por los buques que van a operar en la terminal. Esto difiere del comportamiento esperado de los pilotes convencionales sometidos únicamente a cargas verticales.

Cabe señalar que, como se ha comprobado en fases anteriores del proyecto, el nivel de estabilidad del muelle actual está por debajo de los estándares prescritos en la normativa aplicable [2]. En consecuencia, la solución diseñada no sólo debe acomodar las cargas adicionales impuestas por el dragado, las grúas y buques de mayor tamaño, sino también reforzar el muelle existente. Por lo tanto, no se trata simplemente de una solución de profundización, sino más bien de una combinación de profundización y refuerzo.

En resumen, los objetivos principales de la solución son los siguientes:

- En primer lugar, los pilotes deben proporcionar resistencia a cortante y flexión bajo el cajón para mejorar el nivel de seguridad frente a posibles superficies de fallo geotécnico. En este sentido, el diseño de la armadura de estos pilotes será crucial para soportar eficazmente estas demandas.
- En segundo lugar, la conexión entre las cabezas de los pilotes y la viga debe permitir la redirección de una parte significativa de las sobrecargas operativas (como cargas de grúa, tiros

de bolardo, sobrecarga de uso, etc.) hacia las arenas densas situadas en profundidad. Por último, la reducción de las cargas soportadas por los cajones, y la tipología escogida, mejoran radicalmente la estabilidad frente a deslizamiento y vuelco y minimiza los asentos.

3. Desarrollo innovador

3.1. Estudios previos

En la fase inicial del proyecto, se llevó a cabo un amplio análisis de los antecedentes para recopilar información pertinente sobre el estado actual de la infraestructura del muelle. Para ello se evaluó el estado del muelle mediante inspecciones submarinas con ROV, estudios batimétricos detallados, estudio de datos geotécnicos, revisión de estudios previos y registros de proyectos, y análisis de las condiciones meteorológicas del emplazamiento. Tras el análisis de los antecedentes, se desarrolló una campaña geotécnica centrada en profundizar en los aspectos geotécnicos del emplazamiento, especialmente en la banqueta de cimentación del cajón y en las características del terreno de cimentación.

Además, los análisis geotécnicos y estructurales confirmaron la idoneidad de los pilotes de cimentación existentes para la viga de la pata trasera de la grúa STS en las nuevas condiciones de sobrecarga de esta. Sin embargo, la propia viga trasera necesitaría ser reconstruida con una estructura de refuerzo más resistente.

Estas investigaciones previas llevaron a conclusiones críticas que repercutirán en el desarrollo del proyecto:

- El muelle actual se encuentra en un estado defectuoso, con una importante erosión de la banqueta de cimentación y socavación bajo el cajón.
- La banqueta de cimentación resultó no estar compuesta de escollera, sino que el material encontrado es de menor granulometría, y se asemeja a un todo-uno.
- Además, se identificaron unidades de arena deltaica densa a una profundidad razonable (a partir de -20 m), que presentan buenas capacidades de resistencia, con un ángulo de fricción $<38^\circ$ y un $N_{60} > 35^\circ$.
- El diseño de la solución debe evitar el avance de la línea de ataque, ya que hacerlo implicaría o bien una revisión completa de la viga trasera de la grúa STS y sus pilotes de soporte, o bien una reducción del alcance de las grúas existentes, ambas opciones consideradas inaceptables para el operador. Asimismo, manteniendo la alineación del cantil se facilita la continuidad parcial de la operativa durante las obras.

3.2. Análisis de las alternativas

El estudio explora soluciones alternativas para mejorar la infraestructura del muelle respetando las limitaciones del proyecto. El análisis considera opciones tradicionales como las tablestacas o la mejora del terreno de cimentación mediante jet-grouting, junto con un método innovador que implica la ejecución de pilotes a través de los cajones (Figura 5).

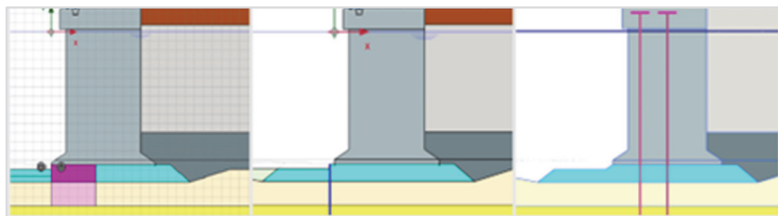


Fig. 5. Representación esquemática de las tres principales alternativas conceptuales analizadas: mejora del terreno de cimentación mediante jet-grouting, hinca de tablaestacas y ejecución de pilotes a través de los cajones (de izquierda a derecha). Fuente: Sánchez P. et al. [4].

Las soluciones basadas en tablaestacas presentaban problemas, como desplazamientos horizontales significativos (los modelos iniciales indican que, para cumplir los desplazamientos máximos permitidos, la tablestaca debería tener una rigidez fuera de los catálogos al uso) y posibles interferencias con el casco de los buques. Las técnicas de jet-grouting ofrecían desplazamientos reducidos, pero venían acompañadas de complejidades e incertidumbres en la ejecución, así como del riesgo de desplazamiento y/o lavado del material de cimentación.

Con el objetivo de aprovechar las ventajas de ambos enfoques, se propusieron soluciones combinadas. Éstas integraban de diferentes maneras la mejora del terreno de cimentación mediante jet-grouting y la instalación de tablaestacas para contener los fluidos del jet grouting. Este enfoque pretendió mitigar, los efectos de lavado de material, aumentando así la confianza en el proceso de ejecución del jet-grouting.

Simultáneamente, se exploró la viabilidad de ejecutar pilotes a través de cajones, lo que ofrece ventajas como un control simplificado en comparación con las técnicas de inyección, una mayor eficiencia con menos perforaciones y una menor interferencia con los buques atracados. Sin embargo, surgen retos, como la perforación a través de losas de cajones reforzadas y a través de posibles escolleras de la banqueta de los cajones. Adicionalmente, esta tipología exige un análisis cuidadoso de las interacciones entre los pilotes y el cajón, incluyendo consideraciones de relevancia en la zapata, las paredes de la celda y otras interfaces críticas.

En la fase final del estudio, se juxtapusieron dos alternativas distintas para su evaluación:

- Alternativa A: Mejora del terreno mediante Jet-Grout bicapa con tablestaca de contención
- Alternativa B: Instalación de pilotes de 1,1 m de diámetro a través de los cajones del muelle

El planteamiento de mejora del terreno mediante bicapa con tablestacas optimizó con éxito los factores de seguridad (FS) de la estabilidad geotécnica y redujo el presupuesto de inversión. La alternativa B, consistente en pilotes de 1,1 m de diámetro a través de los cajones del muelle, presentaba unos FS favorables, pero requería una inversión un 14% superior a la de la alternativa

A pesar del mayor presupuesto, la alternativa B ofrecía ventajas, como un mejor control de la ejecución, una menor incertidumbre sobre el resultado final y la posibilidad de realizar un sobre-dragado, en consonancia con los objetivos del proyecto de aumentar la capacidad de la terminal y la eficiencia operativa. En última instancia, debido a estas ventajas, la alternativa B resultó ser la más adecuada para el refuerzo y la profundización del muelle.

3.3. Metodología

Una vez identificada la solución más favorable, se llevó a cabo el proceso de diseño detallado de la estructura.

En la fase inicial se establecieron las bases del diseño, incluidos los parámetros geotécnicos y estructurales, y se evaluaron las condiciones ambientales. Esto llevó a determinar las cargas sobre el muelle, como el tiro de bolardo y las sobrecargas inducidas por las grúas. A continuación, se construyó un modelo de elementos finitos geotécnico-estructural en 3D utilizando PLAXIS-3D. Desde un punto de vista centrado en la seguridad, se modelaron cajones independientes junto con el sistema asociado de vigas y pilotes (Figura 6). Por lo tanto, este modelo no tuvo en cuenta los efectos de distribución de cargas de la viga a los diferentes cajones ni la contribución estabilizadora de los cajones adyacentes.

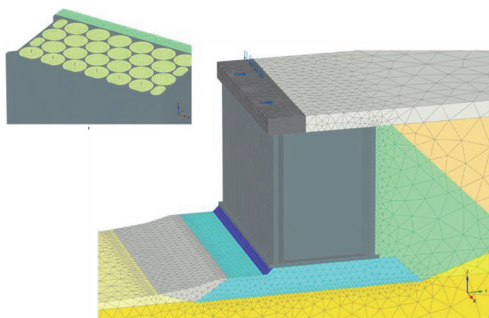


Fig. 6. Detalle del modelo geotécnico de S3A. Fuente: Sánchez P. et al. [4].

El modelo facilita la determinación de los estados tensionales y plastificación tanto de los elementos estructurales como de los suelos, en particular elucidando los esfuerzos en los pilotes (Figura 7). Los pilotes se modelan como elementos de viga embebidos (o *embedded beam*) que incorporan características de resistencia elastoplástica. Por consiguiente, al plastificarse un pilote en un punto determinado, se calculan las redistribuciones de las tensiones. La resistencia elastoplástica de los pilotes en PLAXIS se representa mediante un diagrama simplificado de interacción axial-flexión. Por lo tanto, tras el proceso de diseño del pilote, se evalúan meticulosamente los verdaderos diagramas de interacción axil-flector de los pilotes.

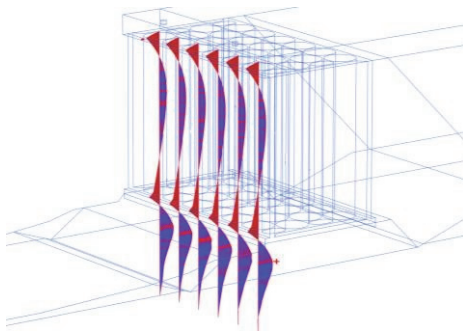


Fig. 7. Ejemplo de las leyes de esfuerzos obtenidas a partir de los modelos geotécnicos 3D a lo largo de cada pilote. En esta figura se muestra el momento flector en los pilotes S3A en el peor de los casos.

Fuente: Sánchez P. et al. [4].

Las leyes de esfuerzo derivadas del modelo se utilizan para evaluar las necesidades de refuerzo de los pilotes en cada sección. Como criterio de diseño, se considera que los esfuerzos deben corresponder a los obtenidos en el *time step* en el que todos los pilotes del lado mar han presentado plastificación. En este mismo *time step*, el FS geotécnico debe ser superior a 1,25 para cumplir con la normativa aplicable y la norma portuaria [2].

Cabe destacar que el proceso descrito es iterativo, de tal forma que el número, geometría, longitud, sección y armadura de los pilotes han sido sucesivamente redefinidos y modelizados para garantizar el cumplimiento de los FS geotécnicos mencionados. Durante la fase de diseño de la solución, surgieron múltiples retos a la hora de seleccionar hipótesis, métodos y parámetros. Se realizaron amplios análisis de sensibilidad y pruebas sobre el terreno para mejorar la comprensión del comportamiento de la estructura en diversos escenarios, tales como:

- Evaluación de la sensibilidad de las condiciones de adherencia de la interfaz entre pilotes y cajones.
- Análisis específico de la distribución de la carga vertical entre cajones y pilotes.
- Campaña de pruebas de hincado de pilotes.

El diseño de la solución definitiva se sometió a un proceso iterativo, en el que evolucionó la geometría de la estructura. En este proyecto, la alternativa inicialmente considerada (Solución Preliminar) difería ligeramente de la definitiva (Solución Final) esbozada en la introducción. Este diseño preliminar proponía pilotes de Ø1,1 m en todas las secciones. Además, para S1, los pilotes se planificaron inicialmente para cada celda alternativa de la hilera hacia tierra, en lugar de para todas las celdas como se implementó finalmente. Sin embargo, este planteamiento dio lugar a configuraciones de armadura demasiado densas, lo que suscitó dudas sobre la colocación óptima del hormigón dentro de los pilotes. Esto condujo a un aumento tanto del diámetro como de la cantidad de pilotes, que culminó en la Solución Final esbozada en la introducción (Figura 3).

A lo largo de este documento se presentan análisis basados en la solución preliminar de pilotes de Ø1,1 m, con conclusiones que pueden extrapolarse a la solución final. Por último, se ofrecen los resultados de ambas soluciones, seguidos de un análisis comparativo entre ellas.

3.4. Cargas de diseño

Las sobrecargas utilizadas para cada caso de diseño son las derivadas de las siguientes condiciones:

- Bolardos: tiro máximo de 250 t en S3A y S3B y de 200 t en S1.
- Defensas: reacción máxima de 1.920 kN
- Grúas STS: peso propio de 1.785 t
- Carga de operación sobre muelle: 20 kN/mm²
- Viento crítico actuante ($V_{v10m,10min}$)
 - Para T= 500 años: 29,97 m/s
 - Para T= 50 años: 22,25 m/s
 - Para T= 5 años 16,18 m/s

Aunque en el Proyecto se han evaluado todas las condiciones de trabajo estipuladas por el ROM [3], este artículo se centra exclusivamente en presentar los resultados correspondientes al peor escenario posible, crítico para el diseño de la solución. En todas las secciones, este caso corresponde al de condiciones operativas extremas, es decir, el escenario de un buque atracado con grúas no operativas y fuerzas del viento de intensidades correspondientes a un periodo de retorno de 50 años.

3.5. Análisis de sensibilidad de las condiciones de adherencia de la interfaz entre pilotes y cajones

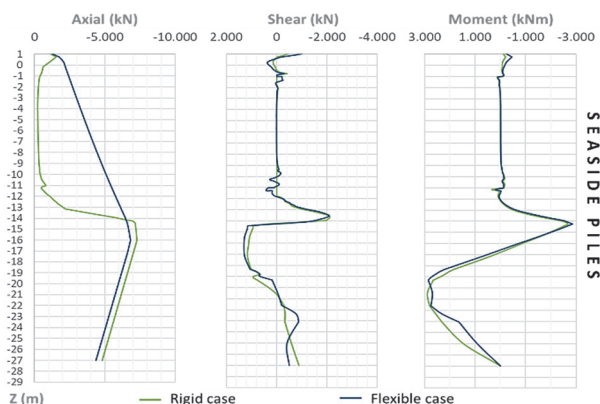
En este estudio evaluaron dos modelos diferentes de estabilidad geotécnica de cada sección en diversas condiciones de trabajo. La diferencia entre ambos modelos radica exclusivamente en la condición de adherencia considerada en la interfaz entre el pilote y el cajón en su intersección con la solera del cajón. El objetivo principal de este análisis es comprobar la influencia de una mayor adherencia en esta interfaz, dada la probabilidad de que el hormigonado del pilote a su paso por la losa del cajón genere un punto de alta adherencia, de forma que cajón y pilote queden sólidamente unidos en este punto de contacto.

- Caso Flexible: este escenario supone unas condiciones estándar de adherencia hormigón-hormigón en la interfaz entre el pilote y la losa del cajón. Para esta configuración de interfaz se designa un valor específico de resistencia de adherencia de $\tau = 250$ kN/ml.
- Caso rígido: en este caso, se supone que el pilote presenta una adherencia completa a la losa del cajón, lo que implica una resistencia de adherencia infinita en esta interfaz. Análogamente, esta condición idéntica se extrapola a las celdas que contienen relleno de mortero.

La solución para todas las secciones del muelle comparte una idea común, pero existen variaciones estructurales entre S1 y S3A/S3B. Las celdas del lado del mar de S1 están rellenas de mortero, mientras que S3A y S3B utilizan material granular en todas las celdas. Además, S3A y S3B proponen una hilera de pilotes, mientras que S1 requiere dos hileras de pilotes conectadas por la viga, a modo pórtico. Estas diferencias repercuten en el rendimiento y el comportamiento del conjunto estructural, por lo que es necesario realizar análisis de sensibilidad independientes.

Como se ilustra en la Figura 7, el análisis de S1 revela diferencias de axil en escenarios rígidos y flexibles. En condiciones rígidas, los pilotes del lado mar, conectados al relleno de mortero, no soportan ningún esfuerzo axil. En el caso flexible, los pilotes soportan axiles de compresión. Los pilotes del lado tierra soportan fuerzas de tracción en ambos escenarios debido a las acciones horizontales de la tracción de los bolardos, con valores axilesmáximos similares.

Los esfuerzos cortantes y de flexión de los pilotes en el interior de los cajones son prácticamente despreciables para ambas filas de pilotes, independientemente de que el caso sea rígido o flexible. Sin embargo, en los pilotes del lado tierra, donde el relleno de la celda es granular, los flectores comienzan a intensificarse en la sección inferior del cajón.



Solución innovadora para el refuerzo y profundización del muelle de la terminal de contenedores APMT para albergar la 2ª generación de portacontenedores Triple-E

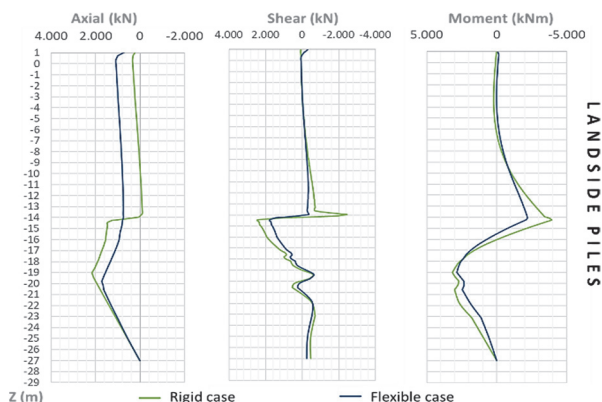


Fig. 8. Axil, Cortante y Momento flector en los pilotes de $\varnothing 1,1$ m de S1 en el lado del mar (arriba) y en el lado de tierra (abajo). Las líneas verdes representan el caso rígido y las líneas azules el caso flexible en el peor escenario de carga. Fuente: Sánchez P. et al. [4].

Los cortantes y momentos flectores máximos siguen siendo similares para los pilotes situados en el lado mar, independientemente de que el caso sea rígido o flexible, debido al efecto de confinamiento del relleno de mortero de las celdas. En cambio, para los pilotes del lado tierra, la presencia de relleno granular de celdas da lugar a una reducción de la resistencia del fuste. La consideración de una conexión de junta rígida en la base afecta a la magnitud del esfuerzo de flexión, pero no al patrón de distribución de esfuerzos. Esto conduce a un aumento de los cortantes y flectores máximos en el sistema rígido bajo la base del cajón.

En conclusión, el caso rígido se tendrá en cuenta en las evaluaciones de estabilidad estructural y geotécnica de S1 debido a su demostrado conservadurismo.

Dada la similitud entre S3A y S3B, sólo S3A se somete a análisis de sensibilidad en el presente estudio, debido a su mayor criticidad en comparación con S3B derivada de análisis anteriores. Como se observa en la Figura 9, en el análisis comparativo de S3A, los cortantes y flectores en los pilotes muestran notables similitudes entre los escenarios rígido y flexible. Se observan pequeñas variaciones, principalmente en los momentos flectores dentro de los diez metros superiores del cajón. A pesar de la gran similitud de los patrones de esfuerzos, el escenario flexible muestra mayores flectores máximos dentro de la celda (a la cota -3 m) y en las profundidades de cimentación (a la cota -23 m).

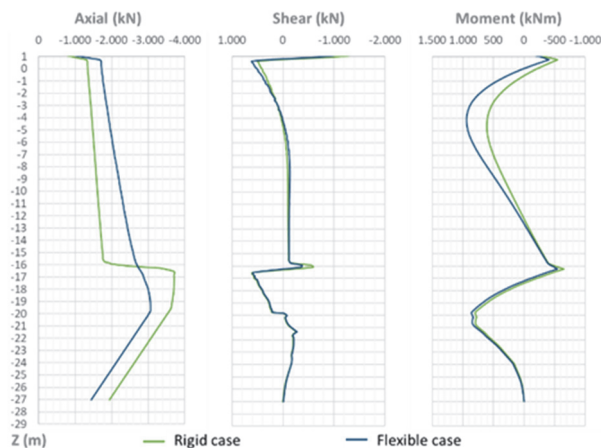


Fig. 9. Axil, Cortante y Momento flector en pilotes S3A Ø1,1 m. Las líneas verdes representan el caso rígido y las líneas azules el caso flexible en el peor escenario de carga. Fuente: Sánchez P. et al. [4]

Las fuerzas axiales varían entre los dos escenarios debido a las restricciones de movimiento en la junta maciza de la losa de los cajones, lo que influye en la forma en que el fuste del pilote absorbe las cargas verticales dentro de la celda. En el caso flexible, los axiles se distribuyen más uniformemente a lo largo del pilote. Por el contrario, en el caso rígido se produce una menor absorción de axiles dentro de la celda del cajón, compensada por una mayor absorción por debajo del cajón en contacto con el terreno. Como resultado, los axiles máximos son ligeramente superiores en los escenarios rígidos en comparación con sus homólogos flexibles.

En resumen, los valores máximos de flexión y cortante son mayores en el escenario flexible, mientras que los valores axiales máximos son ligeramente superiores en el escenario rígido. Por consiguiente, para la modelización de S3A y S3B, se considera más apropiado el escenario flexible.

3.6. Análisis específico de la distribución vertical de la carga entre cajones y pilotes

El análisis pretende comprender el comportamiento operativo de la solución distinguiendo las acciones verticales resistidas por el cajón y las transmitidas a la cimentación a través de los pilotes. Esta distinción es crucial para garantizar que se minimizan las sobrecargas sobre el cajón existente. El porcentaje de carga vertical soportada por el cajón y los pilotes se determina para cada condición de carga. La Figura 10 muestra que los cajones S1 soportan sistemáticamente cargas verticales inferiores a los requisitos actuales, lo que indica que los nuevos pilotes soportan los incrementos de carga previstos y algunos derivados de las actividades existentes.

En resumen, los pilotes soportan eficazmente mayores cargas verticales, permitiendo a los cajones sostener el peso propio y una fracción de las cargas muertas, asegurando que los cajones no solo no operen bajo condiciones de carga mayores para las que fueron diseñados, sino que lo hagan para cargas incluso menores, descargándolos. Se obtuvieron resultados y conclusiones similares para S3A y S3B.

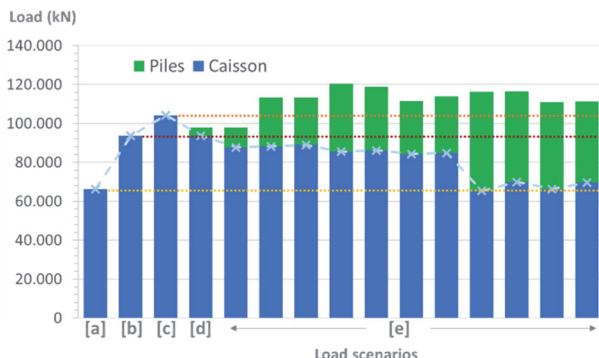


Fig. 10. Distribución vertical de la carga en S1 entre el cajón y los pilotes en diferentes escenarios. El escenario [a] considera únicamente el peso propio del cajón y el relleno. El caso [b] representa peso propio y cargas muertas. En el caso [c], se aplican sobrecargas actuales al muelle. El caso [d] introduce el refuerzo mediante pilotes y aplica las sobrecargas existentes. Los casos [e] ilustran futuros escenarios de sobrecarga con nuevas grúas STS, buques y dragados. Fuente: Sánchez P. et al. [4].

3.7. Campaña de pruebas de hincado de pilotes

Para validar el método de construcción de pilotes propuesto, se llevó a cabo una campaña de pruebas de perforación de pilotes. Los objetivos incluían la validación de los métodos de ejecución, la evaluación de las eficiencias de perforación de pilotes en la losa inferior del cajón y la banqueta de cimentación, y la evaluación de los procedimientos de hormigonado y armado de los pilotes. En la campaña de pruebas se utilizaron cuatro pilotes, dos en los cajones S1, con una losa base de 35 cm de espesor y baja densidad de armadura (probados tanto en las celdas situadas hacia tierra como hacia el mar), y dos en los cajones S3B, con una losa de 65 cm de espesor y mayor densidad de armadura.

En conclusión, se confirmó la viabilidad de la penetración de los pilotes, con velocidades de perforación que superaron las expectativas (Figura 11). Los ensayos cross-hole revelaron un hormigonado satisfactorio, salvo anomalías en la base de poca gravedad. Estas anomalías estaban vinculadas a un soporte inadecuado de lodo polimérico, lo que motivó la sustitución de este método por un encofrado recuperable en la metodología de construcción definitiva.



Fig. 11. Extracto de solera del cajón perforada y extraída. Fuente: Sánchez P. et al. [5].

4. Resultados de la solución preliminar y final

Como se observa en la Figura 12, la plastificación de los pilotes se produce en primer lugar en la solera del cajón, aunque en S3A y S3B aparecen al mismo tiempo algunos puntos de fluencia en los pilotes situados bajo el cajón. Los desplazamientos totales se controlan eficazmente mediante la solución propuesta, garantizando que se limitaban a un máximo de 26 mm en S1 y 18 mm en S3A y S3B.

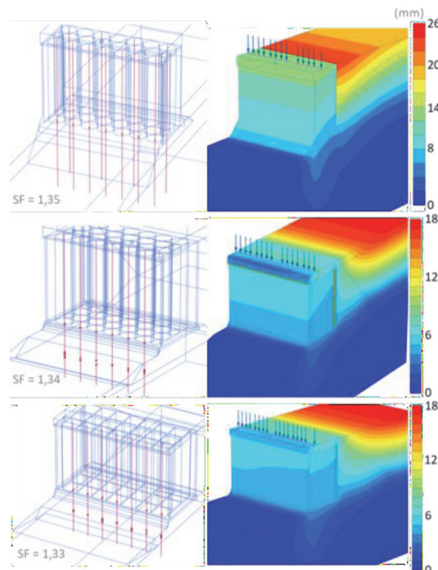
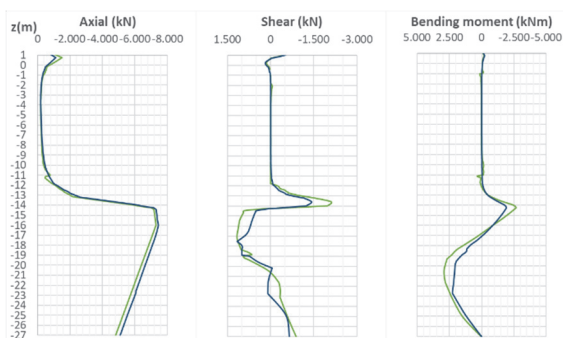


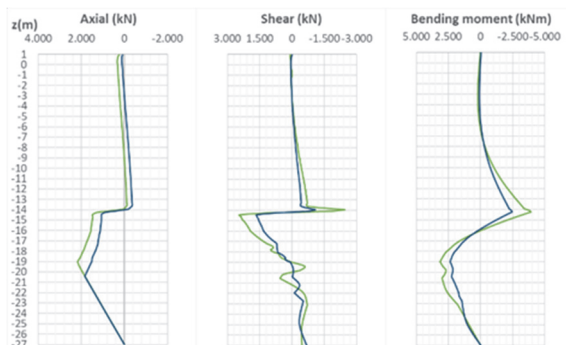
Fig. 12. Puntos de plastificación en pilotes y desplazamientos totales con su FS asociado de la Solución Final para cada sección en el peor escenario de carga. Fuente: Sánchez P. et al. [4].

La figura 13 muestra las tensiones resultantes en cada sección, tanto para la solución preliminar, que considera pilotes de Ø1,1 m, como para la solución final que utiliza pilotes de Ø1,2/1,5 m. Además, la tabla 1 muestra los valores máximos obtenidos en cada sección para el peor escenario de carga, junto con el FS asociado.

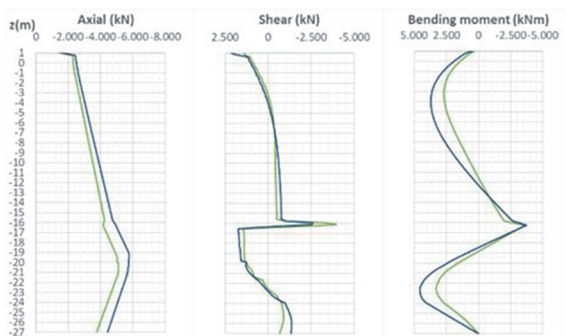
Sección 1 – Pilotes lado mar



Sección 1 – Pilotes lado tierra



Sección 3A



Sección 3B

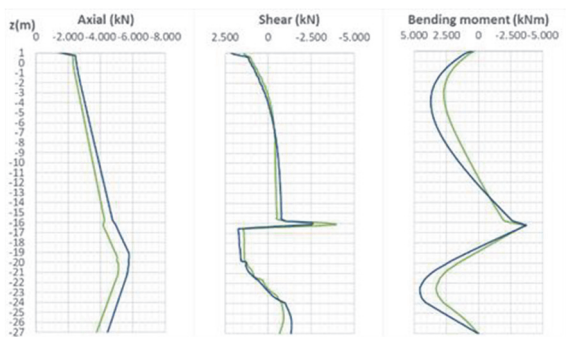


Fig. 13. Resultados de axil, cortante y momento flector en los pilotes para cada sección. En verde, resultados para la solución preliminar (pilotes de Ø1,10 m) y en azul para la solución final (pilotes de Ø1,20/Ø1,50 m). Todos los resultados corresponden a la hipótesis de carga más desfavorable. Fuente: Sánchez P. et al. [4].

Tabla 1. Valores máximos de tensión y momento flector observados en la figura 13 y los correspondientes valores geotécnicos de FS. Fuente: Sánchez P. et al. [4].

	Ø (m)	N (kN)	Q (kN)	Mmax. (kNm)	Mmin. (kNm)	SF
S1-SS	1.1	-7,289.4	-2,100.9	2,898.1	-2,683.1	1.33
	1.2	-7,455.9	-1,417.7	2,264.6	-1,916.6	1.35
S1-LS	1.1	2,171.9	2,452.2	3,173.4	-3,931.1	1.33
	1.2	1,852.5	1,642.7	2,381.4	-2,437.9	1.35
S3A	1.1	-5,099.7	-3,916.8	3,319.6	-3,599.0	1.31
	1.5	-5,774.1	-2,567.3	4,548.9	-3,725.4	1.34
S3B	1.1	-6,592.4	-3,388.4	2,987.3	-3,045.2	1.29
	1.5	-7,439.8	-3,638.9	4,175.2	-4,156.9	1.33

Al comparar los resultados de la Solución Preliminar y la Solución Final, se observa que:

- El comportamiento global de la estructura es muy similar, radicando las principales diferencias en las tensiones máximas resultantes y en un ligero incremento del factor de seguridad geotécnica (FS) para la Solución Final.
- Los esfuerzos cortantes son prácticamente idénticos en ambas soluciones. En la zona de la losa del cajón, sin embargo, se observan diferencias en los valores máximos, atribuidas a razones de modelización numérica.
- En los pilotes de S1, donde no sólo se aumenta la sección sino también el número de pilotes, se reducen tanto el axil como el momento flector ($\Delta \bar{N}=-6\%$ y $\Delta \bar{M}=-28\%$).
- En cambio, en las secciones 3A y 3B, el aumento de la sección de los pilotes provoca un aumento de la compresión ($\Delta \bar{N}=13\%$) y de los momentos flexores ($\Delta \bar{M}=29\%$).

El armado del refuerzo diseñado para cada pilote se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Densidades de armadura y utilización de acero/hormigón para pilotes y cajones en la solución preliminar (sombreado gris) y final (sin sombreado). Fuente: Sánchez P. et al. [4].

	Ø (m)	Pilotes por cajón (u)	Acero			Hormigón
			kg/m3	kg/ml	kg/caj.	m3/ cais.
S1-SS	1.1	7	236	224	44,351.0	187.9
	1.2	7	114	129	25,496.1	223.6
S1-LS	1.1	4	424	403	45,532.3	107.4
	1.2	7	180	204	40,257.0	223.6
S3A	1.1	6	286	272	46,069.2	161.1
	1.5	6	121	214	36,243.3	299.5
S3B	1.1	7	274	260	51,492.3	187.9
	1.5	7	107	189	37,391.5	349.5

Obsérvese que estas cuantías de acero se optimizan posteriormente a lo largo del pilote y se reducen allí donde los esfuerzos son menos exigentes.

La Solución Preliminar, como se muestra en la Tabla 2, requiere un armado de refuerzo muy denso para los pilotes, lo que conduce a un espaciado estrecho entre las barras. Esto suscita dudas sobre el correcto hormigonado del pilote, especialmente en la zona periférica donde se sitúan las barras, más allá de la capacidad de detección de las pruebas de integridad Cross-hole. Por el contrario, la Solución Final de mayor diámetro reduce significativamente la densidad de la armadura, lo que permite aumentar la separación entre barras para una mejor colocación del hormigón. La aplicación de la Solución Final supone un aumento del 83% en el uso total de hormigón (de 50.000 m³ a 91.000) y una reducción del 15% en el uso total de acero (de 14M kg a 12M kg).

5. Conclusiones

A lo largo del artículo se ha demostrado que la solución estructural presentada en la figura 3 permite dragar la zona de atraque manteniendo un FS superior a 1,25 a pesar del importante aumento de cargas al que se verá sometido el muelle por los mayores buques y mayores grúas. Esta consiste en la ejecución de pilotes a través de las celdas de la primera fila a lo largo del muelle. En S1, se añadirá una segunda hilera de pilotes en las celdas del lado de tierra debido a su deteriorado estado. Los pilotes, conectados mediante una viga cantil superior, estarán cimentados a -27 m, con diámetros de 1,20 m en S1 y 1,50 m en S3A y S3B.

Esta solución innovadora consigue una transmisión eficaz de las nuevas sobrecargas a las arenas densas situadas bajo la banqueta del cajón mediante los pilotes propuestos, que atraviesan las celdas de los cajones. Estos pilotes también mejoran la estabilidad global al desplazar a mayor profundidad las superficies de fallo geotécnico. Este enfoque innovador integra dos tipos de muelles: muelles de gravedad y muelles pilotados. En particular, los pilotes no sólo sirven para resistir cargas verticales, sino que también contribuyen a la estabilidad global frente a las importantes cargas horizontales provocadas por el tiro de bolardo de los buques. Además, la solución propuesta garantiza que los cajones no sólo no operen bajo condiciones de carga mayores a aquellas para las que fueron diseñados, sino que lo hagan para cargas incluso menores, descargándolos. Lo anterior es especialmente positivo en el caso de los cajones más antiguos, en peor estado de conservación.

Referencias bibliográficas

- [1] Martí A., (2022). Catalan news, Exports 42.5% higher this August than before pandemic.
- [2] Puertos del Estado (2005). ROM 0.5-05 Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias.
- [3] Puertos del Estado (2011). ROM 2.0-11 Obras de Atraque y Amarre Criterios Generales y Factores del Proyecto.
- [4] Sánchez P., Herrero L., Candel F., Vila A. and Cerra T. (2023). Adecuación del Paramento Este del Muelle Sur a Buques EEE. Terminal APMT Barcelona.
- [5] Sánchez P., Herrero L., Candel F., Vila A. and Cerra T. (2023). Informe final de la campaña de pilotaje de prueba.

Muelle de Raos 6. Pantalla de tablestacas en terrenos deformables con escasa capacidad portante

Raos 6 pier. Combiwall on deformable terrain with low load-bearing capacity

Natividad Sánchez López^a, Santiago Carrillo Alonso^b, Rubén Suárez López^c, Christian Manrique Valdor^d, Daniel Zamora Serrano^e y José Manuel González Herrero^f

^aAcciona Ingeniería (AI), natividad.sanchez.lopez@acciona.com; ^bAI, santiago.carrillo.alonso@acciona.com;

^cAutoridad Portuaria de Santander (APS), rsuarez@puertosantander.com;

^dAPS, Christian_Manrique@puertosantander.com; ^eAI daniel.zamora.serrano@acciona.com;

^fAI, jgherrer_ext@acciona.com

How to cite: Sánchez López, N.; Carrillo Alonso, S.; Suárez López, R.; Manrique Valdor, Ch.; Zamora Serrano, D. & González Herrero, J. (2024). Muelle de Raos 6. Pantalla de tablestacas en terrenos deformables con escasa capacidad portante. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

This article describes the project for the Raos 6 Pier in the port of Santander which structural typology is a combi-wall AZ/HZ anchored by means of tie-back to a micropiled cap. The location of the works represents a challenge in the design since it is conditioned by the existing infrastructures and by the high deformability and low load-bearing capacity of the land. Thanks to the work carried out it is concluded that structural typologies that are more expensive and are usually discarded, they can solve execution problems, and they are economically competitive. To accomplish that goal some necessary checks are required during the project phase in order to find the optimal solution.

Keywords: set pile quay wall, combi-wall, micropiles. ground treatment, preloading treatment, gravel drain, consolidation process.

Resumen

En este artículo se describe el proyecto del Muelle Raos 6 en el puerto de Santander cuya tipología estructural es de pantalla combinada AZ/HZ anclada mediante tirantes a un encepado micropilotado. El enclave de las obras supone un reto en el diseño ya que está condicionado por las infraestructuras existentes y por la alta deformabilidad y escasa capacidad portante de los terrenos. Gracias al trabajo desarrollado se concluye que tipologías estructurales que a priori son más caras y se suelen descartar, pueden resolver problemas de ejecución y ser competitivas económicamente. Para ello se requieren las comprobaciones necesarias durante la fase de proyecto con el objetivo de encontrar la solución óptima.

Palabras clave: muelle de tablestacas, pantalla combinada, micropilotes, mejora de terreno, precarga, mechas drenantes, proceso de consolidación, diseño BIM.

1. Introducción

El proyecto desarrollado consiste en la creación de un nuevo muelle en la dársena de Maliaño del puerto de Santander de 325 m de longitud, 10,00 metros de calado y coronado a la +6,50.

Los retos del proyecto se centran en cuatro aspectos:

- Condicionantes de diseño: geotecnia complicada con importantes espesores de fangos de escasa capacidad portante sobre arcillas del Keuper.
- Diseño de pantallas de tablestacas: aplicación de la ROM 2.0-11 y ROM 05-05, modelización con programa Plaxis. Necesidad de consolidación previa a la hinca de las tablestacas.
- Influencia de la tipología de anclaje de la pantalla principal: sustitución de pantalla trasera de tablestacas por encepado micro pilotado.
- Desarrollo del proyecto con metodología BIM.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de las obras proyectadas.

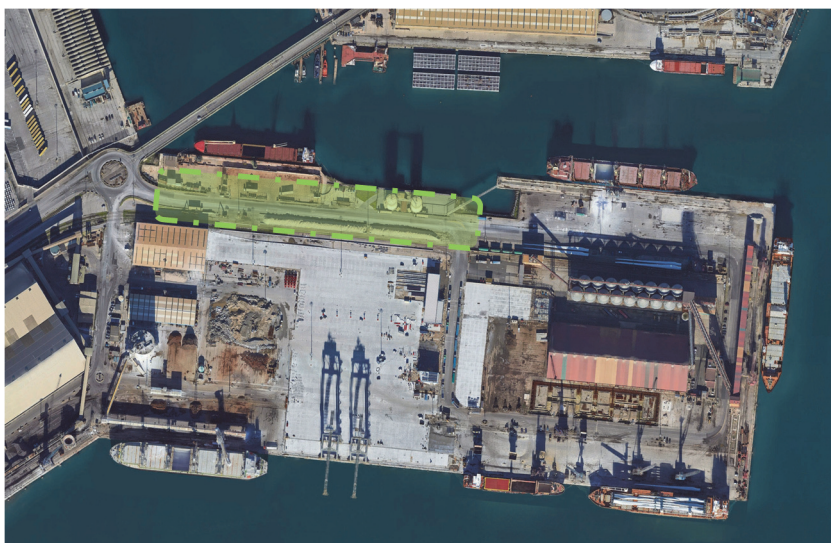


Fig. 1. *Ubicación Muelle Raos 6.* Fuente: Google Earth. (2023)

2. Condicionantes del diseño

El enclave de las obras diseñadas, con estructuras preexistentes y ubicado en una dársena en explotación, supone un reto a la hora de su diseño.

2.1. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales exigidos al proyecto fueron los siguientes:

- Geometría del muelle:
 - Longitud: en torno a los 325 m, de los cuales 212 m suponen la prolongación del muelle 5 de Raos y 113 m un adelantamiento del muelle de Nueva Montaña. La anchura del adelantamiento es de unos 10 metros

- Calado referido al cero del Puerto: mínimo 10,00 m
- Cota de coronación de muelle y explanada: +6,50 m
- Línea de cantil prolongación del muelle Raos 5
- **Uso y explotación:**
 - Tipo de terminal: multipropósito (tráfico de mercancía general y graneles sólidos)
 - Buque de proyecto: condicionado por la geometría del muelle. Se consideraron buques graneleros y de carga general compatibles con calado de muelle (10 metros)
 - Cargas de operación y almacenamiento: el muelle ha sido diseñado para una carga de operación de 60 kN/m² y para una carga de almacenamiento de 165 kN/m²
 - Definición de zonas de operación y almacenamiento. La anchura de la zona de operación es de sólo 12 metros. Cabe reseñar que la anchura de la zona de operación requerida es mucho menor que la propuesta en la ROM 2.0-02 ($\geq 22,50$ m), y viene condicionada por las necesidades operacionales del concesionario del muelle de Nueva Montaña. Esta disposición de superficies tiene una gran influencia en el diseño de las infraestructuras.

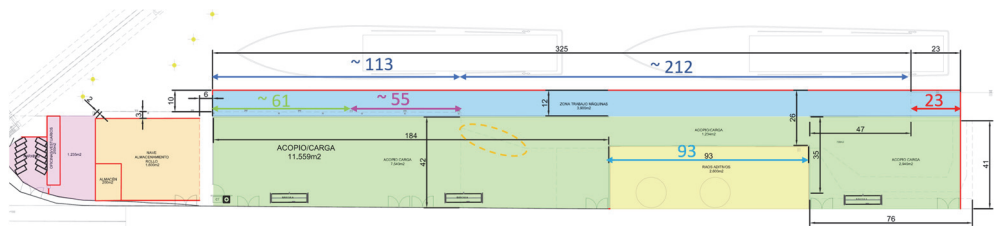


Fig. 2. Longitudes Nuevo Muelle (Fase 1 + Fase 2). Anchura de zona de operación y almacenamiento (nota: los 23 metros orientales se corresponden al muelle de cajones existente RAOS 5)

2.2. Infraestructuras existentes

El enclave de las obras, con estructuras preexistentes y ubicado en una dársena en explotación, supone un reto a la hora de su diseño. El futuro muelle, no solo ha de ser estable durante su proceso constructivo y explotación en servicio, también ha de garantizar la integridad de las infraestructuras adyacentes durante la construcción. Su tipología estructural final ha de adaptarse a estas instalaciones.

Como se ha indicado con anterioridad, el nuevo muelle tendrá 325 metros de longitud que se proyectan prolongando la línea de cantil del contiguo muelle Raos 5. De ellos, los 131 metros más orientales se construirán en el frente del antiguo cierre del espigón Norte de Raos. Los restantes 194 metros suponen un adelantamiento del muelle de Nueva Montaña.



Fig. 3. Planta instalaciones existentes. Fuente: elaboración propia. (2023)

El muelle de Raos 5, de cajones sobre banqueta de escollera, tiene un calado de 10 metros. El muelle de Nueva Montaña tiene en la actualidad un calado de 6 metros y en él se distinguen dos secciones tipo. Los primeros 118 metros (al Oeste), consisten en una solución de tablero sustentado por pilotes metálicos, separados unos 5 metros y que se superpone a la antigua estructura pilotada de los años 40 con pilotes hincados de hormigón armado. Los 53 metros más orientales consisten en una pantalla pilotada que contienen un relleno cementado con escoria de alto horno y que reforzó su frente recientemente (año 2010) con pilotes metálicos. Otro elemento importante que considerar son los silos de cemento de la concesión Aditivos Raos y que se muestran en la siguiente imagen.



Fig. 4. Silos Aditivos Raos. Fuente: APPS. (2023)

2.3. Geotecnia: presencia de suelos blandos

Para la caracterización de los terrenos en los que se sitúan las obras, se realizó un análisis del marco geológico y de la información existente de campañas de campo y estudios geotécnicos anteriores. También se llevó a cabo una investigación geotécnica complementaria durante el desarrollo del proyecto consistente en la ejecución de 10 nuevos sondeos (3 en tierra y 7 en mar en la alineación del futuro cantil).



Fig. 5. Campaña geotécnica complementaria. Fuente: elaboración propia. (2023)

Si bien la interpretación geológica distingue en la zona 8 unidades diferentes con unas distribuciones geométricas bastante irregulares, desde el punto de vista del comportamiento geotécnico se simplificó el modelo unificando unidades de comportamiento geotécnico similar, reduciendo el número de unidades geotécnicas a 5.

Tabla 1. Unidades Geotécnicas consideradas. Fuente: Elaboración propia. (2023)

Denominación	Símbolo	U.G. Principal	U.G.Secundaria	Descripción
Rellenos Antrópicos	E1	Recubrimiento superficial	Materiales Antrópicos	Son depósitos constituidos por bloques de escollera a calizos, dispuestos directamente sobre los depósitos de cobertera, sobre los cuales, a su vez, se han vertido escombros y escorias, que en ocasiones están mezclados con suelo natural. La base de estos depósitos tiene morfología irregular
Fangos	B1	Recubrimiento superficial	Depósitos Actuales	Fangos heterogéneos de carácter arcilloso con gran cantidad de materia orgánica y escasa consistencia. Incluye los fangos negros superficiales así como los marrones y grises
Arenas	B2	Recubrimiento superficial	Suelos cuaternarios	Arenas limpias de gran fino a muy fino, bastante uniformes. Tienen naturaleza silicea con restos bioclásticos carbonatados de potencia variable
Keuper alt.	K2	Sustrato facies Keuper	-	Sustrato alterado, en transición entre el sustrato sano y los materiales cuaternarios superiores. Se establece que el Keuper está alterado cuando los golpeos SPT caen por debajo de 30
Keuper sano	K3	Sustrato facies Keuper	-	Arcillas abigarradas plásticas, que engloban gravas de arcillas endurecidas (argilitas), gravas y cristales de yeso, así como nódulos de naturaleza carbonatada. Localmente pueden aparecer bloques pertenecientes al encajante del diapiro, generalmente muy alterados, de areniscas facies Weald, de dolomías, calizas, margas y en mayor medida bloques de yeso (K4)

Como sustrato se identificó la facies Keuper en forma de arcillas endurecidas y áreas de yesos, presentándose generalmente con un nivel superior alterado de poca potencia. Por encima de este nivel se identificaron unos fangos con escasa consistencia (golpeos SPT menores de 10) sobre los que se apoyaba un nivel de arenas uniformes de consistencia media. Los espesores de cada uno de estos niveles a lo largo del muelle son bastante variables, presentándose los mayores espesores de fangos (7m) en la zona oeste y central, y en la zona central el contacto con el sustrato del Keuper a mayor profundidad.

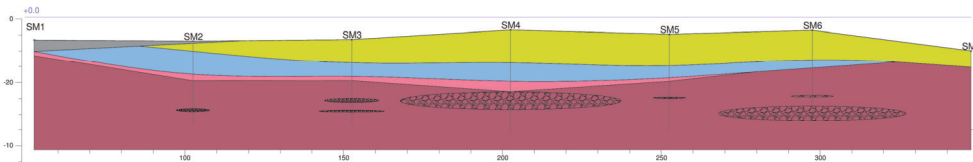


Fig. 6. Perfil geotécnico alineación cantil. Fuente: elaboración propia. (2023)

Destaca en este entorno geotécnico propuesto la presencia de la unidad de fangos en profundidad en contraste con las arcillas del Keuper. Este hecho dificulta el diseño por conjugar problemas de estabilidad, asentos, movimientos y empujes propiciados por los fangos con problemas de excavación, hincado o dragado de los materiales del Keuper.

Los parámetros considerados para cada una de las unidades definidas fueron los siguientes:

Tabla 1. *Parámetros geotécnicos considerados en el proyecto Muelle Raos 6.* Fuente: elaboración propia. (2023)

Unidad Geotécnica	Definición	γ_{ap} (kN/m ³)	γ_{sum} (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ'	E (t/m ²)	Cc	Cr	K (m/dia)
A2	Relleno Antrópico.	18	8	15	30	6000	-	-	1
B1	Fangos	18	8	5	25	-	0,25	0,045	4,04E-05
B2	Arenas	19	9	0	31	2000	-	-	0,26
Ka	Keuper Alt	20	10	30	25	1900	0,20	0,043	1,96E-05
Ks	Keuper sano	21	11	20	26	10000	-	-	2,32E-05

Con este contexto geotécnico definido, se han estudiado las soluciones necesarias que garanticen la estabilidad del muelle y el control de asentos en fase de explotación y que a su vez ofrezcan suficiente garantía de posibilidad de ejecución.

3. Estudio de alternativas

En primer lugar, se procede al planteamiento de las soluciones estructurales típicas (muelle de gravedad, muelle con cimentación profunda, y muelle de tablestacas) con el fin de descartar aquellas inviables técnicamente. Con las soluciones viables se realiza un análisis comparativo para desarrollar el proyecto de la más ventajosa.

3.1. Planteamiento de alternativas

3.1.1. Solución de gravedad

La solución de muelle de cajones es una de las más extendida en los puertos españoles. Es una solución robusta y versátil que permite la adaptación a diferentes instalaciones de carga de buques. Además, es la solución constructiva adoptada para el muelle adyacente Raos 5.

Cualquier solución de gravedad que se pueda plantear ha de consistir en un elemento monolítico (cajón de hormigón armado o muro de bloques) cimentado a la cota -10,00 (calado requerido de proyecto). Además, se requiere de una banqueta de escollera para que el muro de gravedad apoye sobre el terreno natural y reparta las tensiones sobre el mismo.

Según se muestra en la **figura 7**, una solución de gravedad afectaría a la concesión de Raos Aditivos. Sería necesario disponer un elemento de contención del talud para poner a salvo los silos y las básculas existentes.

Además, es importante indicar que el muelle de Raos 5 se cimentaba sobre unos terrenos más favorables ya que el techo del sustrato de keuper aparecía a menor cota y que con el dragado se eliminaba por completo la capa de fangos (en el nuevo muelle Raos 6, la capa de keuper aparece mucho más profunda - hasta la cota -23,00 -).

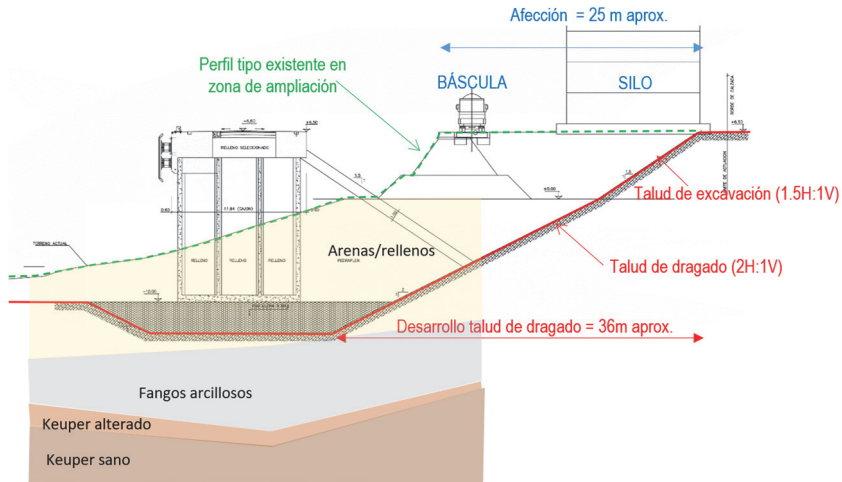


Fig. 7. Perfil geotécnico alineación cantil. Fuente: elaboración propia. (2023)



Fig. 8. Perfil geotécnico alineación cantil. Fuente: elaboración propia. (2023)

Las soluciones de gravedad se descartan, pues son inviables debido a la escasa capacidad portante del terreno y a la existencia de instalaciones muy próximas que requieren de importantes estructuras de contención para su protección durante el desarrollo de las obras.

3.1.2. Solución Pilotada

Una solución típica de muelles con escasa capacidad portante del terreno es la solución pilotada. En el caso que nos ocupa, se analizó una solución pilotada, con un talud bajo tablero similar al utilizado en el dragado del muelle Raos 5.

Debido a la escasa capacidad resistente de los terrenos en los que se localiza el nuevo muelle, es necesario validar la estabilidad del talud bajo tablero con las cargas de servicio. Como resultado de estas comprobaciones se concluyó que el talud que encaja con la geometría para no afectar a los silos no resultaba estable. Para garantizar su estabilidad debería ser más tendido o se requeriría de un tratamiento de terreno adecuado. Las columnas de grava solo serían efectivas en la zona fuera de talud. Las arenas ya cuentan con un ángulo de rozamiento elevado y es difícil poder mejorarlas suficientemente para alcanzar la estabilidad.

La solución pilotada quedaría pues descartada a no ser que se refuerce la solución con pantallas para contener y estabilizar el talud.

En la siguiente figura se muestran los resultados del cálculo de estabilidad de talud con el programa slope con y sin pantalla de contención de talud.

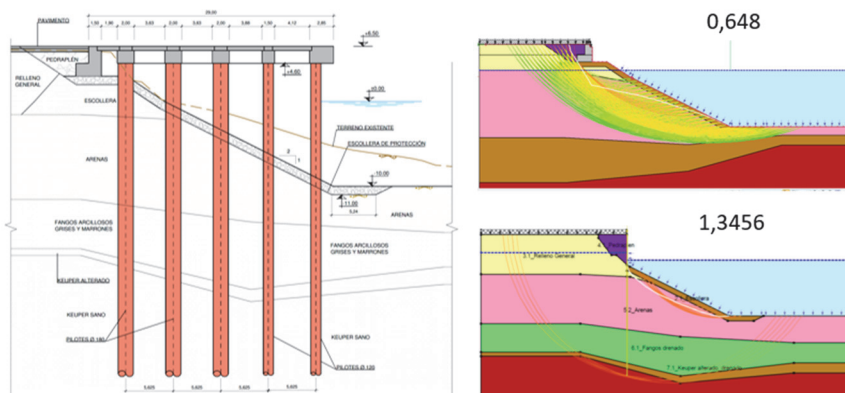


Fig. 9. *Solución pilotada. Cálculos de estabilidad de talud bajo tablero.* Fuente: elaboración propia. (2023)

3.1.3. Solución tablestacas

Los terrenos existentes, altamente deformables, traen consigo la necesidad de realizar un tratamiento del terreno que limite los asentamientos en fase de explotación de las obras que condiciona el proceso constructivo a establecer en la realización de un muelle de tablestacas. Este tratamiento del terreno consiste en la aplicación de una precarga. Se plantea en primer lugar la posibilidad de construir el muelle de tablestacas (combi-wall) anclado, y, una vez construido y antes de que comience su explotación, aplicar una precarga. Con el programa Plaxis se modeliza el proceso constructivo. Las deformaciones obtenidas al nivel del anclaje, con deformaciones verticales superiores a 1,20 metros durante la aplicación de la precarga, son inadmisibles y requieren variar el proceso constructivo. La conclusión que se alcanza es que la solución de pantalla anclada únicamente es viable si la precarga para la consolidación de los terrenos deformables se realiza previa a la construcción del muelle.

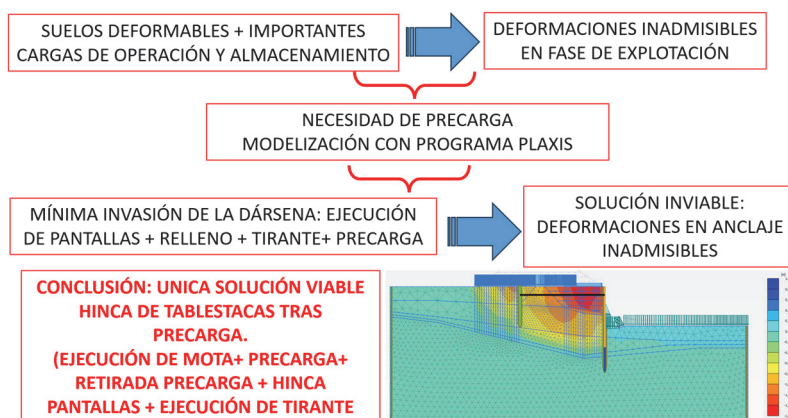


Fig. 10. Esquema de análisis de solución de tablestacas ancladas. Fuente: elaboración propia. (2023)

3.2. Alternativas viables técnicamente

Como se ha explicado en los apartados precedentes, las alternativas técnicamente viables que se contemplan son la realización de un muelle de tablestacas anclado con aplicación de precarga previa a la hinca de las tablestacas y colocación de tirante y muelle pilotado cuya fila trasera de pilotes está configurada con pilotes secantes. En las siguientes figuras se muestran las secciones tipo de dichas soluciones.

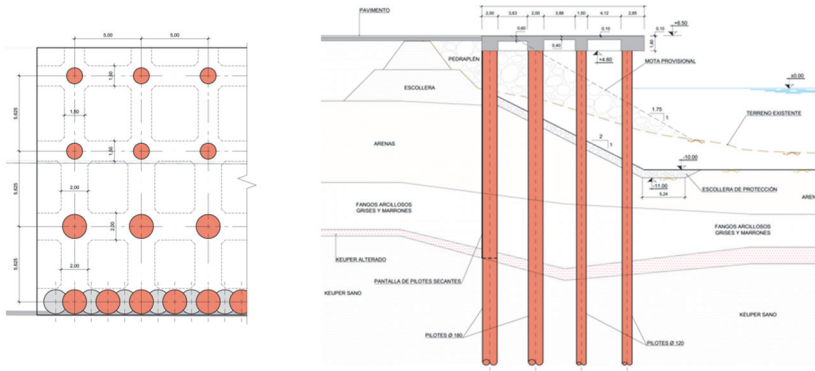


Fig. 11. Planta y sección tipo de alternativa pilotada con pantalla de pilotes secantes.
Fuente: elaboración propia. (2023)

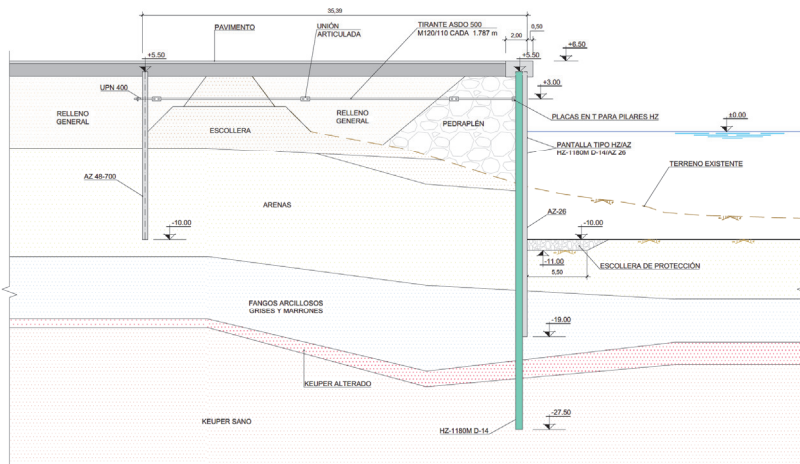


Fig. 12. Sección tipo de alternativa pantalla tablestacas compuesta ancladas a tablestaca trasera.
Fuente: elaboración propia. (2023)

Se realizó un prediseño de ambas soluciones y tras ello se realizó un análisis comparativo evaluando ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. En dicho análisis se contemplan los siguientes aspectos:

- Viabilidad técnica
- Viabilidad constructiva
- Invasión y afección a estructuras existentes

- Plazo de ejecución
- Presupuesto de inversión
- Aspectos medioambientales

Tabla 2. Análisis de Alternativas Muelle Raos 6. Fuente: elaboración propia. (2023)

PRESUPUESTO DE INVERSIÓN		28.740.180,20 €		37.919.123,38 €	
	Factor de ponderación	ALTERNATIVA PANTALLA DE TABLESTACAS		ALTERNATIVA DE PILOTES	
		Valoración	Valoración Ponderada	Valoración	Valoración Ponderada
Viabilidad técnica.	0,20	2	0,4	2	0,4
Viabilidad constructiva.	0,30	3	0,9	1	0,3
Invasión y afección a estructuras existentes.	0,10	1	0,1	3	0,3
Plazo de ejecución.	0,10	2	0,2	2	0,2
Presupuesto de inversión.	0,40	3	1,2	1	0,4
Aspectos medioambientales.	0,10	3	0,3	1	0,1
PUNTUACIÓN			3,1		1,7

La alternativa seleccionada es la solución de pantalla de tablestacas anclada mediante tirantes a pantalla trasera ya que resulta la más económica y viable técnica y constructivamente. Tras dar por concluido el estudio de alternativas, da comienzo el desarrollo del proyecto constructivo.

4. Proyecto constructivo

Dado el significativo espesor de suelos blandos con alta deformabilidad, fue inevitable considerar un tratamiento del suelo para evitar asientos residuales excesivos en fase operativa. El tratamiento utilizado fue el uso de una precarga con drenes verticales que acelerasen el proceso de consolidación. Ha sido necesario un proceso constructivo que contemplase la consolidación de los estratos blandos previa a la ejecución de las pantallas, pues los anclajes sufrirían deformaciones inadmisibles.

Durante el desarrollo del proyecto constructivo, se llevó a cabo una campaña geotécnica para la caracterización del terreno, en concreto se hizo hincapié en obtener parámetros de consolidación con los correspondientes ensayos edométricos en la capa de fangos. Cuando se afronta el desarrollo del proyecto se obtienen los resultados de los ensayos edométricos y se puede cuantificar las deformaciones en el tiempo con la aplicación de las cargas acordes al proceso constructivo.

4.1. Análisis del proceso de consolidación

De la campaña geotécnica, que se ha realizado durante el desarrollo del estudio de alternativas, se obtienen los parámetros de consolidación de los terrenos. Con dichos parámetros se estudia la sensibilidad de la solución en función de los tiempos de actuación de la precarga para la consolidación de los terrenos. Se comprueba que las solicitaciones sobre la pantalla delantera se elevan en función de los tiempos de consolidación y se constata que la solución de tablestacas tiene una gran sensibilidad a las deformaciones del terreno. Con la pantalla AZ/HZ inicialmente propuesta en el estudio de alternativas, solo se alcanzan los coeficientes de seguridad estructurales de la pantalla para unos elevados tiempos de actuación de la precarga (coef. de seguridad estructural 1,5,

según ROM 0.5-05). Para que la pantalla propuesta en el estudio de alternativas alcance el coeficiente de seguridad requerido, se estima un tiempo de consolidación de al menos 6 meses. La reducción de los tiempos de consolidación es posible a costa de cambiar el perfil compuesto AZ/HZ a uno con mayor módulo resistente, pero con mayor peso, es decir a costa de encarecer la solución.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos con el programa Plaxis para la pantalla AZ/HZ del estudio de alternativas en función de los tiempos de actuación de la precarga.

Tabla 3. Resultados programa Plaxis. Pantalla anclada a tablestaca con diferentes tiempos de actuación de precarga. Fuente: S. Carrillo (2024)

					sin reducir espesor				reduciendo espesor por la corrosión			
					módulo resistente elástico		módulo resistente plástico		módulo resistente elástico		módulo resistente plástico	
	Tiempo espera tras Precarga	Axil (kN)	M (kN*m)	Q(kN)	tensión (kN/mm2)	Coef. Seg.	tensión (kN/mm2)	Coef. Seg.	tensión (kN/mm2)	Coef. Seg.	tensión (kN/mm2)	Coef. Seg.
Malla drenes Triangular (1,5)	7d	1020	5315	807	379,15	1,21	354,82	1,30	403,00	1,14	377,13	1,22
Triangular (1,5)	60d	935	4655	713	332,89	1,38	311,58	1,48	353,83	1,30	331,18	1,39
Triangular (1,5)	90d	920	4464	689	319,69	1,44	299,26	1,54	339,80	1,35	318,08	1,45
Triangular (1,5)	180d	818	3940	661	282,28	1,63	264,25	1,74	300,04	1,53	280,87	1,64

4.2. Solución de anclaje a encepado micro pilotado

Tras un análisis pormenorizado de las deformaciones y modos de fallo de los modelos de Plaxis, se llega a la conclusión de que hay que conseguir minimizar el movimiento del anclaje en su conexión con la pantalla trasera. Para conseguirlo, se sustituye dicha pantalla trasera por un encepado micro pilotado, que supone las siguientes ventajas:

- Se reduce el movimiento del punto de anclaje del tirante y de la pantalla delantera
- Se reducen las solicitaciones de la pantalla delantera
- Es posible reducir el perfil compuesto a uno más ligero y con menor módulo resistente (HZ-1180M D-14 / AZ-26 397 kg/m² se sustituye por HZ-1080 M C-24 / AZ-30 -750 26 306 kg/m²)
- Se elimina la incertidumbre de la viabilidad de la hinca de la pantalla trasera debido a la existencia del antiguo cierre del contorno del espigón norte de Raos.

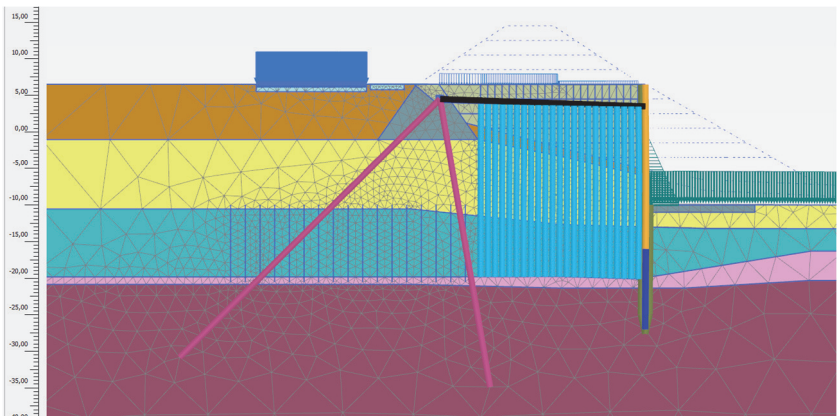


Fig. 13. Pantalla AZ/HZ anclada a encepado micro pilotado. Fuente: elaboración propia. (2023)

Finalmente, se realiza una comparativa entre la solución anclada a pantalla trasera y la solución anclada a encepado micro pilotado que concluye con la toma de decisión de elegir esta última opción para el proyecto constructivo.

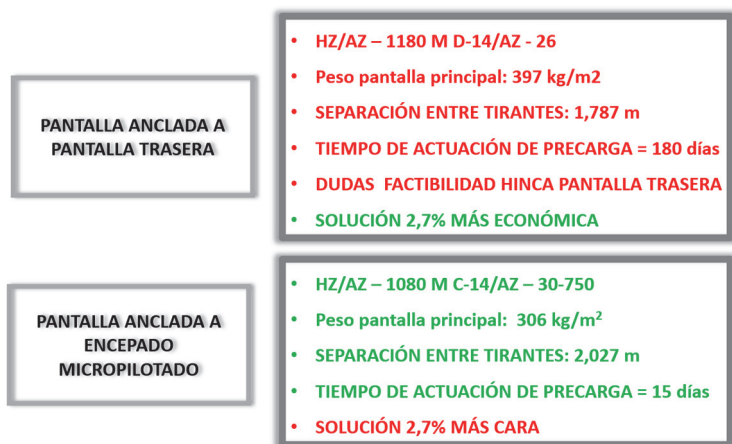


Fig. 14. Esquema aspectos considerados en la toma de decisión de cambio de tipología estructural para anclaje de la pantalla principal. Fuente: elaboración propia. (2023)

Como se puede ver en la figura anterior, la reducción de número de tirantes, tiempo de actuación de la precarga y peso de la pantalla principal son determinantes para optar por el encepado micro pilotado para la fijación de los tirantes.

4.3. Proceso constructivo

El proceso constructivo contemplaba las siguientes fases:

- MOTA Y DRENES MECHA
- COLOCACIÓN DE PRECARGA
- RETIRADA DE PRECARGA
- HINCA DE PANTALLA COMBINADA DE TABLESTACAS
- EJECUCIÓN DE MICROPILOTES
- EXCAVACIÓN DEL TRASDÓS
- EJECUCIÓN DE ENCEPADO
- COLOCACIÓN DE TIRANTES
- FINALIZACIÓN DEL TRASDÓS
- EJECUCIÓN DE VIGA CANTIL
- PAVIMENTOS E INSTALACIONES
- RETIRADA DE MOTA EN EL FRENTE
- DRAGADO

5. Información relevante del proyecto

A continuación, se incluyen algunos datos relevantes del proyecto constructivo.

CANTIDADES

- PEDRAPLÉN EN MOTA: **98,8 x 10³ m³**
- MECHAS DRENANTES: **51 x 10³ ML**
- ACERO EN PANTALLA COMPUESTA: F1 = 1.738·10³ kg; F2 = 1.113·10³ kg;
TOTAL = 2,85 M KG
- ACERO EN TIRANTES: F1 = 312 x 10³ KG (104 UDS); F2 = 205,7 x 10³ KG (69 UDS);
TOTAL = 517 x 10³ KG (173 UDS)
- MICROPILOTES: F1 = 26.913 ML (547 UDS); F2 = 12603 ML (302 UDS);
TOTAL = 39.516 (849 UDS)

OTROS

- REALIZADO BIM
- CAMPAÑA DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL DE DRAGADO
- ESTUDIO DE MANIOBRAS CON MODELO NUMÉRICO (SIPORT XXI)
- EL PROYECTO INCLUYE:
 - DISEÑO DE INSTALACIONES ELÉCTRICA, ABASTECIMIENTO E ILUMINACIÓN
 - DRENAJE
 - PAVIMENTACIÓN

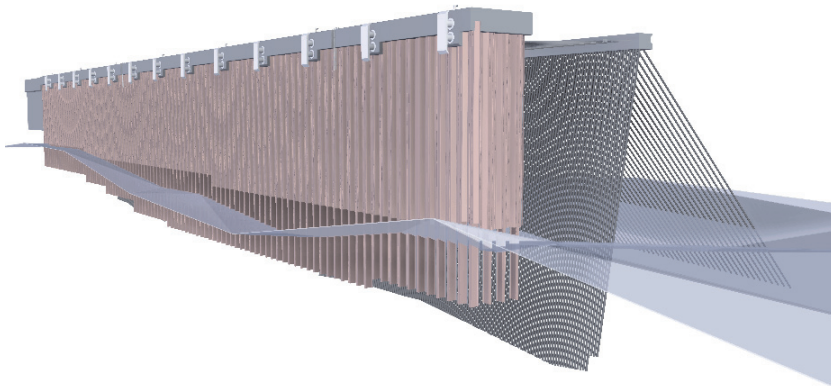


Fig. 15. Modelización BIM del proyecto constructivo del Muelle Raos 6. Fuente: elaboración propia. (2023)

6. Resumen y conclusiones

- **Condicionantes de diseño:**
 - Terrenos con escasa capacidad portante y muy deformables y también terrenos que por su elevada resistencia hacen imposible ciertas técnicas de tratamiento de terreno o contenciones.
 - Elevadas cargas de diseño.
 - Infraestructuras existentes que hay que proteger.
 - Afección mínima a la operación del puerto buscando reducir el plazo de ejecución.
- **Diseño de pantallas de tablestacas:**
 - Necesidad de consolidar los terrenos antes de construir el muelle y hacer compatibles dichos movimientos con los anclajes que tienen su limitación al respecto.
 - Búsqueda de mejor solución que limite futuros problemas durante las obras.
- **Conclusión:**
 - Tipologías estructurales que a priori son más caras y se suelen descartar, pueden resolver problemas de ejecución y ser competitivas económicamente. Para ello se requieren las comprobaciones necesarias durante la fase de proyecto con el objetivo de encontrar la solución óptima

Referencias bibliográficas

- ROM 2.0-11. Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución en Obras de Atraque y Amarre. Programa ROM. Puertos del Estado, 2011.
- ROM 0.5-05. Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias. Programa ROM. Puertos del Estado, 2005.
- Autoridad Portuaria de Santander. Proyecto de Construcción Muelle Raos 6 – Fase 1, diciembre 2023.
- Autoridad Portuaria de Santander. Proyecto de Construcción Muelle Raos 6 – Fase 2, noviembre 2024.
- Sánchez, N, Carrillo, S, Suárez, R, Manrique, C, Zamora, S, González, J.M, 2024. Muelle de Raos. Pantalla de tablestacas en terrenos deformables con escasa capacidad portante. XVII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Ibiza. 2024.

Proyecto de ejecución de un nuevo muelle de hidrocarburos en la Ría de Huelva-Muelle Sur (Tartessos)

M^a Piedad Herrera^a, Rodrigo Ortiz^b, Natalia Fernandez^c, Jesús Cáceres^d y Roberto Pillado^e

^aPROES Consultores S.A., mariapiedad.herrera@proes.es; ^bJV TPT, rodrigo.ortiz@exolum.com,

^cJVTPT, natalia.fernandez@exolum.com, ^dJV TPT, jesus.caceres@cepsa.com y ^e PROES Consultores S.A roberto.pillado@proes.es.

How to cite: Herrera, M^a P.; Ortiz, R.; Fernandez, N.; Cáceres, J. & Pillado, R. (2024) Proyecto de ejecución de un nuevo muelle de hidrocarburos en la Ría de Huelva-Muelle Sur (Tartessos). Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

The Joint Venture EXOLUM-CEPSA (JV TERMINAL PUERTO TARTESSOS) is executing the construction and operation of a new continuous dock for energetic and other compatible liquid bulks in the Port of Huelva (Spain). With this new structure, both companies will carry out ship loading/unloading operations from/to the EXOLUM storage facilities in Huelva and the La Rábida Energy Park (PELR) owned by CEPSA. A total length of 511 m is proposed, giving continuity to the South Container Dock in a single alignment. The proposed structural solution is a combi-wall solution crowned at a level of +6.5 m, which allows the berth of energy bulk vessels according to the current operational conditions, with vessels of up to 80,000 DWT in a first phase, and energy vessels of up to 110,000 DWT in a second phase.

Keywords: dock, piles, combi-wall solution, maritime structures, navigation, dredging.

Resumen

La Joint Venture EXOLUM-CEPSA (JV TERMINAL PUERTO TARTESSOS), en calidad de titular, está en proceso de ejecutar la construcción y explotación de un nuevo muelle continuo para el atraque y distribución de graneles líquidos energéticos y otros compatibles en el Puerto Exterior de la zona de servicio en el Puerto de Huelva, en la Ría de Huelva (España). En dicho muelle ambas compañías realizarán operaciones de carga/descarga de buques desde/hasta las instalaciones de almacenamiento de EXOLUM en Huelva y el Parque Energético La Rábida (PELR) propiedad de CEPSA. Se plantea una longitud total de muelle de 511 m, dando continuidad al Muelle Sur de contenedores en una única alineación. La solución estructural planteada es la de muelle continuo de tablestacas coronado a la cota +6.5 m, que permita el atraque de buques de graneles energéticos según las condiciones operacionales actuales de la ría, con buques de hasta 80.000 TPM en una primera fase (adecuando el calado de la fosa de atraque para el atraque de los mismos), y buques energéticos de hasta 110.000 TPM en una segunda fase (requiriendo una repfundización de la fosa de atraque y canal de navegación).

Palabras clave: muelle, hidrocarburos, tablestacas, estructuras marítimas, navegación, dragado

1. Introducción

EXOLUM (compañía logística de hidrocarburos CLH S.A), compañía líder en almacenamiento y distribución de hidrocarburos líquidos, y CEPSA, una de las empresas líderes del sector energético en España, desean ampliar la capacidad de sus instalaciones localizadas en Huelva para la realización de operaciones combinadas de carga y/o descarga de hidrocarburos. Para ello, ambas compañías se constituyen en Joint Venture (JV TPT-Terminal Puerto Tartessos) ganando el concurso público de Concesión del Puerto de Huelva para la construcción y operación de un nuevo terminal para graneles energéticos y otros productos; con la principal singularidad de tener que adoptar una tipología de muelle continuo de tablestacas para dar continuidad al Muelle Sur de contenedores construido recientemente.

2. Objetivos

El nuevo muelle contará con un atraque para hidrocarburos cuya capacidad actual de los buques de diseño oscila entre 5.000 TPM y 110.000 TPM , y un segundo atraque en simultaneidad para buques BIOS/HVO (Proyecto Verde de CEPSA) con tamaños variables desde 5.000 TPM a 50.000 TPM.

Para la construcción del mismo, se destinarán aproximadamente unos 50 millones de Euros con una ejecución por fases condicionada a los futuros dragados que se realicen en el canal de navegación de la Ría de Huelva.

Este proyecto ha tenido en cuenta en su diseño, realizado por PROES Consultores S.A., los principales condicionantes climáticos, condicionantes de operación habitual de la Ría, y condicionantes de explotación de la terminal; que han requerido la realización de diversos estudios náuticos, y el desarrollo de una ingeniería básica y de detalle para la solución que se expone en los siguientes apartados.

3. Ubicación de las obras

El nuevo muelle se ubicará en la Ría de Huelva, a aproximadamente a 123 m al sur del Pantalán de DECAL, para permitir una maniobra de atraque y desatraque segura y evitar la afección a este en materia de dragado ya que los pilotes existentes están cimentados a la cota -18 m. Tendrá una longitud de 511 m en continuidad con el nuevo Muelle Sur de contenedores, y dará cabida a brazos e instalaciones asociadas, conectándose mediante multiducto con las instalaciones de EXOLUM y CEPSA en la localidad de Palos de la Frontera, Instalación de Almacenamiento de Huelva y Parque Energético de La Rábida.

El nuevo muelle continuo, instalaciones de servicios asociadas y parte de las líneas de conexión se construirán en la zona V Puerto Exterior y Muelle Ingeniero Juan Gonzalo en la subzona V.2 Puerto Exterior, en las parcelas V.2.3.C y V.2.5.

La instalación se proyecta bajo el nombre “Proyecto nuevo atraque y líneas de conexión con las instalaciones existentes en EXOLUM y CEPSA”, denominado **“Proyecto Muelle Sur”**.



Fig. 1 Ubicación del nuevo muelle

4. Condicionantes técnicos

La amplia flota de diseño junto con el amplio rango de carrera de marea existente en la Ría de Huelva, y la ejecución de un muelle continuo para una terminal de hidrocarburos han sido los aspectos técnicos que más condicionantes han supuesto para la ejecución del **“Proyecto Muelle Sur”**.

4.1. Flota de diseño

Se proyecta el nuevo muelle para permitir el atraque de buques de hasta 80.000 TPM (pudiendo llegar hasta 110.000 TPM sólo en caso de que se incremente el calado de navegación en una segunda fase). Asimismo, se ha diseñado para situaciones de simultaneidad con buques BIOS/HVO de hasta 50.000 TPM en el mismo muelle, en un atraque independiente.

Como flota de diseño se han considerado los buques más representativos del rango establecido por JV-TPT:

- Atraque norte (graneles energéticos): tamaño máximo 80.000 TPM con posibilidad de aumentar a 110.000 TPM en una segunda fase. Posibles tamaños menores: 15.000 TPM, 20.000 TPM, 30.000 TPM, 45.000 TPM y 50.000 TPM.
- Atraque sur (HVO/BIOS): tamaño máximo 50.000 TPM. El tamaño mínimo esperado es 5.000 TPM. Posibles tamaños intermedios: 5.000 TPM, 15.000 TPM, 20.000 TPM, 30.000 TPM y 45.000 TPM.

La Tabla 1 muestra las características principales de los buques esperables.

Tabla 1. Características principales de la flota de diseño

Buque tipo:	110000	80000	50000	45000	30000	20000	15000	5000
TPM (t)	110000	80000	50000	45000	30000	20000	15000	5000
Eslora total (m)	253.6	229.0	183.0	183.0	171.2	157.4	151.0	110.0
Δ (t)	134472.6	87979.0	60554	54963	38714	27502.5	22800	7970
Eslora entre perpendiculares (m)	242.0	220.50	175.9	175	163.68	147.2	146	102
Manga (m)	44.0	32.3	32.23	32.0	27.4	24.5	24.5	17.5
Puntal (m)	21.4	20.6	19.1	18.0	17.3	13.4	12.1	8.2
Calado máximo en carga (m)	15.2	14.1	13.3	12.0	10.6	9.8	9.3	6.8
Calado en lastre (m)	8.8	7.47	7.10	7.55	7.20	6.00	5.57	4.02

4.2. Clima marítimo

Se ha caracterizado oleaje, viento, corrientes y niveles del mar en las proximidades de la Ría de Huelva. A continuación, se resumen brevemente los principales resultados obtenidos del análisis realizado para cada uno de ellos.

4.2.1. Niveles del mar

Los niveles del mar de referencia considerados son los obtenidos del mareógrafo del Puerto de Huelva, perteneciente a la REDMAR (Red de Mareógrafos de Puertos del Estado). La serie de datos empleada cuenta con mediciones desde 13/09/1996 hasta el 17/11/2022. La estación 3329 está ubicada en las coordenadas 692761.48 m, 4111497.86 m (WGS84).

La Tabla 2 muestra los niveles de marea:

Tabla 2. Niveles de marea

Niveles de marea característicos	Elevación respecto al NMM	Elevación respecto al CERO Puerto
Máximo nivel observado	+2.21 m	+4.23 m
Máxima Marea Astronómica	+2.01 m	+4.03 m
Pleamar máxima diaria media	+1.18 m	+3.20 m
Pleamar media	+1.11 m	+3.13 m
Nivel Medio del Mar	+0.0 m	+2.02 m
Bajamar media	-1.06 m	+0.96 m
Bajamar mínima diaria media	-1.10 m	+0.92 m
Mínima Marea Astronómica	-1.96 m	+0.06 m
Cero del Puerto	-2.02 m	+0.00 m
Mínimo nivel observado	-2.10 m	-0.08 m

4.2.2. Oleaje y viento exterior

Para la caracterización del oleaje y el viento en la zona se ha obtenido el registro correspondiente al nodo SIMAR 5032022 de Puertos del estado, ya que su extensión temporal permite la realización de un análisis estadístico fiable tanto en términos medios como extremal. La Fig.2 muestra la rosa de altura de ola significativa (izq.) y de velocidad de viento (dcha)

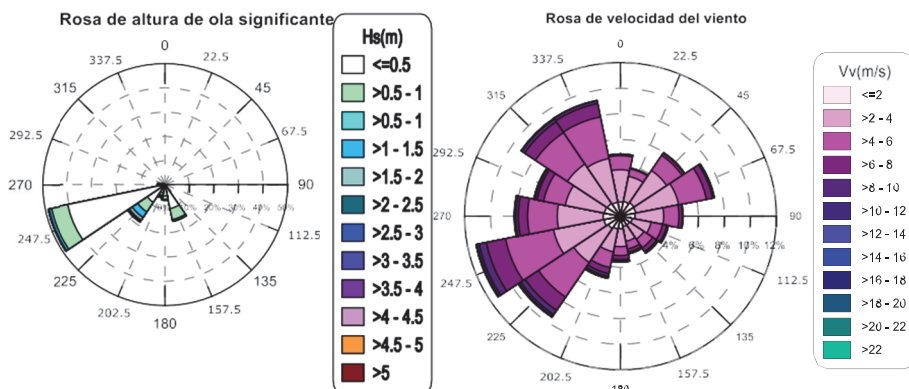


Fig. 2 Rosa direccional de altura de ola significativa anual (izq) y velocidad de viento (dcha). SIMAR 5032022

Posteriormente, se ha obtenido el oleaje generado por viento en el muelle haciendo uso del método propuesto en la ROM 04.95 a partir de la longitud del Fetch.

4.2.3. Corrientes

Se ha realizado un estudio completo de la hidrodinámica de la Ría de Huelva con el software MOHID. Asimismo, se ha contado con mediciones de corrientes en la zona de proyecto durante un periodo de tres meses (de abril a julio de 2021).

En el estudio hidrodinámico realizado, se observa cómo los valores de corriente están íntimamente relacionados con el régimen de mareas, que no experimenta variaciones significativas a lo largo del año. Se ha considerado un valor de corriente de diseño de 3 nudos, correspondiente al valor máximo registrado.

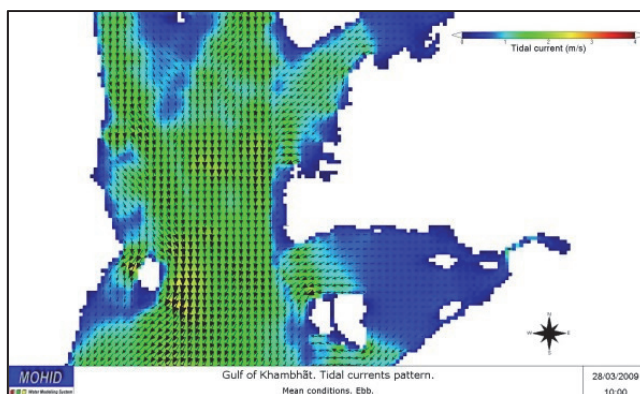


Fig. 3 Modelización hidrodinámica realizada con MOHID

4.3. Compatibilidad náutica

Como se ha comentado, uno de los principales condicionantes de diseño es la amplia flota de buques en una zona con mareas relevantes, junto con la ejecución de un muelle continuo para mercancía peligrosa. Este hecho, ha llevado a la realización de un análisis exhaustivo de las configuraciones de amarre y de su comportamiento frente a buques pasantes por la Ría.

Así pues, se ha determinado la geometría, distribución y elevación de las interconexiones buque-terminal, verificando la compatibilidad del sistema de amarre y defensa con la flota de diseño. Además, se han definido las envolventes de trabajo de los brazos de carga y descarga y de las pasarelas de acceso a buques.

El comportamiento de buque amarrado ha sido analizado usando el modelo numérico OPTIMOOR desarrollado por Tension Technology International, Ltd. (versión 6.8.5), y el modelo ANyMOOR.TERMSIM + ROPES.

En primer lugar, se ha realizado un estudio de buque amarrado (sin buque pasante) en el que se ha comprobado el comportamiento de buque amarrado frente a las condiciones climáticas de la zona. En este sentido, se han obtenido valores de tensiones en líneas para vientos extremos de 44 nudos, corriente ambiental de 3 nudos y niveles extremos de marea, sin superar para ninguno de los buques de diseño los porcentajes límite de rotura (líneas entorno al 10-15% del MBL).

Adicionalmente, se ha analizado el efecto en amarras de buques pasantes de distintas tipologías y distintas velocidades entre 8 y 10 nudos sobre el agua. Para ello, se han considerado 4 buques representativos de los que actualmente operan en la Ría, en condiciones de viento operacional de 20 nudos y corriente ambiental de 3 nudos con niveles extremos de marea. Se demuestra que la configuración de amarras propuesta produce unos esfuerzos en los buques atracados y unos movimientos que son compatibles con su operación en el atraque.

Finalmente, para garantizar la maniobra de atraque y desatraque en condiciones de seguridad se ha realizado un estudio de maniobras en tiempo real con el simulador con el que cuenta PROES en sus oficinas (SIMFLEX-Force Technology).

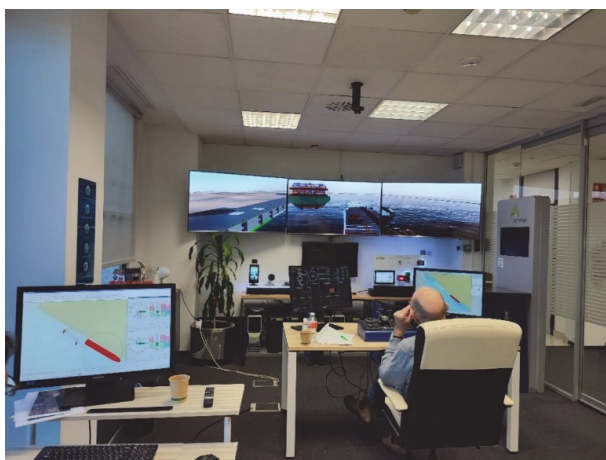


Fig. 4 Fotografía realizada durante la ejecución de las maniobras

5. Desarrollo de la solución adoptada

El muelle se diseña para una cota de dragado a la -17 m para albergar buques de hasta 110.000 TPM y 254 m de eslora (la tipología de tablestacas en muelles de gran calado optimiza los volúmenes de dragado y reduce afección ambiental), si bien se realizará un dragado por fases condicionado a los dragados futuros previstos en el canal de navegación de la Ría (de acuerdo al Proyecto “Habilitación a nuevos tráficos de la canal del Puerto de Huelva”): (a) Fase 0 para albergar buques de dimensiones actuales en la Ría; (b) Fase 1 para buques de 80.000 TPM, y (c) Fase 2 para buques de hasta 110.000 TPM.

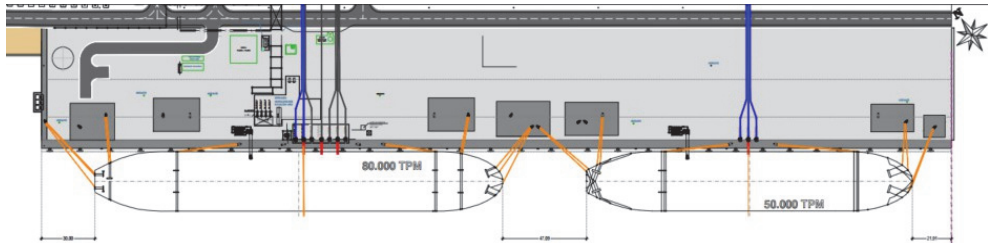


Fig. 5 Planta de estado futuro

A diferencia de la tipología estructural habitual empleada en muelles de hidrocarburos, el nuevo muelle, coronado a la cota +6.5 m, se plantea con una sección tipo combi-wall formado por pilotes metálicos HZ de sección 1180 MB 12 S-460AP, conectados lateralmente por tablestacas AZ 28-750 S-270GP. La pantalla frontal está conectada a una pantalla de anclaje (formada por perfiles AZ 28+750 S-430GP Doble) que se encuentra a 37 m de distancia en el trasdós, mediante tirantes metálicos macizos ASDO 500 M 115/90, separados 2.02 m, a la cota +1.0 m.

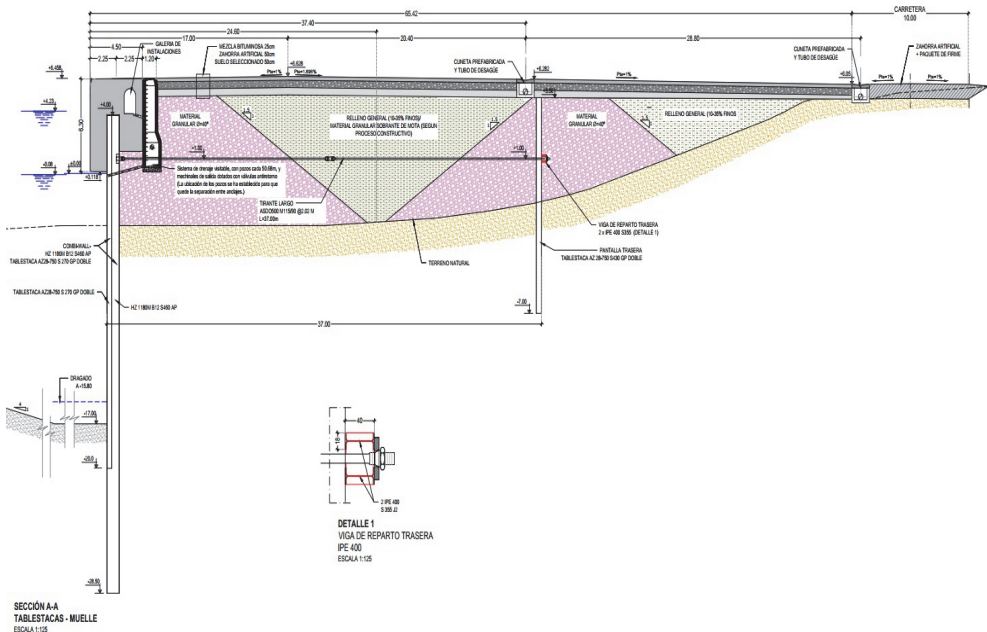


Fig. 6 Sección tipo propuesta

Para el cierre lateral norte, se reproducirá una sección similar (mismos perfiles de tablestacas) pero con tirantes a la cota +1.50 m, para permitir el cruce con los tirantes de la sección principal de pantalla delantera y trasera, tal y como se muestra en la siguiente figura.



Fig. 7 *Planta de tablestacas y tirantes*

Por debajo de los 12 m de profundidad, la sección se modifica aligerándola con perfiles HZ 1080M A12 S460 AP hincados hasta la cota -23.50 m, conectados con tablestacas AZ 28-750 S270 GP a la cota -20 m. Los tirantes pasan a ser ASDO 500 M90/68. Asimismo, el muelle requerirá un dragado al norte del mismo para conseguir las dimensiones de la fosa de atraque que establece la ROM 2.0-11. Para contener estos taludes de dragado, se proyecta una pantalla frontal de tablestaca AZ36-700N DOBLE S430 GP hincada hasta la cota -20.0 m.

A lo largo de todo el muelle se colocará sobre la tablestaca principal una viga cantil coronada a la cota +6.5 m donde se instalarán las defensas y los ganchos de escape rápido necesarios para garantizar un correcto amarre y atraque.

Esta estructura será de hormigón armado con unas dimensiones de 4.5 m de ancho y 6.30 m de alto. Ésta está empotrada en la pantalla combi-wall 3.8 m de longitud de tal forma que se garantice el empotramiento en el extremo superior de la pantalla. No obstante, se añadirán en esta zona pernos conectores $\Phi 22$ a cada lado soldados al perfil HZ.

En la parte interior de la viga cantil se tiene una galería de servicios de 1.70 m de altura por 1 m de ancho. Se dispondrán en la misma 8 pasos $\Phi 110$ mm para canalizaciones cada 100 m a lo largo de todo el muelle. Asimismo, se colocará un tubo para salida de aguas que conectará con los pozos colocados en el trasdós para controlar el nivel de las aguas en la parte trasera manteniéndolo a la +1.8 m.

6. Aspectos constructivos

La construcción del muelle se está realizando por vía terrestre desde una mota perimetral, siguiendo la metodología constructiva del Muelle Sur contiguo destinado a contenedores. Esa mota estará constituida por piedra exenta de finos, con un ángulo de rozamiento interno de al menos 40° y tamaño máximo 150 mm.

La hinca se hará por medios terrestres desde las motas. La ejecución se hará por recintos estancos (3 o 4 recintos por muelle) desde los cuales se hincarán las tablestacas delantera y trasera. Tras la hinca de las pantallas, parte del material granular de aportación de la mota será empleado para relleno de la sección. No obstante, en la parte trasera resulta necesario aportar más material con características de relleno general (10-35% finos).

Teniendo en cuenta las actuaciones que contempla la Autoridad Portuaria de Huelva en los próximos años, se considera un dragado por fases:

- Fase 0 para albergar buques de dimensiones habituales en la Ría. Con dragado actual del canal de navegación y del área de maniobras.
- Fase 1 de dragado para albergar buques de 80000 TPM en el atraque de buques energéticos y de 50000 TPM en el de BIOS/HVO. Calado mínimo la fosa de atraque de -15.8 m (referidos al Cero del Puerto).
- Fase 2 de dragado para albergar buques de 110000 TPM en el atraque de buques energéticos, en caso de que finalmente se realice el aumento de calado en el canal de navegación y zona de reviro. Calado mínimo la fosa de atraque de -17.0 m (referidos al Cero del Puerto)

No obstante antes de ejecutar cualquier dragado en el frente de atraque será imprescindible haber instalado completamente los tirantes, que son los que garantizan la estabilidad de las tablestacas delanteras.

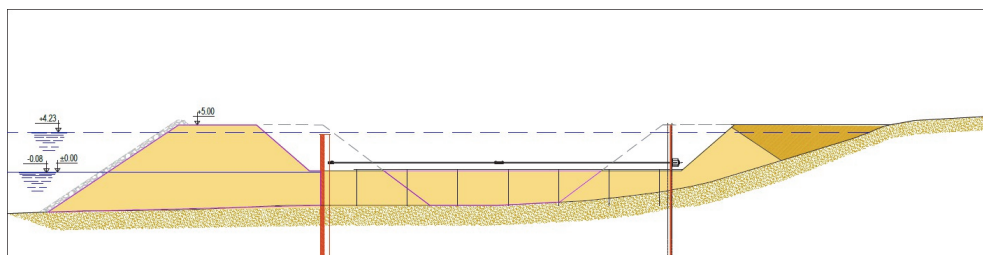


Fig. 8 *Hinca de tablestacas y colocación de tirantes por medios terrestres*

Posteriormente, se ejecutará la viga cantil y superestructura y se procederá a la pavimentación del muelle (de acuerdo a la ROM 4.1-18) y a la instalación del equipamiento marino.

Referencias

Pliego de bases para la contratación de la Asistencia Técnica para la redacción del Proyecto “Habilitación a nuevos tráficos de la canal del Puerto de Huelva”, redactado en abril de 2020.

ROM 0.4-95 ACCIONES CLIMÁTICAS II: VIENTO

ROM 2.0-11 Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución en Obras de Atraque y Amarre.

ROM 4.1-18 Recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios

Daño por fatiga en las conexiones de diques flotantes modulares

Alejandro J. Cebada Relea^a, Mario López Gallego^b y Manuel Aenlle López^c

^aGrupo de Investigación DyMaSt, Dpto. de Construcción e Ingeniería de la Fabricación, Universidad de Oviedo, , cebadaalejand@uniovi.es; ^bGrupo de Investigación DyMaSt y Centro Universitario de Investigación y Desarrollo del Agua (CUIDA), Universidad de Oviedo, , mario.lopez@uniovi.es ^cGrupo de Investigación DyMaSt, Universidad de Oviedo, , aenlle@uniovi.es.

How to cite: Cebada Relea, A.; López Gallego, M. & Aenlle López, M. (2024). Daño por fatiga en las conexiones flotantes modulares. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

This study investigates the fatigue damage in the connections of modular floating breakwaters, with a particular focus on a case study in Galicia. Despite being economical structures with low environmental impact, the connections between floating modules are susceptible to structural failures due to fatigue caused by cyclic loading. To calculate the accumulated damage and the service life of the connection, an approach based on stress transfer functions and the Wirsching-Light spectral method is applied, which accounts for the site-specific wave conditions of the bay. The results indicate that wind waves cause larger damage than swell ones. Intermediate connections present an estimated service life of 4-5 years, while the outer connections may exceed 80 years. This study highlights the importance of detailed analysis to improve the durability and safety of floating shelter structures.

Keywords: *Floating breakwater, structural fatigue, spectral methods, endurance.*

Resumen

Este estudio investiga el daño por fatiga en las conexiones de diques flotantes modulares, con un enfoque particular en un caso de estudio en Galicia. A pesar de ser estructuras económicas y de bajo impacto ambiental, las conexiones entre módulos flotantes son vulnerables a fallos estructurales debido a la fatiga provocada por ciclos prolongados de carga. Para calcular el daño acumulado por fatiga y la vida útil de la conexión se emplea un enfoque basado en las funciones de transferencia de tensión, y el método espectral de Wirsching-Light, que tiene en cuenta las condiciones de oleaje específicas de la bahía. Los resultados indican que el oleaje de viento genera un daño mayor que el oleaje de fondo. Las conexiones intermedias presentan una vida útil estimada de 4-5 años, mientras que las conexiones externas pueden superar los 80 años. Este estudio resalta la importancia de un análisis detallado para mejorar la durabilidad y seguridad de las estructuras de diques flotantes.

Palabras clave: *Diques flotantes, fatiga estructural, métodos espectrales, durabilidad.*

1. Introducción

Los diques flotantes son utilizados desde hace décadas por su economía frente a las soluciones fijas y su menor impacto ambiental (Fig. 1). Su rango de aplicación está restringido a ubicaciones con un clima marítimo suave, con alturas de ola de diseño de escasos metros (Hales, 1981). A pesar de sus ventajas, son frecuentes sus fallos estructurales y, estos suelen estar relacionados con su talón de Aquiles: las conexiones entre módulos (Richey, 1982).

El diseño de estas estructuras requiere un estudio profundo de su comportamiento hidrodinámico. Habitualmente esto se realiza mediante dos procedimientos: los ensayos físicos y los modelos numéricos. Los ensayos físicos se llevan a cabo en tanques de olas y permiten analizar de forma precisa la respuesta hidrodinámica bajo condiciones similares a las reales (Martinelli et al., 2008). El alto coste de este procedimiento, unido al avance de las técnicas de computación, han permitido desarrollar modelos numéricos o CFD (por sus siglas en inglés *computational fluid dynamics*) que son capaces de reproducir el comportamiento hidrodinámico. Los modelos que resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes ofrecen gran precisión del cálculo hidrodinámico, ya que pueden reproducir efectos no lineales complejos (Ren et al., 2017; Schmitt and Elsäßer, 2017). Sin embargo, requieren de una alta capacidad de procesamiento, especialmente cuando hay varias estructuras involucradas en el análisis. Alternativamente, existen modelos basados en la teoría del flujo potencial como el método de los elementos de contorno o BEM (del inglés *Boundary Element Method*), con los que se consigue un compromiso razonable entre precisión y coste computacional (Aliabadi and Wen, 1984).



Fig. 1. *Dique flotante modular de tipo pontón en funcionamiento (panel superior izquierda), detalle de conexión entre módulos flotantes (panel inferior izquierda) y rotura de conexión (panel derecho)*

El estudio de los modos de fallo que se produce en las conexiones es un asunto de gran interés para el diseño de diques flotantes. Los principales fallos que conducen a la rotura son dos. Por un lado, se produce el agotamiento de la sección cuando se excede la resistencia nominal de rotura de la conexión (Cebada-Relea et al., 2022). Este suele ser el resultado de exponer el dique flotante a oleajes severos, como las marejadas o las tormentas (ver Fig. 1 panel derecho). El otro modo de fallo ocurre por el daño acumulado a fatiga en los cables de acero trenzado que forman parte de la conexión (ver Fig. 2), cuando ésta se enfrenta a reiterados ciclos de carga de forma prolongada durante su vida útil.

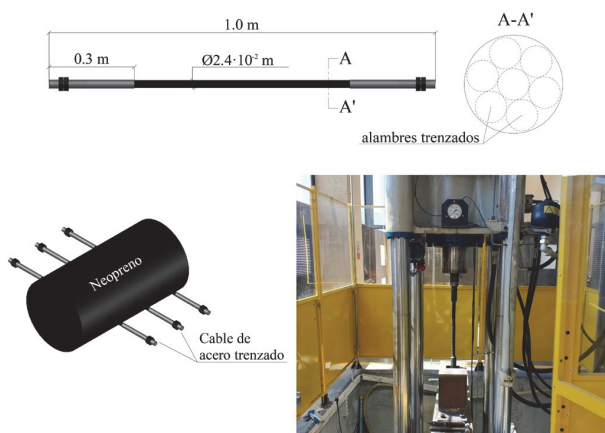


Fig. 2. Detalle del cable trenzado (panel superior) empleado en las conexiones (panel izquierdo) y ensayo de carga de rotura del cable trenzado (panel derecho). Fuente: SF-Marina, n.d.

La forma más precisa de estimar el daño por fatiga es combinar un método de conteo de ciclos de tensión sobre el registro o historial de tensiones – comúnmente el algoritmo Rainflow desarrollado en Matsuichi and Endo, 1968 –, junto con un modelo de daño como la regla de Palmgren-Miner (Miner, 2021). Varios estudios previos se han centrado en analizar el agotamiento de las conexiones de un dique flotante bajo cargas extremas de oleaje (Cebada-Relea et al., 2023; Ferreras et al., 2014), sin embargo la literatura es escasa en trabajos sobre su comportamiento a fatiga. Este procedimiento se vuelve costoso a medida que el registro temporal crece. Alternativamente, existen métodos espectrales de estimación de daño basados en el dominio de la frecuencia (Zorman et al., 2023) que, pese a no ser tan precisos, son más eficientes y, además, permiten ver comportamientos que serían imposibles de deducir en el dominio del tiempo, por ejemplo los modos de vibración o resonancias (Muñiz-Calvente et al., 2022).

La estimación numérica de la vida útil o del daño por fatiga en las conexiones de un dique flotante es un proceso computacionalmente costoso, debido al procesamiento necesario para obtener la serie temporal numérica de tensión en cada conexión. Este proceso requiere realizar múltiples simulaciones hidrodinámicas y repeticiones de los diferentes estados de mar que caracterizan al oleaje incidente, al que se prevé que el dique flotante sea expuesto (DNV GL, 2017). Otro procedimiento más novedoso y eficaz consiste en obtener las funciones de transferencia de tensión en las conexiones de la estructura (Cebada-Relea et al., 2024), las cuales permiten estimar el espectro de tensiones de forma sencilla para cualquier estado de mar con el que, posteriormente, utilizar un método espectral de estimación de daño adecuado.

En este trabajo se evalúa el daño por fatiga en las conexiones de un dique pontón flotante modular que se situaría en el entorno de la Bahía de Bouzas (Galicia, España). La estructura analizada está formada por siete módulos flotantes fondeados a una profundidad de 5 m. Para estimar el daño a fatiga en los cables que componen las conexiones del dique, se obtuvieron las funciones de transferencia de tensión simulando la estructura frente a un espectro blanco de oleaje y considerando diferentes ángulos de incidencia. El cálculo del daño acumulado se realizó utilizando el método espectral de fatiga de Wirsching-Light. Como paso previo, se caracterizó el oleaje de la zona de estudio a partir de registros temporales de 57 años del modelo SIMAR, diferenciando entre mar de fondo y mar de viento, y se determinó la probabilidad anual de ocurrencia de cada estado de mar.

Los estados de mar se caracterizaron mediante espectros irregulares de oleaje y, con ellos se estimó el espectro de tensiones en cada conexión. Finalmente, el daño total acumulado en las conexiones se obtuvo como la suma ponderada de los daños que produce cada estado de mar sobre la conexión, multiplicados por su probabilidad anual de ocurrencia.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es determinar mediante simulación numérica el daño por fatiga en las conexiones de un dique flotante, empleando como base un caso de estudio real. Para alcanzar esta meta se han definido una serie de objetivos específicos que establecen una hoja de ruta clara hacia el objetivo principal. Estos son:

- Simular la estructura frente a un espectro de oleaje de ruido blanco.
- Determinar las funciones de transferencia de tensiones en cada cable de las conexiones de la estructura.
- Analizar la propagación del oleaje en la zona de estudio y caracterizar los estados de mar.
- Obtener la matriz de probabilidad anual de ocurrencia de los distintos estados de mar en la zona de estudio.
- Aplicar metodologías espectrales para calcular el daño por fatiga y la vida útil de las conexiones.

3. Desarrollo de la innovación

La estructura flotante de protección consta de 7 pontones modulares conectados entre sí mediante juntas de tipo bisagra y fondeados a 5 m de profundidad sobre el lecho marino mediante 4 cabos elasticos por cada módulo flotante. Fig. 3 muestra un esquema conceptual de la estructura proyectada. Se han considerado las dimensiones y propiedades mecánicas del modelo utilizadas en estudios previos (A.J. Cebada-Relea et al., 2022).

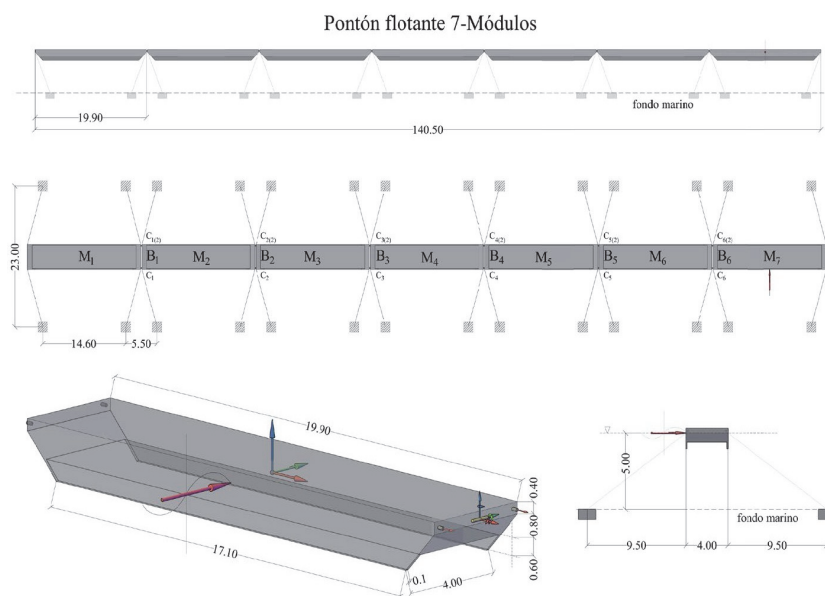


Fig. 3. Esquema estructural y dimensiones en [m] del dique flotante pontón de 7 módulos. **Mi** hace referencia al número de pontón modular, **Bi** al número de junta bisagra y **Ci** al número de conexión

3.1. Modelo numérico y tensión axial en los cables

La respuesta hidrodinámica del dique flotante se simula mediante el método BEM en el dominio del tiempo, que está basado en la teoría del potencial. Cada módulo flotante se malla utilizando ≈ 2.300 paneles cuadriláteros difractantes (ver Fig. 4) con una dimensión de 0.5 ± 0.1 m, para un total de ≈ 16.100 elementos.

El sistema de fuerzas que actúa sobre el módulo pontón se calcula en cada paso temporal siguiendo la siguiente expresión:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{f}_h(t) + \mathbf{f}_I(t) + \mathbf{f}_d(t) + \mathbf{f}_r(t) + \mathbf{f}_c(t) + \mathbf{f}_m(t) \quad (1)$$

donde $\mathbf{M}$ es la masa del pontón, $\ddot{\mathbf{u}}$ es la aceleración, $\mathbf{f}_h(t)$ es la fuerza hidrostática, $\mathbf{f}_I(t)$ es la fuerza del oleaje incidente, $\mathbf{f}_d(t)$ es la fuerza de difracción, $\mathbf{f}_r(t)$ es la fuerza de radiación, $\mathbf{f}_m(t)$ es la fuerza de los amarres y $\mathbf{f}_c(t)$ representa las fuerzas en las conexiones.

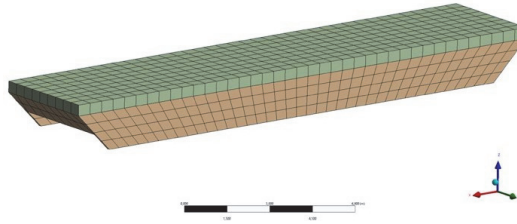


Fig. 4. Malla de paneles difractantes aplicada sobre el módulo pontón. En color marrón se muestran los elementos situados por debajo del nivel del mar y en verde aquellos situados por encima

Las fuerzas de conexión inter-modulares se modelan con elementos de tipo bisagra que permiten el movimiento de cabeceo relativo entre dos pontones consecutivos (ver Fig. 5). Estos elementos permiten obtener las fuerzas de reacción en cada grado de libertad de la junta y han sido previamente calibrados en A.J. Cebada-Relea et al., 2022. La fuerza axial que soportan los cables de la conexión se calcula teniendo en cuenta las reacciones de la bisagra contenidas en el plano horizontal, la fuerza axial $F_{x-b}(t)$ y el par vertical $M_{z-b}(t)$. La fuerza axial equivalente en el cable de la conexión $F_{x-c}(t)$ se deduce como

$$F_{x-c}(t) = \frac{F_{x-b}(t)}{2} + \frac{M_{z-b}(t)}{2 \cdot y_{arm}}, \quad (2)$$

siendo $y_{arm} = 1.75$ m el brazo de aplicación del momento $M_{z-b}(t)$. Notar que, este procedimiento de transposición de carga considera que la fuerza axial en la conexión de barlovento y de sotavento es la misma (e.g. $F_{x-C4}(t) = F_{x-C4(2)}(t)$).

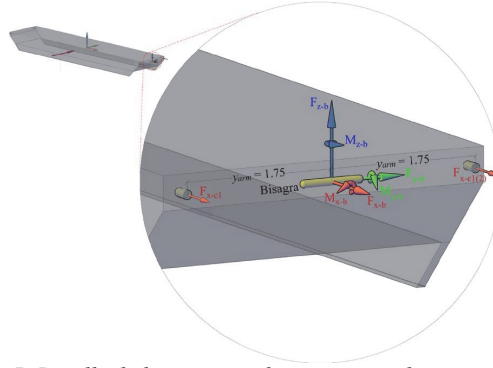


Fig. 5. Detalle de la junta tipo bisagra entre dos pontones consecutivos.

Una vez obtenida la fuerza axial en la conexión, la tensión axial $\sigma(t)$ que soporta cada cable es

$$\sigma(t) = \frac{F_{x-c}(t)}{A \cdot n_{cable}}, \quad (3)$$

con $n_{cable} = 3$ cables trenzados en la conexión con un área efectiva $A = \pi \cdot \phi^2 \cdot 4^{-1}$, donde el diámetro del cable es $\phi = 24$ mm (ver Fig. 2).

3.2. Metodología para el cálculo del daño por fatiga

El procedimiento llevado a cabo para estimar el daño por fatiga en los cables trenzados se muestra en Fig. 6. En primer lugar, se deben obtener las funciones de transferencia de tensión $H^2(f)$ de cada cable, que se consigue a través de la simulación de la estructura frente a un espectro blanco de oleaje. Las condiciones del oleaje que va a incidir sobre la estructura se obtienen a partir de espectros irregulares de energía de oleaje $S_w(f)$ como Pierson-Moskowitz (Pierson Jr and Moskowitz, 1964) o JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). A continuación, el espectro de energía de la tensión axial $S_\sigma(f)$ se determina utilizando la Ec.(4). Finalmente, se aplica el método espectral de daño a fatiga de Wirsching-Light (Wirsching and Light, 1980) – establecido como el método más adecuado en Cebada-Relea et al., 2024 – para obtener el daño a fatiga en el cable.

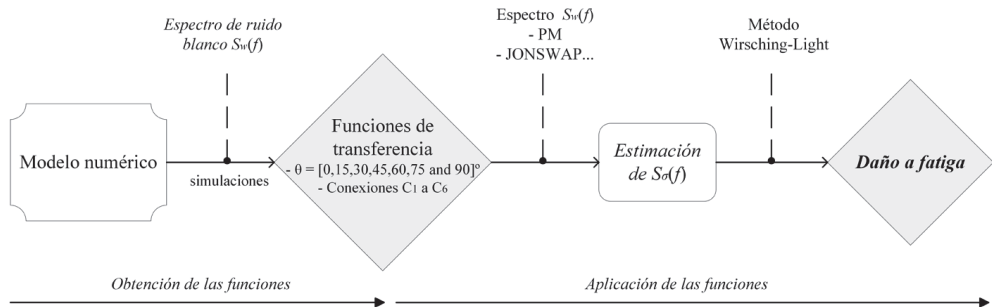


Fig. 6. Esquema del procedimiento para obtener y aplicar las funciones de transferencia de tensión en las conexiones del dique flotante

3.2.1. Funciones de transferencia de tensión

El modelo numérico de la estructura flotante se ha sometido a un espectro irregular de oleaje blanco durante 30 minutos, con un paso temporal de $\Delta t = 0.1$ s. Se simularon varios ángulos de incidencia del espectro de oleaje $\theta = [0, 15, 30, 45, 60, 75 \text{ y } 90]^\circ$. Además, el espectro contiene una densidad de energía $S_w(f) = 0.013 \text{ m}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ sobre todo su ancho de banda (ver Fig. 7), es decir, todas las frecuencias contenidas en el ancho de banda son excitadas por igual.

A partir de la tensión axial $\sigma(t)$ que se obtiene en los cables de la conexión, se estima la densidad de energía espectral $S_\sigma(f)$ usando la metodología propuesta por Welch, 1967. La función de transferencia de tensión $H^2(f)$ para cada conexión, se obtiene como el cociente entre el espectro de tensión $S_\sigma(f)$ y el espectro blanco de oleaje $S_w(f)$, es decir:

$$H^2(f) = \frac{S_\sigma(f)}{S_w(f)}. \quad (4)$$

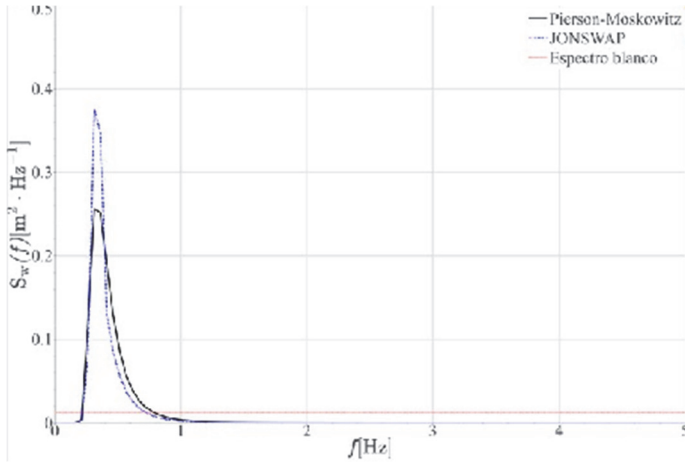


Fig. 7. Espectro blanco de oleaje y espectros Pierson-Moskowitz y JONSWAP

3.2.2. Daño por fatiga en los cables de acero trenzado

Conocidas las funciones de transferencia, es posible estimar el espectro de tensiones $S_\sigma(f)$ para cualquier estado de mar. Para ello, primero es necesario determinar las condiciones del oleaje al que la estructura va a estar sometida. Esto se detalla en el epígrafe 3.3.

Aparte de las tensiones existentes en cada conexión, para estimar el daño por fatiga también es necesario caracterizar el material del que se componen. El enfoque más común para caracterizar el comportamiento a fatiga de cualquier material bajo condiciones de carga cíclica es el uso de curvas Tensión-Número de ciclos (S - N), también conocidas como curvas de Wöhler (Cardei et al., 2019). Esta curva relaciona los rangos de tensión ($\Delta\sigma$) y el número de ciclos N que conduce al fallo por fatiga en cada nivel de tensión. La expresión analítica de la curva S - N , según el modelo de Basquin, viene dada por:

$$N = C \left(G_f \cdot \Delta\sigma \right)^{-k}, \quad (5)$$

donde $C = 3.4 \cdot 10^{14}$ es el parámetro de intersección, G_f es el factor de Goodman, y $k = 4$ es la pendiente de la curva, ambos parámetros empíricos definidos para un cable de alambre trenzado (DNVGL-OS-E301, 2015) (ver Fig. 8). En aplicaciones y materiales específicos se suele considerar un límite de durancia σ_{end} . Sin embargo, las curvas indicadas en las normas consideran una campo $S-N$ lineal (en escala logarítmica), es decir, sin límite de durancia.

El efecto de la tensión media en el daño por fatiga se ha considerado a través del factor G_f en Ec.(5) (Goodman, 1899). Si se consdiera $\sigma_{end} = 0$, este factor se define como:

$$G_f = 1 - \left(\sigma_m \cdot \sigma_u^{-1} \right), \quad (6)$$

donde σ_u es la tensión última calculada a partir de la carga axial de rotura del cable trenzado $F_u = 450$ kN (A. Cebada-Relea et al., 2022) y $\sigma_m = F_m \cdot A^{-1}$ es la tensión media en el cable trenzado para un nivel de fuerza de pretensado axial, que se ha considerado de $F_m = 50$ kN.

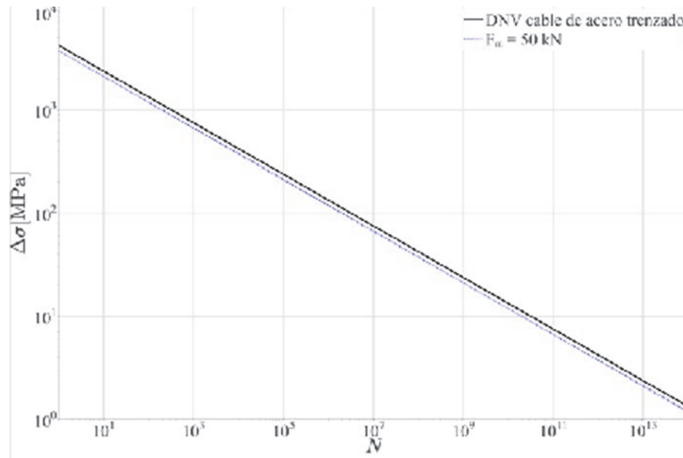


Fig. 8. Curva $S-N$ del cable de acero trenzado con pretensión del cable de $F_m = 50$ kN.
Fuente: (DNVGL-OS-E301, 2015)

Para procesos aleatorios estacionarios de banda ancha, el cálculo del daño espectral por fatiga D sólo se puede realizar de forma aproximada. En este trabajo se utiliza el método espectral de Wirsching-Light. Con este método se calcula inicialmente un daño D_{NB} (Bendat and Piersol, 2000) correspondiente a un proceso de banda estrecha, que posteriormente se corrige mediante el factor ρ . El daño a fatiga para el proceso de banda ancha se calcula con la expresión:

$$D = \rho \cdot D_{NB}. \quad (7)$$

Wirsching y Light, mediante simulaciones Monte Carlo, obtuvieron de forma empírica la siguiente expresión para el factor de corrección ρ :

$$\rho = a(k) + (1 - a(k)) \cdot (1 - \varepsilon)^{b(k)} \quad (8)$$

donde:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_1}{\sqrt{m_0 \cdot m_2}}, \quad (9)$$

y

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n \cdot S_{\sigma}(f) df, \quad (10)$$

son los momentos espectrales m_n del espectro de tensión $S_{\sigma}(f)$, y ε es el parámetro de ancho espectral que caracteriza la banda del proceso aleatorio.

El factor de corrección ρ depende de los parámetros de la curva $S-N$ del material (C y k), así como del parámetro de ancho espectral ε . Los valores óptimos para la pendiente k de la curva oscilan típicamente entre 3 y 6. En este rango de valores este método espectral proporciona una buena concordancia con el método Rainflow, habitualmente considerado como método de fatiga de referencia.

3.3. Caso de estudio: Ría de Vigo

En este caso de estudio se ha decidido emplazar la estructura en la bahía de Bouzas (ver Fig. 9), dentro de la ría de Vigo (519392, 4675006 ETRS89-UTM 29-N). La estructura tiene una alineación N-E (45° respecto del norte geográfico) y se fondea a $d = 5$ m de profundidad.

Se ha considerado la carga inducida en las conexiones por el oleaje, la cual puede deberse a dos factores: oleaje de viento y oleaje de fondo. Conviene destacar que ambas propagaciones de oleaje hasta la zona de estudio han sido facilitadas por la autoridad portuaria competente.

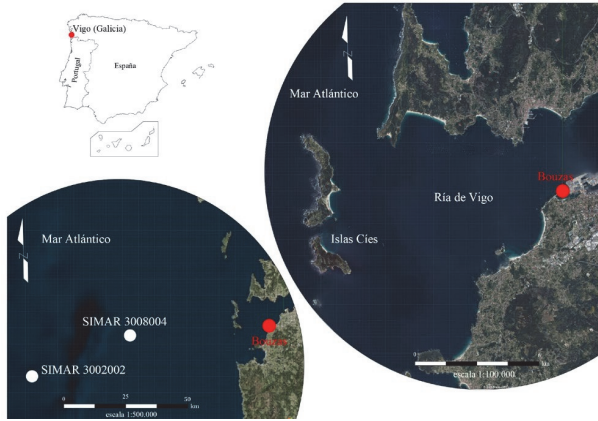


Fig. 9. Emplazamiento y situación de los puntos SIMAR 3002002 y 3008004 y la bahía de Bouzas

3.3.1. Daño por oleaje de fondo

Para caracterizar el oleaje de fondo en la bahía de Bouzas se ha tomado el histórico registrado en el punto SIMAR 3002002 durante 57 años (desde 1960 hasta 2017). Las series temporales contienen registros de los estados de mar horarios caracterizados por las variables oceánicas H_s altura significante de ola, T_p periodo pico y θ dirección del oleaje (Puertos del Estado, n.d.).

La rosa de los vientos característica del oleaje de fondo se muestra en Fig. 10. El oleaje que se ha registrado en este punto se encuadra en el sector W-N y tiene mayoritariamente una componente NW. El porcentaje mayor de alturas significativas de ola oscila entre $H_s = 0-2.5$ m, aunque pueden alcanzar valores de más de 10 m. El periodo de pico registrado oscila principalmente entre 2-7 s y alcanza máximos por encima de los 20 s.

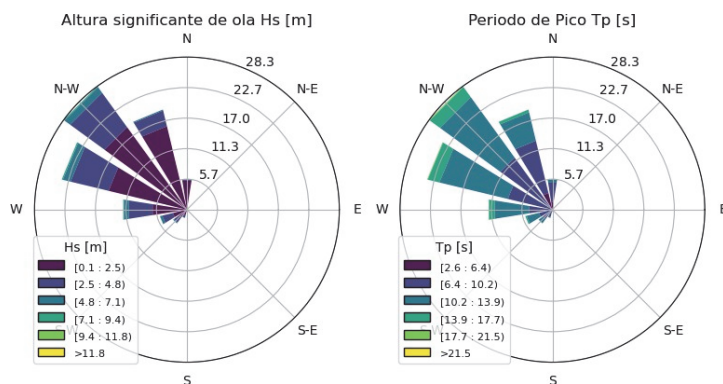


Fig. 10. Rosa de los vientos para la altura significativa de ola H_s y el periodo pico T_p del oleaje de fondo

Los coeficientes de propagación (K_h) se muestran en Tabla 1. El oleaje que tiene direcciones exteriores incluidas en el sector SSW-NW es capaz de propagarse hacia el interior de la ría y, consecuentemente, generar agitación dentro de la bahía. Con cualquier otra dirección exterior se considera que el oleaje se disipa completamente y no afecta al dique. Además, se asume también que el periodo de pico se mantiene invariante.

Tabla 1. Coeficientes de propagación del oleaje de fondo para la zona de proyecto situada en la Bahía de Bouzas. Datos facilitados por la Autoridad Portuaria de Vigo

Dirección SIMAR	K_h	Dirección Bahía de Bouzas [°]
SSW	0.02	308
SW	0.05	311
WSW	0.06	313
NW	0.03	317

Cada altura significativa registrada se multiplica por el correspondiente coeficiente de propagación, obteniendo así la serie temporal de oleaje de fondo que afecta a la estructura flotante en la zona de proyecto (11):

$$H_{s-fondo} = K_h \cdot H_{s-simar} \quad (11)$$

Los estados de mar propagados se han caracterizado con un espectro de oleaje de tipo Pierson-Moskowitz (ver Fig. 7), dado que este tipo de espectro se ajusta a los mares completamente desarrollados como es el de fondo (Pierson Jr and Moskowitz, 1964). La ecuación que define el espectro de energía de oleaje $S_w(f)$ viene dada por la expresión:

$$S_w(f) = \frac{5H_s^2}{16T_p^4 f^5} e^{-\frac{5}{4}fT_p^{-4}} \quad (12)$$

Con los registros temporales también se calcula la probabilidad de ocurrencia anual (p_{occ}) de cada estado de mar a través de su densidad de probabilidad. La probabilidad de ocurrencia anual de cada estado de mar se obtiene mediante:

$$p_{occ}(H_s, T_p, \theta) = \frac{C(H_s, T_p, \theta)}{\sum_{H_s, T_p, \theta} C(H_s, T_p, \theta) N_{años}} \quad (13)$$

donde $C(H_s, T_p, \theta)$ es el número de veces que se cuenta un determinado estado de mar y $N_{años} = 57$ es el número de años considerados en la serie. El daño por fatiga en los cables de acero trenzado se determina multiplicando el daño producido por cada estado de mar por su correspondiente probabilidad de ocurrencia, es decir:

$$D_{fondo}(H_s, T_p, \theta) = p_{occ}(H_s, T_p, \theta) \cdot D(H_s, T_p, \theta). \quad (14)$$

3.3.2. Daño por oleaje de viento

La propagación del oleaje de viento se realiza teniendo en cuenta los registros históricos de viento medio V_m y direccionalidad θ en el punto SIMAR 3008004. Las rosa de los vientos que caracteriza el viento medio en este punto se muestra en Fig. 11. Aquí, los vientos de componente NW-NE predominan sobre el resto con velocidades medias $V_m = 0-15$ m/s. El viento es menos frecuente en el resto de direcciones exteriores, sin embargo, éste puede llegar a alcanzar velocidades medias $V_m = 20$ m/s.

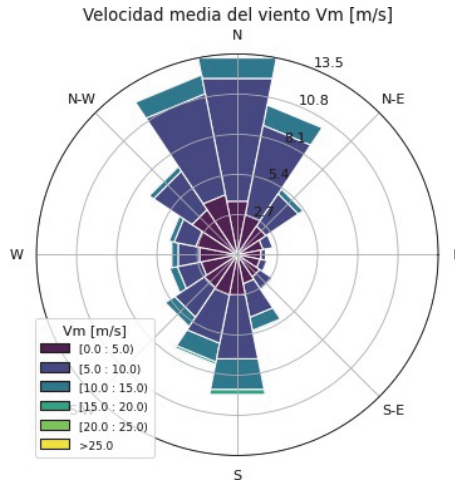


Fig. 11. Rosa de los vientos para la velocidad media del viento registrada en el punto SIMAR 3008004.

La generación de oleaje por viento local fue realizada por encargo de la Autoridad Portuaria de Vigo utilizando el modelo MIKE21-NSW. Los parámetros del oleaje generado por el viento local se muestran en Tabla 2. Las propiedades que definen el oleaje de viento en la zona de proyecto son interpoladas para cada valor del registro de viento del punto SIMAR 3008004.

Tabla 2. *Parámetros del oleaje de viento generado por el viento local en la bahía de Bouzas. Datos facilitados por la Autoridad Portuaria de Vigo.*

V_m [m/s]	NNE	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW
H_s [m]									
15	0.472	0.435	0.493	0.577	0.679	0.686	0.607	0.546	0.150
20	0.693	0.620	0.702	0.821	0.939	0.948	0.888	0.778	0.180
25	0.912	0.815	0.923	1.074	1.180	1.222	1.186	0.966	0.200
T_p [s]									
15	3.2	3.1	2.4	2.6	4.7	5.1	5.2	3.5	2.1
20	3.4	3.3	2.7	2.8	4.9	5.2	5.4	3.6	2.3
25	3.8	3.7	3.2	3.4	5.5	5.9	6.1	3.8	2.7
θ [°]									
15	5	350	332	303	282	275	272	261	250
20	3	350	332	303	284	278	277	266	252
25	1	350	332	303	284	280	281	268	254

La serie temporal que se obtiene con el mar de viento también contiene valores horarios. Sin embargo, aquí se ha optado por caracterizar cada estado de mar con un espectro de tipo JONSWAP (ver Fig. 7), es decir, se considera que el mar de viento no está completamente desarrollado. La ecuación que define el espectro de oleaje $S_w(f)$ es (DNV GL, 2017), viene dada por la expresión:

$$S_w(f) = A_\gamma \cdot S_{w-PM}(f) \cdot \gamma^e \cdot \left(\frac{f - f_p}{\xi \cdot T_p} \right)^{-0.51} \cdot \left(\frac{f - f_p}{\xi \cdot T_p} \right)^2 \quad (15)$$

donde $S_{w-PM}(f)$ es la energía del espectro Pierson-Moskowitz, $A_\gamma = 1 - 0.287 \cdot \ln(\gamma)$ es el factor de normalización, ξ es el parámetro de ancho de banda y $\gamma = 3.3$ es el parámetro de forma de pico. Análogamente al oleaje de fondo, una vez obtenida la serie temporal de las variables del oleaje de viento, se puede calcular la probabilidad de ocurrencia anual de los estados de mar mediante la Ec. (13), y el daño acumulado en los cables de acero D_{viento} utilizando la Ec. (14). El daño total que reciben los cables de acero trenzado se determina considerando el principio de supersposición, que se corresponde a la suma del daño que produce cada tipo de oleaje, es decir:

$$D_{Total}(H_s, T_p, \theta) = D_{fondo}(H_s, T_p, \theta) + D_{viento}(H_s, T_p, \theta) \quad (16)$$

por tanto, el daño total en cada cable trenzado se calcula como el sumatorio del daño que produce cada estado de mar

$$D_{Total}(H_s, T_p, \theta), \quad (17)$$

y la vida útil de cada conexión se determina como

$$F_{vida} = \frac{duración}{D_{total}} \quad (18)$$

donde la duración se establece en 1 año medio, de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia.

4 Resultados

En esta sección se muestran los resultados del daño por fatiga en los cables de acero trenzado que componen las conexiones de un pontón flotante. El dique considerado consta de 7 pontones flotantes interconectados y fondeados a una profundidad de $d = 5$ m.

En primer lugar, se han obtenido las funciones de transferencia de tensión características de cada cable a través de simular la estructura frente un espectro de ruido blanco. Después, se ha estimado la carga incidente del oleaje y su probabilidad de ocurrencia para, finalmente, calcular el daño por fatiga en los cables aplicando una metodología espectral.

4.1. Funciones de transferencia

Los datos brutos de las simulaciones consisten en series temporales de la fuerza axial $F_{x-c}(t)$ en los cables de las conexiones (ver Fig. 12). Con las series temporales de la fuerza axial se calcula la tensión axial $\sigma(t)$ y su correspondiente espectro de tensiones $S_\sigma(f)$, de acuerdo con Ec. (3).

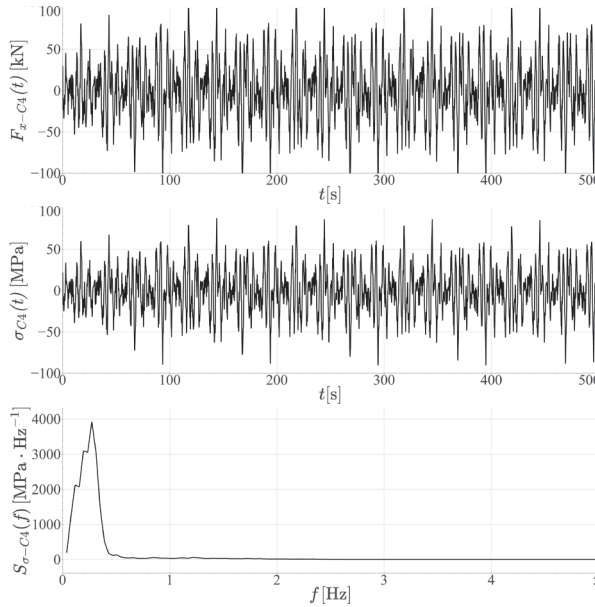


Fig. 12. Extracto de 500 s de las historias temporales en la conexión C_4 de la fuerza axial $F_{x-c}(t)$ (panel superior), la tensión axial $\sigma(t)$ (panel medio) y el espectro de tensiones $S_\sigma(f)$ (panel inferior). El ángulo de incidencia considerado sobre la estructura es $\theta = 60^\circ$.

Utilizando el espectro de tensiones y el espectro de oleaje de ruido blanco incidente, se determina la función de transferencia de tensiones $H^2(f)$. Fig. 13 muestra las funciones de transferencia obtenidas en la conexión intermedia C_4 , ya que se considera que ésta soporta mayores cargas debido a que su movimiento está más restringido. La función de transferencia difiere significativamente dependiendo del ángulo de incidencia del oleaje con la estructura. Cuando incide un oleaje oblicuo $\theta = 60^\circ$ sobre la estructura, la energía espectral del cable se concentra en torno a 0-0.5 Hz, con valores máximos superiores a $H^2(f) > 2 \cdot 10^6 \text{ MPa}^2 \cdot \text{Hz}^{-2}$. Por contrapartida, cuando el oleaje es transversal a la estructura $\theta = 90^\circ$ la energía se reparte sobre un ancho de banda mayor (0.5-4 Hz) alcanzando valores máximos de $H^2(f) = 5 \cdot 10^5 \text{ MPa}^2 \cdot \text{Hz}^{-2}$. Por otro lado, cuando la dirección de incidencia del oleaje es paralela a la estructura, $\theta = 0^\circ$, la función es nula en todo el ancho de banda.

σ

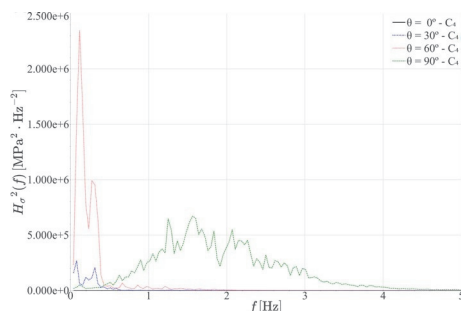


Fig. 13. Funciones de transferencia de tensión $H_e^2(f)$ para cuatro direcciones de incidencia del oleaje $\theta = [0, 30, 60 \text{ y } 90]^\circ$ en el cable de la conexión C4.

4.2. Oleaje en la zona de proyecto

Los resultados obtenidos tras la propagación del mar de viento y del mar de fondo sobre la Bahía de Bouzas desde los registros SIMAR se muestran a continuación.

Los resultados de la propagación del oleaje de fondo se detallan en las rosas de los vientos de Fig. 14 (paneles superiores). El oleaje que puede penetrar en la bahía tiene dirección N-W. Además, las alturas significantes de ola que se observaban en el punto SIMAR se ven significativamente mermadas cuando consiguen penetrar. El 90% de las alturas significantes tienen un valor que oscila entre $H_s = 0\text{-}0.1$ m con valores extremos de 0.7 m.

Los paneles inferiores de Fig. 14 corresponden a las rosas de viento obtenidas con el mar de viento. Al contrario que el oleaje de fondo, el oleaje de viento que accede a la bahía puede tener diferentes componentes comprendidas dentro del sector SW-NNE. El oleaje de viento que más impacto tiene es el generado con componente W que produce aturas significantes de ola que alcanzan $H_s = 1$ m, aunque mayoritariamente su valor está comprendido entre 0-0.4 m con periodos de pico entre $T_p = 0\text{-}5$ s.

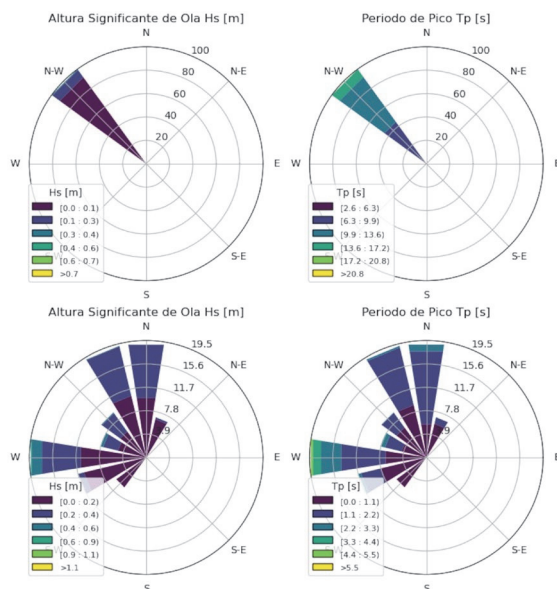


Fig. 14. Rosas de los vientos para el oleaje de fondo (paneles superiores) y para el oleaje de viento (paneles inferiores) propagadas en la zona de estudio.

Con la densidad de probabilidad de estas variables se ha estimado la probabilidad de ocurrencia anual p_{occ} de cada estado de mar y de cada dirección de incidencia del oleaje. La probabilidad de ocurrencia anual (en tanto por 1) de los estados de mar de fondo y de viento con dirección $\theta = 307^\circ$ se muestran en Fig. 15. Las probabilidades superiores a 10^{-4} aparecen en estados de mar de fondo y de viento con alturas significantes entre $H_s = 0-0.3$. Sin embargo, los periodos de pico del oleaje de fondo oscilan entre $T_p = 5-10$ s, mientras que los de viento lo hacen entre $T_p = 0-3$ s. Con cualquier otra dirección la probabilidad de ocurrencia obtenida es casi nula.

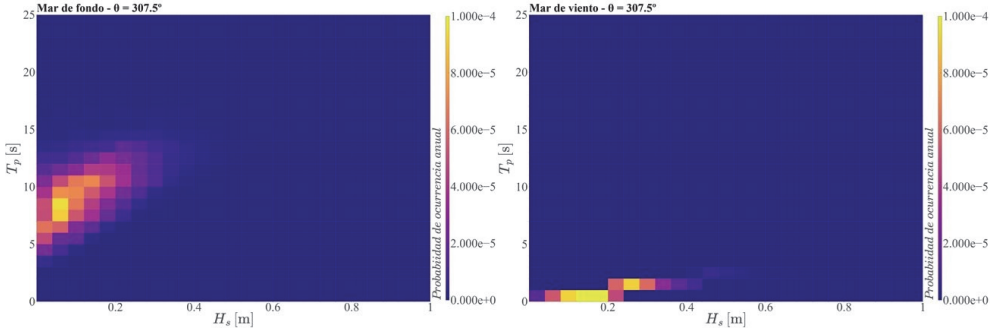


Fig. 15. Probabilidad de ocurrencia anual en tanto por 1 de los estados de mar con dirección $\theta = 307^\circ$ para el mar de fondo (panel izquierdo) y mar de viento (panel derecho).

4.3. Daño acumulado y vida a fatiga

Las matrices del daño acumulado por fatiga en la conexión intermedia C_4 se muestran en Fig. 16. El resultado que se muestra es el daño acumulado durante un año medio de exposición de la estructura al oleaje de la bahía. El patrón de daño que siguen los estados de mar es similar al de su respectiva matriz de probabilidad de ocurrencia, sin embargo, está ligeramente desplazado hacia alturas significantes de oleaje y periodos de pico más altos. En el caso del oleaje de fondo, el daño que producen los estados de mar es comparativamente más bajo que los estados de mar de viento. Para el cable de la conexión C_4 y una dirección del oleaje $\theta = 307^\circ$, el valor máximo de daño $D_{fondo} \approx 5 \cdot 10^{-4}$ ocurre con $H_s = 0.3$ m y $T_p = 10$ s, mientras que el daño por el mar de viento $D_{viento} = 1 \cdot 10^{-3}$ alcanza su máximo con periodos de pico mucho menores $T_p = 3$ s.

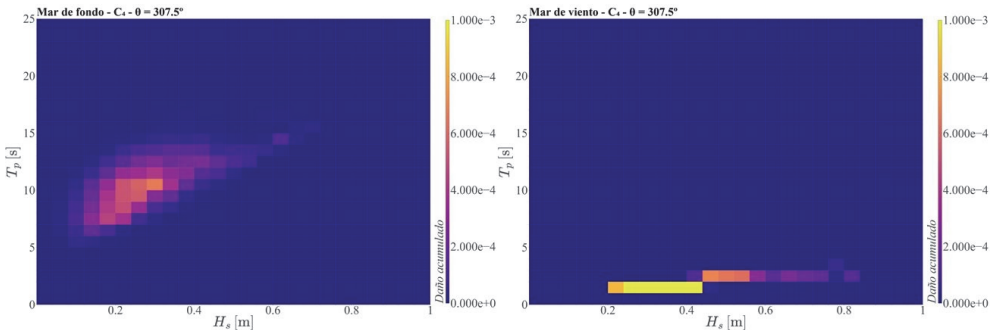


Fig. 16. Matrices de daño en el cable de la conexión C_4 para diferentes estados de mar de fondo (panel izquierdo) y de viento (panel derecho) con ángulo de oleaje de $\theta = 307^\circ$.

Esto se refleja también en Tabla 3, en las que se resume el daño que producen todos los estados de mar en un año medio. Aquí se puede ver cómo el daño que produce el mar de fondo tiene escasa relevancia en el resultado, en comparación con el mar de viento. De hecho, el daño entre ambos tipos de oleaje varía en un orden de magnitud. Las conexiones más dañadas son las intermedias C_3 y C_4 , con valores de daño total de $D_{total} = 198.13 \cdot 10^{-3}$ y $224.02 \cdot 10^{-3}$ respectivamente. Esto supone que su vida útil a fatiga oscile en torno a los 5 años. Por contrapartida, las conexiones exteriores C_1 y C_6 están menos solicitadas y su vida estimada supera los 80 años.

Tabla 3. *Daño acumulado y vida a fatiga de las conexiones del dique flotante para un año medio en la zona de emplazamiento de la estructura*

Conexión	$D_{fondo} \cdot 10^{-3}$	$D_{viento} \cdot 10^{-3}$	$D_{Total} \cdot 10^{-3}$	Fvida[años]
C_1	0.11	6.71	6.82	146.43
C_2	4.67	98.23	102.09	9.72
C_3	19.10	179.03	198.13	5.05
C_4	19.44	204.58	224.02	4.46
C_5	4.53	124.42	128.95	7.76
C_6	0.07	11.61	11.68	85.54

5. Conclusiones

En este trabajo se estudia el comportamiento a fatiga de las conexiones de un dique flotante que consta de 7 pontones flotantes fondeados a 5 m de profundidad para las condiciones de oleaje de una ubicación en la costa de Galicia. Para aumentar la eficiencia de los cálculos y reducir el coste computacional se ha optado por usar un enfoque basado en las funciones de transferencia de tensión. Estas funciones son obtenidas para cada conexión a través de simular la estructura flotante frente a un espectro de oleaje de ruido blanco. Después, se ha procedido a estimar el daño y la vida útil de cada una de las conexiones mediante el método espectral de fatiga de Wirsching-Light. Las conclusiones alcanzadas se exponen a continuación:

- Las funciones de transferencia de tensión son una herramienta eficaz para estimar la tensión axial de los cables de las conexiones.
- Los oleajes oblicuos generan funciones de transferencia con picos de mayor amplitud que se centran en frecuencias bajas (0-0.5 Hz), mientras que el oleaje transversal produce funciones más abombadas con picos de menor amplitud y desplazados hacia altas frecuencias.
- Los oleajes paralelos a la estructura producen funciones de transferencia nulas y, por tanto, daño por fatiga irrelevante.
- El emplazamiento seleccionado protege a la estructura de forma natural de los oleajes de fondo, la altura significativa de ola registrada en la serie temporal del SIMAR 3002002 se ve significativamente reducida.
- El daño acumulado recibido por los cables de las conexiones se produce mayoritariamente por el oleaje de viento, y además es más elevado en las conexiones intermedias.
- Con estas condiciones ambientales la vida útil que se estima en las conexiones intermedias oscila en torno a 4-5 años, mientras que en las conexiones extremas es de más de 80 años.

6. Agradecimientos

A. Cebada fue apoyado por las "Ayudas para la realización de Tesis Doctorales. Modalidad A: Contratos de Investigación en régimen de concurrencia competitiva", un programa de becas de investigación financiado por la Universidad de Oviedo (España) [número de subvención PAPI- 22-PF-9].

Los autores también desean agradecer la ayuda prestada por la autoridad portuaria de Vigo (APVigo), que ha sido de vital importancia para realizar este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Aliabadi, M.H., Wen, P.H., 1984. Boundary element methods in engineering science, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(84\)90010-x](https://doi.org/10.1016/0148-9062(84)90010-x)
- Bendat, J.S., Piersol, A.G., 2000. Random data analysis and measurement procedures. Meas. Sci. Technol. 11, 1825–1826.
- Cardei, P., Sfiru, R., Muraru, V., 2019. A mathematical model for the accumulation of fatigue in bars subjected to lateral vibrations. E3S Web Conf. 112, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911203002>
- Cebada-Relea, A., Menéndez, C., Fernández, P., Soto-Pérez, F., Claus, R., Aenlle, M., López, M., 2022. Diques flotantes portuarios: análisis de las conexiones y sinergias con la energía undimotriz. Rev. Española Mecánica la Fract. 3, 199–204.
- Cebada-Relea, A.J., Aenlle, M., López, M., 2024. Fatigue damage risk assessment on connections of floating pontoon arrays. Ocean Eng. 299. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117317>
- Cebada-Relea, A.J., López, M., Aenlle, M., 2022. Time-domain numerical modelling of the connector forces in a modular pontoon floating breakwater under regular and irregular oblique waves. Ocean Eng. 243, 110263. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110263>
- Cebada-Relea, A.J., López, M., Claus, R., Aenlle, M., 2023. Short-term analysis of extreme wave-induced forces on the connections of a floating breakwater. Ocean Eng. 280. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114579>
- Cebada-Relea, A. J., Lopez, M., Claus, R., Soto, F., 2022. Numerical Investigation of Floating Breakwaters Using Time Domain Boundary Element Method. Proc. IAHR World Congr. 4383–4393. <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC2521716X2022379>
- DNV GL, 2017. DNVGL-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads. DNV GL Recomm. Pract. 1–259.
- DNVGL-OS-E301, 2015. Position Mooring. Det Nor. Verit. As E301, 114.
- Ferreras, J., Peña, E., López, A., López, F., 2014. Structural Performance of a Floating Breakwater for Different Mooring Line Typologies. J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng. 140, 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000240](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000240)
- Goodman, J.E., 1899. Mechanics Applied to Engineering, Longman, Green & Company, London, 1899.
- Hales, L.Z., 1981. Floating Breakwaters: State-of-the-Art Literature Review. U.S.Army, Corps Eng. Coast. Eng. Res. Cent.
- Martinelli, L., Ruol, P., Zanuttigh, B., 2008. Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts. Appl. Ocean Res. 30, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2008.09.002>

- Matsuichi, M., Endo, T., 1968. Fatigue of metals subjected to varying stress.
- Miner, M.A., 2021. Cumulative Damage in Fatigue. *J. Appl. Mech.* 12, A159–A164. <https://doi.org/10.1115/1.4009458>
- Muñiz-Calvente, M., Álvarez-Vazquez, A., Pelayo, F., Aenlle, M., García Fernández, N., 2022. A comparative review of time- and frequency-domain methods for fatigue damage assessment. *Int. J. Fatigue* 163, 107069. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107069>
- Pierson Jr, W.J., Moskowitz, L., 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.* 69, 5181–5190.
- Puertos del Estado, n.d. PORTUS [WWW Document]. URL <https://portus.puertos.es/#/> (accessed 9.1.24).
- Ren, B., He, M., Li, Y., Dong, P., 2017. Application of smoothed particle hydrodynamics for modeling the wave-moored floating breakwater interaction. *Appl. Ocean Res.* 67, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.011>
- Richey, E.P., 1982. Floating Breakwater Field Experience, West Coast.
- Schmitt, P., Elsässer, B., 2017. The application of Froude scaling to model tests of Oscillating Wave Surge Converters. *Ocean Eng.* 141, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.003>
- SF-Marina, n.d. Flexible connector [WWW Document]. URL https://sfmarina.com/solutions/technique/#_connector (accessed 2.26.24).
- Welch, P., 1967. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* 15, 70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>
- Wirsching, P.H., Light, M.C., 1980. Fatigue under Wide Band Random Stresses. *J. Struct. Div.* 106, 1593–1607. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0005477>
- Zorman, A., Slavič, J., Boltežar, M., 2023. Vibration fatigue by spectral methods — A review with open- source support. *Mech. Syst. Signal Process.* 190, 110149. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110149>

Modelo de transferencia de viento a escala local: aplicación a la estación de Tarifa y la duna de Valdevaqueros

Félix P. Martínez-García^a, Antonio Contreras-de-Villar^b, Juan J. Muñoz-Perez^a

^aDpto. de Física Aplicada, Universidad de Cádiz, España, <https://orcid.org/0000-0001-9436-3045>
felix.martinezgarcia@alum.uca.es^bDpto. ingeniería Industrial y Civil, Universidad de Cádiz, España,
<https://orcid.org/0000-0002-8286-2493>, antonio.contreras@uca ^aDpto. de Física Aplicada, Universidad de
Cádiz, España, <https://orcid.org/0000-0002-0379-8287> juanjose.munoz@uca.es

How to cite: Martínez-García, F. P.; Contreras-de-Villar, A. & Muñoz-Perez, J. J. (2024). Modelo de transferencia de viento a escala local: aplicación a la estación de Tarifa y la duna de Valdevaqueros. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

After reviewing the studies of different authors on the coastal dune systems of the Cadiz coastline, a common problem is to obtain accurate data without arduous campaigns. Since statistical downscaling, despite its capabilities, does not yet allow downscaling to near point level, we have proposed a form of spatial wind propagation for scales smaller than 10 km. The proposed transfer is easily and accurately developed using regression methods and wind profile theory. The aim is to establish a methodology to obtain a wind transfer function for local applications. For this purpose, we analyse field and nearby weather station data that finally lead to transfer equations for wind speeds and directions. The proposed methodology is applied to the Valdevaqueros Coastal Dune.

Keywords: statistical downscaling; short-term prediction; transfer function; wind profile

Resumen

Tras revisar los estudios de diferentes autores sobre los sistemas dunares costeros del litoral gaditano, se observa como problema común la obtención de datos precisos sin arduas campañas. Dado que el downscaling estadístico, a pesar de su capacidades, todavía no permite una reducción de escala a nivel casi puntual, hemos propuesto una forma de propagación espacial del viento para escalas inferiores a 10 km. La transferencia propuesta se desarrolla de forma fácil y precisa mediante métodos de regresión y la teoría del perfil del viento. El objetivo es establecer una metodología para conseguir una función de transferencia del viento para aplicaciones locales. Para ello, analizamos datos de campo y de una estación meteorológica cercana que conducen a ecuaciones de transferencia para las velocidades y direcciones del viento. La metodología propuesta se aplica a la Duna Costera de Valdevaqueros.

Palabras clave: downscaling estadístico; predicción a corto plazo; función de transferencia; perfil del viento

1. Introducción

En general, los modelos de circulación global (GCM) se han desarrollado significativamente. Proporcionan predicciones meteorológicas a gran escala y aplicando técnicas estadísticas, como la reducción de escala estadística (SD), los GCM se utilizan para predecir el clima a escala local (Martínez-García, Contreras-De-villar, et al., 2021). Sin embargo, no hay forma de propagar los vientos entre dos lugares cercanos, esto es una transferencia espacial, como por ejemplo la que se usa para la propagación del oleaje desde aguas profundas (Martínez-García et al., 2023). Tras estudiar los sistemas dunares costeros afectados por los vientos, se propone una forma de propagación espacial del viento para escalas inferiores a 10 km basado en el perfil de viento (Bernabeu et al., 2001).

La duna litoral de Valdevaqueros (Cádiz) es un sistema geomorfológico cuyas características granulométricas hacen posible un movimiento continuo (Gómez-Pina et al., 2007; Muñoz Pérez, 1996), especialmente con viento unidireccional de levante (E). La distancia máxima de avance medida es de aproximadamente 1 m por día con este tipo de viento. Para conocer los parámetros que rigen su comportamiento es necesario conocer el campo de vientos local que incide en ella. Sin embargo, las predicciones de GCM+SD a pequeña escala (<10 km) todavía no son precisas y tampoco permiten una transferencia del viento espacial entre puntos situados para conocer sus efectos en sistemas locales.

2. Área de estudio

El área de estudio es una duna costera situada en Valdevaqueros (Cádiz), en el extremo sur de España (Estrecho de Gibraltar). Los datos de base son datos meteorológicos de Tarifa (Cádiz) y una campaña en 2012 realizado en la duna. La Duna de Valdevaqueros (Cádiz) se encuentra aproximadamente a 10 km de la estación meteorológica de Tarifa. La estación meteorológica de Tarifa está situada en un promontorio sobre la dársena del puerto y está gestionada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, www.aemet.es). La elevación del terreno en la estación de Tarifa es de unos 32,00 m sobre el nivel medio del mar (m.s.n.m.), que se utiliza como datum vertical para esta investigación. La figura 1 ilustra el lugar de estudio y muestra la ubicación relativa de la estación meteorológica de Tarifa y la Duna de Valdevaqueros.



Fig. 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Martínez-García et al. (2021)

El sistema dunar está formado por acúmulos de arena que migran desde la playa debido a los intensos vientos de levante. En la figura 2 se muestra el régimen de vientos reinante en la zona de estudio para la campaña realizada en 2012.

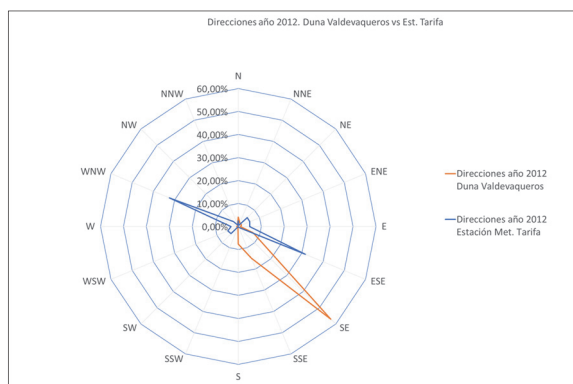


Fig. 2. Régimen de Vientos en el área de estudio. Fuente: Martínez-García et al. (2023)

El resultado es una formación de arena orientada al NE-SW. Su dinámica está causando un impacto relevante desde el punto de vista científico y social (Bello-Millán et al., 2016). La frecuente ocurrencia de vientos de levante ha generado una duna de alta movilidad (Toffani, 2020). En la duna se producen altas tasas de migración de arena debido a que el 70% de la velocidad del viento supera la velocidad umbral de sedimentación. Las condiciones climáticas son únicas para esta zona (Yue et al., 2022), principalmente debido a la presencia de una larga línea de costa (más de 40 kilómetros) y una ensenada antes de llegar a la duna. Este tramo de costa sólo se interrumpe cuando la laguna del río Valle conecta con el mar durante las grandes crecidas (Toffani, 2020). El sedimento arrastrado por el viento es un material bien graduado compuesto principalmente de cuarzo, con un tamaño medio de arena de 0,3 mm (Muñoz-Perez et al., 2009; Yue et al., 2022).

3. Materiales y métodos

Kirchmeier et al. (2014) indican que no existe un método único para desarrollar una ecuación de predicción a partir de la reducción de escala estadística. Sin embargo, este trabajo consiste en realizar una propagación del viento, esto es, conocer el viento en un punto a partir de los datos en otro cercano (una transferencia espacial). Para ello, una vez ajustados estadísticamente los predictores de la estación meteorológica de Tarifa y los predictandos de campañas realizadas en la duna de Valdevaqueros, los valores obtenidos deben de estar dentro de un rango de confianza. Además habrá que considerar un análisis intrínseco para los valores extremos observados, así como estudiar cómo afecta la variabilidad espacial y temporal al modelo y sus ecuaciones. Algunos autores (Kirchner-Bossi et al., 2015) establecieron una forma de abordar este doble problema. En primer lugar, la variabilidad temporal se resuelve directamente con el downscaling estadístico (SD). De acuerdo con esto, el proceso de los datos de partida se estableció según SD en base a regresión con el fin de obtener una ecuación de transferencia de viento entre la estación de Tarifa y la duna. Para resolver la variabilidad espacial se usó la ley del perfil de viento (Counihan, 1975).

La presente metodología se centra en la comparación de series temporales de viento de la estación meteorológica de Tarifa (Cádiz) (predictores) junto con el registro de un experimento de campo realizado en la Duna de Valdevaqueros (Cádiz) en 2012 (predictandos). La toma de datos en campo fue llevada a cabo en 2012 y midió los datos de viento utilizando un mástil con anemómetros a diferentes alturas de 0,25, 0,50, 1,00 y 4,00 m. La figura 2 muestra el tipo de anemómetro utilizado en la parte de barlovento de la duna costera.



Fig. 2. Tipo de anemómetro utilizado. Fuente: (Martínez-García et al. (2023))

Estos anemómetros registraron datos del viento (velocidad y dirección) cada minuto durante los meses de marzo y octubre de 2012. Los datos se registraron cada minuto. Todos los datos recogidos fueron tratados y utilizados; sin embargo, debido a la gran cantidad de estos datos, no se incluyen en el texto para no perturbar el objetivo de este trabajo.

Los datos de las series temporales de la estación de Tarifa fueron proporcionados por la AEMET. Estos datos de viento de la estación de Tarifa (actualmente operativa) se recogieron en intervalos de diez minutos, proporcionando valores de velocidad y ángulos para la dirección del viento medidos en este lugar. La elevación del anemómetro de Tarifa es de 10 m sobre el terreno existente, lo que corresponde a 42 m. La figura 3 muestra la ubicación de la estación meteorológica.



Fig. 3. Localización de la Estación Meteorológica de Tarifa. Fuente: AEMET.

En la figura 4 se muestra la situación y elevaciones de la duna de Valdevaqueros respecto de la estación meteorológica de Tarifa.

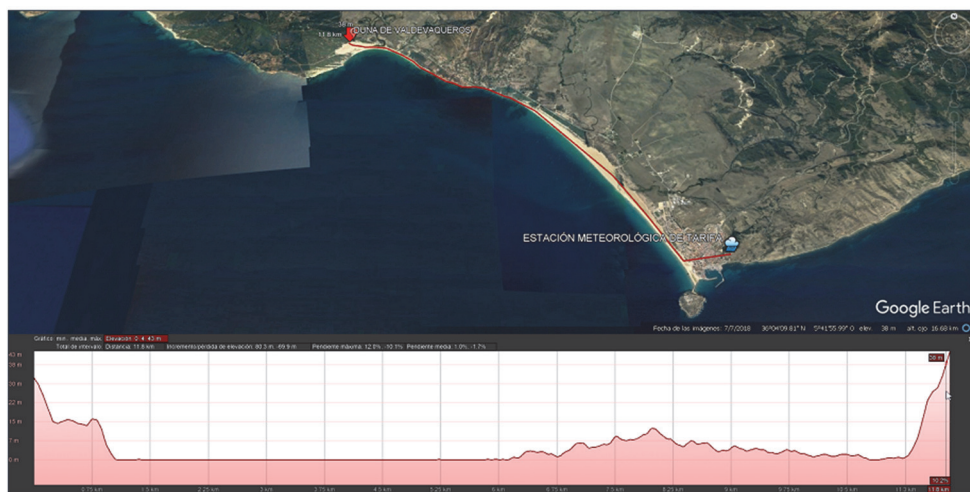


Fig. 4. Situación de la Duna de Valdevaqueros respecto a la estación meteorológica de Tarifa

Una vez encuadrado el sistema que proporciona los datos de la investigación, se pasa a describir la metodología propiamente dicha. La primera acción consistió en comprobar la diferencia entre las muestras e identificar si pertenecían a la misma población (partes de un mismo grupo con las mismas características). Para ello, se utilizaron las pruebas de Kruskal-Wallis (K-W) (prueba de la mediana) (Ostertagová et al., 2014) y Mann-Whitney (M-W) (Boudia & Santos, 2019; Gibbons & Chakraborti, 2010). Además, se aplicó una prueba de análisis de la varianza (ANOVA) (Liu, 2015) para determinar la fuerza de la relación entre las variables. Existía una relación significativa entre las muestras de ambas mediciones cuando la incertidumbre (valor p) era inferior al 5%. En caso contrario, las muestras se consideraron independientes. El nivel de confianza era del 95%. El siguiente paso consistió en buscar el tipo de regresión que ajustara las funciones de transferencia con la máxima correspondencia entre los predictores (velocidades de la Estación de Tarifa) y los predictandos (velocidades de la Duna de Valdevaqueros). Todas las pruebas se realizaron utilizando la versión 19.4.02 del software Statgraphics Centurion (Statgraphics Technologies, Inc., Virginia, USA). El diagrama de flujo de la figura 5 resume la metodología propuesta.

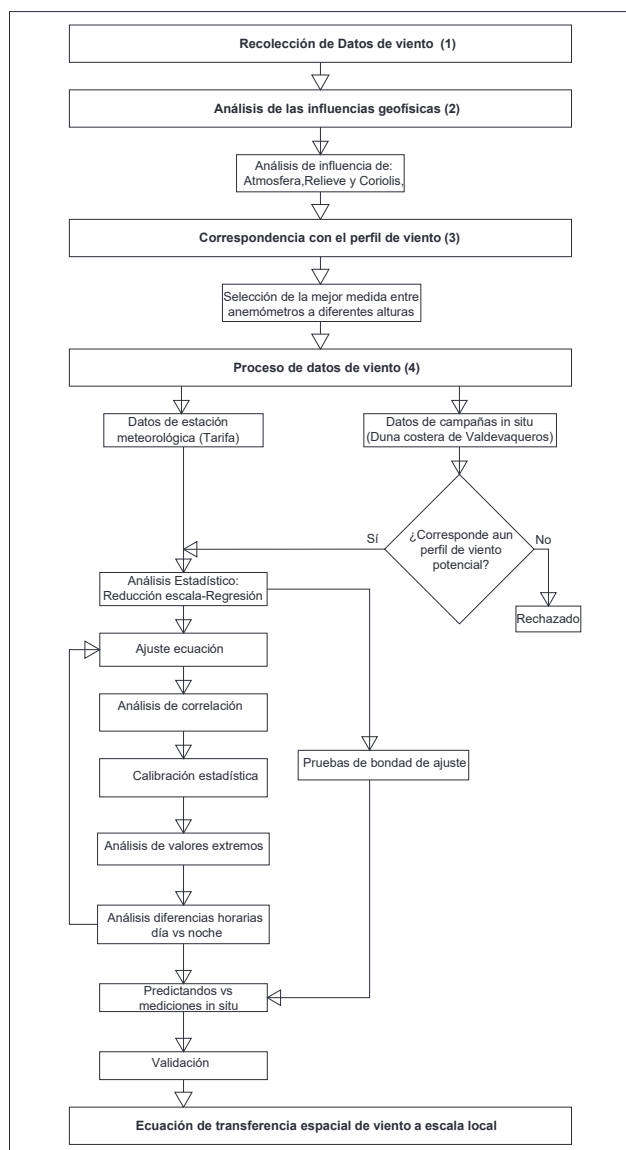


Fig. 5. Diagrama de flujo de la Metodología propuesta. Fuente: Martínez-García et al. (2023)

A continuación, fue necesario evaluar la influencia del medio físico en sí mismo en los vientos actuantes en la zona. La influencia del terreno circundante y de la atmósfera no se tuvo en cuenta porque los anemómetros se colocaron a pocos metros sobre el nivel del mar y no había accidentes geográficos significativos que considerar (Bardal et al., 2018; Barthelmie, 1999; Ryu et al., 2022; Wharton & Lundquist, 2010). Los efectos de estos dos factores podrían predecir la intensidad y la aceleración de los vientos en la zona. En primer lugar, la topografía (terreno accidentado u orografía compleja) podría producir una aceleración, y los valles producen una disminución de la velocidad del viento (Barcons et al., 2018). Sin embargo, en este caso, tanto la duna como la

estación meteorológica están situadas en puntos de la costa separados por 10 km, sin topografía significativa ni formaciones de valles pronunciados. Los efectos del gradiente atmosférico entre los dos puntos resultaron ser despreciables en la línea de costa (Fraile Jurado & Aguilar Alba, 2006). Además, según Barcons et al. (2018), la teoría de similitud de Monin-Obukhov (Cheng et al., 2019) puede utilizarse para establecer cuándo influye la atmósfera. La relación entre la altura (Z) y la longitud de Obukhov (L) (Martínez-García, Contreras-de-Villar, et al., 2021) indica si la atmósfera es estable, inestable o neutra. Se puede considerar que la zona de estudio tiene una atmósfera neutra sin efectos sobre los vientos. En la figura 6 se muestra la relación

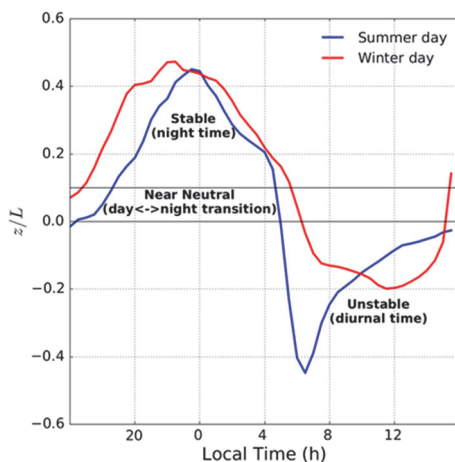


Fig. 6. Valores de Z/L ciclo diurno sin nubes de verano y otro de invierno. Fuente: (Barcons et al., 2018)

El parámetro de estabilidad ζ (z/L) se utiliza como escala para caracterizar el grado de estabilidad de la capa límite.

- $\zeta = z/L > 0,1$ estable (se inhiben los movimientos verticales del aire);
- $0,1 \geq \zeta \geq 0$ casi neutral (inerte a los movimientos verticales);
- $\zeta < 0,1$ inestable (amplificación de movimientos del aire favoreciendo las ráfagas).

Por último, la aceleración de Coriolis es importante para las escalas altas con modelos generales de circulación (GCM), pero no se incluyó en nuestra función de transferencia de forma directa debido a la baja rugosidad, el terreno llano y la proximidad de los dos puntos de la zona de estudio. La rugosidad y las condiciones del terreno se incluyen en la ley de potencia, que se utiliza para elegir los mejores datos. En general, la escala local del presente estudio reduce la influencia de las variables orográficas (Crosman & Horel, 2010; Steele et al., 2013).

Otra ley física utilizada en este estudio es la teoría del perfil del viento. Esta teoría se ha utilizado ampliamente en investigaciones sobre el límite atmosférico (dentro de la capa superficial) hasta 100 m (Guevara Díaz, 2013). La investigación se llevó a cabo en la línea de costa, y la ley de potencia del perfil del viento es aplicable hasta 100 m de altura sobre la superficie, por lo que el criterio de aplicación es completamente válido. La teoría de perfil de viento fue la pieza clave para establecer la correspondencia entre las mediciones de viento en la duna y las registradas por la estación de Tarifa. Aquí se buscaba determinar si existía alguna relación y cómo comparar los valores. Se utilizó la ley de potencia del perfil del viento para comprobar qué medidas de los experimentos de campo de 2012 tenían mayor grado de correspondencia con los datos de la estación meteorológica de Tarifa.

La selección de los datos de los anemómetros consistió en determinar la medición que más se aproximaba al perfil del viento. Para la ley de potencia del perfil del viento (Bañuelos-Ruedas et al., 2010), se utilizó la Ecuación (1), frecuentemente denominada ecuación de la ley de potencia de Hellman (Gunda et al., 2021). También se analizó el perfil logarítmico del viento. Sin embargo, este tipo de perfil es el más adecuado para la energía eólica, donde las características de la superficie y el área tienen un peso importante en la expresión final (Bañuelos-Ruedas et al., 2010; Gunda et al., 2021).

$$V_z = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

donde V_z es la velocidad desconocida a la elevación conocida Z , V_{ref} es la velocidad de referencia a la elevación conocida Z_{ref} , y α es el coeficiente de cizalladura del viento para una zona determinada. El valor del coeficiente α se toma como 0,14; según (Rehman et al., 2015) este valor es aceptable para alturas de hasta 10 m (Rehman et al., 2015) sin introducir desviaciones considerables. La aplicación de la Ecuación (1) en este estudio tuvo como objetivo verificar la altura del anemómetro que ofrece la mejor correspondencia con el perfil del viento.

Finalmente, e íntimamente ligada a los parámetros de estabilidad atmosférica indicados en el párrafo anterior, se analiza la variación entre el día y la noche en la escala de vientos, necesaria para establecer la ecuación, tipología y si se trata de una función continua o por el contrario necesita de establecer unos tramos en función de intervalos de velocidades. Como ocurre en general, el viento sopla más fuerte de día que de noche en la zona estudiada. En general, la velocidad del viento en Tarifa es siempre superior a la de Valdevaqueros, independientemente de la hora del día. Se ha observado que la variación de la velocidad del viento no es tan superior a 10 m/s entre el día y la noche. Sin embargo, las direcciones tienen un comportamiento diferente según nos refiramos a la estación de Tarifa o a la Duna de Valdevaqueros. En el caso de Tarifa, se observa que la dirección para las primeras horas de la mañana es WNW. Desde las 15:00 hasta las 20:00 horas, aproximadamente la dirección principal es ENE, y el resto del día prevalecen como direcciones principales ESE a S. Este patrón prácticamente se mantiene constante tanto en invierno como en verano.

En el caso de la Duna de Valdevaqueros, las direcciones se comportan de forma diferente entre las estaciones cálidas y frías. En invierno, se ha observado que las direcciones WNW y NW se alternan como predominantes a lo largo del día. En cambio, en verano, las primeras horas de la mañana comienzan con vientos del NNE o NE, y se convierten en vientos del ESE después del mediodía para terminar el día, convertidos en vientos del SSE y S.

4. Resultados

4.1. Selección de datos

A pesar de la ingente cantidad de datos recibidos, tras el análisis de los mismos se obtuvo que solo una parte de ellos eran estadísticamente aptos para ser usados, principalmente por su cantidad y continuidad. Así se seleccionaron 2 meses que pudieran ser representativos de las dos estaciones del año invierno y verano, y que permitiera el desarrollo e implementación así como la validación de la ecuación. Estos meses fueron marzo y octubre de 2012. Previo a la selección se realizó un análisis de la frecuencia de vientos y velocidades en comparación con el resto del año y se obtuvo que ambos meses, además de tener datos en cantidad suficiente, eran representativos. se analizaron las velocidades y direcciones predominantes durante las estaciones de verano e invierno, y se obtuvo que los meses de marzo y octubre eran los más representativos de los vientos de la zona para estos

dos periodos, así como en ellos predominaban las componentes de dirección del viento de aplicación directa a esta tesis, como se describe en el párrafo siguiente. Hay que considerar que esta investigación buscaba la transferencia de datos de un punto a otro, por lo que inherente a ella está el carácter de “no biunívoca”, esto es, solo se pueden transferir aquellos vientos que medidos en Tarifa serían capaces de llegar a Valdevaqueros, y eso solo sería posible para las dirección que van desde ENE hasta SSE. Las direcciones con componente oeste, así como las de componente N pura, medidas en Tarifa no alcanzarían a la duna de Valdevaqueros, esto es, no circularían desde Tarifa hasta Valdevaqueros, tal y como se ha observado en la figura 2.

4.2. Influencia atmosférica

La relación entre la intensidad del viento y la estabilidad atmosférica es otro aspecto que debe considerarse. Se encontró que los efectos del gradiente atmosférico entre los dos puntos eran insignificantes en la costa (Fraile Jurado & Aguilar Alba, 2006). Además, Barcons et al. (2018) propusieron el uso de la longitud de estabilidad Obukhov (L) de la teoría de similitud de Monin-Obukhov. Para el cálculo del parámetro L se ha usado la calculadora de perfil longitudinal y velocidad del viento (Monin-Obukhov Length and Windspeed Profile Calculator (shodor.org)) desarrollada por Shodor, organización dedicada a la ciencia computacional (Shodor: A National Resource for Computational Science Education). Se consideran valores medios para un día completo (día y noche) por simplificación ya que no existe una variación considerable de las temperaturas diurnas y nocturnas. Así, siguiendo lo indicado por Hernández-Walls et al. (2002) y Guevara Díaz (2013) se estimaron los valores de la velocidad de fricción del viento en 0,54 m/s, el flujo de calor cinemático en $-0.03 \text{ }^{\circ}\text{K}\cdot\text{m/s}$. La temperatura media anual ha sido tomada de AEMET, establecida en $17,19^{\circ}\text{C}$ en la zona de estudio para el periodo 1981-2010 como muestra la figura 7.

Monin-Obukhov Length and Windspeed Profile Calculator

Introduction: This calculator calculates the Monin-Obukhov length (L), defined as that height at which turbulence is generated more by buoyancy than by wind shear. In the daytime over land, L is typically between 1 to 10 metres. In this calculator, you have three input values:

1. friction velocity u^* , in metres per second (m/s)
2. the absolute virtual temperature T_v , in degrees Kelvin
3. the kinematic surface heat flux, F_{Hsf} , in units of degrees Kelvin meter per second (K, m/s)

In addition, there are two constants in this calculator:

1. the von Karman constant (κ), a surface constant with a value of 0.4
2. the gravitational acceleration constant (g), 9.8 m/s^2

$$L = \frac{-u^{*3}}{\kappa g T_v F_{Hsf}}$$

This calculator also determines the windspeed profile (M) at a given elevation in the stable surface layer. Input for this calculation are:

1. Aerodynamic roughness length, z_0 , in metres
2. Height in the stable surface layer, z , in metres

The algorithm for the windspeed profile (M) is:

$$M = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} + \epsilon \frac{z}{L} \right]$$

Monin-Obukhov/Windspeed Profile Calculator

NOTE: For your convenience, enter temperatures in degrees Celsius. The calculator will convert them to degrees Kelvin automatically!

Input Values:

Friction velocity (m/s)	0.54
Absolute virtual temperature T_v , in degrees Celsius	17.19
Kinematic surface heat flux, F_{Hsf}	-0.03
Aerodynamic roughness length, z_0 , in metres	0.0002
Height in the stable surface layer, z , in metres	1.5

Results:

Monin-Obukhov length (L), in metres	388.56
Windspeed profile, in m/s	12.08

[Reset Values](#) [Evaluate](#)

Friction velocity (m/s)	0.54
Absolute virtual temperature T_v , in degrees Celsius	17.19
Kinematic surface heat flux, F_{Hsf}	-0.03
Aerodynamic roughness length, z_0 , in metres	0.0002
Height in the stable surface layer, z , in metres	1.5

Resultados

Monin-Obukhov length (L), in metres	388.56
Windspeed profile, in m/s	12.08

Fig. 7. Parámetros atmosféricos en la zona de estudio. Fuente: (Martínez-García, 2024)

Se observa que el límite medio de inestabilidad está muy por encima de los 100 m sobre los que la práctica ha sancionado y avalado el uso de las ecuaciones del perfil de viento.

4.3. Perfil de viento y selección de datos base

Una vez que se ha verificado que es posible la aplicación de la ley del perfil de viento, se usa esta para verificar cuál de las mediciones, a las diferentes alturas de los anemómetros montados en el mástil, tiene mayor correspondencia con los datos registrado en la estación meteorológica de Tarifa.

La presente investigación se llevó a cabo en la línea de costa, con elevaciones entre 1,75 y 5,50 m.s.n.m.m. para los anemómetros instalados en la duna de Valdevaqueros y de 42,00 m.s.n.m.m. para el anemómetro de la estación meteorológica de Tarifa. La ley exponencial del perfil del viento, también conocida ley de potencia (wind profile power law) es aplicable en estos 100 m. de altura, que se corresponde con el primer décimo de la altura del límite de la capa atmosférica durante el día (espesor de 1000 km.) y a su espesor durante la noche (100 m) (Brune, 2020), por lo que el criterio de aplicación es completamente válido.

La selección de datos de los anemómetros consistió en determinar la medida que más se aproximaba al perfil del viento. Para la ley de potencia del perfil del viento (Bañuelos-Ruedas et al., 2010), usamos la Ecuación (1). En la figura 8 se representan los valores de velocidades medidas en cada anemómetro en comparación con las obtenidas aplicando la fórmula de la ley de potencia (1) a las medidas de la estación de Tarifa.

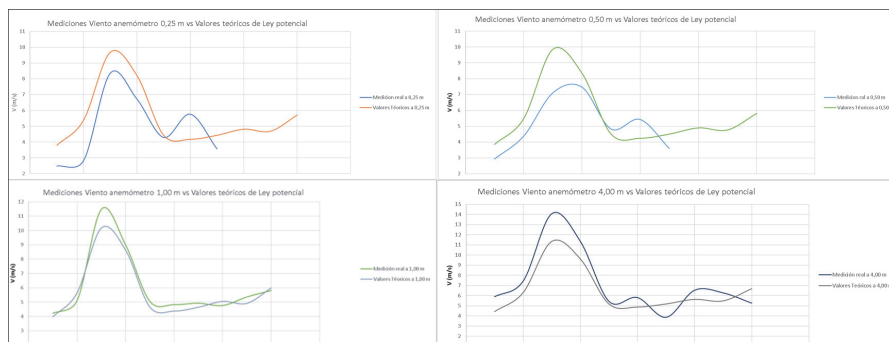


Fig. 8. Comparativa anemómetros y perfiles teóricos obtenidos con la ley de potencia a partir de los datos de la estación meteorológica de Tarifa. Fuente: (Martínez-García, 2024)

Por simple comparación de datos, los valores que más se asemejan al perfil de viento teórico son los registrados en el anemómetro situado a 1,00 m. sobre el terreno, esto es, a la elevación 2,5 m.s.n.m.

4.4. Estadística descriptiva de las muestras.

4.4.1. Registros Anemómetro

En las figuras 9 y 10 muestran la comparativa de velocidades y direcciones de viento de los registros del anemómetro para una altura de 2,5 m.s.n.m. y la estación meteorológica de Tarifa. El parámetro V_t indica la velocidad en Tarifa y V_v la velocidad en la duna de Valdevaqueros.

a) Velocidades

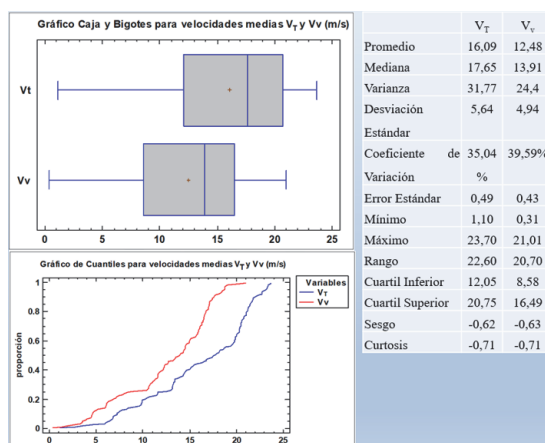


Fig. 9. Comparativa estadística descriptiva velocidades de viento entre duna y estación de Tarifa. Fuente: (Martínez-García, 2024)

b) Direcciones

El parámetro Dt indica la dirección en Tarifa y Dv la dirección en la duna de Valdevaqueros.

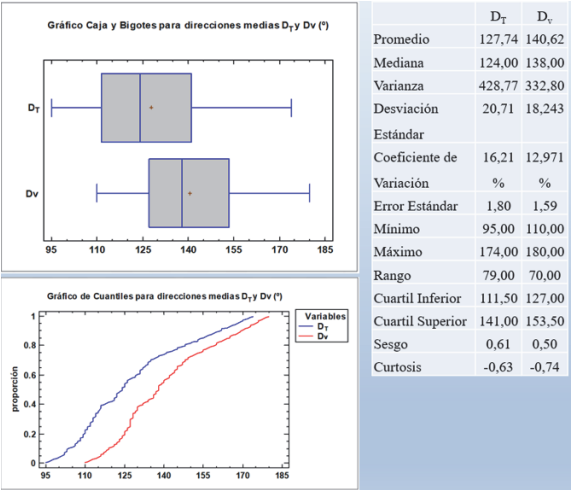


Fig. 10. Comparativa estadística descriptiva direcciones de viento entre duna y estación de Tarifa.
Fuente: (Martínez-García, 2024)

Una vez analizadas las muestras estadísticamente se llegan a las siguientes conclusiones se verifica que las muestras son totalmente independientes del estudio estadístico se presume posible mismo tipo distribución, pero con estadísticos centrales diferentes. En la tabla 1 se muestra un resumen de los resultados del análisis de las pruebas estadísticas.

Tabla 1. Resumen de pruebas estadísticas. Fuente: (Martínez-García, 2024)

V	Prueba No paramétrica	Valor-P	Hipótesis nula	¿Se rechaza hipótesis nula?
	W de Mann-Whitney (Wilcoxon)	4,33E-08	mediana1 = mediana2	Sí
D	Kolmogorov-Smirnov	0,00E+00	Proviene de la misma distribución La distribución es normal	No
	Prueba No paramétrica	Valor-P	Hipótesis nula	¿Se rechaza hipótesis nula?
D	W de Mann-Whitney (Wilcoxon)	4,62E-08	mediana1 = mediana2	Sí
	Kolmogorov-Smirnov	1,08E-07	Proviene de la misma distribución La distribución es normal	No

Los resultados de las pruebas de K-W y M-W permitieron asegurar que no había diferencias significativas entre las medianas de velocidad de las mediciones anemométricas y los datos de Tarifa. Se utilizó la regresión lineal (Mao & Monahan, 2018) para obtener la expresión de los predictores y predictandos. En la prueba ANOVA se obtuvieron porcentajes elevados para la correlación con la velocidad. Esto explicaría que las velocidades V_T están desplazadas hacia la derecha de V_v , y en el caso de las direcciones es al contrario, D_v está desplazado hacia la derecha de D_T . Esto es, las velocidades medidas en Tarifa son algo mayores que las de Valdevaqueros, y las direcciones en Valdevaqueros muestran variación hacia el S con respecto a Tarifa para el rango ENE-SSE ($67,50^\circ$ - $157,5^\circ$).

4.5. Análisis de resultados de pruebas estadísticas

Las pruebas paramétricas no pueden ser usadas para la caracterización de muestras que no provienen de una distribución normal o tienen diferentes poblaciones. Esto en un principio invalidaría el uso del test ANOVA para su caracterización. Sin embargo, para el caso del ajuste de los coeficientes por regresión, existen unos supuestos que permiten el uso de esta prueba. Entre otros aspectos, la robustez que presentan los tests paramétricos. Las pruebas paramétricas tienen más poder estadístico que las no paramétricas, pero al menos los predictores deben cumplir las propiedades de homogeneidad (varianza constante), independencia y distribución normal. Los métodos paramétricos estándar, como ANOVA (análisis de varianza) tienen una sensibilidad diferente a la desviación de la ley de distribución de datos inicial de la Normal. Por lo tanto, la desviación de lo "normal" durante el uso de dichos métodos no conduce necesariamente a malos resultados, aunque no aumenta la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos. No es necesario, ni suele ser posible, que un modelo ANOVA se ajuste perfectamente a los datos. Los modelos ANOVA son razonablemente robustos frente a ciertos tipos de desviaciones del modelo, como que los datos no estén con exactitud distribuidos normalmente (Liu, 2015). Adicionalmente, es posible usar el test ANOVA si los residuos demuestran homocedasticidad, varianza relativamente constante, y se distribuyen con cierta "normalidad". Para verificar los resultados del test ANOVA en cuanto al ajuste de los coeficientes de las ecuaciones de transferencia, se realizará la regresión por dos vías diferentes, regresión lineal y regresión ortogonal y también un análisis de los residuos para verificar como se distribuyen, así como la doble comprobación mediante regresión lineal y ortogonal.

4.6. Ecuaciones de transferencia obtenidas

De acuerdo con la aplicación de los diferentes métodos, en la tabla 2 y 3 se indican las diferentes ecuaciones obtenidas para las velocidades y direcciones, así como los resultados de los errores.

a) Velocidad

Tabla 2. Ecuaciones obtenidas para velocidades. Fuente: (Martínez-García, 2024)

Ecuación por R. Lineal $V_v = \{-0,54 + 1,01 \cdot vV_T\}^2$ (m/s)	Error regresión lineal (%)	Ecuación por R. Ortog. $V_v = \{-0,60 + 1,03 \cdot vV_T\}^2$ (m/s)	Error regresión ortogonal (%)	Ecuación por M.C. inversos $V_v = \{-0,66 + 1,04 \cdot vV_T\}^2$ (m/s)	Error M.C. inversos (%)
$\Delta em =$	5.37%	$\Delta em =$	5.56%	$\Delta em =$	5.59%
$\Delta eT =$	7.40%	$\Delta eT =$	7.08%	$\Delta eT =$	7.87%

b) Dirección

Tabla 3. Ecuaciones obtenidas para direcciones. Fuente: (Martínez-García, 2024)

Ec. por R. Ortogonal $D_v = -88,05 + 20,29 \cdot v(D_T)$ (°)	Error R. Ortogonal (%)	Ec. por R. Lineal $D_v = -78,48 + 19,41 \cdot v(D_T)$ (°)	Error R. Lineal (%)	Ec. por M.C. Inversos $D_v = -88,08 + 20,30 \cdot v(D_T)$ (°)	Error M.C. Inversos (%)
$\Delta em =$	6.70%	$\Delta em =$	6.70%	$\Delta em =$	6.70%
$\Delta eT =$	8.50%	$\Delta eT =$	8.50%	$\Delta eT =$	8.50%

Donde:

- Δem : se corresponde con el error medio de los valores estimados si no se consideran valores extremos y/o atípicos. Se observa como en ninguna de las 3 aproximaciones de las ecuaciones es superior al 5,50 %
- ΔeT : es el error medio considerando todos los valores.

De los resultados anteriores se puede comprobar como las ecuaciones obtenidas por regresión ortogonal son las que presentan un menor error. Para la obtención de los coeficientes que más ajustaran la expresión de los predictores y predictandos se realizó una doble comprobación mediante la regresión simple (Mao & Monahan, 2018) y regresión ortogonal (Carr, 2012; Carreno-Madinabeitia et al., 2020; Carroll & Ruppert, 1996; Leng et al., 2007; Wu & Zhen Yu, 2018). A continuación, en la tabla 4 se muestran los resultados de la prueba ANOVA para ambos procesos de regresión en el que se puede constatar los altos porcentajes (superiores al 95%) para la correlación con la velocidad, así como expresiones matemáticas casi idénticas.

Tabla 4. Ecuaciones obtenidas para direcciones. Fuente: Martínez-García et al. (2023)

Modelo velocidades	R
Doble Raíz Cuadrada: $V_v = (-0.54 + 1.01 \cdot \sqrt{V_t})^2$	0.98
Modelo Direcciones	R
Doble Raíz Cuadrada: $D_v = -88.05 + 20.29 \cdot \sqrt{D_t}$	0.98

En las figuras 11 y 12 se representan gráficamente los modelos obtenidos y los datos brutos. Las líneas magenta indican el límite de confianza (95%); este es el rango de valores en el que esperamos que caigan los predictandos. Las líneas verdes indican los límites de predicción (95%), el rango de valores que probablemente contendrá una predicción futura considerando la variabilidad de los datos. El rango de confianza y los límites de predicción se calculan utilizando la media y la desviación estándar, el error cuadrático medio (MSE) y los valores críticos para la prueba estadística que aplica la distribución normal (Martínez-García et al., 2023).

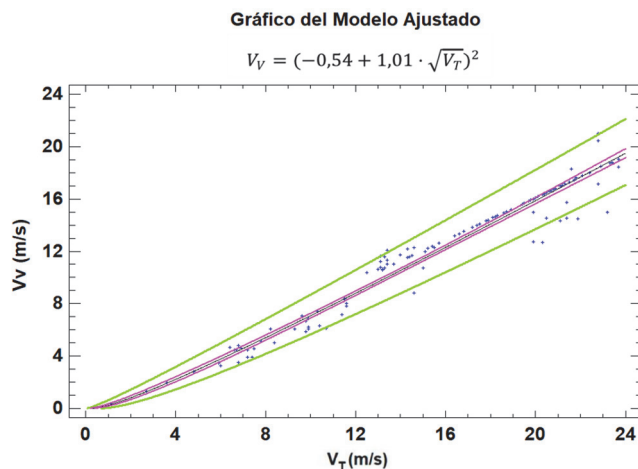


Fig. 11. Gráfico del modelo ajustado para las velocidades de viento por Regresión Ortogonal. Fuente: Martínez-García et al. (2023)

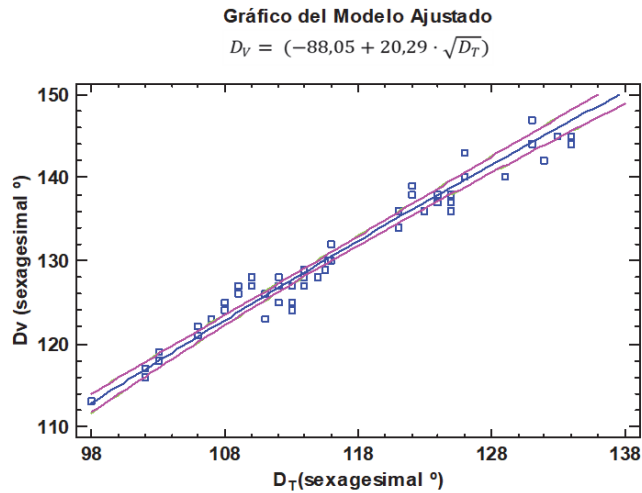


Fig. 12. Gráfico del modelo ajustado para las direcciones de viento ($0^{\circ}=N$) por Regresión Ortogonal.
Fuente: Martínez-García et al. (2023)

4.7. Validación del modelo

Para la validación de los modelos se han usado los datos de octubre de 2012. A continuación, se muestran las tablas 5 para velocidad y 6 para dirección, donde se muestran los valores errores tras aplicar la ecuación de transferencia con datos de dicho mes.

Tabla 5. Validación del modelo de transferencia de velocidades de viento para octubre de 2012.
Fuente: (Martínez-García, 2024)

Ecuación de transferencia $V_V=(-0,54+1,01 \cdot \sqrt{V_T})^2$ (m/s)	Error (%)
$\Delta em=$	4.22%
$\Delta eT=$	6.55%

El error medio sin considerar valores extremos o atípicos (Δem) es del 4,22% y el error medio global (ΔeT) es del 6,5 %

Tabla 6. Validación del modelo de transferencia de direcciones de viento para octubre de 2012.
Fuente: (Martínez-García, 2024)

Ecuación de transferencia $D_V=-88,05+20,29 \cdot \sqrt{D_T}$ (m/s)	Error (%)
$\Delta em=$	3.31%
$\Delta eT=$	5.13%

El error medio sin considerar valores extremos o atípicos (Δem) es del 3,31% y el error medio global (ΔeT) es del 5,13%

5. Conclusiones

El objetivo de la investigación fue resolver la falta de métodos, con técnicas relativamente simple, para la transferencia/propagación del viento a escala local. La mayoría de las predicciones locales se basan en GCM, pero su diseño es adecuado para la predicción meteorológica mundial y el cambio climático. Sin embargo, los GCM se pueden ejecutar a escala local, pero necesitan una gran cantidad de datos para el reanálisis y suposiciones que, a veces, pueden generar más incertidumbres y limitaciones de los resultados en esta resolución espacial. Este trabajo explora la forma de llevar a cabo la propagación del viento en base a ubicaciones con información de datos seriales de viento a no más de 10 km.

El método utilizado está basado en la comparación entre la ley dl perfil de viento y datos recogidos in situ. Esto nos llevó a seleccionar los datos de viento más adecuados entre 4 anemómetros ensamblados a diferentes alturas a partir de una campaña en la duna. Posteriormente, estos datos se compararon con los datos de una estación meteorológica cercana. Esto permitió seleccionar qué anemómetro y qué altura era la más adecuada, siendo el colocado a 1 m sobre el terreno (2,5 m.s.n.m.) el mejor para establecer relaciones de regresión con los registros de Tarifa. Gracias a esta novedosa aplicación del perfil de viento, y bajo la premisa de generar expresiones manejables matemáticamente, se obtuvieron ecuaciones de transferencia de velocidad de viento y dirección sencillas y fáciles de operar, con una elevada precisión. El coeficiente de correlación para el ajuste del modelo de regresión en los diferentes casos analizado fue superior al 95% y errores totalmente acotados, inferiores al 5,5% para velocidades y al 7% para direcciones en fase de validación, y por debajo del 5% para ambos parámetros durante la calibración.

Finalmente, es importante señalar que el método nace con carácter universal y no está afectado por restricciones siempre que la transferencia sea inferior a 10 km. En un futuro, se pretende extender la investigación para la obtención de datos de viento a partir de las características morfológicas de las playas.

Referencias

- Bañuelos-Ruedas, F., Angeles-Camacho, C., & Rios-Marcuello, S. (2010). Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2383–2391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.05.001>
- Barcons, J., Avila, M., & Folch, A. (2018). A wind field downscaling strategy based on domain segmentation and transfer functions. *Wind Energy*. <https://doi.org/10.1002/we.2169>
- Bardal, L. M., Onstad, A. E., Sætran, L. R., & Lund, J. A. (2018). Evaluation of methods for estimating atmospheric stability at two coastal sites. *Wind Engineering*, 42(6). <https://doi.org/10.1177/0309524X18780378>
- Barthelmie, R. J. (1999). The effects of atmospheric stability on coastal wind climates. *Meteorological Applications*, 6(1). <https://doi.org/10.1017/S1350482799000961>
- Bello-Millán, F. J., Somoano, M., Clavero, M., Gómez-Pina, G., & Losada, M. A. (2016). El sistema dunar de Valdevaqueros: evolución histórica y alternativas de gestión. *Ribagua*, 3(2). <https://doi.org/10.1016/j.riba.2016.07.001>
- Bernabeu, A. M., Medina, R., Vidal, C., & Muñoz-Pérez, J. J. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Rev. Soc. Geol. España*, 14(3–4).

- Boudia, S. M., & Santos, J. A. (2019). Assessment of large-scale wind resource features in Algeria. *Energy*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116299>
- Brune, W. H. (2020). *Fundamentals of Atmospheric Science*. The Pennsylvania State University.
- Carr, J. R. (2012). Orthogonal regression: A teaching perspective. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 43(1). <https://doi.org/10.1080/0020739X.2011.573876>
- Carreno-Madinabeitia, S., Ibarra-Berastegi, G., Sáenz, J., Zorita, E., & Ulazia, A. (2020). Sensitivity studies for a hybrid numerical-statistical short-term wind and gust forecast at three locations in the basque country (Spain). *Atmosphere*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/ATMOS11010045>
- Carroll, R. J., & Ruppert, D. (1996). The Use and Misuse of Orthogonal Regression in Linear Errors-in-Variables Models. *American Statistician*, 50(1). <https://doi.org/10.1080/00031305.1996.10473533>
- Cheng, Y., Zhang, M., Zhang, Z., & Xu, J. (2019). A new analytical model for wind turbine wakes based on Monin-Obukhov similarity theory. *Applied Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.225>
- Counihan, J. (1975). Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880–1972. *Atmospheric Environment* (1967), 9(10), 871–905. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(75\)90088-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90088-8)
- Crosman, E. T., & Horel, J. D. (2010). Sea and Lake Breezes: A Review of Numerical Studies. *Boundary-Layer Meteorology*, 137(1). <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9517-9>
- Fraile Jurado, P., & Aguilar Alba, M. (2006). La influencia de la presión atmosférica y el viento en la variabilidad del nivel del mar en el mareógrafo de Bonanza (Cádiz). *V Congreso AEC: Clima, Sociedad y Medio Ambiente*.
- Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2010). Nonparametric statistical inference. In *Nonparametric Statistical Inference*. https://doi.org/10.5005/jp/books/10313_14
- Gómez-Pina, G., Fages, L., Ramírez, J. L., Muñoz-Pérez, J. J., & Enríquez, J. (2007). A Critical Review of Beach Restoration Projects in the Northern Coast of Cadiz (Spain) After Thirteen Years. *Coastal Engineering* 2006, 4167–4178. https://doi.org/10.1142/9789812709554_0350
- Guevara Díaz, J. M. (2013). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra Nueva Etapa*, 46(46).
- Gunda, L., Chikuni, E., Tazvinga, H., & Mudare, J. (2021). Estimating wind power generation capacity in Zimbabwe using vertical wind profile extrapolation techniques: A case study. *Journal of Energy in Southern Africa*, 32(1). <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2021/v32i1a8205>
- Hernández-Walls, R., Mascarenhas, J. S., & Ocampo-Torres, F. J. (2002). Una relación entre la velocidad de fricción del viento y el retroesparcimiento de las microondas por la superficie del mar. *Ciencias Marinas*, 28(3). <https://doi.org/10.7773/cm.v28i3.224>
- Kirchmeier, M. C., Lorenz, D. J., & Vimont, D. J. (2014). Statistical downscaling of daily wind speed variations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0230.1>

- Kirchner-Bossi, N., García-Herrera, R., Prieto, L., & Trigo, R. M. (2015). A long-term perspective of wind power output variability. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.4161>
- Leng, L., Zhang, T., Kleinman, L., & Zhu, W. (2007). Ordinary least square regression, orthogonal regression, geometric mean regression and their applications in aerosol science. *Journal of Physics: Conference Series*, 78(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/78/1/012084>
- Liu, H. (2015). Comparing Welch's ANOVA, a Kruskal-Wallis test and traditional ANOVA in case of heterogeneity of variance ANOVA. In *Theses and Dissertations*. <https://scholarscompass.vcu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5026&context=etd>
- Mao, Y., & Monahan, A. (2018). Linear and nonlinear regression prediction of surface wind components. *Climate Dynamics*, 51(9–10). <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4079-5>
- Martínez-García, F. P. (2024). *Transferencia espacial de datos de viento. Aplicación a la duna de Valdevaqueros (Cádiz)*. Universidad de Cádiz.
- Martínez-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). <https://doi.org/10.3390/jmse9030318>
- Martínez-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). <https://doi.org/10.3390/jmse9030318>
- Martínez-García, 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). <https://doi.org/10.3390/jmse11050923>
- Muñoz Pérez, J. J. (1996). *Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en las rocosas*. Universidad de Cádiz.
- Muñoz-Perez, J. J., Navarro, M., Roman-Sierra, J., Tejedor, B., Rodríguez, I., & Gomez-Pina, G. (2009). Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method. *Geomorphology*, 112(1–2), 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.016>
- Ostertagová, E., Ostertag, O., & Kováč, J. (2014). Methodology and Application of the Kruskal-Wallis Test. *Applied Mechanics and Materials*, 611, 115–120. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.611.115>
- Rehman, S., Muhammad Shoaib, Imran Siddiqui, Firoz Ahmed, Muhammad Rashid Tanveer, & Saif Uddin Jilani. (2015). Effect of Wind Shear Coefficient for the Vertical Extrapolation of Wind Speed Data and its Impact on the Viability of Wind Energy Project. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 11, 90–100. <https://doi.org/10.6000/1927-5129.2015.11.12>
- Ryu, G. H., Kim, Y. G., Kwak, S. J., Choi, M. S., Jeong, M. S., & Moon, C. J. (2022). Atmospheric Stability Effects on Offshore and Coastal Wind Resource Characteristics in South Korea for Developing Offshore Wind Farms. *Energies*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/en15041305>

- Steele, C. J., Dorling, S. R., Von Glasow, R., & Bacon, J. (2013). Idealized WRF model sensitivity simulations of sea breeze types and their effects on offshore windfields. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(1). <https://doi.org/10.5194/acp-13-443-2013>
- Toffani, M. (2020). Morphodynamic study of the dunes from Bahía Creek dunefield, Río Negro, Argentinian Patagonia | Estudio morfodinámico de las dunas del campo eólico de bahía creek, río negro, patagonia argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 27(1).
- Wharton, S., & Lundquist, J. (2010). Atmospheric stability impacts on power curves of tall wind turbines—an analysis of a west coast north american wind farm. *Lawrence Livermore National Laboratory*.
- Wu, C., & Zhen Yu, J. (2018). Evaluation of linear regression techniques for atmospheric applications: The importance of appropriate weighting. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(2), 1233–1250. <https://doi.org/10.5194/amt-11-1233-2018>
- Yue, Z., Yuan, X., Cao, L., Tian, F., Han, C., & Zhang, H. (2022). Characteristics and variation law of wind-blown sand delivered to the Ningxia–Inner Mongolia reach of the Yellow River under a changing environment. *International Journal of Sediment Research*, 37(2). <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.09.004>

REBECOS: método numérico 3D para la construcción realista de diques

Josep R. Medina^a, Jorge Molines^a y M^a Esther Gómez-Martín^a

^aInstituto del Transporte y Territorio, Universitat Politècnica de València, , jrmolina@upv.es; jormollo@upv.es; sermuopa@upv.es; mgomar00@upv.es.

How to cite: Medina, J. R.; Molines, J & Gómez-Martín, M. E. (2024). REEBECOS: método numérico 3D para la construcción realista de diques. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

The construction of hundreds of new breakwaters in the coming decades and the rehabilitation of many breakwaters deteriorated over the years are favoured by a long- term sustained growth of maritime trade. A new proprietary software named PLACSIM[®] is described as a numerical tool to optimize the procedures for the construction of new mound breakwaters, and repair and rehabilitation of old breakwaters. This numerical simulator uses the open-source PhysX video game software to apply Newton's laws to rigid bodies; the motions and collisions of blocks or stones during the placement process are realistically simulated. This software can be used to analyze the feasibility and results of different placement meshes to optimize the placement procedure of a given breakwater under given environmental conditions.

Keywords: rubble-mound breakwater; armor unit placement; numerical simulator; optimization; feasibility analysis

Resumen

La construcción de cientos de nuevos rompeolas en las próximas décadas y la rehabilitación de muchos rompeolas deteriorados con los años se verá favorecida por el crecimiento sostenido a largo plazo del comercio marítimo. Se describe un nuevo software de código cerrado denominado PLACSIM[®] como herramienta numérica para optimizar los procedimientos de construcción de nuevos dique en latud y la reparación y rehabilitación de otros. Este simulador numérico utiliza el software de código abierto para videojuegos PhysX para aplicar las leyes de Newton a cuerpos rígidos; los movimientos y colisiones de los bloques o piedras durante el proceso de colocación se simulan de forma realista. Este software puede usarse para analizar la viabilidad y los resultados de diferentes mallas de colocación para optimizar el procedimiento de colocación de un dique dado en condiciones ambientales dadas.

Palabras clave: rompeolas; reparación de diques; mallas de colocación; simulador numérico; análisis de viabilidad; optimización

1. Introducción

Durante la segunda mitad del S. XX se han construido en el mundo miles de diques de abrigo que han contribuido decisivamente al desarrollo económico y social de muchos países. Durante la fase de crecimiento económico rápido, la atención técnica se centra en el diseño, construcción y explotación de infraestructuras; sin embargo, esta situación cambia cuando los países se desarrollan y tienen que gestionar una gran acumulación de infraestructuras construidas y explotadas a lo largo de muchas décadas. La reparación, mantenimiento y rehabilitación de diques son obras que requieren una atención creciente debido al gran número de diques existentes en servicio cuya vida útil ha sido rebasada o lo será en los próximos años (ver Stagnitti et al., 2023). Además, el Cambio Climático (CC) y la correspondiente subida global del nivel medio del mar (SLR) tienden a aumentar las solicitudes de los diques y otras obras marítimas (ver Isobe, 2011). Los riesgos estructurales y de inundación (ver Muis et al., 2020) y los impactos ambientales en las zonas costeras tienden a aumentar con el tiempo, y con ellos el riesgo asociado a los diques en servicio que tienen que resistir, además de la degradación natural de la infraestructura, unas solicitudes diferentes a las que se consideraron en el diseño original.

La vida útil de los diques de abrigo portuarios suele situarse entre 25 y 50 años (ver ROM 1.0- 09) y los países desarrollados tendrán que enfrentarse al problema de la reparación, rehabilitación o el desmantelamiento de cientos de diques en servicio que excederán su vida útil con un escenario climático adverso. Por otro lado, el transporte marítimo internacional (ver Fig. 1), impulsor de las grandes infraestructuras portuarias, sigue creciendo de manera imparable, como también crece la flota de embarcaciones de recreo. Se tendrán que construir nuevos diques, sobre todo en países en desarrollo, y deberán rehabilitarse muchas de las infraestructuras existentes en los países desarrollados.

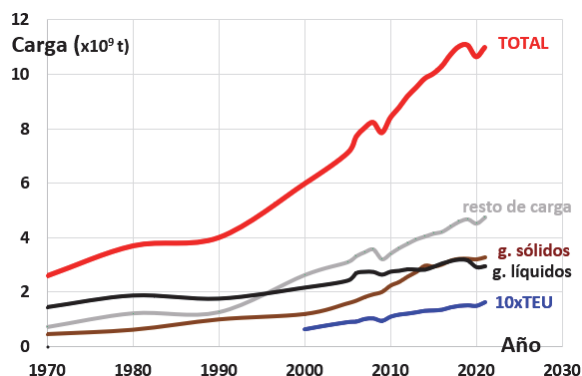


Figura 1. Transporte marítimo por tipo de carga (UNCTAD, 2022).

En resumen, las obras marítimas son elementos fundamentales para las infraestructuras del transporte marítimo, la navegación de recreo y la protección de costas, y este tipo de infraestructuras seguirán creciendo durante las próximas décadas. Además de muchos nuevos diques, será necesario reparar y rehabilitar cientos de ellos en el futuro próximo. Los diques en talud, muelles de bloques y otras obras requieren la colocación por gravedad de grandes elementos prefabricados y piedras de gran tamaño utilizando medios mecánicos (grúas, etc.). Planear correctamente la colocación de estos grandes bloques resulta esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia en la construcción, reducir los costes y los plazos de las obras.

La viabilidad y robustez del proceso de construcción de nuevos diques o de la rehabilitación de los existentes está condicionada por las operaciones de colocación de grandes bloques con grúas, que tienen un impacto económico relevante sobre las obra. Un procedimiento de construcción simple y fiable, basado en operaciones factibles de colocación, permite prevenir accidentes, reducir retrasos imprevistos y también el coste y tiempo de colocación de bloques durante la construcción.

Hay que considerar que no es fácil la colocación ciega bajo el agua; esta imprecisión en la colocación favoreció en el pasado el diseño de diques con mantos bicapa (cubos, escollera, etc.) para minimizar el riesgo de averías por mala colocación. Las grúas modernas suelen tener un GPS diferencial en cabeza para colocar con precisión (coordenadas horizontales X-Y) las piezas masivas (cubos, Cubipodos, etc.) y, por otro lado, existen sistemas especiales (ver Mouquet, 2009) para la colocación precisa (apoyada por buzos) de piezas *bulky* tipo Accropode, Core- Loc, etc.

A escala prototipo, se suelen diseñar mallas de colocación (ver Pardo et al., 2014) para colocar con grúas los elementos del manto principal de los diques en talud. La colocación de piezas se puede estudiar con experimentación física a escala reducida (ver Medina et al., 2010), pero los modelos a escala reducida de diques se construyen generalmente dejando caer las piezas a mano. Hay que considerar que las condiciones de construcción en el laboratorio son excelentes (visión perfecta, construcción en seco, colocación precisa, etc.) en comparación con la construcción a escala prototipo. El proceso constructivo (colocación de elementos pesados con grúas) se ve afectado por el oleaje, el viento, la habilidad del operador y la mala visibilidad, entre otros factores. Todo ello puede derivar en un efecto de modelo relevante en los ensayos de laboratorio si la colocación a escala prototipo difiere mucho de la realizada en laboratorio; disponer de mallas de colocación factibles y procedimientos de construcción sencillos y viables resulta imprescindible para reducir costes de construcción y garantizar la seguridad de la estructura.

Tanto para la construcción de nuevos diques en talud como para la rehabilitación o reparación de los existentes, es necesario la colocación con grúas de grandes elementos siguiendo un orden determinado en una malla de colocación prefijada que define coordenadas horizontales {X,Y}. Para garantizar que la malla de colocación a utilizar es viable, se pueden hacer ensayos físicos de construcción realista de diques con grúas a escala reducida (ver Medina et al., 2010), pero el tiempo requerido es muy elevado. El uso de simuladores numéricos de construcción realista permite reducir mucho el tiempo requerido para los ensayos y con ello es factible analizar muchas mallas diferentes y procesos de construcción para seleccionar la que proporcionan los mejores resultados. En este artículo se presenta el software PLACSIM[®] (www.placsim.com) diseñado para realizar simulaciones numéricas de construcción realista de diques con diferentes mallas y tipos de piezas según el procedimiento y la precisión de la colocación. Este software permite determinar si una malla y procedimiento de colocación son viables para la construcción nueva o la rehabilitación de un dique en talud determinado y las pérdidas que cabe esperar con un procedimiento y precisión de colocación dados.

2. Objetivos

En este artículo se analiza la simulación numérica realista de colocación en bloques en el manto principal de diques en talud como herramienta para estudiar la calidad de las mallas de colocación específicas para la construcción de nuevos diques y la reparación o rehabilitación de los existentes. Se presenta el software de código cerrado PLACSIM[®] derivado del Proyecto REBECOS (2022-2024) de Prueba de Concepto, que permite la simulación numérica realista del proceso constructivo utilizando el software para videojuegos PhysX que aplica las leyes de la Mecánica Clásica al movimiento de sólidos rígidos.

En el caso de nuevos diques en talud, resulta aparentemente sencillo definir los diques con plantas y secciones, pero no lo es tanto si consideramos los procesos y la viabilidad constructiva a escala prototipo. En los ensayos físicos de construcción realista, con modelos 3D a escala reducida, se pueden ver algunos de los posibles problemas de la construcción a escala prototipo que son muy difíciles de observar con las plantas y secciones que suelen utilizarse en la fase de diseño. Los ensayos físicos de construcción realista con grúas a escala reducida son muy lentos (solo un orden de magnitud más rápido que la construcción a escala prototipo), mientras que los ensayos numéricos de construcción realista de diques (utilizando simuladores) son varios órdenes de magnitud más rápidos y permiten optimizar y validar mallas de colocación en un tiempo razonable.

En el caso de la reparación o rehabilitación de diques en talud, es mucho más difícil la estandarización. No solo se requiere definir mallas para el tronco, el morro, los tramos en curva y las transiciones, sino que se requiere una malla de colocación adecuada en cada tramo y resulta imprescindible su verificación. Si el dique es grande, los ensayos físicos de construcción realista con grúas a escala reducida son inviables (plazo de realización) y la simulación numérica resulta idónea para optimizar mallas de colocación y verificar que son factibles las mallas y procedimientos a escala prototipo.

3. Metodología

Dentro del Proyecto REBECOS (2022-2024) de Prueba de Concepto se ha desarrollado el software de código cerrado PLACSIM® y aplicaciones para la construcción numérica realista de diques en talud. Este software es similar al software de código abierto descrito por Molines y otros (2021) y Muñoz-Palao y otros (2024), quienes lo emplearon para construir diques de homogéneos de baja cota de coronación (HLCS), optimizar mallas de colocación y analizar los errores de colocación a escala de prototipo. El software anterior derivado del Proyecto HOLOBREAK (2019-2022) utilizaba Bullet Physics Engine (BPE) descrito por Milington (2007) mientras que PLACSIM® utiliza PhysX; tanto BPE como PhysX se utilizan en videojuegos y aplican las Leyes de Newton sobre sólidos rígidos. Se requieren calibrar cinco parámetros (coeficiente de fricción, margen de colisión, etc.) para conseguir una respuesta realista que, en el caso que nos ocupa, se han utilizado resultados de ensayos físicos a escala reducida de HLCS de Cubípodos (ver Molines y otros, 2021).

La Fig. 2 representa el proceso constructivo numérico de un tronco recto de dique en talud con manto de cubos bicapa, donde se observan los elementos ya colocados (gris), el bloque que está siendo colocado (resaltado en amarillo) y los cubos que están en la malla a la espera de ser colocados (negro transparente). Los cubos se han colocado a velocidad constante, simulando las velocidades bajas de descenso con grúa de las obras reales. En esta aplicación a dique nuevo se ha utilizado el software del Proyecto HOLOBREAK (2019-2022) basado en BPE; partiendo de una malla de colocación predefinida, los elementos cúbicos se dejan caer en el orden prefijado y a la velocidad definida (colocación con grúa). Los bloques en este simulador son cuerpos rígidos que chocan y se mueven e interactúan siguiendo las leyes de la Mecánica Clásica.

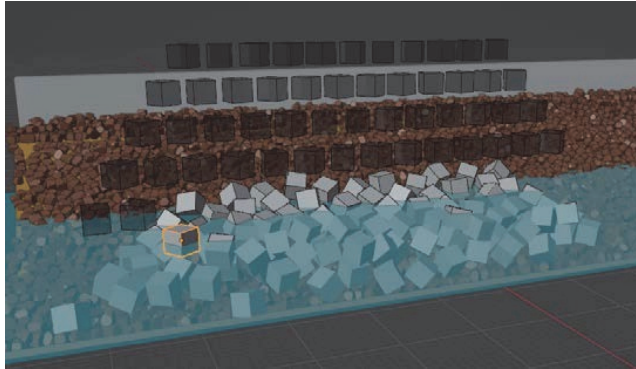


Figura 2. Simulación del proceso constructivo de un tronco con un manto principal de cubos bicapa

3.1. Ensayos físicos de construcción de diques

PLACSIM® es un simulador numérico que intenta emular el proceso de colocación de bloques en el manto principal de forma análoga al prototipo y a los ensayos físicos a escala reducida de construcción de diques. Los ensayos físicos a escala reducida son siempre una opción posible para el estudio de los procesos constructivos y la colocación de bloques en el manto principal, tanto para los diques nuevos como para obras de reparación y rehabilitación de diques. Medina y otros (2010) describen cómo utilizar modelos de diques y grúas a escala reducida para simular la colocación de bloques y poder diseñar mallas de colocación adecuadas (ver Pardo y otros, 2014). El problema de utilizar modelos a escala reducida no es de carácter técnico sino económico y de plazos; la modelación física describe bien el proceso constructivo a escala prototipo pero consumiendo mucho tiempo ya que la colocación física es solo un orden de magnitud más rápida que la colocación real a escala prototipo. La Fig. 3 muestra un instante del proceso de colocación de bloques con grúas a escala reducida; el operador de grúa dispone de las coordenadas $\{X,Y\}$ en cabeza y el orden de colocación, de forma análoga a los operadores de grúas reales que tampoco ven las piezas (colocación ciega bajo el agua).



Figura 3. Colocación realista en modelo físico a escala reducida

Es sabido que la porosidad real del manto afecta el rabase y su estabilidad hidráulica (ver Medina y otros, 2014) y la porosidad depende de la malla y los procesos de colocación. Sin embargo, en los laboratorios se suelen construir los modelos a escala reducida colocando los bloques “a mano”, para ahorrar tiempo, ya que las grúas a escala reducida y los procesos realistas de colocación consumen un tiempo del que normalmente no se dispone. Una malla inadecuada puede provocar la pérdida de muchas piezas durante la construcción a escala prototipo y dejar una porosidad heterogénea en el manto que reduzca la estabilidad hidráulica respecto de lo estimado en laboratorio con piezas colocadas a mano de forma óptima.

En el caso de diques nuevos, se requiere definir mallas adecuadas para el tronco recto, para el morro (gran curvatura), para los tramos curvos y las transiciones por tamaño de bloque. Para un tramo recto, será suficiente con definir una malla tipo diamante caracterizada por las dos distancias relativas (a/D_n y b/D_n) en dirección paralela y perpendicular al tronco (ver Fig. 4); estas distancias relativas determinan si es viable la colocación, la porosidad media del manto y la heterogeneidad probable del mismo. Las mallas de colocación para morros y troncos con cierta curvatura son más difíciles de diseñar y requieren su encadenamiento ya que la longitud entre bloques tiende a reducirse desde la berma de pie a la coronación (ver Fig. 5). Pardo et al. (2014) describe como diseñar mallas de colocación de troncos rectos y de morros y tramos con curvatura.

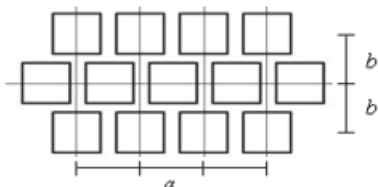


Figura 4. Malla de colocación tipo diamante

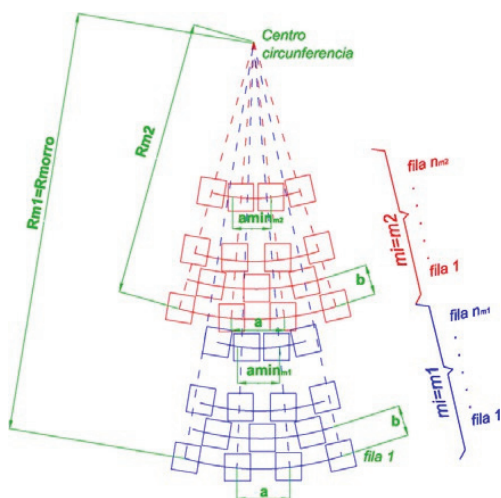


Figura 5. Malla de colocación encadenada para morros (Medina y Gómez-Martín, 2015)

Además de los cambios de curvatura de la traza del dique, los cambios en el tamaño del bloque utilizado también requiere realizar transiciones para adecuar las mallas de colocación (ver Medina y Gómez-Martín, 2015).

3.2. Ensayos numéricos de construcción de diques

PLACSIM[®] es un software de código cerrado basado en PhysX (utilizado en videojuegos) para simular la construcción realista de diques incluyendo la colocación y recolocación de bloques del manto principal. Se puede utilizar un MDT (Modelo Digital del Terreno) de alta precisión, obtenido de un programa de monitorización de diques, para crear un modelo numérico 3D del dique con bloques rígidos (cubos, piedras, Cubípodos, etc.). El software PLACSIM[®] se utiliza después para realizar ensayos numéricos de colocación alternativos (mallas, orden, velocidades, etc.) para la construcción o reparación del dique, con el fin de encontrar alternativas factibles con resultados óptimos. El objetivo final es encontrar el mejor procedimiento factible para la construcción o reparación del dique, utilizando grúas con velocidades verticales realistas y errores de posicionamiento, dando como resultado una estructura similar a la considerada en los ensayos físicos. La Fig. 6 muestra la pantalla principal para controlar el simulador numérico de colocación PLACSIM[®]; una vez dada la cuadrícula de colocación y el orden de colocación, el simulador puede colocar de 30 a 40 unidades por minuto (tiempo acelerado cuatro veces) siguiendo las leyes de Newton sobre cuerpos rígidos (bloques del manto).

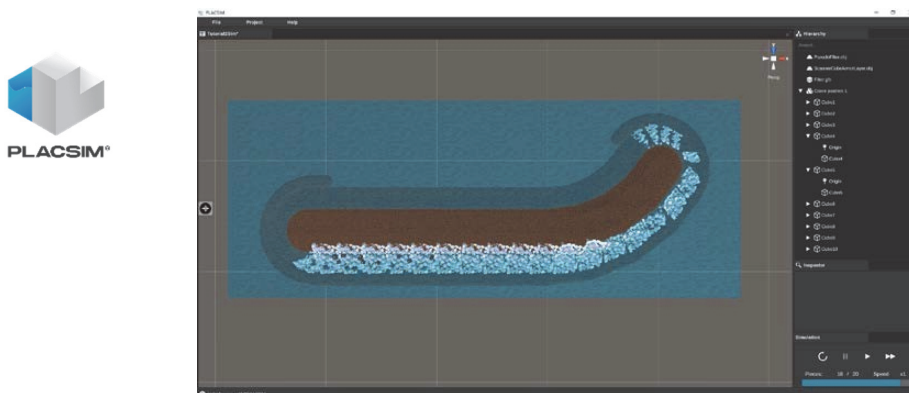


Figura 6. Pantalla principal de PLACSIM[®]

La malla de colocación que se ensaya tiene la colocación de cada unidad ordenada en el tiempo de acuerdo con las posiciones de la grúa, similar a la construcción de prototipos en la que el operador de la grúa conoce el orden exacto y la posición X-Y de cada bloque que se colocará en el manto. PLACSIM[®] genera un modelo numérico para el fondo marino, el núcleo y las capas inferiores; una vez que se le proporciona una cuadrícula y un orden de colocación a PLACSIM[®], el software coloca de manera realista todas las unidades del manto en la malla de colocación definida, como lo haría la grúa en el prototipo. El software permite visualizar el resultado desde diferentes puntos de vista para evaluar la calidad del resultado final. Si el resultado no es bueno (muchas unidades perdidas, etc.), se puede definir una nueva malla de colocación u orden de colocación para una nueva prueba de colocación realista, aprendiendo de los malos resultados de las pruebas de colocación anteriores. Este proceso de aprendizaje por retroalimentación puede continuar hasta que una determinada malla y orden de colocación resulta factible, generando un resultado óptimo. La Fig. 7 muestra la secuencia de colocación de PLACSIM[®] según las posiciones previstas de la grúa.

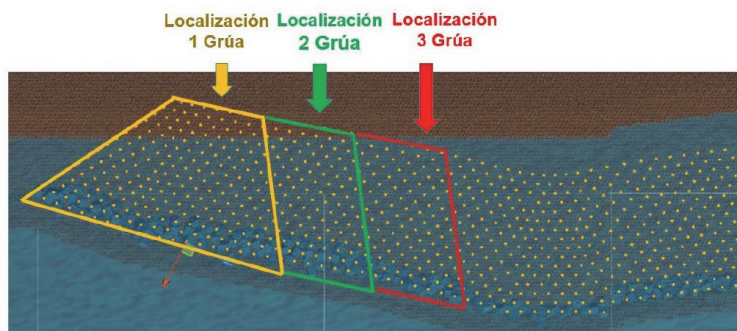
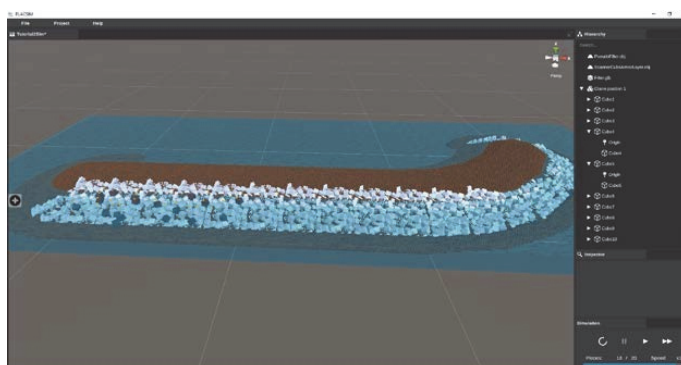


Figura 7. Secuencias de colocación de bloques en el manto principal (PLACSIM®, 2024)

PLACSIM® utiliza las leyes de Newton sobre cuerpos rígidos (bloques del manto) controlando el posicionamiento horizontal X-Y de cada elemento con algún error de posicionamiento (olas, viento, etc.) y velocidad de descenso de las piezas (operador de grúa); sin embargo, el software es muy eficiente y puede acelerar el tiempo real para una colocación más rápida (más de 40 unidades/minuto). Este simulador numérico es dos órdenes de magnitud más rápido que las pruebas de colocación físicas realistas y tres órdenes de magnitud más rápido que la colocación en obras reales. Esta eficiencia de videojuego permite el análisis múltiple de mallas de colocación para optimizar el proceso de construcción y evaluar la viabilidad de un procedimiento de construcción dado. Este software es especialmente adecuado para diseñar mallas de colocación factibles para reparar rompeolas dañados porque no hay disponible una regla de colocación fiable para rompeolas dañados.

La Figura 8 muestra una vista del modelo numérico 3D durante el proceso de colocación de nuevos bloques cúbicos en un manto ya dañado; las leyes de Newton se aplican a cuerpos rígidos considerando la velocidad vertical y el error de posicionamiento de la grúa utilizada para reparar el dique, similar a Muñoz-Palao et al. (2024). La calidad y viabilidad del proceso de reparación dependen de la malla de colocación de la reparación, los errores de posicionamiento de la grúa y la velocidad vertical de las unidades antes del contacto. El modelo numérico 3D con cubos rígidos y piedras derivado del MDT de alta precisión se modifica mediante el proceso de reparación numérica; en la Fig. 8, la capa inferior y el manto dañado (cubos blancos) se toman del escáner láser de un modelo físico de dique a pequeña escala en un canal de oleaje, repetido a lo largo del tronco para generar el modelo numérico 3D.



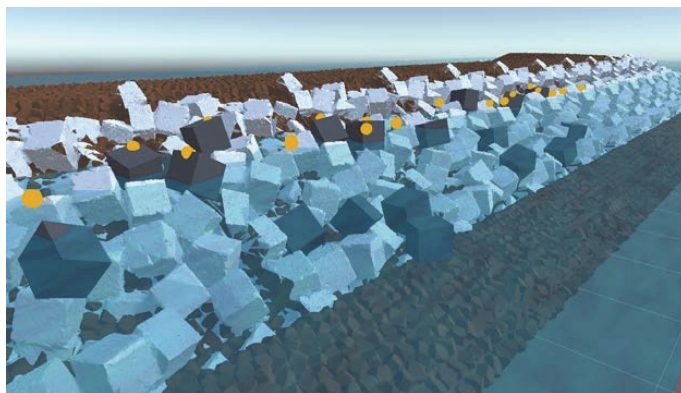


Figura 8. Colocación de bloques cúbicos en reparación: (a) vista general y (b) detalle

Los puntos amarillos de la Fig. 8 indican los puntos de la malla de colocación. Los bloques a colocar se activan en un orden determinado; cuando un bloque se mueve hacia abajo con una velocidad prescrita (simulando la colocación de una grúa) se ve afectada por las múltiples colisiones con los bloques vecinos ya colocados y puede provocar o no movimientos de las unidades colocadas. Si el resultado no es aceptable (los bloques no se colocan donde deberían), la malla de colocación se puede cambiar hasta obtener una malla de colocación factible para reparar ese dique particular. La robustez de una solución dada (malla de colocación y orden de colocación) se puede analizar incrementando el error de posicionamiento o la velocidad de descenso de los bloques simulando peores condiciones ambientales durante la construcción. El software PLACSIM[®] se puede utilizar con fondos marinos irregulares para nuevos diques y también para reparar o rehabilitar diques.

La principal ventaja de PLACSIM[®] no es encontrar soluciones para los casos simples sino soluciones para los más complejos (reparaciones, morros, fondo marino irregular, diferentes tamaños de unidades, etc.) en los que no son aplicables reglas generales para el diseño de mallas de colocación.

4. Conclusiones

La construcción de cientos de nuevos rompeolas en las próximas décadas y la rehabilitación de muchos rompeolas deteriorados con los años se ven favorecidas por un crecimiento sostenido a largo plazo del comercio marítimo y de la flota naviera mundial. En este artículo, se describe un nuevo software de código cerrado denominado PLACSIM[®] como una herramienta numérica para optimizar los procedimientos de construcción de nuevos rompeolas, así como la reparación y rehabilitación de dique e ntalud. El nuevo software PLACSIM[®] es similar al utilizado por Molines et al. (2021) y Muñoz-Palao et al. (2024) basado en motores numéricos para videojuegos y software de código abierto Blender y BPE para resolver las leyes de Newton sobre la dinámica de cuerpos rígidos, calibrado con resultados de pruebas físicas. PLACSIM[®] utiliza el software PhysX en lugar de BPE y una descripción 3D realista del rompeolas sobre un fondo marino irregular. El nuevo software utiliza las leyes de Newton (software PhysX) sobre cuerpos rígidos (bloques cúbicos, etc.) con coeficientes (margen de colisión, fricción, rebote, amortiguamiento, etc.) calibrados con pruebas físicas. Las unidades del manto (cubos, piedras, etc.) pueden tener geometrías complejas; el efecto del viento y el oleaje durante la construcción a escala real se puede considerar en el simulador introduciendo errores de posicionamiento horizontal X-Y. La velocidad de descenso de los bloques durante la colocación se controla para imitar el funcionamiento de la grúa.

El simulador numérico PLACSIM® está diseñado para trabajos de reparación y rehabilitación de diques deteriorados, así como para optimizar el procedimiento de construcción de nuevos diques. Las mallas de colocación factibles para áreas especiales (morros, reparación, fondos irregulares, etc.) no son fáciles de definir y el uso de mallas inviables pueden provocar grandes pérdidas económicas durante la construcción. El ahorro de costes, los procedimientos de construcción seguros y fiables, así como un mejor conocimiento del resultado final de la obra son las principales ventajas de usar PLACSIM®, evitando el uso de cuadrículas de colocación que no son factibles. Los ensayos de colocación numéricos realistas en 3D realizadas con el nuevo software se pueden emplear para el análisis de viabilidad de la construcción de rompeolas en diferentes condiciones ambientales y de utilización de grúas. Este simulador numérico para la colocación de bloques en el manto es tres órdenes de magnitud más rápido que la colocación a escala real.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por los proyectos REMOBE (PID2021-126475OB-I00) y HOLOBRACE (PID2021-128035OA-I00), MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por “ERDF A way of making Europe”, por “European Union NextGenerationEU/PRTR”.

Referencias

- Millington, I. (2007). *Game Physics Engine Development*. Elsevier.
- Isobe, M. (2011). Impact of global warming on coastal structures and adaptation strategy. *Proceedings of Coastal Structures 2011*, World Scientific, Vol. 1, 3-19.
- Medina, J.R., Gómez-Martín, M.E., and A. Corredor. (2010). Influence of armor unit placement on armor porosity and hydraulic stability. *Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Paper No. 255 / structures.41.
- Medina, J.R., Molines, J., and M.E. Gómez-Martín. (2014). Influence of armour porosity on the hydraulic stability of cube armour layers, *Ocean Engineering*, 88, 289-297.
- Medina, J.R. y M.E. Gómez-Martín (2015). Manual del Cubípodo® 2015. Editorial Universitat Politècnica de València, p. 103.
- Molines, J., Centi, R., Di Risio, M., and Medina, J.R. (2021). Placement tests of Cubipod homogeneous low-crested structures using Bullet Physics Engine. *Coastal Engineering* 168 (2021) 103901.
- Mouquet, A. (2009). Armor unit placement and positioning in 3D real time. *Proc. 9th Int. Conf. ICE Coasts, marine structures and breakwaters*, Thomas Telford, Vol. 1, 437-447.
- Muis, S., Apecechea, M.I., Dullaart, J., Rego, J.L., Madsen, K.S., Su, J., Yan, K. and M. Verlaan. (2020). A high-resolution global dataset of extreme sea levels, tides, and storm surges, including future projections. *Frontiers in Marine Science*, 7 (2020) 263.
- Muñoz-Palao, S., Díaz-Carrasco, P., Molines, J., Gómez-Martín, M.E., and Medina, J.R. (2024). Numerical construction tests to assess the feasibility of placement grids for Cubipod Homogeneous Low-Crested Structures. *Coastal Engineering* 188 (2024) 104455.
- Pardo, V., Herrera, M.P., Molines, J. and Medina, J.R. (2014). Placement tests, porosity and randomness of cube and Cubipod armor layer. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 140(5), 04014017.

- PLACSIM® (2024). *Manual de usuario, Versión 1.0*, [Online], https://placsim.com/wp-content/uploads/2024/10/20240628_Manual_REBECOS.pdf [Access January 20025]
- Stagnitti, M., Lara, J.L., Musumeci, R.E., and E. Foti. (2023). Numerical modeling of wave overtopping of damage and upgraded rubble-mound breakwaters. *Ocean Engineering*, 280, 114798.
- UNCTAD, (2022). *Review of maritime transport. United Nations Publications*, [Online], <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2022> [Access September 2023].

Valor característico de los parámetros geotécnicos en los métodos de fiabilidad. Aplicación al diseño del nuevo muelle en Nigg Bay-Escocia

Alvaro Sanz de Ojeda^a, Manuel-Jesús Bueno-Aguado^b, Felix Escolano Sánchez^c

^aIngeniero de Minas. Especialista del Departamento de Geotecnia de Proes Ingenieros SA, (alvaro.sanz@proes.es);

^bDoctor Ingeniero de Caminos C y P. responsable del Departamento de Geotecnia de Proes Ingenieros SA, Profesor de Geología y Geotecnia de la Universidad Politécnica de Madrid. (manuel.bueno@proes.es);

^cLicenciado en Ciencias Geológicas. Doctor por la Escuela de Ingenieros de Caminos C y P. Profesor de Geología y Geotecnia de la Universidad Politécnica de Madrid.

How to cite: Sanz de Ojeda, A.; Bueno-Aguado, M. J & Escolano Sánchez, F. (2024). Valor característico de los parámetros geotécnicos en los métodos de fiabilidad. Aplicación al diseño del nuevo muelle en Nigg Bay-Escocia. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Resumen

El método de diseño por Estados Límites Últimos aplicado a los modos de fallo geotécnicos requiere la definición de unos conjuntos de coeficientes de seguridad junto con unos valores característicos que representan el comportamiento del terreno. En la actualidad, los códigos y normas, -- y en particular el Eurocódigo 7--, proporcionan varios enfoques de diseño donde se recogen estos conjuntos de coeficientes. La selección de los valores característicos de las propiedades del suelo es el otro factor esencial para alcanzar el margen de seguridad exigido. Sin embargo, hoy en día, este proceso de selección depende en gran medida de la experiencia de los ingenieros geotécnicos y de su sentido común. El Análisis Estructural de la Fiabilidad (RSA, por sus siglas en inglés) proporciona una poderosa herramienta para ayudar a los profesionales en este proceso de decisión. En este artículo, se ha utilizado el método RSA para comprender la seguridad de un muro de contención anclado, --perteneciente al proyecto de las instalaciones portuarias de Nigg Bay (Escocia)-- utilizado distintos enfoques de diseño. En él se estudia, a través del índice de fiabilidad, la probabilidad de fallo de la estructura al cambiar las propiedades del suelo, la cohesión efectiva y el ángulo de fricción interno. El trabajo también estudia la influencia de las incertidumbres geométricas como la posición del anclaje, el nivel de excavación o el nivel freático. El índice de fiabilidad se ha calculado utilizando el Método de Confiabilidad de Primer Orden (FORM), que ha demostrado ser preciso y efectivo para este problema geotécnico. El artículo trata de llevar los métodos de diseño probabilístico a la práctica normal de diseño de ingeniería, utilizando para ello un ejemplo de trabajo simplificado.

Palabras clave: Análisis de fiabilidad; Incertidumbre de diseño; Método de diseño probabilístico; Diseño por enfoques; Índice de fiabilidad.

1. Introducción

El análisis estructural de fiabilidad (RSA por sus siglas en inglés) se ocupa principalmente de la probabilidad de que una estructura no falle. Por su parte, los factores de seguridad están pensados para evitar el fallo de esa estructura. La relación entre los dos conceptos es bien conocida y, de hecho, el método RSA se utiliza a menudo para justificar los coeficientes de seguridad de la normativa.

Sin embargo, para un ingeniero geotécnico, existe una preocupación previa que es la selección de los valores característicos de los parámetros del terreno. La correcta selección de los parámetros del suelo, especialmente aquellos relacionados con la rotura, como el ángulo de fricción interna y la cohesión, también está relacionada con la seguridad estructural. De hecho, una posición demasiado optimista en la caracterización del suelo podría llevar a anular el margen de seguridad estructural y viceversa.

La incertidumbre en torno a la selección de los valores característicos se puede notar por la forma en que los códigos y las normas aconsejan definirlos. Por ejemplo, el Eurocódigo 7 (CE-7) lo define como "una estimación prudente del valor que afecta a la aparición del estado límite".

El problema no es obvio, ya que los reconocimientos del terreno generalmente proporcionan una gran cantidad de valores para representar las propiedades del suelo, a menudo con una gran dispersión. La forma de pasar de los resultados de la investigación del suelo a los valores característicos no está definida explícitamente. Por lo tanto, parece que finalmente, la seguridad estructural depende de la experiencia del ingeniero geotécnico y su sentido común.

En este artículo se aplica el método RSA para comparar la probabilidad de fallo de una estructura particular calculada por varios enfoques de diseño en función de los valores característicos.

La estructura corresponde al nuevo muelle de atraque, situado dentro de dique seco en las instalaciones de Global Energy NIGG Limited en Escocia.

La estructura seleccionada es un muro de contención soportado por un nivel de anclaje. Se comprueban dos modos de fallo principales que definen la geometría del muro: (A) la fuerza a nivel del puntal, (B) el empotramiento del muro.

Se van a utilizar tres enfoques de diseño que están propuestos por el Eurocódigo 7 con los factores de seguridad definidos en el anexo general. Uno de estos enfoques es comparable con el del enfoque propuesto por la ROM 0.5/05.

Los valores de los parámetros del suelo se seleccionan considerando que se trata de funciones estadísticas con una distribución conocida. En el artículo se discuten los criterios para elegir los valores de medias y desviaciones.

También se discute el efecto de incertidumbres adicionales como la posición del anclaje, las excavaciones sobre-excavaciones no planificadas o la posición del nivel freático en el trasdós de la pantalla. Dado que no existe un factor de seguridad específico para estos parámetros, sus incertidumbres deben incluirse en el conjunto de factores de seguridad aplicados a las acciones y a los parámetros del suelo.

Este caso de estudio tiene como objetivo fomentar el uso de métodos de diseño probabilístico a problemas geotécnicos, como una forma de alcanzar una mejor comprensión de los métodos de Enfoque de Diseño (AD) propuestos por el EC-7, y procurar una mejor armonización entre los profesionales involucrados diariamente en el diseño de estructuras.



Ilustración 1. Muelle interior de Nigg Energy Park

2. Descripción del proyecto

Nigg bay es una instalación portuaria situada en la costa este de Escocia, dedicada a dar servicio a las instalaciones de generación de energía situadas en el Mar del Norte. Estas instalaciones están explotadas por la empresa Global Energy NIGG Limited.

Las instalaciones cuentan con un dique seco que en la actualidad únicamente dispone de un frente de atraque, que funciona cuando el dique está inundado. Con el fin de mejorar la capacidad de estas instalaciones, en el año 2022 salió un concurso de proyecto y obra para construir un nuevo muelle de atraque dentro del dique seco. Este muelle de atraque servirá para dar servicio a las operaciones de carga y descarga de equipos pesados en situación de dique inundado. Además, es capaz de soportar las cargas impuestas por el vaciado del dique seco.

El proyecto se encuentra en la actualidad en fase de desarrollo, por lo que se presenta a continuación es el proceso constructivo propuesto para este concurso. Sobre este diseño, se desarrolla el análisis llevado a cabo para valorar la seguridad de la solución propuesta.

Las fases constructivas propuestas para la construcción del nuevo muelle de traque se resumen de forma gráfica en la siguiente figura.

Valor característico de los parámetros geotécnicos en los métodos de fiabilidad. Aplicación al diseño del nuevo muelle en Nigg Bay-Escocia

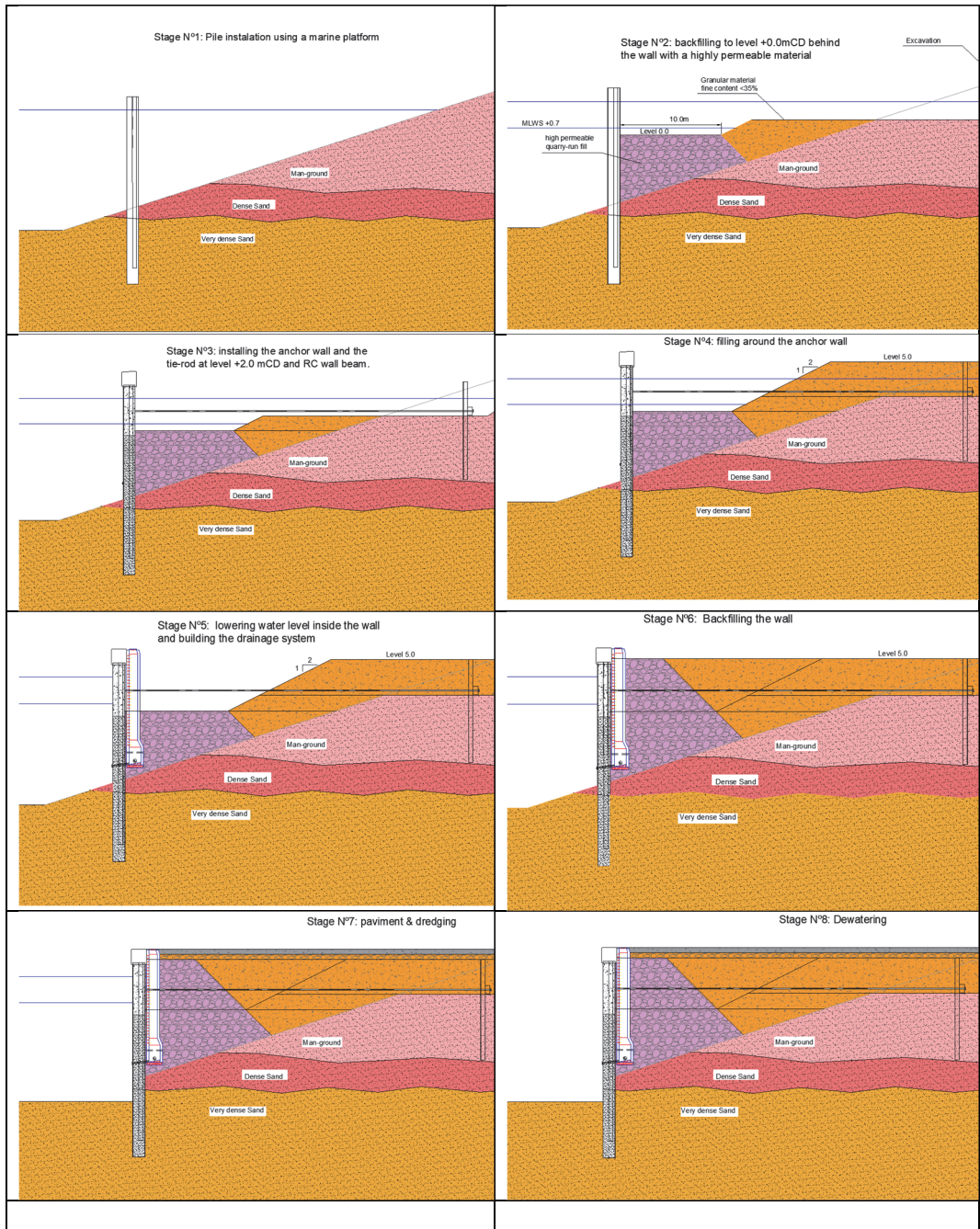


Ilustración 2. *Proceso constructivo propuesto para el nuevo muelle*

3. Enfoques de diseño del Eurocodigo 7 para pantalla ancladas

La Figura 3 muestra un esquema simplificado de lo que es una pantalla anclada con las principales magnitudes que actúan en el cálculo de su seguridad.

Se trata de un muro vertical apuntalado en el nivel H_{strut} que se excava hasta el nivel H_{exc} . El nivel del agua en el lado activo y pasivo está definido por las cargas hidráulicas (H_{act} y H_{pas}). El muro también soporta una carga uniforme considerada como una acción variable. En aras de la simplicidad, se utiliza un único conjunto de parámetros del terreno que representan los parámetros operativos que gobiernan los modos de fallo geotécnicos de la pantalla. Dado que se trata de un perfil predominantemente granular, el análisis se lleva a cabo en condiciones drenadas.

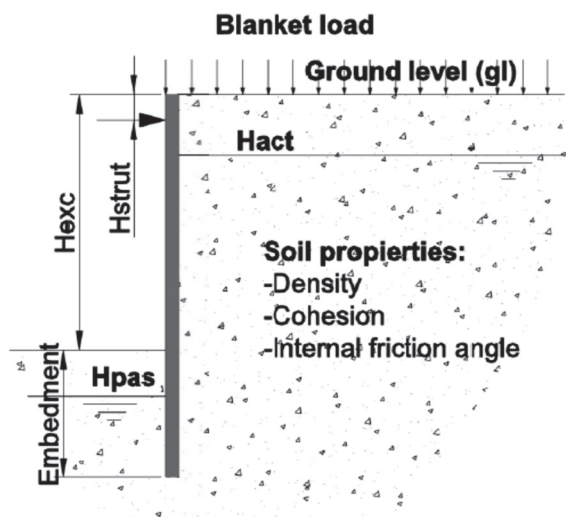


Ilustración 3. Esquema simplificado de una pantalla anclada

EC-7 define tres enfoques de diseño diferentes, el primero con dos combinaciones. Cada país ha elegido en su anexo nacional uno de ellos. Los métodos más comunes para el diseño de muros de contención apuntalados son los siguientes.

El primer enfoque es el denominado enfoque de diseño uno, combinación uno (DA-1 C1) y es similar a DA-2. Consisten en factorizar las acciones permanentes desfavorables por un coeficiente igual a 1,35 y las acciones variables desfavorables por 1,5. Para este enfoque, el empuje de tierras y del agua en el trasdós se consideran una acción permanente desfavorable. La

sobrecarga uniforme es una acción variable desfavorable. Con las acciones mayoradas se resuelve el equilibrio de momentos en el pie de la pantalla, lo cual proporciona directamente tanto la longitud de empotramiento como la reacción del anclaje, ambas ya mayoradas.

El segundo enfoque es una variación del primero (denominado en esta ponencia como DA-2*), y es el más similar al propuesto en la ROM 0.5/05. Consiste en multiplicar las acciones de las variables desfavorables por 1.11 (que es la relación entre coeficientes 1,5/1,35), resolver la ecuación de equilibrio para proporcionar tanto el empotramiento como la reacción de anclaje. Finalmente, se mayor la reacción del anclaje por 1,35 y el empotramiento se multiplica por un factor. ROM 0.5/05 recomienda un factor de 1.2.

El tercer enfoque es el denominado enfoque de diseño uno combinación 2 (DA-1 C2). Este puede considerarse similar a DA-3. Consiste en reducir los parámetros del terreno -ángulo de fricción interna y cohesión- con un factor constante igual a 1,25 y aumentar la carga variable desfavorable en un factor igual a 1,3.

Se supone que los tres enfoques de diseño son consistentes y proporcionan un riesgo de fallo similar para todas las geometrías y parámetros del suelo. Esta afirmación está lejos de ser cierta. Por lo tanto, el método RSA es necesario para comprenderlos correctamente.

4. Los valores característicos para los parámetros del terreno

El comportamiento del suelo tiene varias fuentes de incertidumbre que se pueden agrupar en dos grandes categorías. La primera fuente de incertidumbre son las propiedades físicas y químicas del propio suelo, que no son homogéneas en todo el espacio. La segunda fuente de incertidumbre es la inexactitud de los ensayos y pruebas que se utilizan para determinar las propiedades del suelo.

Las propiedades intrínsecas de un estrato aparentemente homogéneo se pueden representar con una función estadística, que puede ser constante dentro del perfil del suelo o puede seguir alguna tendencia como, por ejemplo, un aumento de la resistencia y la densidad con la profundidad. Es habitual proponer funciones estadísticas simples como distribución normal o distribución logarítmica-normal para representar la variación intrínseca de las propiedades del suelo. Estas funciones están bien definidas por un valor medio y de desviación estándar.

La investigación del terreno tiene como objetivo principal clasificar el perfil del suelo en estratos homogéneos y luego caracterizar cada nivel con unos parámetros representativos. Para el método RSA, estos parámetros ya no son valores únicos, sino funciones estadísticas en las que se espera una amplia gama de resultados singulares, cada uno de ellos con una probabilidad asociada.

La segunda fuente de incertidumbre proviene de los propios ensayos utilizados en la investigación. Existen ensayos muy sofisticados que tratan de medir con precisión la respuesta del suelo tal y como se encuentra en un estado inalterado (ensayo triaxial, ensayo edómetro...). Otros tratan de superar las alteraciones de muestreo operando sobre el perfil del suelo (presiómetros, investigación geofísica...). Existen otros ensayos que se basan en obtener un gran número de resultados para evaluar la homogeneidad y la resistencia del suelo (ensayo SPT, ensayo CPT...). Cada tipo de prueba tiene su propia precisión, que se refleja en la dispersión de valores que proporcionan.

El ingeniero geotécnico tiene que aplicar una gran cantidad de experiencia y sentido común para elegir entre los resultados de las pruebas aquellos que realmente representan el comportamiento del suelo, y descartar aquellos que están fuera de rango o afectados por el procedimiento de ensayo. También tienen que corregir los errores sistemáticos de los dispositivos basándose en la observación, la experiencia y la comparación de los resultados de diferentes fuentes. En última instancia, los ingenieros geotécnicos tienen que dar sentido a un gran número de datos solo para obtener unos pocos parámetros que se espera que representen el comportamiento del suelo.

Para el cálculo de la estructura, el ingeniero seleccionará un valor característico, que se define de diferentes maneras, según el código. En el Eurocódigo 7 se menciona que un valor característico es una "estimación cautelosa" de un valor representativo que no será inferior, en caso de que el modo de fallo requiera un valor mínimo. Para un análisis probabilístico, el Eurocódigo -7 menciona el valor significativo del 5% tomado de su distribución estadística. ROM 0.5/05 menciona el promedio menos dos veces la desviación estándar tomada de los resultados de los ensayos disponibles. El código C7604 sugiere un valor promedio representativo a lo largo de la posible superficie de fallo. Estos consejos parecen esconder algunas incertidumbres.

De esas definiciones deben señalarse varias cuestiones. (1) El valor característico representará el modo de fallo. No es un valor aislado tomado de un punto singular dentro del perfil del suelo. Se debe tener en cuenta la longitud de la superficie de fallo y, por lo tanto, la geometría de la pantalla.

(2) Las perturbaciones generadas por el muestreo, las pruebas “in situ” y las pruebas de laboratorio deben descartarse de los resultados disponibles, ya que no rigen el fallo de la estructura. (3) Los resultados de las pruebas ayudan a definir los valores característicos, pero sus distribuciones estadísticas no coinciden necesariamente con el valor representativo del modo de fallo. Si las pruebas son fiables y no tienen sesgos, una opción prudente puede ser seleccionar el valor promedio de la población como valor promedio representativo del modo de fallo.

Sin embargo, esta regla difícilmente se puede aplicar para definir la desviación estándar. En muchas situaciones prácticas, los resultados de las pruebas tienen una dispersión mayor de lo esperado para el valor representativo. Por lo tanto, la elección de esa dispersión puede conducir a un valor característico excesivamente conservador para el modo de fallo. En este contexto, tiene sentido proponer el uso de una dispersión conocida que provenga de experiencias previas y valores recomendados incluidos en los códigos.

La dispersión se define a menudo por la desviación típica o, más a menudo, por el coeficiente de variación "v", que se define mediante la expresión:

$$COV = v = \frac{\sigma}{\mu}$$

Donde "σ" es la desviación típica y "μ" es la media de una variable estadística.

Dependiendo de la cantidad de datos disponibles, se pueden utilizar varios métodos para estimar las desviaciones estándar de los parámetros geotécnicos. Duncan (2000) describe cuatro métodos que son aplicables a diversas situaciones. El código del modelo probabilístico JCRR incluye los valores publicados para ese coeficiente de variación. Una de las listas publicadas más completas de estos parámetros se encuentra en la Norma ROM 0.5/05, que se muestra en la siguiente tabla.

Table 2.14.1. Recommended Reference Units and Approximate Values for the Variation Coefficient of Geotechnical Parameters for Normally Homogeneous Ground

Parameter	Symbol	Recommended reference unit	Typical coefficient of variation
Unit weight	γ_d	kN/m ³	0.05
Moisture content	w	%	0.10
Angle of friction (tangent)	tg ϕ	Dimensionless	0.07
Cohesion	c	kPa	0.10
Undrained shear strength	c_u, s_u	kPa	0.15
Unconfined compressive strength, soils	q_u	MPa	0.15
Unconfined compressive strength, rocks	R_c	MPa	0.20
Tip resistance in static penetration tests	q_c	MPa	0.15
Limit pressure, pressuremeter tests	p_l	MPa	0.15
N-index (SPT)	N	Dimensionless	0.15
Elasticity modulus	E	MPa	0.30
Poisson's ratio	ν	Dimensionless	0.05
Preconsolidation pressure	p_c	MPa	0.15
Compression and swelling indices	C_c, C_s	Dimensionless	0.10
Consolidation coefficient	c_v	cm ² /s	0.50
Permeability coefficient (Darcy)	k	cm/s	*

Ilustración 4. Coeficientes de variación, tomados de ROM 0.5/05

A partir de un análisis exhaustivo de todas las fuentes de información disponibles, se espera que el ingeniero geotécnico sea capaz de definir para cada parámetro geotécnico una función estadística, que intervenga en el cálculo del modo de fallo.

Para el análisis realizado en este artículo, estas funciones son (a) la función de distribución normal o (b) la función de distribución log-normal, cuyas formas se muestran en la siguiente figura.

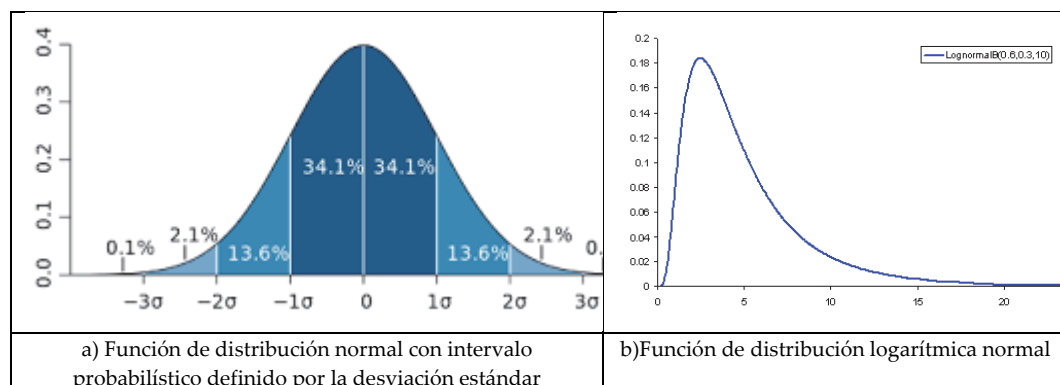


Ilustración 5. Distribuciones estadísticas usuales de parámetros geotécnicos

El valor de característico se selecciona de estas distribuciones. En este trabajo se utilizará el valor significativo del 5% a partir de una distribución de probabilidad normal o log-normal y un COV conocido. Se entiende que los factores de seguridad propuestos para las verificaciones del estado límite en el Eurocodigo -7 están referidos a esos niveles de confianza. Para respaldar este punto, también se presentan cálculos con valores medios (nivel de significación igual al 50%) y se compara el índice de fiabilidad resultante.

5. Metodología de estudio

El estudio va a cubrir una amplia gama de propiedades del suelo y geometrías de la estructura. Para cada una de ellas se calculará el índice de fiabilidad, β . El índice de fiabilidad está relacionado con la probabilidad de fallo. Para una estructura con una vida útil de 50 años y una importancia normal, se requiere usualmente que la probabilidad de fallo sea inferior a 10^{-4} . Esto significa que, para un conjunto de variables de entrada distribuidas normalmente, el índice de fiabilidad, β , será superior a 3,7.

El índice de fiabilidad varía para cada enfoque de diseño. A continuación, se describe la metodología para la obtención de estos índices:

En primer lugar, la reacción a nivel de anclaje F_{DAi} y la longitud de empotramiento L_{DAi} se calcula para cada enfoque de diseño, -- DA2, DA-1 C2 y DA2* --, resolviendo la ecuación:

$$\sum M_o - F_{DAi} \times L_{DAi} = 0$$

$$\sum E = F_{DAi}$$

Donde:

$\sum M_o$ es el momento en el pie de la pantalla de todas las presiones que actúan sobre ella, tanto en los lados activo como pasivo.

$\sum E$ es la fuerza resultante de todas las presiones que actúan sobre la pared.

L_{DAi} es la distancia entre el nivel del anclaje y el nivel del pie de la pantalla.

Se define la función de desempeño $g(u)$ como:

$$g(\phi, c, h_{act}, H_{exc}, H_{strut}) = \sum M_o(\phi, c, H_{act}, H_{exc}, H_{strut}) - F_{DAi} \times L_{DAi}$$

Donde ϕ (ángulo de fricción interna), c (cohesión efectiva), H_{act} (carga de agua en el lado activo), H_{exc} , (altura de excavación) y H_{strut} (nivel de anclaje) son las variables estáticas de entrada que representan las incertidumbres.

Para cada variable individual, considerándola como una variable estadística única en la función de desempeño, y para cada enfoque de diseño, se calcula el índice de fiabilidad (β) utilizando el Método de Fiabilidad de Primer Orden (FORM). Se observa que, para una sola variable, este método tiene una forma de entenderse intuitiva, que consiste en encontrar la probabilidad de la variable de entrada que produce fallo dentro de su distribución estadística.

En esta fase se estudia la relevancia del rango de valores que puede tomar la variable en el índice β . También se estudia la influencia del nivel significativo para definir los valores característicos (5% y 50% de fractil-, y también la sensibilidad a los valores de COV.

En una segunda fase, se realiza un cálculo completo considerando las cinco variables como estadísticas.

La densidad del suelo no ha sido elegida variable estadística de entrada, a pesar de estar vinculada a la acción de la presión de la tierra. La razón es que la densidad cambia en un rango muy pequeño de valores. Se ha confirmado en otros estudios de fiabilidad que la influencia de su variabilidad en el diseño de pantalla es poco relevante.

En las siguientes secciones se desarrolla cada uno de estos puntos.

6. Influencia del ángulo de fricción interna

La influencia del ángulo de fricción interna se estudia considerando únicamente esta variable como estadística. El resto de las variables son fijas. Estas toman los siguientes valores:

- Densidad aparente 18 KN/m³, Densidad saturada 20 KN/m³
- Cohesión 0,0 KN/m²
- Altura de excavación 10m
- Nivel del puntal bajo la cabeza de la pantalla 1.0m
- Altura de agua en el lado pasivo -10 bajo cabeza de pantalla
- Altura de agua en el lado activo -5.0 bajo cabeza de pantalla

El ángulo de fricción interna se considera como una variable estadística cuyos valores característicos varían de 28 a 40°. El valor característico se toma de una distribución logarítmica normal con un coeficiente de variación de 0,1 y un nivel de significación del 5%. El siguiente gráfico muestra el índice de fiabilidad calculado para los tres enfoques de diseño.

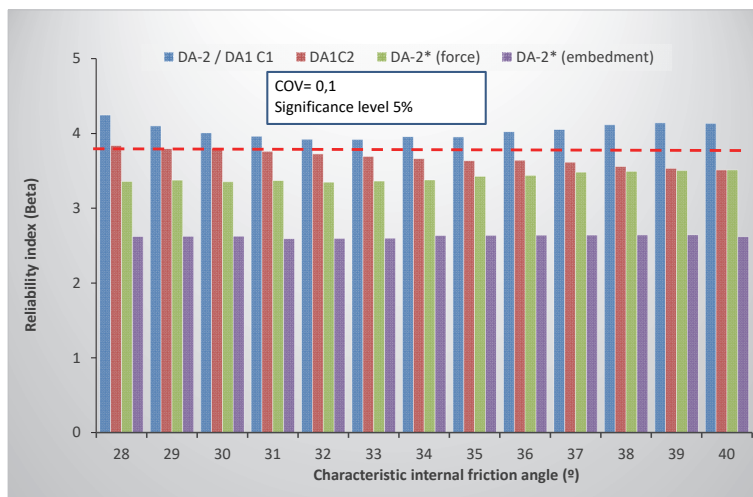


Figure 1. Reliability index for internal friction angle for base scenario

Cabe señalar que:

- El enfoque de diseño DA-2 es el único que supera el nivel de fiabilidad de 3,7, que es usualmente requerido.
- El enfoque de diseño DA1C2 solo alcanza este valor para el rango de ángulo inferior, pero está cerca de él para el resto.
- La reacción de anclaje en el enfoque DA2* está cerca del umbral requerido pero no lo alcanza. Lo que significa que el uso de este enfoque no tiene la misma fiabilidad que el DA-2.
- DA2* para el empotramiento utilizando el factor 1,2 está lejos de cumplir con el criterio de aceptación del riesgo.
- Los índices de fiabilidad cambian ligeramente con el ángulo de fricción interno. Para el DA-2, son más bajos para el rango intermedio, de 30 a 35°.

Para el siguiente cálculo, se eligen valores característicos con un nivel de significación del 50%, es decir, se elige el valor medio de la población---. Se observa que los índices de fiabilidad se reducen drásticamente. Este hallazgo viene a verificar que la elección del valor característico apropiado de una población dada es parte del factor de seguridad requerido para el método de diseño del Estado Límite.

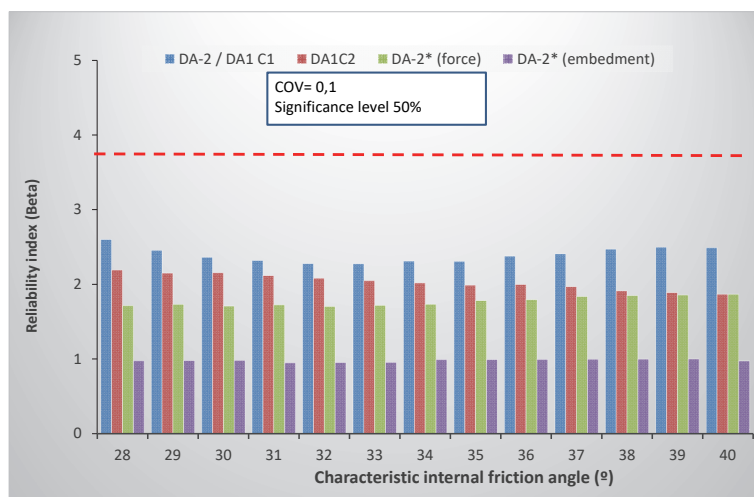


Figure 2. Reliability index changing significance level

En el siguiente cálculo, se modifica el coeficiente de variación. El COV es también es una fuente de incertidumbre. La siguiente figura muestra los resultados de aumentar el COV a 0,15. Cabe señalar que β se reduce significativamente a niveles inferiores a los que se requieren.

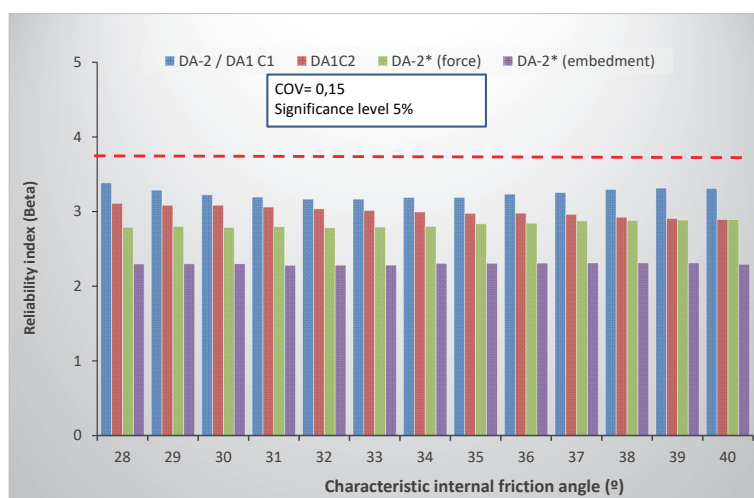


Figure 3. Reliability index changing COV

Con el fin de evaluar la sensibilidad frente a los cambios geométricos, se ha calculado el escenario base modificando únicamente la altura de excavación a 5,0 m. El siguiente gráfico muestra los resultados obtenidos. Se señalan dos puntos interesantes. En primer lugar, que el enfoque DA-2 se sitúa por debajo del índice de fiabilidad requerido. Esto no es extraño, ya que la reducción de altura conlleva una disminución en la relación entre las acciones estabilizadoras y desestabilizadoras y, por lo tanto, una reducción de la influencia de los factores de seguridad de la carga.

El segundo punto es que DA1 C2 casi no se ve afectado por el cambio de geometría. Este resultado se puede entender fácilmente si se considera que el factor de seguridad se aplica a los parámetros del suelo. Si la carga variable fuera nula, el problema de fiabilidad podría resolverse en la distribución estadística anterior sin resolver la ecuación de estabilidad de la pantalla.

Se puede observar que el índice de fiabilidad apenas varía, tampoco, para el enfoque DA-2*. Los factores de seguridad apenas cambian la relación entre la acción estabilizadora y la desestabilizadora.

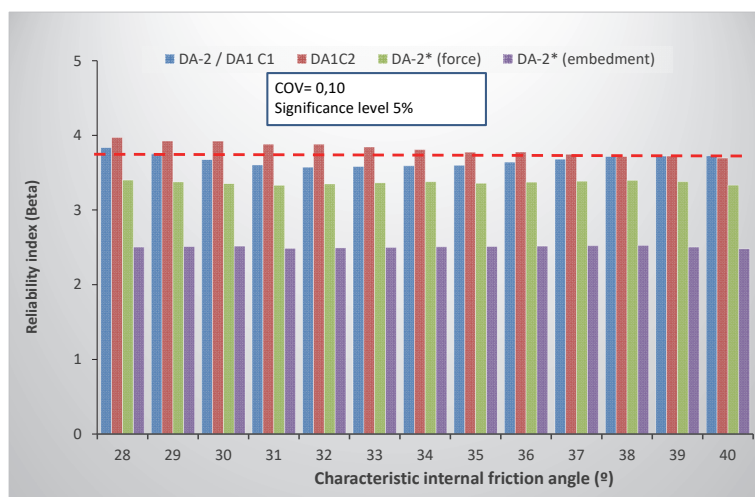


Figure 4. Reliability index changing excavation height.

El aumento de la carga de agua en el lado activo tiene el efecto opuesto al de la reducción de la excavación. En este caso, las acciones desestabilizadoras aumentan más que las estabilizadoras, por lo que el factor amplificador de las acciones incluidas en el enfoque DA-2 tiene un impacto relevante en el índice de fiabilidad final. El efecto apenas se aprecia en los otros dos enfoques.

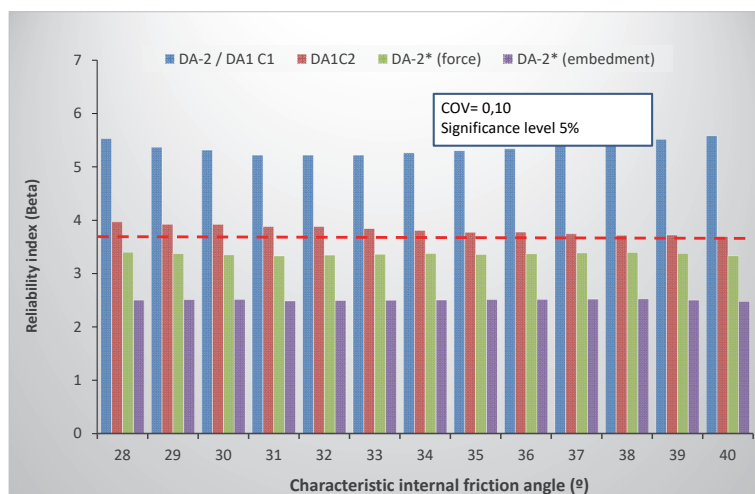


Figure 5. Reliability index changing water head at active side

El impacto de la cohesión se muestra en la siguiente figura. Los cálculos se han realizado con una cohesión efectiva de 10KN/m². Cabe señalar que la cohesión tiene un impacto relevante en el enfoque DA-1 C2. Los otros dos enfoques son casi invariantes a los cambios de cohesión.

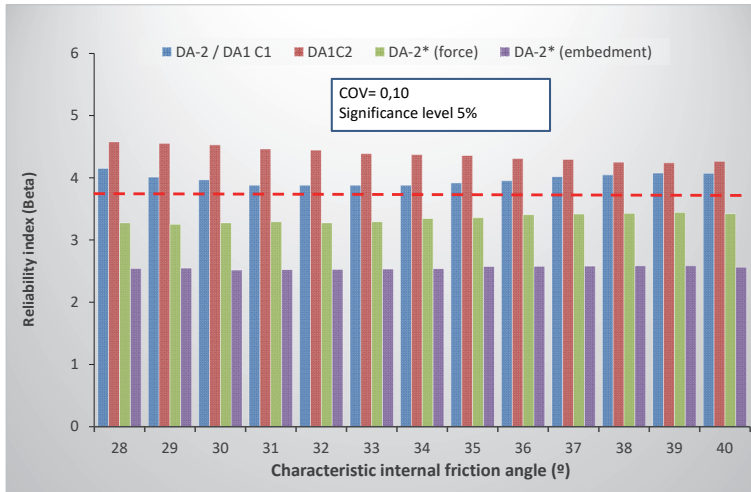


Figure 6. Reliability index changing effective cohesion.

A modo de resumen, el siguiente gráfico muestra el efecto de modificar cada una de las variables para un ángulo de fricción interno característico de 30°.

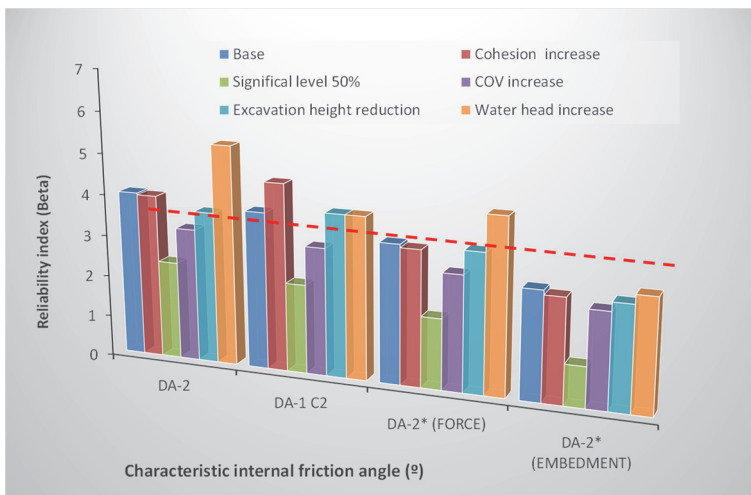


Figure 7. Reliability index for Internal friction angle = 30°

Cabe señalar que:

- El enfoque DA-2 es bastante sensible a los cambios en la geometría: altura de excavación y nivel del agua.
- DA-1 C2 es sensible a los cambios en la cohesión -propiedades del suelo- pero no en la geometría.

- DA2* es sensible a los cambios geométricos, pero en menor medida que DA-2.
- Todos los enfoques aumentan el riesgo de fallo si se eligen valores característicos con un nivel significativo cercano al 50%, y también si aumenta el coeficiente de varianza.
- DA2* produce una fuerza en el anclaje que es cercana pero más baja que un índice de fiabilidad de 3.7 que a menudo se requiere.
- El empotramiento DA2* basado en el aumento del 20% de la longitud enterrada de la pantalla está lejos de alcanzar un criterio aceptable de probabilidad de fallo.

7. La influencia de la cohesión

Es bien sabido que el diseño de muros de contención es muy sensible al valor de la cohesión. Además, es una propiedad del suelo difícil de determinar ya que se encuentra muy afectada por la alteración del muestreo. Por lo tanto, siempre se recomienda una selección cautelosa de este parámetro. Adicionalmente, el enfoque de diseño puede modificar la importancia de una selección correcta. Este aspecto se desarrolla en este apartado.

Como se ha hecho anteriormente, se elige un escenario base para evaluar la influencia de la cohesión en el diseño. La cohesión efectiva es una variable estadística con una distribución logarítmica normal. Las variables deterministas toman los siguientes valores:

- Densidad aparente 18 KN/m^3 , Densidad saturada 20 KN/m^3 .
- Ángulo de fricción interno 30°
- Altura de excavación 10m
- Nivel del puntal 1.0m bajo la cabeza de pantalla.
- Altura de agua en el lado pasivo -10 bajo la cabeza de pantalla.
- Altura de agua en el lado activo -5.0 bajo la cabeza de pantalla.

Se utiliza un rango de variación de la cohesión efectiva de 5 a 50 KN/m^2 . Para el escenario base, se adopta un coeficiente de variación (COV) igual a 0,2 y un nivel de significación igual al 5%.

A partir de este escenario base, se elabora el índice de fiabilidad. La siguiente figura muestra estos resultados. Cabe señalar que:

- Para valores de cohesión efectiva inferiores a 10 KN/m^2 , los índices β son bastante grandes. Este resultado puede explicarse por la poca influencia que tiene la cohesión efectiva en la estabilidad de la pared. Cuando la cohesión efectiva tiende a cero, el índice de fiabilidad tiende a infinito.
- Para una cohesión efectiva superior a 15 KN/m^2 , los resultados comienzan a converger hacia un valor β constante.
- El comportamiento es bastante similar al observado para el ángulo de fricción interno. Los enfoques DA-2 y DA-1 C2 están por encima del índice a menudo requerido, mientras que el enfoque DA-2* está por debajo, especialmente para el coeficiente de longitud de pantalla.

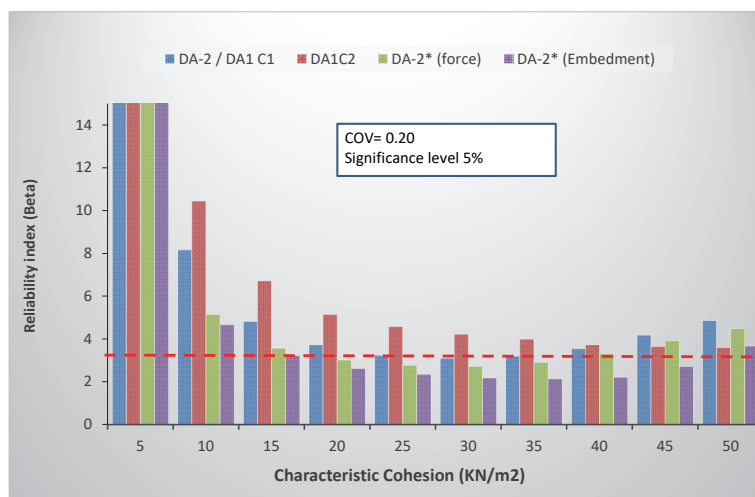


Figure 8. Reliability index base scenario for effective cohesion as a statistic variable

Al igual que se hizo para el ángulo de fricción interno, se ha modificado cada una de las variables para evaluar la respuesta del índice de fiabilidad. En el gráfico siguiente se muestran estos resultados para una cohesión efectiva de 20 KN/m². Se observan tendencias similares a las observadas anteriormente.

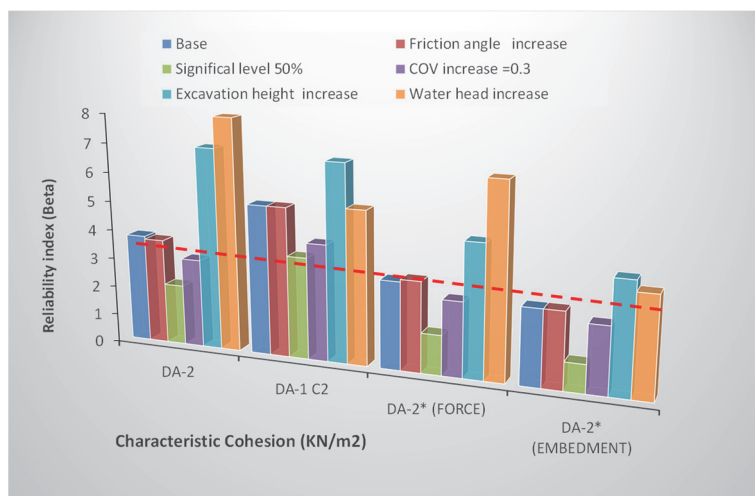


Figure 9. Reliability index for effective cohesion = 20 kN/m²

Cabe señalar que:

- Los cambios en el ángulo de fricción interno tienen poca influencia en el índice β . A esta conclusión se llega con un cambio de 30 a 35°, donde las leyes de actuación casi no se ven afectadas.
- La elección del valor característico para un nivel de significación del 50%, es decir, la elección del valor medio esperado reduce mucho el índice β . Una vez más, se demuestra

que el método de los factores de seguridad parciales se basa en la selección correcta del valor característico para alcanzar una probabilidad de fallo adecuada.

- El coeficiente de variación también se asocia a los factores de seguridad parcial y a la probabilidad de fallo. Un COV igual a 0,3 reduce significativamente el índice β .
- El aumento de las acciones ya sea por una excavación más alta o el aumento de la altura del nivel del agua en el lado activo, aparentemente hace que los enfoques de diseño sean más conservadores. Sin embargo, esta conclusión requiere cierta reflexión. Cuando la cohesión efectiva es pequeña en comparación con las acciones, su valor se vuelve irrelevante para el diseño de muros, y entonces su índice β tiende a infinito. Eso es lo que está ocurriendo en la figura mostrada. Por otra parte, una cohesión alta relativa a las acciones hace que el muro sea innecesario, y entonces el índice β tiende a cero. Por lo tanto, el análisis de fiabilidad de la cohesión efectiva solo tiene sentido para un rango de valores que dependen de la geometría del problema.

Las conclusiones de esta sección también se pueden aplicar para el cálculo de pantalla cuando su diseño está gobernado por la resistencia al corte sin drenaje. En este caso, debe tenerse en cuenta que esta propiedad del suelo se ve aún más afectada por la alteración de la muestra. Por otro lado, el diseño de la pantalla depende en gran medida de este parámetro.

8.- La influencia de la incertidumbre geométrica

La incertidumbre geométrica está relacionada con la definición de cotas que interviene en el diseño. Para este ejemplo, se consideran tres fuentes diferentes de incertidumbre geométrica: (A) posición del nivel del anclaje, (B) nivel de excavación y (C) nivel del agua en el trasdós.

Hay que entender que estas incertidumbres están presentes, aunque se tomen precauciones para mitigarlas. Por ejemplo, algunos códigos recomiendan tener en cuenta una excavación no planificada. Si esta acción se incluye en el diseño, se trata de un caso de carga adicional considerado con sus factores de seguridad adecuados. Sin embargo, el nivel máximo de excavación incluida la excavación no planificada puede aún ser una variable aleatoria, que se define con una función de distribución estadística cuya media es el nivel de excavación definido y la desviación estándar dependería de la precisión del procedimiento de excavación.

Lo mismo puede decirse del nivel de anclaje. Se espera que el constructor construya el anclaje en la posición definida en los planos. Sin embargo, aún surgen incertidumbres dependiendo de la precisión del método de construcción.

El nivel freático cambia con el tiempo. Sin embargo, una investigación bien realizada podría definir con cierta precisión la posición más desfavorable para el diseño. Una vez elegido ese nivel, todavía existe la incertidumbre de que pueda ser superado en cualquier momento.

Todas estas incertidumbres geométricas se pueden describir como variables estadísticas con una función de distribución normal, con promedio igual a cero, --eso significa que el nivel elegido es el más probable y luego el valor característico tiene un nivel de significancia del 50%-- y una desviación estándar que depende de la variación esperada sobre la posición definida. La desviación estándar se definiría en función de los procedimientos de construcción y el nivel de control de calidad.

Los enfoques de diseño no prevén ningún factor de seguridad para las incertidumbres geométricas, por lo que tienen que ser lo suficientemente pequeñas como para ser irrelevantes, o bien, los otros factores de seguridad incluyen algún margen para tenerlas en cuenta.

Si este fuera el caso, sería interesante conocer el índice de fiabilidad asociado a esta variable aleatoria. Para este modelo, la única variable estadística es la posición de anclaje. Las variables deterministas toman los siguientes valores:

- Densidad aparente 18 KN/m³, Densidad saturada 20 KN/m³.
- Ángulo de fricción interno 30°
- Cohesión 0
- Altura de excavación 10m
- Altura de agua en el lado pasivo -10.0 por debajo de la cabeza de pantalla.
- Altura de agua en el lado activo -5.0 por debajo de la cabeza de pantalla.

La posición del puntal se encuentra en el nivel -1.0 por debajo de la cabeza de la pantalla. Pero es una variable estadística con un promedio sobre esa posición igual a cero y una desviación estándar igual a 0.3m, lo que significa que es poco probable que el nivel de anclaje pueda estar fuera del rango (-0.1m, -1.9m) bajo la cabeza de la pantalla.

El resto de las variables se cambian una por una para mostrar la influencia de estas en el escenario base. En la siguiente figura se muestran los índicesβ calculados.

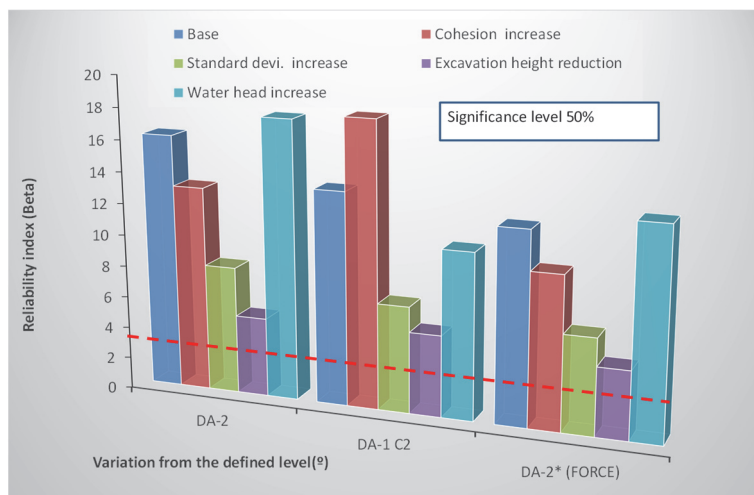


Figure 10. Reliability index for geometry uncertainty

Cabe señalar que:

- El escenario base proporciona índices de fiabilidad que están muy por encima de los solicitados, para los tres enfoques. Por lo tanto, parece que para la geometría base una desviación estándar de 0,3 es casi irrelevante.
- Un cambio en la cohesión efectiva de 0,0 a 20KN/m² tiene un efecto notable. Sin embargo, el índice de fiabilidad sigue siendo bastante alto, por lo que la incertidumbre geométrica aún no es relevante.

- Aumentar la desviación estándar de 0,3 a 0,6 tiene un efecto notable. Eso significa que el rango para la posición de anclaje se convirtió en (+0.8, -2.8). Este cambio es relevante para el diseño ya que aumenta el riesgo de fallo. El hecho de que el índice β sea aún más alto de lo requerido no debe olvidar el hecho de que esta incertidumbre debe combinarse con las acciones y los parámetros del suelo, que son los que soportan los factores de seguridad y sumarán incertidumbres adicionales.
- La reducción de la altura de excavación en 5,0 m disminuye manifiestamente el índice de fiabilidad. Este resultado viene a mostrar que las estructuras más grandes permiten más imprecisiones geométricas que las estructuras más pequeñas. La influencia de una desviación estándar de 0,3 m en la posición del anclaje consume casi todos los factores de seguridad previstos para otras variables.
- El aumento del nivel del agua subterránea en el lado activo aumenta el tamaño del muro de contención y, por lo tanto, la estructura es más tolerante a la inexactitud de la construcción.

Otras incertidumbres geométricas tendrían el mismo tratamiento que la posición de anclaje. Sin embargo, el principal interés ahora es integrarlos con el resto de las incertidumbres del modelo de entrada.

9. Un modelo global incluyendo todas las incertidumbres

Después de la revisión previa del factor principal que interviene individualmente en el cálculo del índice de fiabilidad, podría ser posible integrar todas las incertidumbres en un índice único. Para ello, la función de desempeño tiene que ser resuelta para todas las variables estadísticas al mismo tiempo.

El escenario base adoptado es el siguiente:

- Densidad aparente 18 KN/m³, Densidad saturada 20 KN/m³.
- Ángulo de fricción interno: variable estadística con media 30° y COV 0,1
- Cohesión: variable estadística con valor inicial igual a 0 y COV 0,3
- Altura de excavación: variable estadística con valor medio inicial de 10 m y desviación estándar de 0,3 m
- Altura de agua en el lado pasivo -10 por debajo de la cabeza de pantalla.
- Altura de agua en el lado activo: variable estadística con valor medio inicial de -5,0 por debajo de la cabeza de pantalla y desviación estándar de 0,3.
- Nivel de anclaje: variable estadística con valor medio inicial de -1,0 por debajo de la cabeza de pantalla. y desviación estándar de 0,3.

A continuación, se muestra el gráfico resumen con los resultados obtenidos.

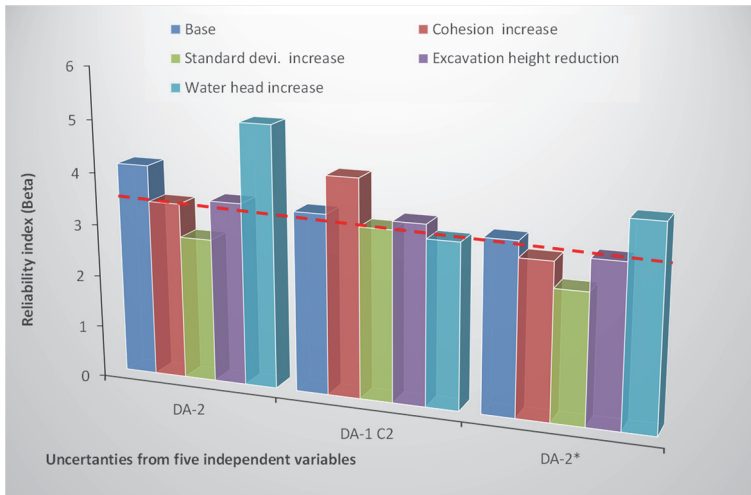


Figure 11. Reliability index for five independent statistic variables

Cabe señalar que:

- Para el escenario base, el índice de fiabilidad es casi el mismo que el calculado para el análisis único de un ángulo de fricción interno igual a 30° . Esto se debe al hecho de que la cohesión media es cero, por lo que no interviene en el cálculo de la fiabilidad, y las otras tres incertidumbres geométricas producen un elevado índice β . Por lo tanto, el resultado es consistente con el hecho de que la principal incertidumbre proviene del ángulo de fricción interno.
- Para el enfoque DA-2*, ya no es posible separar el factor de seguridad aplicado a la fuerza del anclaje y el aplicado al empotramiento. En consecuencia, el índice de fiabilidad es un valor intermedio entre los dos individuales.
- Si se incluye la incertidumbre de cohesión para un valor medio de 20 KN/m^2 , se puede observar que la tendencia es la misma que en el caso en que la cohesión era la única variable. Significa que, al final, el índice de fiabilidad está determinado por una variable. En este caso, la cohesión es más significativa para el riesgo de fallo que el ángulo de fricción interno. Las cuestiones de geometría siguen siendo irrelevantes.
- La desviación estándar de las variables geométricas y el COV de los parámetros del suelo se convierten en un problema cuando aumentan significativamente. Las variaciones imprevistas de las variables de entrada de diseño parecen ser tan relevantes para el riesgo de fallo como la selección precisa de los valores característicos.
- La reducción de la altura de la excavación o el aumento del nivel freático tienen un efecto similar al del análisis de una sola variable. DA-2 es sensible a los cambios en las acciones, pero DA-1 C2 y DA-2* son menos sensibles. En cualquier caso, cuando la acción desestabilizadora aumenta el DA-2* produce un mayor índice de fiabilidad y viceversa es cierto para el DA-1 C2.

El análisis previo considera todas las variables independientes. Este no es realmente el caso. La cohesión y el ángulo de fricción interno no son variables independientes. Sin embargo, son independientes de la variable geométrica, que depende de la precisión de la construcción. Sin embargo, se puede argumentar que las variables de geometría no son totalmente independientes

entre ellas, ya que el control de calidad que se aplica a una obra trata de mantener procedimientos estándar homogéneos.

El análisis de fiabilidad permite introducir la dependencia entre variables. Esta sofisticación adicional ayudaría a homogeneizar el índice de fiabilidad. En aras de la concisión, no se ha aplicado en este estudio.

10. Diseño de pantallas basado en modelos numéricos

En la práctica, el diseño de muros de contención tiene que poder incluir perfiles de suelo con varias capas, geometrías complejas y etapas de construcción. Por lo tanto, el modelo simplificado basado en el equilibrio de momento presentado en este artículo no es habitualmente utilizado.

Los modelos más utilizados se basan en el software de elementos finitos (FE) o en modelos de muelles horizontales que definen la presión de la tierra en función de la deformación. En estas situaciones, puesto que la deformación no es inicialmente conocida, las acciones favorables y desfavorables no están definidas. Por lo tanto, los factores de seguridad no se pueden aplicar a las acciones. En consecuencia, el enfoque DA-2 no es una opción disponible.

Los únicos métodos posibles son el DA-1 C2 y DA2*. Por ello, es relevante subrayar los puntos débiles que se han destacado anteriormente para ellos. Los cuales son básicamente:

- DA1 C2 es sensible a los valores de las propiedades del suelo, pero es casi invariable a los cambios de geometría siempre y cuando las cargas variables sean una pequeña proporción de las cargas permanentes.
- La fiabilidad de DA-2* es casi independiente de las propiedades del suelo y la geometría de la pantalla, siempre y cuando las cargas variables sean relativamente pequeñas. Ahora bien, los coeficientes de mayoración que se utilizan para fijar el empotramiento de la pantalla, requieren una revisión cuidadosa.

Por lo tanto, teniendo en cuenta esta consideración, tiene sentido el enfoque de diseño adoptado por algunos países, --como el Reino Unido-- donde el muro se define por los dos enfoques sea cual sea el más exigente.

11. Discusión

En este trabajo se ha mostrado que el valor característico de una propiedad del suelo es un valor representativo del mínimo que gobierna el fallo del estado límite. El nivel de significación del 5% está en línea con los factores de seguridad propuestos en los enfoques de diseño de la EC-7.

Sin embargo, la cuestión está lejos de estar cerrada, porque el valor característico debe ser representativo del valor mínimo a lo largo de la superficie de fallo, que no es lo mismo que el valor mínimo en una población de ensayos. El hecho de que el valor mínimo tenga que ser representativo de toda la superficie de fallo permite una especie de valor promedio a lo largo de la superficie.

Por otro lado, se debe descartar la alteración introducida por la toma de muestra, ya que no es representativa del fallo estructural. Eso significa que se espera que el ingeniero tenga experiencia suficiente en procedimientos de investigación de suelos y pruebas de laboratorio para saber descartar esta dispersión del procedimiento de ensayo. Además, también se presume la comprensión de las singularidades del lugar donde se lleva a cabo la investigación. Por lo tanto, se requiere que el ingeniero aplique una gran cantidad de sentido común para interpretar correctamente la información recibida.

En ese punto, el análisis de fiabilidad (RSA) viene a ayudar al ingeniero. El RSA permite comprender el significado de los factores de seguridad y calibrarlos.

Los códigos técnicos y las normas han evolucionado mucho en los últimos 20 años. Tratan de armonizar el criterio de diseño con otros países. Para los países europeos, es una forma de facilitar la unión de libre mercado, pero esta empresa ha puesto de manifiesto las incoherencias a las que estaban acostumbrados. La armonización es, con el tiempo, una forma de reflexionar sobre tus hábitos de diseño. La RSA es, en última instancia, la forma más sensata de llegar a un acuerdo decente. También permite diferenciar entre prácticas antiguas o prácticas alternativas.

Pero la RSA no se detiene en el método de verificación de diseño, sino que también aporta una visión sobre el control de calidad durante la construcción. Estas actividades suelen generar una gran cantidad de datos, cuya interpretación solo es posible a través del análisis estadístico y una referencia a la probabilidad de fallo.

Este artículo se enmarca en un esfuerzo más general para llevar los métodos de diseño probabilístico a la práctica común en ingeniería civil. Es en este sentido un enfoque didáctico que trata de mostrar cómo ponerlos en práctica.

Sistema de monitorización de la calidad del aire y plataforma ambiental inteligente de la APB

Jorge Martín Jiménez^a, Edurne Ibarrola-Ulzurrun^b y José Manuel Vellón Graña^c

^aAutoridad Portuaria de Baleares, , jmartin@portsdebalears.com; ^bKunak Technologies SL, , eibarrola@kunak.es; ^cSuez Smart Environmental Solutions Spain, SL, , josemanuel.vellon@suez.com.

How to cite: Martín Jiménez, J.; Ibarrola-Ulzurrun, E. & Vellón Graña, J. M. (2024). Sistema de monitorización de la calidad del aire y plataforma ambiental inteligente de la APB. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

1. Introducción

La Autoridad Portuaria de Baleares (APB) trabaja desde 2016 en determinar el nivel de calidad del aire en sus puertos y el grado en que le afecta la operativa portuaria con el fin de introducir las mejoras necesarias. El despliegue de una red de medición basada en sensores y la integración de la información generada en una plataforma inteligente, permite monitorizar la calidad del aire en los puertos de la APB, facilitando la detección de puntos críticos, sus causas y la propuesta de acciones más objetivas y específicas para cada situación.

2. Red de vigilancia de la calidad del aire

La red de vigilancia de la APB consta de 25 puntos de monitorización de la calidad del aire repartidos en sus 5 puertos (Palma, Ibiza, Mahón, Alcúdia y La Savina) mediante dispositivos KUNAK AIR PRO, que incluyen sensores de SO₂, NO, NO₂, CO, O₃, partículas, NMVOC, ruido y parámetros meteorológicos. La APB dispone también de un sistema de medición móvil Kunak, equipado con GPS, que permite realizar mediciones de contaminantes in situ durante cualquier evento de interés. La información recogida por los puntos de medición se publica en tiempo real en la web de la APB.

Los dispositivos utilizados usan el sistema de cartuchos Plug&Play patentado, que permite controlar las medidas durante el ciclo de vida de cada sensor y solucionan muchos de los problemas conocidos de la tecnología de sensores, como la variabilidad, corrigen los efectos de las condiciones ambientales, ofrecen mayor precisión en el dato, etc., todo ello sin necesidad de desinstalar el equipo, ni enviarlo a fábrica para su calibración o mantenimiento.

La red de calidad del aire de la APB fue recibió el “Premio a la mejor red de monitorización de la calidad del aire” en AQE 2022 (Reino Unido), uno de los eventos mundiales más importantes sobre calidad del aire y emisiones industriales. A su vez, los dispositivos Kunak han sido galardonados por diferentes organismos independientes, tales como el Airlab Challenge (Francia), en el que han recibido el “Premio al equipo multi-contaminante más preciso” en las dos últimas ediciones (2021 y 2023).



Fig. 1 Red de calidad del aire de la APB (izquierda). Detalle de la red de calidad del aire del Puerto de Palma de Mallorca (centro). Estación de monitoreo (derecha)

3. Plataforma ambiental inteligente (Smart Port)

La plataforma ambiental inteligente integra, entre otras, la vertical de calidad del aire, la cual centraliza en tiempo real la información generada por las estaciones de seguimiento, facilita la gestión y análisis de datos y alertas, la consulta del histórico, etc., y permite el estudio de los episodios de contaminación, pudiendo determinar, en base a modelos de dispersión y retrotrayectorias, los posibles responsables de cualquier evento de contaminación. A su vez, la plataforma permite realizar simulaciones bajo demanda de escenarios de atraque para la toma de decisiones en base al estudio de la influencia prevista en la calidad del aire.

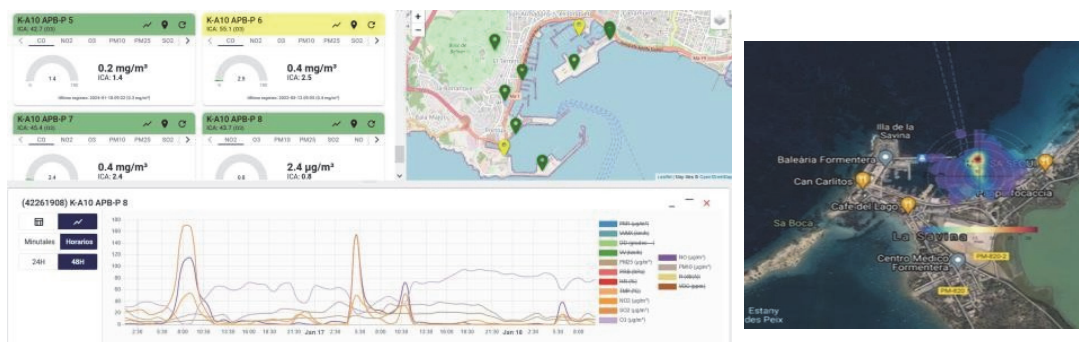


Fig. 2 Panel de la vertical de calidad del aire (izquierda) y gráfica polar de SO_2 (derecha)

4. Conclusión

La red de monitorización de la calidad del aire de la APB, diseñada acorde con las características del entorno portuario, y la plataforma ambiental inteligente, permiten evaluar el impacto de la actividad portuaria en la calidad del aire de los puertos de la APB y su entorno, proporcionando un sistema de alerta temprana y pronóstico orientado a la toma de decisiones que permite identificar y prever problemas de calidad del aire, su análisis y la exploración de alternativas en la gestión de la actividad portuaria para reducir su impacto.

Influencia del cambio climático en el oleaje de diseño. Aplicación a proyectos de ingeniería costera

Climate change influence on design wave. Coastal engineering projects implementation

Marta Velasco Carrau^a, Joaquín M. Garrido Checa^a, Miguel Figueres Moreno^a,
Ángela Pérez Bardal^a

^aIngeomar (IGM): martavelasco@ingeomar.es, jgarrido@ingeomar.es, mfigueres@ingeomar.es, aperez@ingeomar.es.

How to cite: Velasco Carrau, M.; Garrido Checa, J.; Figueres Moreno, M. & Pérez Bardal, Á. (2024). Influencia del cambio climático en el oleaje de diseño. Aplicación a proyectos de ingeniería costera. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

The recent increase in maritime storms, which are causing severe damages along the Valencian coast, raises the question of whether there is a change in the maritime climate, what is its magnitude, since when it is occurring, and its involvement in the design parameters of coastal engineering works, in order to guarantee its reliability and resilience. To this end, the trends over time of several wave statistical (from Puertos del Estado's SIMAR wave timeseries) have been analysed in two coastal zones of Valencia as part of its restoration studies, taking into account different time periods, more and more recent. As a result, an increase in frequency ($< T_R$) and intensity ($> H_s$ and p_f) of the last 20 years sea storms has been identified, inducing the necessity of overhaul the classical method used to select the design wave considering the whole series, commonly applied in projects of maritime works.

Keywords: climate change, extreme events, maritime storm, coastal engineering, design wave.

Resumen

El aumento en los temporales marítimos observado en los últimos años, que produce graves daños en el litoral valenciano, lleva a cuestionarse si se ha producido un cambio en el comportamiento del clima, cuál es su magnitud, desde cuándo se produce y qué implicaciones tiene en los parámetros de diseño de actuaciones de ingeniería costera, con el fin último de garantizar su fiabilidad y resiliencia. Para ello, se analizan las tendencias experimentadas por diferentes parámetros estadísticos del oleaje a lo largo del tiempo en dos zonas de la costa valenciana con objeto de su regeneración, a partir de la compartimentación de las series de oleaje SIMAR (Puertos del Estado) en ventanas de tiempo cada vez más recientes. Se identifica así un aumento en la frecuencia ($< T_R$) e intensidad ($> H_s$ y p_f) de los oleajes en los últimos 20 años,

que hace replantearse el actual enfoque del diseño de las obras marítimas en lo referente a la selección del estado de mar de cálculo.

Palabras clave: cambio climático, eventos extremos, temporal marítimo, ingeniería costera, oleaje de diseño.

1. Introducción

En los últimos tiempos se viene observando un aumento en los temporales marítimos que ocasionan graves daños en las costas del litoral valenciano, como es el caso del temporal Gloria, ocurrido en enero de 2020, que destaca por presentar la máxima altura de ola del registro histórico de oleaje en la zona, 9 m en el pico del temporal registrado por la boya exterior de Valencia (REDEXT 2630, Puertos del Estado).

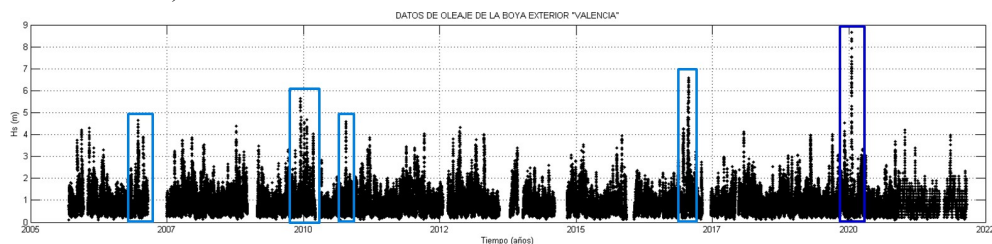


Fig. 1. Serie de altura de ola significativa de la Boya Exterior de Valencia de Puertos del Estado.

Estos daños se ponen de manifiesto en la erosión de playas, dunas y acantilados, y en el deterioro o incluso fallo estructural de espigones, paseos marítimos, accesos al mar, etc. Algunos de los cuales, ocasionados por Gloria en la provincia de Alicante, se muestran a continuación.



Fig. 2. Apertura de grietas y socavación del pie del acantilado de Cala Piteras (Torrevieja) como consecuencia del temporal Gloria.



Fig. 3. Fotografías de la plataforma de acceso a Cala Moraig (Benitachell): antes (izq.), durante (centro) y una vez transcurrido (dcha.) el temporal Gloria.

Se tienen evidencias científicas de que el calentamiento global va acompañado de cambios en la intensidad, duración, frecuencia y extensión de los extremos climáticos (IPCC, 2007). Según el Informe Especial “El océano y la criosfera en un clima cambiante” del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (SROCC; IPCC, 2019), el nivel medio del mar a escala mundial está aumentando, y la aceleración observada en los últimos decenios obedece al ritmo cada vez más rápido de la pérdida de hielo y a la expansión térmica del océano producidas por el calentamiento global. Entre los cambios físicos observados por el IPCC, como parte de este 6º periodo de evaluación (AR6), se hallan: los aumentos de los vientos y las precipitaciones de los ciclones tropicales, así como los incrementos de las olas extremas, que, combinados con el aumento del nivel del mar relativo, agravan los fenómenos relacionados con el nivel del mar extremo y los peligros costeros.

Estos eventos extremos condicionan el diseño de las obras marítimas en general y, en concreto, el de playas y sistemas dunares, pues han de ser capaces de resistirlos durante su vida útil, por lo que tener correctamente caracterizado el régimen extremal del oleaje es fundamental para garantizar de forma realista la fiabilidad de las obras costeras.

Así, con objeto de garantizar dicha fiabilidad en el proceso de diseño, el presente estudio busca identificar este cambio de tendencia en el comportamiento de los temporales marítimos, lo que puede dar una explicación a los daños producidos en la costa en los últimos años y ayudar a prevenir sus impactos.

2. Objetivos

El estudio desarrollado busca dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- ¿Existe realmente un cambio de comportamiento en el clima marítimo?
- ¿Desde cuándo se produce?
- ¿Cuál es su magnitud?
- ¿Qué implicaciones tiene en los parámetros de diseño de actuaciones de ingeniería costera?

Con el fin último de garantizar la fiabilidad de las obras marítimas actuales y futuras, aumentando su resiliencia.

3. Desarrollo de la innovación

3.1. Casos de estudio

El trabajo realizado se ha centrado en analizar las tendencias experimentadas por diferentes parámetros estadísticos del oleaje a lo largo del tiempo en dos zonas de la costa valenciana, la playa de Les Deveses en Denia (Alicante) y la de La Torre en Almazora (Castellón), como parte de los siguientes trabajos acometidos para su regeneración:

- “Evaluación de la erosión de dunas y diseño de nuevos cordones dunares en la costa de Denia (Alicante)” IGM, 2020. Servicio Provincial de Costas de Alicante.
- “Proyecto constructivo para la estabilización de la playa de La Torre en Almazora (Castellón)” IGM, 2022-2023. Servicio Provincial de Costas de Castellón.



Fig. 4. Zonas objeto de estudio.

3.2. Datos de partida

Dada la ausencia de datos instrumentales de oleaje en estas zonas, se escogen las series de datos de oleaje SIMAR de la Base de Datos Oceanográficos de Puertos del Estado, comúnmente empleadas en proyectos de ingeniería marítima en España por su cobertura temporal, más de 60 años de registro con cadencia horaria (1958-2024), continuidad y disponibilidad espacial.

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Las series SIMAR surgen de la concatenación de dos conjuntos de datos: SIMAR-44 y WANA. El subconjunto SIMAR-44 se obtiene a partir de reanálisis numéricos de alta resolución que cubren el intervalo 1958-2005. El subconjunto WANA procede de la parte de diagnóstico o análisis del sistema de predicción del estado de la mar que Puertos del Estado ha desarrollado en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). No obstante, los datos WANA no son datos de predicción sino datos de diagnóstico o análisis. Esto supone que para cada instante el modelo proporciona campos de viento y presión consistentes con la evolución anterior de los parámetros modelados y consistente con las observaciones realizadas, ya que se supone que esa información está corregida con medidas reales. El objetivo de SIMAR es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente.

El nodo seleccionado para el análisis en Denia es el 2084107, por su ubicación en aguas profundas frente a la playa de Les Deveses. En el caso de Almazora, la serie del nodo 2094118, ubicado en profundidades indefinidas más allá de las Islas Columbretes por la influencia de éstas en la transformación de los oleajes, ha sido reconstruida en puntos objetivo costeros a través del anidamiento de los modelos de propagación SWAN (Booij, Ris, & Holthuijsen, 1999) y OLUCA (GIOC, 2000) siguiendo el método de “downscaling híbrido” del HIPERCUBO- MAXDISS (Camus et al, 2013).

3.3. Metodología de trabajo para el estudio de la evolución temporal de los eventos extremos de oleaje frente al litoral dianense entre 1958 y 2020

3.3.1. Selección de extremos

Como punto de partida para estudiar el comportamiento de los episodios de temporal ocurridos desde 1958 hasta 2020, en primer lugar, se procede a la selección del subconjunto de eventos extremos cuyo comportamiento a lo largo del tiempo se pretende analizar, empleando para ello el método de Máximos Anuales (Coles, 2001). Con este criterio, se obtienen los valores máximos anuales de altura de ola del global de la serie y se trabaja con esta nueva serie de temporales (Fig. 5).

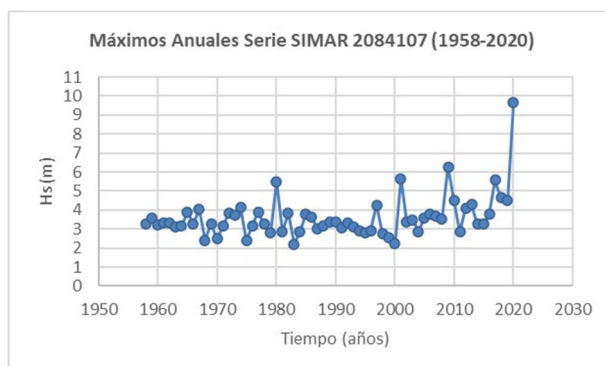
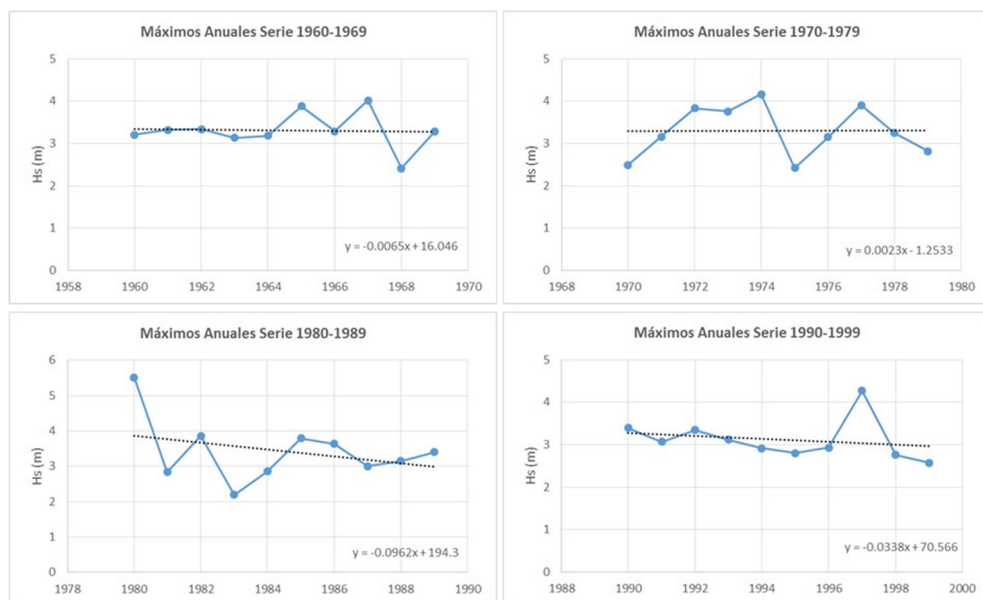


Fig. 5. Máximos anuales de altura de ola del nodo SIMAR 2084107

3.3.2. Análisis de tendencias

A continuación, y como una primera aproximación al análisis de tendencias, se calcula la correlación existente entre los máximos anuales de altura de ola de la serie y el tiempo, ajustando la ecuación de una recta a los datos en intervalos de tiempo de décadas, y comparando los cambios observados en las pendientes calculadas.



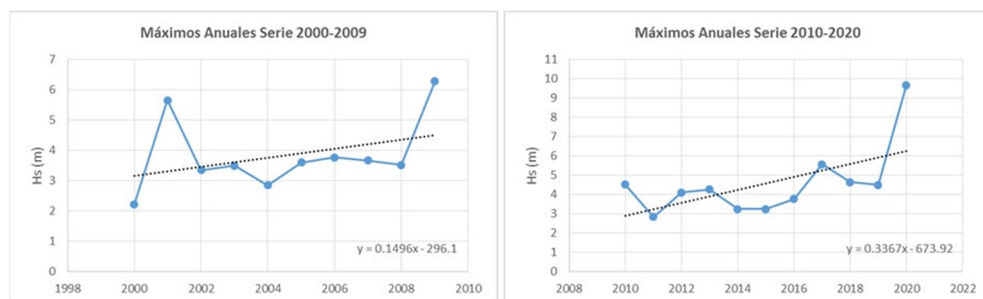


Fig. 6. Tendencias en el comportamiento de los eventos extremos por décadas mediante cálculo de la regresión lineal

3.3.3. Evolución temporal del régimen extremal de oleaje. Ajuste de extremos y cálculo de los parámetros de diseño asociados al oleaje a distintas escalas temporales

La caracterización del régimen extremal del oleaje se aborda mediante el ajuste de los máximos anuales de altura de ola (tanto del global de la serie, como de distintas ventanas temporales cada vez más recientes en el tiempo) a una función de distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV), tal que:

$$F(H_s) = \exp \left\{ - \left(1 + \xi \frac{H_s - \mu}{\Psi} \right)^{-1/\xi} \right\} \quad (1)$$

Donde:

μ es el parámetro de localización

Ψ es el parámetro de escala

ξ es el parámetro de forma

Las franjas de tiempo escogidas quedan reflejadas en el siguiente esquema, mostrándose el ajuste realizado de 3 de ellas en las Figuras 8 y 9:

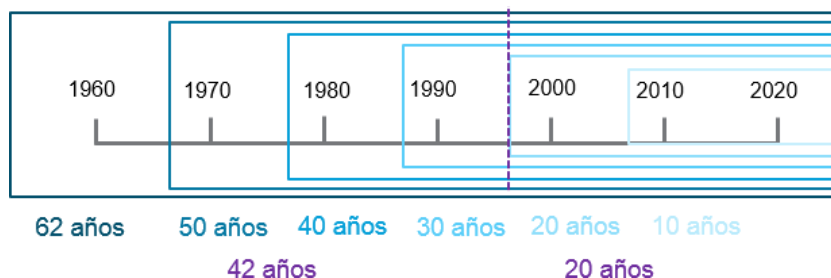


Fig. 7. Periodos de tiempo de partición de la serie para el análisis de los eventos extremos

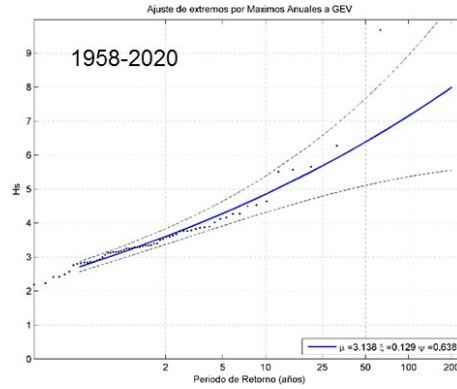


Fig. 8. Ajuste de los máximos anuales de altura de ola significativa del global de la serie (1958-2020) a una función GEV

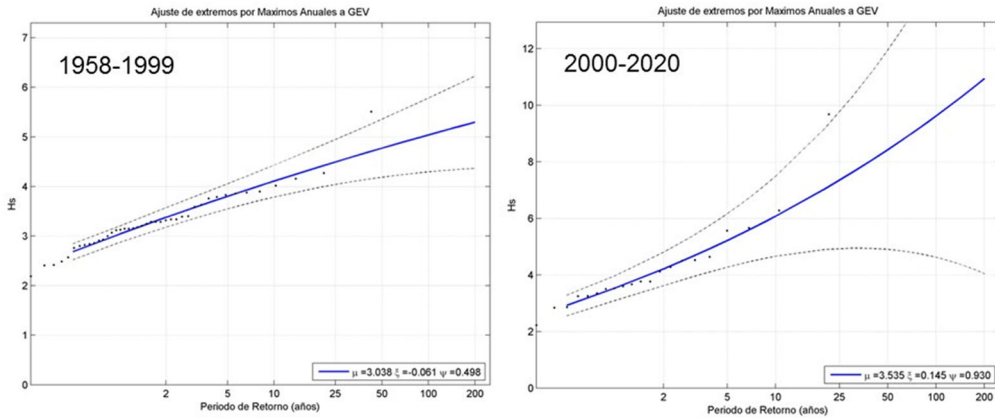


Fig. 9. Régimen extremal de altura de ola significativa para los peiornos de 1958 a 1999 (izq.) y de 2000 a 2020 (dcha.)

Así, a partir de los parámetros de ajuste obtenidos, y considerando los distintos periodos de tiempo escogidos, se analiza la magnitud y probabilidad de ocurrencia en el tiempo de los siguientes temporales:

- Temporal de $T_R = 68$ años, recomendado para el diseño de proyectos de regeneración y defensa de playas (ROM 1.0-09), cuya correcta caracterización resulta por tanto determinante para la estabilidad de este tipo de actuaciones costeras.

La ROM 1.0-09, en su Figura 2.2.33, establece como valores recomendados de vida útil (V_m) y probabilidad de fallo (p_f) para el diseño de actuaciones de “regeneración y defensa de playas”, una V_m de 15 años y una p_f de 0,2. Considerando estos dos valores y la ecuación (2), se obtiene el periodo de retorno de la ocurrencia de un modo de fallo principal u oleaje de diseño, $T_R = 68$ años.

$$T_R = \frac{1}{1 - (1 - p_f)^{1/V_m}} \quad (2)$$

Donde:

T_R : Período de retorno (años)

V_m : Vida útil (años)

P_f : Probabilidad de fallo frente a los modos de fallo

- b) Temporal “Gloria” de enero de 2020, por su excepcionalidad, cuya probabilidad de ocurrencia en el tiempo se busca analizar, de cara a poder confirmar si los episodios de oleaje extremos están siendo cada vez más frecuentes.

3.3.4. Simulación de Monte Carlo

Por último, y con objeto de comprobar la validez de los parámetros de ajuste globales (obtenidos del ajuste de los datos de H_s de 1958 a 2020) al comportamiento actual del oleaje (últimos 20 años) se recurre al Método de Monte Carlo (Stan Ulam & John Von Neumann, 1944) para la simulación aleatoria de los datos y su contraste con lo registrado en la serie SIMAR.

Aplicando probabilidades aleatorias, y empleando los parámetros de ajuste de la distribución GEV de la serie global de oleaje, se simulan los 62 máximos anuales de la serie y se calcula la mediana ($H_{s50\%}$) asociada al periodo 2000-2020, tanto de los datos sintéticos como de los medidos.

Repetiendo esta simulación 10.000 veces, se calcula la probabilidad de que la mediana de la serie simulada con los parámetros de ajuste GEV de la serie global, para el periodo 2000-2020, supere la mediana de los valores de H_s reales en este periodo.

Esta misma simulación aleatoria de la serie sintética se efectúa utilizando de forma diferencial los parámetros de ajuste GEV correspondientes a los periodos 1958-1999 y 2000-2020. Y de igual modo, para un tamaño muestral de 10.000 simulaciones se calcula la probabilidad de que la mediana sintética supere la real.

3.4. Análisis de las diferencias observadas a lo largo del tiempo en el oleaje de cálculo de la profundidad de cierre de las playas en el litoral almazorino

Una vez reconstruida la serie de oleaje del nodo SIMAR 2094118 en la costa, se calcula la altura de ola anual que es excedida 12 horas al año (H_{s12}) y su periodo asociado (T_s), por ser los estados de mar implicados en el cálculo de la profundidad de cierre (h^*) del perfil de las playas, y se analiza su evolución.

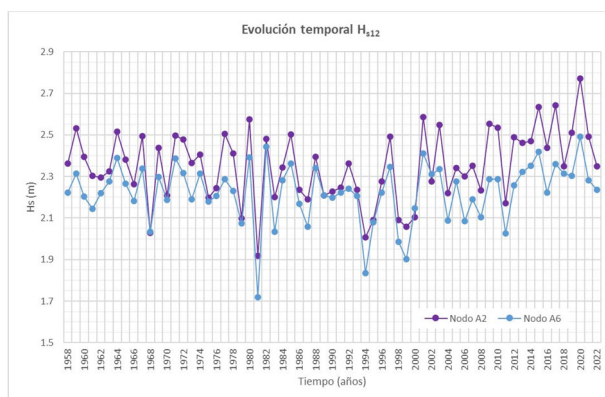


Fig. 10. Evolución de la H_{s12} a lo largo de la serie de oleaje reconstruida frente a la costa de Almazora

La variación en el tiempo de este estado de mar considerado como extremo dentro del régimen medio del oleaje, por su probabilidad de no excedencia del 99,86%, se considera relevante para una adecuada configuración en planta de las estructuras de protección costera y una precisa estimación del volumen de material de aporte requerido para la regeneración de las playas.

Finalmente, la profundidad de cierre (h_*) es calculada, considerando el oleaje asociado a distintos periodos temporales, mediante las formulaciones de Hallermeier (1981) y Birkemeier (1985) ampliamente empleadas en ingeniería de costas (CEM, 2008):

$$h_* = 2.28 \cdot H_{s12} - 68.5 \cdot \left(\frac{s_{12}}{gg \cdot T_s^2} \right) \quad \text{Hallermeier (1981)} \quad (3)$$

$$h_* = 1.75 \cdot H_{s12} - 57.9 \cdot \left(\frac{H_{s12}^2}{gg \cdot T_s^2} \right) \quad \text{Birkemeier (1985)} \quad (4)$$

4. Resultados

4.1. Evolución de los parámetros que definen el régimen extremal según el periodo de tiempo considerado

La tendencia mostrada por las pendientes de las rectas ajustadas a los máximos anuales decenales indica una intensificación de los oleajes en los últimos 20 años, presentando estas dos últimas décadas una pendiente positiva a diferencia de los años precedentes (Tabla 1).

Tabla 1. Pendientes obtenidas de ajustar los máximos temporales anuales por décadas a la ecuación de una recta.

Periodo (años)	Y' = dy/dx
1960-1969	-0.0065
1970-1979	0.0023
1980-1989	-0.0962
1990-1999	-0.0338
2000-2009	0.1496
2010-2020	0.3367

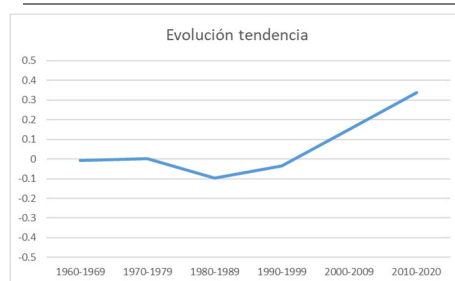


Fig. 11. Gráfico de evolución de las pendientes de los temporales decenales.

El cálculo de la altura de ola de diseño de playas y dunas (H_s de $T_R=68$ años) en distintos escenarios temporales cada vez más recientes, permite reforzar la hipótesis de partida de que con el transcurso del tiempo los oleajes están siendo más energéticos (véase Fig. 12 y Tabla 2), poniendo a su vez en entredicho la validez de diseñar teniendo en cuenta estados de mar antiguos que minoran la altura de ola de cálculo (H_s, T_{R68}). Se resumen a continuación las principales diferencias obtenidas:

- Si se consideran tan sólo los últimos 20 años de datos (2000-2020) en lugar del total de la serie (1958-2020) como datos de partida en la estimación, la altura de ola de diseño se ve incrementada en $\rightarrow \Delta H_s$ todo vs últimos 20, real $\approx +2,2$ m (+33%)
- El aumento en la altura de ola de cálculo entre las obras que se diseñan en la actualidad (datos de 1958 a 2020) y las que se diseñaban en el año 2000 con los datos existentes hasta aquel momento (1958-1999) es de $\rightarrow \Delta H_s$ 2000 vs 2020, oficial $\approx +1,8$ m (+37%)
- La diferencia en la altura de ola obtenida por un ingeniero en el año 2000 y la obtenida considerando tan sólo los últimos 20 años del registro (2000-2020) sería de $\rightarrow \Delta H_s$ 2000 vs últimos 20, real $\approx +4,0$ m (+182%)

Tabla 2. Cálculo de la altura de ola de 68 años de periodo de retorno para distintos rangos temporales.

Periodo (años)	Duración – últimos (años)	GEV			Hs, TR68 (m)
		Localización (μ)	Escala (Ψ)	Forma (ξ)	
1958-2020	62	3,138	0,638	0,129	6,7
1970-2020	50	3,142	0,682	0,162	7,3
1980-2020	40	3,185	0,721	0,179	7,7
1990-2020	30	3,239	0,731	0,223	8,3
2000-2020	20	3,535	0,93	0,145	8,9
2010-2020	10	3,747	0,864	0,298	11,0

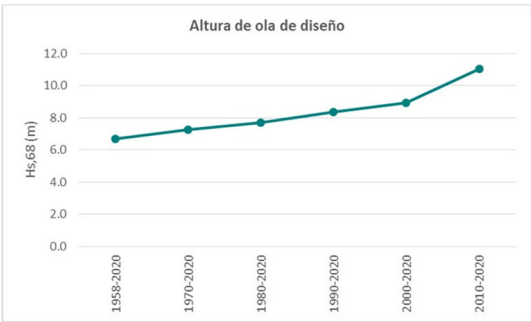


Fig. 12. Altura de ola de diseño de playas y dunas según el rango de datos considerado.

Tabla 3. Altura de ola de diseño para los principales periodos temporales considerados.

Periodo (años)	Duración (años)	GEV			Hs, TR68 (m)
		Localización (μ)	Escala (Ψ)	Forma (ξ)	
1958-2020	62	3,138	0,638	0,129	6,7
1958-1999	42	3,038	0,498	-0,061	4,9
2000-2020	20	3,535	0,93	0,145	8,9

En el caso del temporal Gloria (Tabla 4 y Figura 13), se observa como el periodo de retorno del temporal (T_R) disminuye conforme se excluyen del cálculo los oleajes más antiguos de menor intensidad, demostrando que estos eventos excepcionales son cada vez más frecuentes, aumentando la probabilidad de fallo (pf) de las estructuras costeras.

Tabla 4. Cálculo del periodo de retorno y la probabilidad de fallo de un evento excepcional para distintos rangos temporales.

Periodo	Duración- últimos (años)	Gloria	Parámetros ajuste GEV			Resultados	
		Hs (m)	Localización (μ)	Escala (Ψ)	Forma (ξ)	TR (años)	P fallo
1958-2020	62	9,68	3,138	0,638	0,129	688	2,2%
1970-2020	50	9,68	3,142	0,682	0,162	326	4,5%
1980-2020	40	9,68	3,185	0,721	0,179	214	6,8%
1990-2020	30	9,68	3,239	0,731	0,223	131	10,8%
2000-2020	20	9,68	3,535	0,93	0,145	103	13,6%
2010-2020	10	9,68	3,747	0,864	0,298	43	30,0%

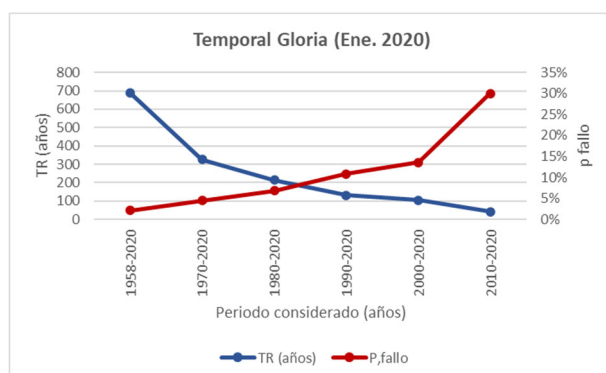


Fig. 13. Evolución temporal del periodo de retorno y la probabilidad de fallo de un evento excepcional.

De hecho, la altura de ola de diseño de $H_{s\ TR68} = 6,7$ m, resultante de tomar en cuenta todos los datos de la serie para su cálculo, metodología aplicada hoy en día como práctica habitual en el desarrollo de proyectos de ingeniería costera, pasa a presentar un periodo de retorno de $T_R=16$ años y una pf del 61% (40% superior) si se tienen en cuenta sólo los últimos 20 años del registro.

Finalmente, la simulación de Monte Carlo efectuada permite demostrar que los temporales acaecidos en los últimos 20 años no se rigen por la misma función de distribución que la serie global, dado que la mediana simulada es inferior a la real cuando se emplean los parámetros de ajuste GEV de 1958 a 2020 para modelar los temporales ocurridos entre el 2000 y el 2020 (Figura 14), en contraste con los resultados obtenidos si se emplean por separado los parámetros GEV obtenidos de estos dos periodos temporales (Figura 15), poniendo de manifiesto el cambio observado en el comportamiento de los oleajes de los últimos 20 años.

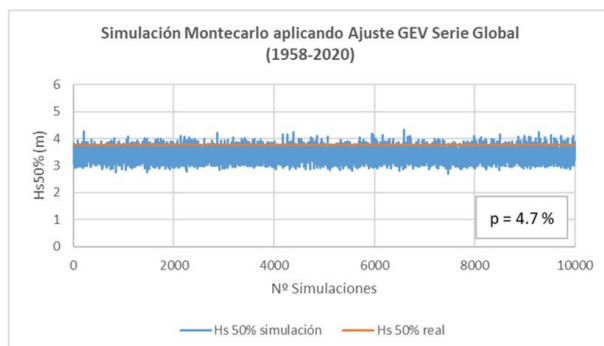


Fig. 14. Simulación de Monte Carlo del 2º periodo temporal considerando los parámetros de ajuste de la función GEV asociados al total de la serie.

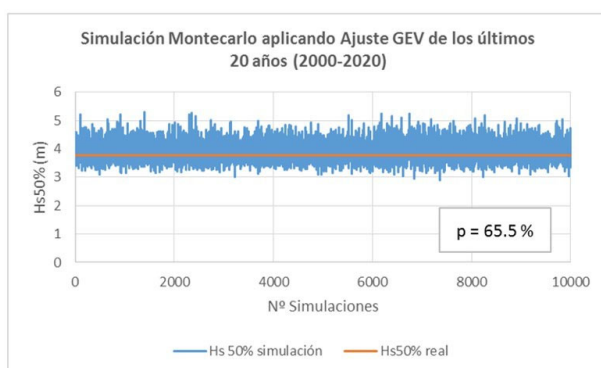


Fig. 15. Simulación de Monte Carlo del 2º periodo temporal considerando los parámetros de ajuste de la función GEV asociados a éste.

4.2. Evolución de la profundidad de cierre de las playas en función del tiempo

En el plano del régimen medio, la intensificación observada en la altura de ola que es excedida 12 horas al año (H_{s12}), conlleva un aumento de la profundidad de cierre del perfil de las playas (h^*) del $\approx 4\%$, si se consideran tan sólo los últimos 20 años del registro (Tabla 5) en lugar del global de la serie (Tabla 6).

Tabla 5. Cálculo de la profundidad de cierre de las playas (h^*) considerando el global de los datos de oleaje en los nodos costeros (1958-2022).

Puntos Objetivo			Oleaje de cálculo (1958-2022)		Profundidad de cierre, h^* (m NMMA)	
ID	Ubicación	Prof. (m NMMA)	H_{s12} (m)	$T_{s \text{ asoc.}}$ (s)	Hallermeier	Birkemeier
A2	Centro Celda 1 (N) Playa de La Torre	- 6	2,35	10,05	5,0	3,8
A6	Centro Celda 2 (S) Playa de La Torre	-6	2,22	9,84	4,7	3,6

Tabla 6. Cálculo de la profundidad de cierre de las playas (h^*) considerando los últimos 20 años de los datos de oleaje en los nodos costeros (2000-2022).

Puntos Objetivo			Oleaje de cálculo (2000-2022)		Profundidad de cierre, h^* (m NMMA)	
ID	Ubicación	Prof. (m NMMA)	Hs12 (m)	Ts asoci. (s)	Hallermeier	Birkemeier
A2	Centro Celda 1 (N) Playa de La Torre	-6	2,43	10,85	5,2	4,0
A6	Centro Celda 2 (S) Playa de La Torre	-6	2,27	10,53	4,8	3,7

5. Conclusiones

De los diferentes análisis de tendencias realizados se extrae que:

- Con anterioridad al año 2000, la correlación Hs-tiempo seguía una tendencia constante o incluso negativa, mientras que en los últimos 20 años, las alturas de ola aumentan con el paso del tiempo.
- Los eventos extremos de oleaje son cada vez más frecuentes e intensos, disminuyendo el periodo de retorno (T_R) de los mismos con el transcurso del tiempo, y aumentando la altura de ola (H_s , $T_R=68$) y la probabilidad de fallo (pf) de las estructuras marítimas.
- El rango de datos considerado para el cálculo de la altura de ola de diseño (H_s , $T_R=68$) es decisivo para garantizar su fiabilidad.
- La distribución seguida por los máximos anuales del global de la serie considerada (1958-2020) no es representativa del comportamiento actual de los temporales (últimos 20 años, 2000-2020).
- El periodo 2000-2020 presenta un ajuste adecuado e independiente respecto de la serie analizada en su conjunto (1958-2020).

Como consecuencia de estos resultados, y para los datos analizados, se puede concluir que, efectivamente, en las últimas décadas los eventos extremos de oleaje han experimentado un cambio en su patrón de comportamiento, aumentando en frecuencia e intensidad.

Este hecho lleva a replantearse el actual enfoque del diseño de las obras marítimas, y en concreto, el de las playas y dunas objeto de estudio, en lo referente a la selección del estado de mar de cálculo. Considerar todo el registro de datos desde 1958 hasta la actualidad para establecer la altura de ola de diseño, lleva a infravalorar la magnitud de la altura de ola de diseño en los últimos 20 años, que se ven contrarrestados por los oleajes menos intensos anteriores al año 2000, y con ello a subestimar la altura de ola de cálculo (H_s , $T_R=68$).

Del lado de la seguridad, el diseño de cualquier actuación en la costa debería tener en cuenta este aumento en la altura de ola de los oleajes, que en el caso de las playas, se traduce en playas más anchas, mayores volúmenes de material de aporte requeridos para su regeneración, cotas de coronación de las dunas más altas, espigones más largos y piezas del manto más pesadas, para resistir el embate de estos eventos extremos y adaptarse así a estas nuevas condiciones del clima marítimo.

Referencias

- Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. Part I: model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), 7649-7666.
- Camus, P., Mendez, F., Medina, R., Tomas, A., Izaguirre, C. (2013). "High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas". *Coastal Engineering*. 72, 56-68.
- Coles, S.G. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London, Springer, 208 pp.
- Dean, R. G., Kriebel, D. L., Walton, T. L. (2008). *Coastal Engineering Manual*, Part III, Chapter III-3 Cross-Shore Sediment Transport Processes. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- GIOC, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. (2000). OLUCA- SP, Modelo espectral de propagación de oleaje y corrientes en playas. Manual de referencia, Universidad de Cantabria – Ministerio de Medio Ambiente. Santander (España).
- IPCC. (2019) "Resumen para responsables de políticas", en: Informe especial sobre los océanos y la criosfera en un clima cambiante del IPCC [H. O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)].
- Losada, M.A., Piñeiro, E. (2009). ROM 1.0-09 Recomendaciones del diseño y ejecución de la Obras de Abrigo. Parte 1ª Bases y factores para el proyecto. Agentes climáticos. Recomendaciones para Obras Marítimas, Puertos del Estado, Ministerio de Fomento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los Servicios Povicinales de Costas en Alicante y Castellón por la adjudicación de los trabajos que han servido de base para la realización del presente estudio.

Estudios de inundación de zonas costeras como consecuencia de la acción de temporales

Coastal areas flood studies due to storm actions

José Manuel de la Peña Olivas^a y José María Medina Villaverde^a

^aCentro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX, jose.m.pena@cedex.es, jose.m.medina@cedex.es

How to cite: de la Peña Olivas, J. M. y Medina Villaverde, J. M^a. (2024). Estudios de inundación de zonas costeras como consecuencia de la acción de temporales. En libro de actas: XVI Jornadas Españolas de Costas y Puertos, Ibiza 8 y 9 de mayo de 2024

Abstract

At the Center for Port and Coastal Studies of CEDEX, coastal flooding studies have been carried out, in support of the Coastal and Sea Directorate. These works are being carried out continuously, both by public and private entities, but The right tools are not always applied in the right way. On the other hand, different uncertainties must be managed, both in the processing of the data and in the procedures used.

Specifically, the latest studies carried out involve the south of the province of Alicante, specifically, on the beaches of Pinet and La Marina (Municipal district of Elche and Santa Pola) and this summary refers to them.

Keywords: Coastal floods, climate change, sea level rise

Resumen

En el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, se han ejecutado estudios de inundación de la costa, en apoyo a la Dirección de la Costa y del Mar. Estos trabajos se están ejecutando de continuo, tanto por entidades públicas como privadas, pero no siempre se aplican las herramientas adecuadas de la forma adecuada. Por otra parte, se han de gestionar diferentes incertidumbres, tanto en el tratamiento de los datos como en los procedimientos empleados.

En concreto, los últimos estudios realizados involucran el sur de la provincia de Alicante, en concreto, en las playas del Pinet y La Marina (T.M. de Elche y Santa Pola) y a ellos se refiere el presente resumen.

Palabras clave: Inundaciones costeras, cambio climático, subida del nivel del mar

1. Introducción

El desarrollo urbano de la costa ha hecho que en muchas zonas del litoral español sea ocupado en su parte activa, aunque esa actividad se presente con periodos de retorno largos, lo que llevó en su tiempo a no tener conciencia de que el terreno que se ocupaba podía tener problemas de inundación. El concepto de playa y sus zonas activas como elemento dinámico a lo largo del tiempo, en la

actualidad se encuentra muy asumida; pero se enfrenta a actuaciones pasadas que no lo tuvieron y se construyó en lugares donde existe peligro de intrusión marina.

El análisis de este tipo de situaciones y los peligros que conlleva la edificación en sitios de playa o costa donde alcanza el mar se realiza mediante tres variables climáticas marinas:

1. Temporales sobrevenidos
2. Subida del nivel del mar
3. Marea meteorológica

Estos tres factores se han estudiado para una zona concreta: Las playas del Pinet y La Marina (T.M. de Elche y Santa Pola) en el litoral sur de la provincia de Alicante, por encargo de la Dirección General de la Costa y el Mar.

2. Concepto básico de dinámica costera

Aunque sea reiterativo, es conveniente recordar que la costa, y en concreto sus zonas blandas más moldeables como son las playas, son elementos dinámicos que se comportan en todo momento como estados de reacción ante la acción de los agentes climáticos. Así, por ejemplo, en la Fig. 1 se muestra la playa del Dosel de Cullera en tres estados diferentes según sea menor o mayor la acción del oleaje, poniendo límite superior al alcance de las olas sobre la playa.



Fig. 1 Playa del Dosel de Cullera en tres estados diferentes del mar

También sucede esta situación dinámica cuando lo que varía no es la energía del oleaje, sino la dirección con que alcanza la playa. Un ejemplo muy típico es en aquellas costas donde existen dos direcciones predominantes de oleaje que se alternan a lo largo del tiempo. Así, en la Fig. 2 se muestra tres estados de la playa de Lloret de Mar, tan naturales unos y otros, que delimitan también el alcance de la playa hacia tierra.



Fig. 2. Playa de Lloret de Mar. Foto: Google Earth

A estos estados dinámicos naturales de la costa, se les unen los fenómenos de pérdida o ganancia de material: erosión o acreción costera, que suele ser alterado por causas de acciones humanas (como puertos, muros, etc.).

3. Temporales sobrevenidos

El primero de los factores analizados del clima marítimo son los temporales que se producen con una intensidad inusual, con un periodo de retorno importante. Así, se han obtenido los temporales más intensos registrados en la zona y para ello se tomó el punto SIMAR 2077098 (Fig.3) que es el más próximo a las playas en estudio (Pinet y La Marina) y se analizó su serie de temporales. En la Fig. 4 se muestra el máximo temporal registrado en él.



Fig. 3. Situación de las playas analizadas y el punto SIMAR de oleaje. Fuente: Puertos del Estado

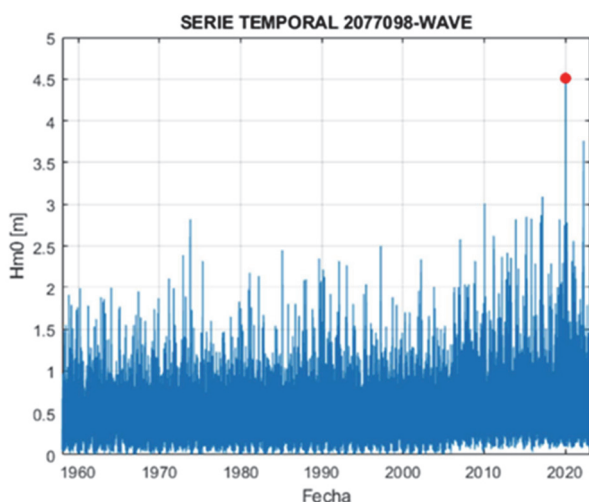


Fig. 4. Máximo temporal de oleaje registrado en el punto SIMAR. Fuente: (CEDEX, 2023)

El máximo temporal se registró en 20 de enero de 2020 con una altura de ola significativa de 4,51 m. Mientras que los temporales mayores hasta entonces alcanzados superaban mínimamente los 3 m.

4. Subida del nivel del mar

El alcance del mar sobre la costa viene también influenciado por la subida del nivel del mar (permanente y estacional). La subida del nivel del mar debido al oleaje (runup u setup) viene implícitamente incluido en el propio análisis del oleaje; pero no ocurre así cuando la subida del nivel del mar es debido al cambio climático (producido por el efecto invernadero).

En la mayoría de las ocasiones, estas subidas solamente se analizan con efectos futuros, olvidándose de la subida ya producida. Si se observan los niveles del mar que registran los mareógrafos de la costa mediterránea española (Fig. 5), se puede apreciar que el valor medio anual se sitúa en 0,4 cm/a (que se reduce a 0,36 cm/a si se elimina el valor mayor y menor).

Este valor, que para la zona de estudio se situaría entre 0,09 cm/a de Gandía, 0,55 cm/a de Carboneras y 0,81 de Formentera. Su valor medio estaría en torno a 0,48 cm/a. Por lo que esa tasa, a falta de otra mejor, sería la que tendría que usarse para la zona de Pinet y La Marina.

MAREOGRAFOS DE PUERTOS DEL ESTADO EN EL MEDITERRÁNEO					
PERIODO	AÑOS	MAREOGRAFO	Puerto	SUBIDA TOTAL (cm)	SUBIDA ANUAL (cm/a)
2005-2023	18,78	3543	Motril 2	6,16	0,33
2006-2023	17,29	3545	Almería	2,14	0,12
1992-2023	31,30	3546	Málaga 3	5,75	0,18
2013-2023	10,30	3547	Carboneras	5,63	0,55
1992-2023	31,04	3651	Valencia 3	12,54	0,40
2007-2023	16,12	3655	Sagunto	4,13	0,26
2008-2023	15,52	3656	Gandía	1,42	0,09
2011-2023	12,37	3756	Tarragona	12,52	1,01
1993-2023	30,12	3758	Barcelona 2	15,95	0,53
2010-2023	13,78	3851	Palma de Mallorca	6,11	0,44
2010-2023	13,78	3853	Alcudia	4,68	0,34
2010-2023	13,73	3855	Formentera	11,17	0,81
2003-2023	20,79	3856	Ibiza 2	9,85	0,47
2010-2023	13,78	3860	Mahón	7,41	0,54
2016-2023	7,78	3548	Almería 2	3,40	0,44
2009-2023	14,23	3541	Algeciras	3,27	0,23
2009-2023	14,23	3540	Tarifa	1,72	0,12
2008-2023	15,78	3510	Melilla	4,55	0,29
Incremento medio anual: 0,40 cm/a					

Fig. 5. Subidas del nivel del mar obtenida de los mareógrafos de Puertos del Estado

5. Marea meteorológica

Los temporales más fuertes suelen venir asociados con borrascas o depresiones atmosféricas importantes, como sucedió en el caso de “Gloria” del 20 de enero de 2020, cuando el mareógrafo de Gandía registró una subida inusual de 0,81 m (con marea meteorológica asociada) como se observa en su curva de niveles del mar (Fig. 6)

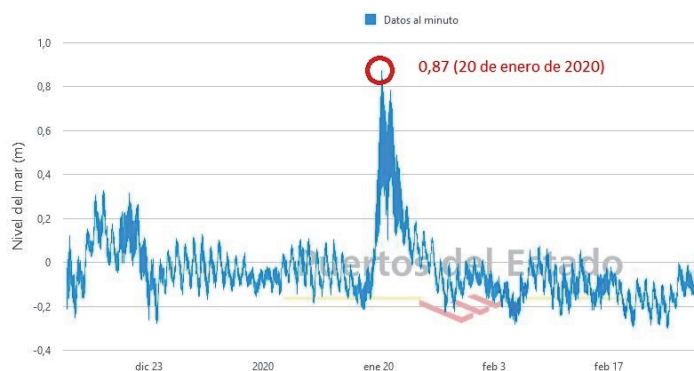


Fig. 6. Nivel del mar obtenida del mareógrafo de Gandía. Fuente: de Puertos del Estado

6. Ejemplo de problemas costeros por invasión de playa

Como se ha indicado en la introducción, el análisis del problema de invasión del mar en las playas se ha aplicado a las playas del Pinet y La Marina (T.M. de Elche y Santa Pola) en el litoral sur de la provincia de Alicante, por encargo de la Dirección General de la Costa y el Mar. La finalidad del trabajo era analizar la peligrosidad de la ubicación de las edificaciones existente en ellas, dentro del dominio público marítimo terrestre, especialmente debido a los tres factores expuestos anteriormente.

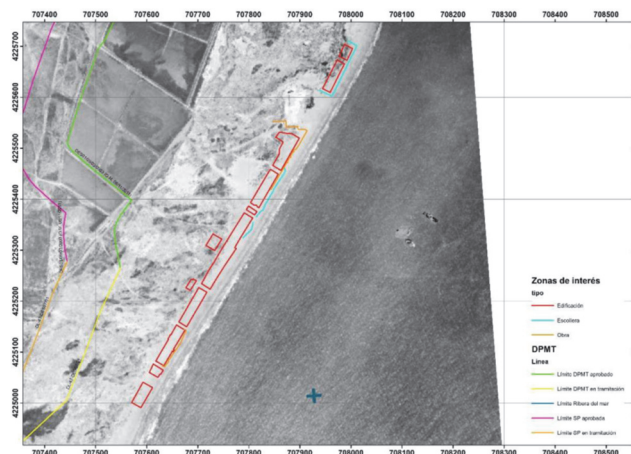


Fig. 7. Playa del Pinet y la Marina en 1929. Fuente: CEDEX, 2023

Las construcciones situadas en las playas citadas se encontraban situadas en 1929 en plena playa (delante de la franja dunar). Esta situación se vio agravada años después, y en 1956 se observa cómo la línea de orilla ya se encontraba a pocos metros de las casas (Fig. 8).

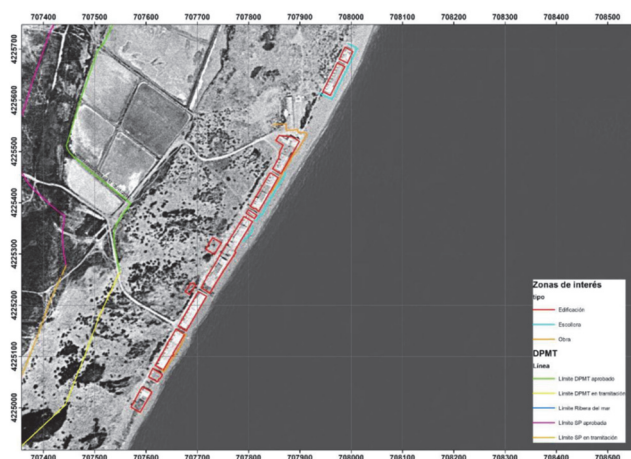


Fig. 8. Playa del Pinet y la Marina en 1956 Fuente: CEDEX, 2023

Poco a poco la situación se ha ido agravando (Fig. 9), teniendo que recurrir a protección de escollera, no diseñada ni calculada reglamentamente, lo que origina un problema de seguridad añadido.



Fig. 9. Playa del Pinet y la Marina en la actualidad Fuente: CEDEX, 2023

Lo primero que se hizo fue analizar el clima marítimo, obteniendo los temporales más intensos registrados en la zona. En la Fig. 4 se muestra el máximo temporal registrado en las proximidades de ambas playas.

Tras ello, se modelizó el tramo de costa, empleando la altura de ola máxima (no la significativa, que da el registro), junto con el nivel del mar obtenido en los registros de los mareógrafos más cercanos. Aunque ello en Alicante no es fácil, puesto que no se tienen registros muy próximos de la red mareográfica de Puertos del Estado, por lo que se recurrió a analizar los tres mareógrafos más cercanos: Gandía, Carboneras y Formentera.

La ola máxima se ha obtenido a partir de las recomendaciones de Goda (Goda, 2010) para cálculo de diques verticales.

De cara al futuro se han realizado modelizaciones adicionales tomando en consideración la elevación del nivel del mar prevista por efecto del cambio climático.

El modelo utilizado fue CMSWAVE , del Sistema de Modelado Costero del CIRP (US Army Corps of Engineers), empleando inundación, interacciones no lineales, rotura y run-up. Como ejemplo de la simulación en la Fig. 10 se muestra uno de los resultados, en los que se obtiene la línea de orilla durante el temporal máximo registrado.

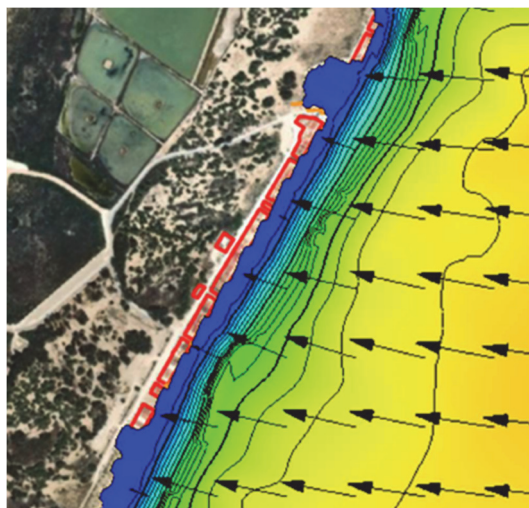


Fig. 10. Resultados en la playa del Pinet. Fuente: (CEDEX, 2023)

Como se observa, en las simulaciones se aprecia cómo el mar rebasa las edificaciones por los extremos y su frente se enfrenta directamente enfrente a la acción del oleaje con la peligrosidad que ellos conllevan.

Esta situación se verá agravada con las expectativas de la subida del nivel del mar debido al cambio climático (apartado 4) y los efectos que como barrera provoquen las edificaciones (Fig. 11).

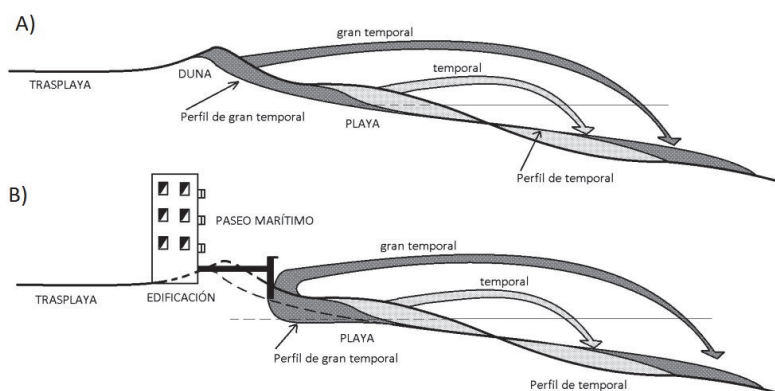


Fig. 11. Comportamiento de la duna frente a un temporal; sin y con estructura rígida. Fuente: (Peña, 2024)

7. Conclusiones

1. La conclusión general resulta en el hecho de que las casas del El Pinet y La Marina (especialmente las primeras) se encuentran expuestas a la acción del mar, y que esta situación se verá empeorada en el futuro, especialmente si se confirma la subida del nivel del mar producida por el cambio climático, pero también empeorará a corto plazo debido a la degradación que las protecciones de escollera inducen en la playa.
2. Actualmente, las casas de El Pinet se han protegido con escollera, aparentemente sin estudio alguno; ello, aparte de resultar peligroso para las propias edificaciones, produce erosiones en la playa.
3. La subida de nivel esperada, que para un ascenso del nivel de 0,26 m y 1,11 m (en los horizontes 2050 y 2100, respectivamente), producen retrocesos de la línea de costa entre 25,2 m (2050) y 107,7 m (2100).

Referencias bibliográficas

- CEDEX. (2023). *Estudio de las playas del Pinet y La Marina (T.M. de Elche y Santa Pola, Alicante)*. Madrid: Centro de Estudios de Puertos y Costas, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Peña Olivas, J. M. (2023). *Tipos de actuaciones en costas, en: Curso práctico de dinámica litoral: diagnóstico y análisis de problemas costeros*. CEDEX (ISBN 978-84-7790-656-8; 978-84-7790-657-5)
- Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. 3rd Edition. ISBN: 978-981-4282-39-0. Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 33. World Scientific.

Ecosistemas marinos y costeros en el Reglamento de la Unión Europea sobre Restauración de la Naturaleza de 2024: una perspectiva jurídica

Francisco Javier Sanz Larruga^a

^a Observatorio del Litoral, Universidade da Coruña,  <https://orcid.org/0000-0003-1045-5888>, fjsanz@udc.es

How to cite: Sanz Larruga, F.J. (2025): Ecosistemas marinos y costeros en el Reglamento de la Unión Europea sobre Restauración de la Naturaleza. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

It is about making an approximation to the legal regime of environmental restoration-marine and coastal- provided for in the new European Union Regulation on nature restoration of 2024. In addition, the precedents and legal assumptions of restoration at the international and community level are addressed. Finally, the different aspects of the environmental restoration of marine and coastal spaces are analyzed: its nature, its content, its application instruments and the challenges it presents.

Keywords: ecosystems, coast, sea, restoration, regulation, European Union

Resumen

Se trata de realizar una aproximación al régimen jurídico de la restauración ambiental -marina y costera- previsto en el nuevo Reglamento de la Unión Europea sobre restauración de la naturaleza de 2024. Además, se abordan los precedentes y presupuestos jurídicos de la restauración a nivel internacional y comunitario. Finalmente se analizan los diferentes aspectos de la restauración ambiental de los espacios marinos y costeros: su naturaleza, su contenido, sus instrumentos de aplicación y los retos que presenta.

Palabras clave: ecosistemas, costa, mar, restauración, regulación, Unión Europea

1. Introducción

La reciente aprobación -tras un polémico y tortuoso proceso en el ámbito de las instituciones de la Unión Europea- del Reglamento de la Unión Europea 2024/1991, relativo a la restauración de la naturaleza (en adelante, RRN), supone un importante hito en la política y el derecho del medio ambiente y, en particular, sobre la protección y gestión ambiental de las costas y espacios marinos. Ante el relativo fracaso de las medidas de prevención y conservación sobre la biodiversidad en la Unión, la restauración ambiental se presenta como una de las claves de bóveda de su futura política ambiental. No obstante, la técnica de la restauración ambiental no es una novedad y, también, en el ámbito jurídico ha venido utilizándose, si bien con un carácter reactivo, en caso de producción de daños ambientales.

El objeto de este trabajo es tratar de hacer una aproximación jurídica al contenido del nuevo RRN y, más concretamente, sobre cómo puede afectar al ámbito de las zonas costeras y el medio marino que aparecen específicamente regulados en el mismo (cfr. apartado 3). Previamente a este estudio, nos parece de interés conocer algunos de los precedentes que sobre la restaturación ambiental aparecen recogidos, tanto en el ámbito internacional como en la normativa española (cfr. apartado 2).

Finalmente, aunque es todavía pronto para saber cómo se va a aplicar el nuevo RNN, tanto en la propia Unión Europea como en cada uno de sus países miembros, vamos a tratar de abordar cuáles son los retos y los problemas que esta normativa tiene por delante en su aplicación a las zonas costeras y marítimas en España; reflexiones que aparecerán resumidas en las conclusiones finales (cfr. apartado 3).

2. Algunos precedentes jurídicos sobre la restauración de la naturaleza

2.1. El ordenamiento jurídico internacional y las iniciativas sobre restauración

El Convenio sobre la Diversidad Biológica -fruto de la Conferencia de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, celebrada en Río de Janeiro en 1992- es sin duda el primer hito más importante en la protección jurídica de la biodiversidad a nivel internacional (entró en vigor el 29 de diciembre de 1993). En su artículo 8º sobre la “conservación in situ”, establece que “cada parte contratante, en la medida de lo posible y según proceda: (...) f) *Rehabilitará y restaurará ecosistemas degradados y promoverá la recuperación de especies amenazadas*, entre otras cosas mediante la elaboración y la aplicación de planes u otras estrategias de ordenación”. Posteriormente, el “Plan estratégico para la Diversidad Biológica (2011-2020)” contiene numerosas referencias a la restauración como la “Meta 15” para 2020 que incluye la “restauración de por lo menos el 15% de las tierras degradadas”; un plan que ha sido sustituido por el “Marco Mundial de Biodiversidad de Kunning-Montreal” aprobado en la 15ª reunión de la partes del Convenio de Diversidad Biológica, celebrado en diciembre de 2022; entre sus “metas mundiales para 2030” -y con el fin de reducir las amenazas a la biodiversidad- “garantizar que *para 2030 al menos un 30 % de las zonas de ecosistemas terrestres, de aguas continentales y costeros y marinos degradados estén siendo objeto de una restauración efectiva...*”.

En el apartado específico del medio marino, la “Agenda 2030” -adoptada por la Asamblea General de Naciones Unidas en 2015- contiene en su “Objetivo de Desarrollo Sostenible” nº 14, relativo a la conservación y utilización sostenible de los mares y recursos marinos, la “meta 14.2” que se planteaba: “De aquí a 2020, gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes, incluso fortaleciendo su resiliencia, y *adoptar medidas para restaurarlos a fin de restablecer la salud y la productividad de los océanos*”.

De otra parte, el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización de Naciones para la Agricultura y la Alimentación (FAO) han promovido desde 2011 el “Decenio de Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas (2011-2030)”. Trata de promover la actividad de restauración por parte de los gobiernos nacionales y la implicación en tal tarea del sector privado y las ONGs.

En definitiva, desde la misma aprobación de la Convención sobre Diversidad Biológica el objetivo específico de la restauración de los ecosistemas y especies ha ido adquiriendo una gran importancia en la medida en que se ha incrementado la degradación de la biodiversidad en muchos lugares del mundo y también en los espacios costeros y marinos (Telesetsky, A., Cliquet, A. & Akhtar-Khavari, A. (2017): *Ecological Restoration in International Environmental Law*. Routledge, London & New York).

2.2. La política de la restauración en el ordenamiento de la Unión Europea

Dejando para más adelante la referencia a los precedentes inmediatos a RNN, a partir de la presentación del Pacto Verde Europeo en 2019, esta claro que la política y el derecho de la biodiversidad en la Unión Europea ha estado centrado en sus dos regulaciones principales: la Directiva 92/43/CEE sobre conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres (la conocida como “Directiva Hábitat”) y la Directiva 2009/147/CE relativa a la conservación de las aves silvestres. Si bien es verdad que en estos textos no aparece expresamente la referencia a la restauración, no hay que olvidar que para garantizar la protección de la coherencia global de la Red Natura 2000 se contemplan “medidas compensatorias” en la Directiva Hábitats que, como señala García Ureta va más allá del principio general de restauración (“Protección de la biodiversidad, mercados, compensación por daños y bancos de conservación”, *Revista de Administración Pública*, nº 198 (2015), pp.297-330; cfr. asimismo la monografía de Sánchez González, J. (2023): *Evaluación ambiental adecuada y Red Natura 2000*, Aranzadi, Cizur Menor).

Con relación al medio marino, como destaca Olmos Carbonell, la Directiva 2008/56/CE sobre el marco para la acción de la Unión Europea en materia de política medioambiental marina, fue la primera de las Directivas ambientales en reconocer el papel de la restauración y establecer esfuerzos para restaurar los ecosistemas marinos degradados « Marine restoration and blue economy in the European Union after the approval of the Nature Restoration Regulation », *Revista de Ordenación del Sector Marítimo*, 2 (2), p. 8). En su texto aparece la referencia a la recuperación de los ecosistemas (cfr. art. 3, 5 al definir el « buen estado ambiental », y en el art. 13, 5 al regular los programas de medidas ; pero también se recoge la « restauración » en el Anexo VI -sobre « programas de medidas »- de la misma Directiva al mencionar, en su apartado 7º, a los « Instrumentos de atenuación y reparación: instrumentos de gestión que orienten las actividades humanas hacia una restauración de los elementos dañados de los ecosistemas marinos”.

Más adelante, nos referimos en este trabajo a los precedentes más inmediatos sobre la aprobación del RNN en la Unión Europea.

2.3. La exigencia de la restauración ambiental en el Derecho Español. Su posterior desarrollo en campo de la protección de la biodiversidad

Podría afirmarse que la restauración ambiental aparece en el ordenamiento jurídico español en los propios comienzos de su régimen constitucional vigente. En efecto, en la Constitución Española de 1978, al regular -en su art. 45- el “Derecho a un medio ambiente adecuado para el desarrollo de la persona”, se establece en su apartado 2º que: “los poderes públicos velarán por el uso racional de todos los recursos naturales, con el fin de promover y mejorar la calidad de vida y defender y restaurar el medio ambiente...”.

Como tuvo ocasión de profundizar en su monografía, Conde Antequera (*El deber jurídico de restauración ambiental*, Comares, Granada, 2004), la restauración ambiental en los comienzos de su regulación constituía una obligación derivada de la responsabilidad por la causación de un daño ambiental a consecuencia de una infracción administrativa o la comisión de un delito penal; por lo tanto con un alcance más limitado que el que hoy ha adquirido como una de las claves de bóveda de la protección de la biodiversidad.

Con relación a la protección del dominio público marítimo-terrestre, la Ley 22/1988 de Costas, prevé en su régimen jurídico de sanciones que, “sin perjuicio de la sanción penal o administrativa que se imponga, el infractor estará obligado a la restitución de las cosas y reposición a su estado anterior...” (cfr. al respecto, el trabajo de Soro Mateo, B. (2023): “Restauración, reposición y restitución del

dominio público natural”, en *Restauración y compensación ecológica: la perspectiva jurídica*, A. García Ureta y B. Soro Mateo (Coords.), Iustel, Madrid).

También, cuando se produce un delito ecológico sobre los recursos naturales y el medio ambiente, el Código Penal prevé en su art. 339 que “los jueces y tribunales ordenarán la adopción a cargo del autor del hecho, de las medidas necesarias encaminadas a *restaurar el equilibrio ecológico perturbado*”.

De otra parte, como consecuencia de la transposición de la Directiva 2004/35/CE sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de los daños ambientales -que tuvo lugar en virtud de la Ley 26/2006, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental-, se ha establecido un régimen de prevención y protección ante daños ambientales a determinados recursos naturales (como, por ejemplo, las aguas marinas o la ribera del mar y de las rías) que pueden causar o estar causados por determinadas actividades económicas o profesionales, aunque no exista dolo, culpa o negligencia (cfr. Anexo III de la Ley). Si se produce un daño ambiental, la Ley prevé -en su art. 20- una “medidas reparadoras o de reparación” (la Ley las define en su art. 2, 16 como “toda acción o conjunto de acciones (...) que tengan por objeto reparar, *restaurar* o reemplazar los recursos naturales y servicios de recursos naturales dañados...”).

Por último, la Ley 42/2007, de Patrimonio Natural y de la Biodiversidad contiene un buen número de referencias a la restauración (cfr. su art. 1º dentro del objeto de la Ley; su art. 2, b) y e) dentro de sus principios orientadores; su art. 3, 32 donde se define la “restauración de los ecosistemas: conjunto de actividades orientadas a reestablecer la funcionalidad y capacidad de evolución de los ecosistemas hacia un estado maduro”; su art. 4, 3 al determinar la función social y pública del patrimonio natural en determinadas obras necesarias para su conservación; etc. Pero, con motivo de una reforma legal de la Ley 42/2007 -producida en 2015- se introdujo la referencia al régimen jurídico de la “Estrategia estatal de Infraestructura Verde y de la conectividad y restauración ecológicas” (cfr. su art. 15); una estrategia que fue aprobada mediante la Orden PCM/735/2021, de 9 de julio. Cabe destacar, a este respecto, que el vigente “Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia” -que canaliza los fondos destinados por la Unión Europea a reparar los daños provocados por la crisis del COVID-19- contempla entre sus “política palanca” una relativa a las “infraestructuras y ecosistemas resilientes” y, más en particular, en su “componente 4ª” sobre “conservación y restauración de ecosistemas marinos y terrestres y su biodiversidad”.

3. Aproximación al régimen jurídico de la restauración de los sistemas costeros y marinos en el Reglamento sobre restauración de la naturaleza

3.1. Presupuestos y pasos previos a la aprobación del RRN

Aunque, como ya hemos visto, la restauración ambiental no es una técnica desconocida en la política ambiental de la Unión Europea, la aprobación del RRN tiene su base programática en la presentación del “Pacto Verde Europeo” por la Presidenta de la Comisión Europea (U. Von der Leyen) a finales de 2019 (cfr. documento COM(2019) 640 final). Se trata, quizá, del programa de política ambiental más ambicioso en toda la historia de la Unión Europea que tiene por objetivo principal la descarbonización en 2050 (con objetivos parciales de reducción -55% de reducción- de los gases de efecto invernadero en 2030). Entre sus líneas de acción está la relativa a la “preservación y restablecimiento de los ecosistemas y la biodiversidad” previendo, para tal fin la aprobación de una Estrategia sobre Biodiversidad y con el propósito de que todas las políticas contribuyan a preservar y recuperar el capital natural de Europa.

En mayo de 2020 se publicó la “Estrategia de la UE sobre Biodiversidad de aquí a 2030. Reintegrar la naturaleza en nuestras vidas” (cfr. documento COM(2020) 380 final). Con carácter general pretende fortalecer la resiliencia ante amenazas futuras y, en particular, las derivadas de los impactos del cambio climático. La Estrategia contiene entre otros instrumentos un plan de restauración de la naturaleza en virtud del cual los países miembros, mediante compromisos y acciones concretas, pongan en marcha medidas de restauración eficaces para restaurar los espacios degradados y, más concretamente, aquellos con más potencial para capturar y almacenar carbono y para prevenir y reducir el impacto de los desastres naturales. La Estrategia especifica que, en la UE “deben estar protegidos al menos el 30% de la superficie terrestre y el 30% de la marina (en 2020 sólo están protegidos el 4% de los espacios terrestres y el 19% de los marinos).

Como parte del plan, la Comisión propuso la elaboración y aprobación de la “Ley de Restauración de la Naturaleza” que incluye el objetivo de restauración general para la recuperación a largo plazo de la naturaleza en las zonas terrestres y marina de la UE con objetivos de restauración vinculantes para hábitats y especies concretas. A mediados de 2022 se presentó por la Comisión Europea la “propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la restauración de la naturaleza” (cfr. documento COM(2022) 304 final) (cfr. sobre la Estrategia de Biodiversidad y sus retos el trabajo de Sadeleer, N. (2023): “El nuevo Pacto por la naturaleza de la UE. De la ambición a la realidad”, *Actualidad Jurídica Ambiental* nº 136, de 17 de julio de 2023).

En octubre de 2020, la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) presentó su informe sobre “Estado de la Naturaleza. Resultados de los informes elaborados en el marco de las Directivas sobre la Naturaleza 2013-2018”, con una perspectiva preocupante para la naturaleza: sólo el 15% de los hábitats están en buen estado y de los que se encuentran en peor estado las turberas y las dunas son las más afectadas. Estos resultados demuestran que el potencial de conservación de la normativa sobre protección de la biodiversidad (Directiva de Hábitats, especialmente) es limitado y no está logrando revertir la degradación progresiva de los mismos. De aquí que la política de restauración se presenta como una alternativa de obligada aplicación.

También incide en la necesaria restauración ambiental el “VIII Programa General de Acción de la Unión Europea en materia de medio ambiente hasta 2030” -aprobado por la Decisión (UE) 2022/591, del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de abril de 2022- en el que, para conseguir sus objetivos prioritarios es preciso que la Comisión, los Estados miembros, las autoridades regionales y locales y las partes interesadas: “transformen el sistema alimentario de la Unión de modo que entre otras cosas, contribuya a proteger y restaurar la biodiversidad, dentro y fuera de la Unión...” (art. 3, n).

En el específico ámbito marino, la preocupación por la restauración hay que ponerlo en relación -como señala Olmos Carbonell (2024)- con otras acciones relacionadas con la protección del medio marino como es el caso de la “Estrategia de Economía Azul” (cfr. documento COM(2021/240 final) y muy en particular con el “Plan de Acción de la UE: proteger y restaurar los ecosistemas marinos en pro de una pesca sostenible y resiliente” (documento COM(2023) 0120) presentado por la Comisión Europea en febrero de 2023 y que, posteriormente dio lugar a una Informe del Parlamento Europeo de 14 de diciembre de 2023 (cfr. A9-0437/2023). En este Informe se pone de relieve la necesidad de restaurar los ecosistemas marinos, potenciar la implantación de zonas marinas protegidas y limitar ciertas prácticas pesqueras (como la de la contacto de fondo), pero, al mismo tiempo tener en cuenta las consecuencias socioeconómicas -y sobre la seguridad alimentaria- que se derivan de la aplicación del plan y la necesidad de contar con la cooperación del sector pesquero.

3.2. Claves principales sobre el régimen jurídico del RRN

Después de más de dos años de negociaciones en el trílogo institucional de la Unión Europea - desde la presentación de la propuesta por la Comisión en junio de 2022, hasta la aprobación por el Parlamento Europeo en febrero de 2024 y, finalmente, la adopción del Consejo de Ministros en junio de 2024- el Reglamento (UE) 2024/1991, del Parlamento Europeo y del Consejo de 24 de junio de 2024 (publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea, serie L, de 29 de julio de 2024) entró en vigor el 18 de agosto de 2024. El proceso de aprobación, como ya adelantamos, ha sido árduo y conflictivo, pues la inicial propuesta contó con la oposición de algunos sectores económicos como la agricultura y la pesca, y también políticamente, ha tenido sus detractores por entender que los objetivos ambientalistas del Reglamento ponían en peligro el normal desarrollo de algunas actividades económicas más vinculadas con el uso de recursos naturales. Por su parte, el mundo científico más relacionado con la biodiversidad (cfr. Society for Ecological Restoration (2022): *Declaration on the European Commission proposal for a regulation on nature restoration*, Alicante, 9 de septiembre de 2022), y, en particular, los grupos y ONGs ecologistas han luchado denodadamente para que el Reglamento saliera adelante (cfr. la plataforma “RestoreNature” *It’s time to RestoreNature in Europe*: <https://www.restorenature.eu/en>). Como es lógico, fruto del proceso de negociaciones el contenido final de la norma aprobada ha rebajado en algunos aspectos sus ambición protectora/restaurativa respecto de la propuesta inicial de la Comisión Europea.

Desde el punto de vista jurídico, llama la atención, en primer lugar la naturaleza jurídica de la norma objeto de estudio: se trata de un Reglamento que, una vez publicado en el DOUE, es de aplicación directa en cada uno de los Estados miembros sin que necesite la previa transposición a su ordenamientos internos, lo cual supone un cambio de estrategia jurídica en la Unión Europea en su política ambiental ya que, al tratarse de una competencia compartida entre la Unión Europea y los Estados miembros, la norma habitualmente utilizada es la Directiva. No obstante, como destaca Sanz Rubiales (“El futuro Reglamento de Restauración: un instrumento para el impulso de la conectividad”, en *Conectividad Ecológica y Derecho*, M. Uriarte Ricote, B. Lozano Cutanda e I. Sanz Rubiales (Coords.), Tirant lo Blanch, Valencia, 2024), la norma otorga, como veremos, un margen de adaptación amplio a los Estados miembros.

El RRN se estructura en seis Capítulos: el primero sobre “Disposiciones generales”, el segundo sobre los “objetivos y obligaciones de restauración”, el tercero sobre los “Planes nacionales de restauración”, el cuarto sobre “Seguimiento y notificación”, el capítulo quinto sobre “Actos delegados y de ejecución” y, finalmente, el sexto sobre “Disposiciones finales”. Un total de 28 artículos, con ocho Anexos que comprenden cerca de un centenar de páginas de extensión en el Diario Oficial de la Unión Europea. Una norma de carácter ambiental de contenido eminentemente técnico, con reglas generales, regímenes específicos sobre los concretos espacios y especies afectadas, y con muchas excepciones a su aplicación que no facilitan su entendimiento al público general.

Como señala Sanz Rubiales, la aprobación del RRN viene a constituir la “constatación de un fracaso: el de las políticas de protección y conservación ambiental en Europa. Frente a los instrumentos preventivos, de protección y conservación de la naturaleza, característico de decenios anteriores (...) la constatación de la insuficiencia de estos está llevando a la UE a insistir en las medidas restauradoras” (Sanz Rubiales, 2024).

El objetivo principal del RRN se contiene en su art. 1,1 comprendiendo la “recuperación a largo plazo y sostenida de unos ecosistemas ricos en biodiversidad y resilientes en todas las zonas terrestres y marinas de los estados miembros mediante la degradación de los ecosistemas degradados”, así como la “consecución de los objetivos de la Unión en materia de mitigación del

cambio climático, la adaptación a este...”, la “mejora de la seguridad alimentaria” y el “cumplimiento de los compromisos internacionales de la Unión”. En el apartado 2 del mismo artículo concreta un poco más -de forma cuantitativa- el objetivo del RRN: los Estados miembros deben de establecer “medidas de restauración efectivas y basadas en la superficie al objeto de abarcar conjuntamente como objetivo de la Unión en las zonas y ecosistemas incluidos en el ámbito de aplicación del Reglamento”, en concreto, “al menos el 20% de las zonas terrestres y al menos el 20% de las zonas marítimas de aquí a 2030 y todos los ecosistemas que necesiten restauración de aquí a 2050”.

Sobre el “ámbito geográfico” sobre el que se proyecta el RRN, el art. 2 dispone que se aplica a todo el territorio sobre el que se extiende la soberanía de los Estados: su territorio, sus aguas costeras y “las aguas, el lecho marino o el subsuelo situados más allá de la línea de base recta que sirve para medir la anchura de las aguas territoriales de un Estado miembro y que se extienden hasta el límite exterior de la zona en que un Estado miembro tiene o ejerce derechos soberanos o jurisdicción” (cita en este punto la Convención de Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar).

En el apartado de definiciones es muy importante el concepto de “restauración” contenido en el art. 3,3 del RRN: “*el proceso de contribuir activa o pasivamente a la recuperación de un ecosistema para mejorar su estructura y funciones, con el objetivo de conservar o aumentar la biodiversidad y la resiliencia del ecosistema, mediante la mejora de una zona de un tipo de hábitat hasta que se encuentre en buena condición, el restablecimiento de un área favorable de referencia y la mejora del hábitat de una especie hasta alcanzar una calidad y cantidad suficientes*, de conformidad con el artículo 4, apartados 1, 2 y 3, y con el artículo 5, apartados 1, 2 y 3, así como la consecución de los objetivos y el cumplimiento de las obligaciones en virtud de los artículos 8 y 12, también mediante la obtención de niveles satisfactorios en relación con los indicadores a que se refieren los artículos 8 y 12”. Siguiendo a Sanz Rubiales (2024) destacamos los aspectos mas importantes de esta definición:

- 1º.- la “restauración es un proceso”; se trata de una “concepto dinámico”; la “acción de restaurar supone “apoyar”, “contribuir a” iniciar un proceso (mejora el tipo de hábitat de una especie) para que la propia naturaleza -las especies involucradas- alcancen una cantidad suficiente”
- 2º.- la “restauración debe promover (...) la resiliencia de los ecosistemas y de las especies; no se trata simplemente de restaurar un hábitat, sino de fortalecerlo” y, por lo tanto de “facilitar su adaptación al cambio climático”.
- 3º.- “de acuerdo con el principio de intervención mínima en la biodiversidad, la restauración pado se centra en eliminar o minimizar las perturbaciones causantes de la degradación, dejando que el ecosistema degradado pueda recuperar por si mismo su estructura y funcionalidad”; en cuanto a la “actividad restauradora activa”, ésta “sólo actúa- con carácter subsidiario- cuando la naturaleza nos es capaz de autorregenerarse...”.
- 4º.- la “restauración tiene por objeto restaurar los recursos naturales pero también los servicios ambientales” (o servicios ecosistémicos).
- 5º.- la “restauración debe mejorar el hábitat de una especie en cantidad y calidad suficientes”.

Sobre los objetivos y obligaciones de restauración que se regulan en los arts. 4 a 13 del RRN, a los efectos de este trabajo sólo nos vamos a referir a los que afectan a las zonas costeras y a las áreas marinas, que serán expuestos en el siguiente subapartado, 3,3). Y, en cuanto a los “planes nacionales de restauración”, por su relevancia, dedicaremos uno de los subapartados siguientes (el 3,4) a un estudio somero de su contenido y alcance.

En el Capítulo IV sobre “seguimiento y notificación” el RRN prevé, en primer lugar, en su art. 20 la obligación para los Estados de realizar un seguimiento de una serie de aspectos que tiene que ver con el avance en el cumplimiento de sus objetivos (estado y evolución de los hábitats, poblaciones de especies de aves, etc.); seguimiento que ha de iniciarse tan pronto como se establezcan las medidas de restauración (cfr. art. 20,2) y con determinadas peculiaridades según el tipo de objetivo previsto por el RRN. En algunos supuestos se prevé el establecimiento de indicadores y la utilización de bases de datos y sistemas de información geográfica (cfr. art. 20, 7 y 9). Para la determinación de algunos parámetros -métodos de seguimiento, indicadores y niveles satisfactorios se prevé la posibilidad de su concreción por la Comisión mediante actos de ejecución (cfr. art. 20,11). De otra parte, el art. 21 establece una serie de exigencias a los Estados miembros para la notificación periódica -y en una serie de plazos que se concretan en cada caso- de una serie de datos e información sobre los progresos realizados en la aplicación de las medidas de restauración y, en general, del cumplimiento de las obligaciones y objetivos establecidos en el RRN. En todo caso, la información que se presente debe cumplir los requisitos de la normativa relativa a la información ambiental y sobre los datos abiertos (cfr. art. 21, 8).

En el Capítulo V del RRN se recoge el régimen jurídico sobre los “actos delegados y de ejecución” de la Comisión europea que está facultada para adoptar determinados actos (por ejemplo, para modificar el contenidos de los Anexos) en función del progreso científico y técnico (cfr. arts. 22 y 23).

Por último, en las “Disposiciones finales” del RRN se prevé la evaluación por la Comisión de la aplicación del mismo antes del 31 de diciembre de 2033 y que será presentado en un informe cuyas conclusiones han de presentarse ante las Instituciones de la Unión Europea (cfr. art. 26).

3.3. Notas específicas sobre la restauración de espacios costeros y marinos

El objetivo de este trabajo está centrado, como ya comentamos, en tratar de la restauración ambiental de los espacios costeros y marinos. Como señala Olmos Carbonell (2024), el “ecosistema mas grande del planeta que sustenta la vida es el océano” y además de otros servicios ecosistémicos también es “una gran controbuyente a la economía” (cfr. Organisation for Economic Cooperation and Development (2016): *The Ocean Economy in 2030*, OCDE Publishing, Paris). No obstante, por la complejidad y heterogenidad de los ecosistemas marinos las experiencias sobre su restauración con no han sido muy abundantes (Cfr. Olmos Carbonell, 2024).

De los ecosistemas vinculados con el medio marino, con el objetivo de su restauración ambiental, el RRN distingue dos: en primer lugar, el relativo a los ecosistemas “costeros” que se regulan con otros tipos de ecosistemas (terrestres y de agua dulce) en su art. 4º y, en segundo lugar, los “ecosistemas marinos” que se regula separada y exclusivamente en su art. 5º.

De forma necesariamente sintetizada exponemos seguidamente los contenidos principales de esta regulación específica del RRN.

3.3.1. Restauración de los ecosistemas costeros

Los Estados miembros “han de establecer medidas de restauración necesarias para mejorar, hasta que se encuentren en buena condición, las zonas de los tipos de hábitat enumerados en el Anexo I que no se encuentre en buena condición” (cfr. art. 4,1). Del Anexo I los ecosistemas propiamente costeros son los siguientes: en el Grupo 1 (Humedales) los “hábitats costeros y salinos”; en el Grupo 2 (Pastizales y otros hábitat pastorales), los “hábitats costeros y de dunas”; en el Grupo 8 (Hábitats rocosos y de dunas), los “acantilados marítimos, playas e islotes” y las “dunas marítimas”. Sobre el concepto de “buena condición”, el art. 3,4 del RRN los define como “un estado en el que las características fundamentales del tipo de hábitat, en particular su estructura, funciones y las especies

típicas o la composición de las especies típicas, reflejen el alto nivel de integridad, estabilidad y resiliencia ecológicas necesario para garantizar su mantenimiento a largo plazo y, por lo tanto, contribuyan a alcanzar o a mantener un estado de conservación favorable de un hábitat...”.

Para la aplicación de las medidas de restauración se prevé en el propio art. 4,1 una planificación temporal: al menos un 30% de su superficie total de aquí al 2030; al menos un 60% de aquí al 2040; y al menos un 90% de aquí al 2050. Cuantificación que corresponderá realizar a los planes nacionales de restauración. En todo caso, “hasta el 2030 se darán prioridad a las medidas de restauración en las zonas situadas en los espacios Natura 2000” (art. 4,1 in fine). El art. 4,2 del RRN prevé, no obstante, la posibilidad de los Estados miembros de excluir de las medidas de restauración a los hábitats de esta categoría que sean “muy comunes y extendidos” (añade: “que abarquen más del 3% de su territorio europeo”); pese a esta excepción, los Estados deben aplicar determinadas medidas de restauración hasta el 2050 (cfr. art. 4,2) y en las condiciones establecidas en el art. 4,3. También se establece excepciones para los Estados que, de forma justificada, consideran que no será posible establecer las medidas de restauración para alcanzar el área favorable de referencia (cfr. art. 4, 5 y 6). Sobre el concepto de “área favorable de referencia” el art. 3,8 del RRN lo define como: “la superficie total de un tipo de hábitat en una determinada región biogeográfica o marina a nivel nacional que se considera la mínima necesaria para garantizar la viabilidad a largo plazo del tipo de hábitat y de sus especies típicas o de su composición de especies típica, así como todas las variaciones ecológicas significativas de ese tipo de hábitat en su área de distribución natural...”.

Algunas de las medidas de restauración de estos ecosistemas se vinculan con la restauración de determinados tipos de especies enumeradas en los Anexos II, IV y V y “para mejorar la conectividad” (cfr. art. 4,7).

En la determinación de las zonas más adecuadas para llevar a cabo las medidas de restauración el art. 4,8 prevé que la información ha de basarse “en la mejor y más reciente información científica que se disponga” (cfr. art. 4,8) y, para tal fin, los Estados han de garantizar, antes de 2030, que “se conozca el estado de los tipos de hábitat en el al menos 90% del área de distribución” de los hábitats considerados para su restauración (cfr. art. 4,9).

En todo caso, las medidas de restauración tendrán en cuenta “la necesidad de mejorar la conectividad entre los tipos de hábitats”, así como las exigencias ecológica de las especies presentes en los mismos (cfr. art. 4, 10); y los Estados han de garantizar que las medidas de restauración adoptadas “muestre una mejora continua del estado de los hábitats” (cfr. art. 4, 11), así como, establecer las medidas oportunas para “prevenir el deterioro significativo de las zonas en las que se se den los tipos de hábitats” considerados (cfr. art. 4, 12).

Fuera de los espacios Natura 2000 se prevén diferentes excepciones paraa aplicar los requisitos del no deterioro de los hábitats y en las circunstancias que se especifican (por ejemplo, supuestos de fuerza mayor, catástrofes naturales, transformaciones inevitables de los hábitats, etc.) (cfr. art. 4, 13, 14 y 15). Y, en los espacios Natura 2000, el incumplimiento de las obligaciones de mejora continua del estado de los hábitats y de prevención de su deterioro, sólo estará justificado si se dan determinados supuetos (fuerza mayor, trasnformaciones inevitables de los hábitats, etc.) (cfr. art. 16).

Finalmente, el art. 4,17 establece las exigencias de que “los Estados miembros garantizarán” que sobre los hábitats considerados, primero que “la superficie que se encuentra en buena condición aumente al menos al 90% y hasta que cada tipo de hábitat en cada región biogeográfica del Estado miembro de que se trate alcance el área favorable de referencia”, y, en segundo lugar, que “se produzca una tendencia creciente hacia la calidad y cantidad de hábitats...” con relación a las especies enumeradas en los Anexos.

3.3.2. Restauración de los ecosistemas marinos

En virtud del art. 5,1 del RRN, “los Estados miembros han de establecer las medidas de restauración necesarias para mejorar, hasta que se encuentre en buen condición, las zonas de los tipos de hábitats enumerados en el Anexo II que no se encuentre en buena condición”. Los tipos de ecosistemas marinos contemplado en el citado anexo se estructuran en los siguientes grupos de hábitats: 1) lechos de vegetación marina; 2) bosques de macroalgas; 3) bancos de mariscos; 4) mantos de rodolitos; 5) campos de esponjas, corales y coralígenos; 6) respiraderos y rezumaderos; y 7) sedimentos arenosos (que no superen los mil metros de profundidad). Para la aplicación de las medidas de restauración se prevé igualmente un calendario con plazos determinados: primero, en el caso de los Grupos de hábitats del 1 al 6: al menos en el 30% de la superficie total de aquí a 2030; el menos del 60% de la superficie de aquí al 2040; y, al menos el 90% de la superficie de aquí al 2050 (cfr. art. 5,1, a) y b); en segundo lugar, en el caso de los hábitats del Grupo 7 se establecen en el art. 5,1, c) y d) objetivos específicos.

En el supuesto de que haya zonas donde no se den los hábitats considerados (de los grupos 1 a 6), los Estados miembros podrán establecer -en tres fases hasta el 2050- medidas de restauración necesarias para reestablecerlos, con el objetivo de alcanzar su área favorable de referencia (cfr. art. 5,2). No obstante, cuando un Estado miembro considera que no es posible establecer este tipo de medidas, “podrá fijar un porcentaje inferior entre el 90% y el 100% en su plan nacional” y aplicar la medida necesarias de forma gradual (cfr. art. 5,3).

Según el art. 5,5 del RRN, “los Estados miembros establecerán las medidas de restauración de los hábitats marinos de las especies enumeradas en el anexo III y en los Anexos II, IV y V de la Directiva 92/43/CEE y de los hábitats marinos de aves silvestres que entren en el ámbito de aplicación de la Directiva 2009/147/CE...”.

Para la determinación de las “zonas más adecuadas para llevar a cabo las medidas de restauración”, la información “se basará en los mejores conocimientos de que se disponga y en los avances técnicos y científicos más recientes para determinar el estado de los tipos de hábitats...” (cfr. art. 5,6). Igualmente, los Estados miembros se comprometen a garantizar el conocimiento del estado de las zonas consideradas en los plazos previstos -hasta el 2050- en el art. 5,7.

Las medidas de restauración han de tener en cuenta, en todo caso, “la necesidad de mejorar la coherencia ecológica y la conectividad entre los tipos de hábitats enumerados en el Anexo II”, así como, las exigencias ecológicas de las especies consideradas en las medidas de restauración (cfr. art. 5,8). Además, las medidas de restauración tienen que garantizar sobre las zonas consideradas que “muestren una mejora continua del estado de los tipos de hábitats enumerados en el Anexo II hasta alcanzar una buena condición...” (cfr. art. 5,9); medidas que, han de garantizar también que “no se deterioran significativamente las zonas donde se haya alcanzado una buena condición, ni en las que se haya alcanzado la calidad suficiente de los hábitats de las especies” (cfr. art. 5,9 in fine).

Con la publicación de los planes nacionales de restauración los Estados miembros “procurarán establecer medidas necesarias para prevenir el deterioro significativo de las zonas en las que se den los tipos de hábitats enumerados en el Anexo II (...) que se encuentren en buena condición o que sean necesarias para cumplir los objetivos de restauración...” (cfr. art. 5,10).

Fuera de los espacios Natura 2000, se establecen una serie de excepciones a las obligaciones de los Estados miembros para aplicar medidas de restauración en casos de deterioro de los hábitats, siempre que se den determinadas circunstancias (por ejemplo, fuerza mayor, transformaciones inevitables de hábitats, planes o proyectos de interés superior para los que no se disponga de soluciones alternativas, etc.) (cfr. art. 5, 11 y 12). Y en el supuesto de los espacios Natura 2000, también se

prevé el posible incumplimiento de las obligaciones de restauración para circunstancias parecidas a las anterior (cfr. art. 5,13).

Finalmente, el art. 5,14 del RRN obliga a los Estados miembros a garantizar para los grupos 1 a 6 de hábitats que "la superficie que se encuentre en buena condición aumente al menos el 90% y hasta que cada tipo de hábitat en cada región biogeográfica de que se tratet alcence el área favorable de referencia" (cfr. art. 5,14, a); una obligación similar se prevé para los hábitats del grupo 7 (cfr. art. 5,14, b), y, por último, se añade la garantía de que "se produzca una tendencia creciente hacia una calidad y cantidad suficientes de los hábitats marinos de las especies enumeradas en el Anexo III del presente Reglamento y en los anexos II, IV y V de la Directiva 92/43/CEE y de las especies que entran en el ámbito de aplicación de la Directiva 2009/147/CE" (cfr. art. 5,14, c).

3.4. Los "programas nacionales de restauración" como el instrumento fundamental para su aplicación

Resulta indudable que para lograr los objetivos previstos en el RRN es fundamental la labor de los Estados miembros, labor que se instrumentaliza a través de los "planes nacionales de restauración" (PNR) regulados a lo largo del Capítulo III del RRN.

Para la elaboración de los PNR el art. 14 del RRN contiene un abigarrado conjunto de instrucciones que no es posible detallar aquí, por los que nos limitaremos a sus contenidos fundamentales. Primero que, para su elaboración es preciso llevar a cabo las investigaciones oportunas -teniendo en cuenta los datos científicos más recientes- y el seguimiento de las mismas para determinar las medidas que han de aprobarse para cumplir las obligaciones requeridas (cfr. art. 14,1). En los planes ha de incluir la cuantificación de la superficie que ha de restaurarse a fin de cumplir los objetivos, según cada tipo de hábitats y con la calidad y cantidad suficientes de los hábitats de las especies necesarias para alcanzar el estado de conservación favorable (cfr. art. 14, 2). Además, se establecen algunas obligaciones para elaboración de indicadores y metodologías para facilitar su aplicación (cfr. art. 14, 5 y 7).

Los Estados miembros han de determinar "las sinergias con los objetivos de mitigación del cambio climático, la adaptación al mismo (...) la prevención de catástrofes, y darán prioridad a las medidas de restauración en consecuencia", y para tal fin, tendrán en cuenta las estrategias y planes nacionales previstos en la materia (cfr. art. 14,9).

Una determinación importante es la que se establece en el art. 14,11 del RRN: "la aplicación del Reglamento no obligará a los Estados miembros a reprogramar ninguna financiación en el marco de la PAC, la PPC y otros programas e instrumentos de financiación agrícola y pesquera...", un precepto introducido ante las quejas de los sectores de la agricultura y de la pesca en el debate del Reglamento. Y, por tal motivo, el art. 14,12 prevé que los Estados miembros "podrán promover la implantación de regímenes de ayuda públicos o provados en beneficio de las partes interesadas que ejecuten las medidas de restauración...".

También, para la elaboración de los PNR los Estados miembros han de coordinarlos con la designación de las zonas de aceleración renovable y las zonas de infraestructuras específicas para cumplir los objetivos nacionales de tal tipo de energías para el 2030 (cfr., art. 14,13).

El art. 14,14 recoge una amplia lista de asuntos que los Estados miembros deben de tener en cuenta para elaborar sus PNR, así por ejemplo, las medida de conservación de los espacios de la Red Natura 2000, las estrategia marinas establecidas con miras a lograr un buen estado mediambiente de todas las regiones marinas, las medidas de conservación y ordenación adoptadas en el marco de la PPC, etc.

El RRN remite en su art. 14, 16 a los Estados miembros para que en la elaboración de sus PNR puedan incorporar algunos de los ejemplos de medidas de restauración que se contienen en el anexo VII. Así, por ejemplo, limitándonos el medio marino: “Reducir al mínimo los efectos negativos de las actividades pesqueras en el ecosistema marino, por ejemplo, utilizando artes con menor impacto en el fondo marino” (apartado 25); “Restaurar importantes zonas de desove y cría de peces” (apartado 26); “Proporcionar estructuras o sustratos para fomentar la vuelta de la vida marina en apoyo a la restauración de arrecifes de corales, ostras o cantos” (apartado 27); “Restaurar los prados de vegetación marina y los bosques de kelp mediante la estabilización activa del fondo marino, reduciendo y, en la medida de lo posible, eliminando las presiones o mediante la propagación y plantación activas” (apartado 28); “Restaurar o mejorar el estado de la población de especies típicas autóctonas características, que es vital para la ecología de los hábitats marinos, llevando a cabo medidas activas o pasivas de restauración, como la introducción de juveniles.” (apartado 30); etc.

También se fomenta por el RRN las sinergias entre varios países sobre sus planes nacionales a través de la colaboración y en el caso de ecosistemas o regiones marinas compartidas (cfr. art. 14, 17 y 18).

El proceso de elaboración del PNR debe ser “abierto, transparente, inclusivo y eficaz” y para que “el público, incluidas todas las partes interesadas pertinentes, pueda participar en dicha elaboración con la suficiente antelación y de forma efectiva” (cfr. art. 14,20).

En cuanto al contenido del PNR -al que se dedica el art. 15 del RRN-, sobre su aspecto temporal, como establece con carácter general el art. 15,1: “abarcará el periodo que concluye en 2050, con plazos intermedios correspondientes a los objetivos y obligaciones”, es decir, plazos intermedios al 2030, 2040 y 2050.

En cuanto a su contenido específico, el art. 15,7 prevé que la Comisión -asistida para tal fin por la Agencia Europea de Medio Ambiente- establezca, mediante actos de ejecución, un “modelo uniforme de plan general”. No obstante, a lo largo del art. 15,3 se citan un gran número de elementos que cada Estado miembro debe incluir en sus respectivos PNR, como, por ejemplo, la “cuantificación de las zonas que deben restaurarse”, la “descripción de las medidas de restauración previstas o establecidas”, una “indicación de las medidas destinadas a mantener en buen condición los tipos de hábitats”, el “inventario de las barreras existentes y las barreras” que ha de eliminarse, una “descripción de los indicadores de los ecosistemas”, el “calendario para la aplicación de las medidas de restauración”, el “seguimiento de las zonas sujetas a restauración”, una “indicación de las disposiciones para garantizar los efectos continuos (...) derivados de las medidas de restauración”, las “repercusiones socioeconómicas previsibles y los beneficios estimados de la aplicación de las medidas de restauración”, las “necesidades de financiación estimadas para la ejecución de las medidas de restauración” y “una indicación de las subvenciones que afecten negativamente el cumplimiento de las obligaciones y los objetivos”, “un resumen del proceso de elaboración y establecimiento del plan”, etc.

Han de constar en el plan nacional las medidas de restauración (medidas de conservación y ordenación) que los Estados adopten en el marco de la política común pesquera, incluidas las medidas de conservación de las recomendaciones conjuntas que un Estado tenga la intención de iniciar (cfr. art. 15,4). Y, cuando proceda, “el plan nacional incluirá una visión general de las consideraciones relativas a la diversidad de situaciones de las distintas regiones” (cfr. art. 15,6).

La presentación del proyecto del PNR por cada Estado miembro deben presentarse ante la Comisión antes del 1 de septiembre de 2026 (cfr. art. 16). Y, una vez presentado ante la Comisión, ésta debe evaluarlo -en estrecha colaboración con el respectivo Estado miembro- en el plazo de seis meses a

partir de la fecha de su presentación (cfr. art. 17,1). La valoración de la Comisión comprende -como prevé el art. 17,2-: su conformidad sobre el contenido del plan de acuerdo con el art. 15, su “idoneidad para conseguir los objetivos y cumplir las obligaciones” correspondientes y su “contribución a los objetivos y metas generales” que se propone el RRN (cfr. art. 17,2). Una vez realizada la evaluación, la Comisión “podrá dirigir sus observaciones sobre el proyecto del plan nacional en un plazo de seis meses a partir de la fecha de recepción del plan” (cfr., art. 17,4); y los Estados miembros tendrán en cuenta las observaciones de la Comisión en sus planes definitivos (cfr. art. 17,5). Finalmente, en el plazo de seis meses desde la recepción de las observaciones de la Comisión el “Estado miembro finalizará, publicará y presentará a la Comisión su plan de restauración” (cfr. art. 17,6).

Cada Estado miembro revisará -y en su caso, “reformulará su plan nacional e incluirá medidas complementarias- “a más tardar el 30 de junio de 2032 y, posteriormente, el 30 de junio, como muy tarde (cfr. art. 19,1). La revisión ha de tener en cuenta los progresos realizados en la aplicación de los planes, las mejores informaciones científicas y los mejores conocimientos disponibles...” (cfr. art. 19,1).

Por último, en el supuesto de medidas de restauración en los ecosistemas marinos, el art. 18 del RRN prevé una serie de medidas de coordinación; medidas que ha de adoptarse en el marco de la política pesquera común y con los demás requisitos y condiciones recogidos en el Reglamento (UE) nº 1380/2013, incluida la presentación de las correspondientes recomendaciones conjuntas (cfr. art. 18, 2 y 3). En esta dirección, Olmos Carbonell (2024) concluye que en la aplicación de la restauración ambiental marina hay que tener en cuenta sus sinergias con otros programas y, en particular, con los programas, estrategias y políticas relativos a la “economía azul” y sus propios objetivos, contando para ello con los sujetos y sectores económicos que están implicados en la misma.

El profesor Sanz Rubiales (2024), al final de su trabajo plantea un importante reto en la aplicación de la nueva política de restauración ambiental de la Unión Europea: “el Reglamento no prevé la forma de financiar este ambicioso objetivo: únicamente impide su financiación a través de la PAC o de la PAC, aunque promueve la utilización de instrumentos de mercado y de su redacción se deduce el protagonismo público en dicha financiación: son los Estados miembros los responsables de ella”.

4. Conclusiones

El considerable fracaso de las medidas de conservación y prevención contenidas en la política de protección de la biodiversidad marina de la Unión Europea han llevado a poner de manifiesto la importancia y la urgencia en la aplicación de las medidas de restauración ambiental. La técnica restaurativa era ya conocida a escala internacional desde la aprobación de la Convención de Diversidad Biológica, sin embargo el impulso dado por la Comunidad internacional y científica a la restauración en los últimos años ha sido decisivo para su recepción en la política de la Unión Europea.

En esta dirección la publicación del “Pacto Verde Europeo” en 2019 y la aprobación en 2020 de la “Estrategia de Biodiversidad de aquí a 2030” han sido claves para la promoción por la Comisión del nuevo Reglamento de Restauración de la Naturaleza y su aprobación en 2024 tras un tortuoso y polémico proceso de negociaciones.

La nueva regulación introduce unos ambiciosos objetivos de restauración que, en el caso de las zonas marítimas han de aplicarse al menos en el 20% de superficie antes del 2030 y, posteriormente, han de aplicarse a todos los ecosistemas que necesiten restauración de aquí al 2050.

Para la aplicación de los objetivos, el nuevo Reglamento establece específicas obligaciones de restauración que abarcan hasta el año 2050. Y, aunque el reglamento tiene aplicación directa sobre los Estados miembro, su efectiva aplicación depende de la aprobación por los Estados de sus respectivos “planes nacionales de restauración”.

En el supuesto de la restauración de los ecosistemas marinos y costeros -que se contemplan específicamente entre los ecosistemas objeto de la protección del Reglamento-, pese a su importancia para la economía y por los servicios ecosistémicos que prestan, existen pocas experiencias al respecto. Y para la elaboración de los planes nacionales de recuperación de los ecosistemas marinos y costeros y para la determinación de las concretas medidas que deben adoptarse, parece especialmente oportuna la participación de todos los sectores socioeconómicos que concurren sobre esos espacios.

Finalmente, como se exige por el propio Reglamento, resulta necesario tener en cuenta las sinergias de los planes de recuperación con otras estrategias y planes que concurren sobre los mismos espacio, y, en particular, la política de “economía azul”. No obstante, la gran importancia de la nueva política restaurativa de la Unión Europea se plantean dudas acerca de la financiación que requiere para su desarrollo y efectiva aplicación, que, en todo caso, va a depender fundamentalmente de la voluntad de los Estados miembros.

Referencias bibliográficas

- Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) (2020): *Estado de la Naturaleza. Resultados de los informes elaborados en el marco de las Directivas sobre la Naturaleza 2013-2018*, Copenhague,
- Conde Antequera, J.: (2004) *El deber jurídico de restauración ambiental*, Comares, Granada
- Sadeleer, N. (2023): “El nuevo Pacto por la naturaleza de la UE. De la ambición a la realidad”, *Actualidad Jurídica Ambiental* nº 136, de 17 de julio de 2023
- García-Ureta, A. : (2015) “Protección de la biodiversidad, mercados, compensación por daños y bancos de conservación”, *Revista de Administración Pública*, nº 198, pp.297-330
- García-Ureta, A. y Soro Mateo, B. (2023): *Restauración y compensación ecológica : la perspectiva jurídica*, Iustel, Madrid
- Olmos Carbonell, E. (2024): « Marine restoration and blue economy in the European Union after the approval of the Nature Restoration Regulation », *Revista de Ordenación del Sector Marítimo*, 2 (2), pp. 1-21
- Organisation for Economic Cooperation and Development (2016): *The ocean economy in 2030*, OCDE Publishing, Paris
- Sánchez González, J. (2023): *Evaluación ambiental adecuada y Red Natura 2000*, Aranzadi, Cizur Menor.
- Society for Ecological Restoration (2022) : *Declaration on the European Commission proposal for a regulation on nature restoration*, Alicante, 9 de septiembre de 2022
- Sanz Rubiales, I. (2024): “El futuro Reglamento de Restauración: un instrumento para el impulso de la conectividad”, en *Conectividad Ecológica y Derecho*, M. Uriarte Ricote, B. Lozano Cutanda e I. Sanz Rubiales (Coords.), Tirant lo Blanch, Valencia, pp. 57-93

Soro Mateo, B. (2023): “Restauración, reposición y restitución del dominio público natural”, en *Restauración y compensación ecológica: la perspectiva jurídica*, A. García Ureta y B. Soro Mateo (Coords.), Iustel.

Telesetsky, A., Cliquet, A. & Akhtar-Khavari, A. (2017): *Ecological Restoration in International Environmental Law*. Routledge, London & New York).

Diseño de estructuras flotantes antirreflejantes de ecohormigón

Design of antireflective floating structures with green concrete

Gloria Argente Garrido^a; Marta Velasco Carrau^a, Miguel Figueres Moreno^a y Joaquín M. Garrido Checa^a

^aIngeomar (IGM): gargente@ingeomar.es, jgarrido@ingeomar.es, mfigueres@ingeomar.es, martavelasco@ingeomar.es.

How to cite: Argente Garrido, G.; Velasco Carrau, M.; Figueres Moreno, M. & Garrido Checa, J. M. (2024). Diseño de estructuras flotantes antirreflejantes de ecohormigón. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

Most common concrete maritime structures have a relatively low environmental value, as they are artificial elements that are inhospitable to the surrounding marine communities. LIVINGREEFS project develops a new concept of bioreceptive green concrete from natural waste materials such as rice straw fiber or volcanic ash, in order to reduce carbon footprint of concrete and increase the colonization potential of marine species on the surface. In addition to modifications in concrete composition, changes are proposed in the micro and macro design of maritime structures, incorporating perforations and internal cavities. Based on this environmentally sustainable structural concept, a floating caisson with an innovative design of interconnected open cells is developed, which improves integration into the natural marine environment and acting as an antireflective structure against wave action.

Keywords: caisson, antireflective structure, bioreceptive concrete, floating structure

Resumen

Las estructuras marítimas de hormigón convencionales cuentan con un valor ambiental reducido ya que se trata de elementos artificiales e inhóspitos para las comunidades marinas que lo rodean. El proyecto LIVINGREEFS desarrolla un nuevo concepto de ecohormigón bioreceptivo a partir de residuos naturales como la fibra de paja de arroz o las cenizas volcánicas, de modo que permita reducir la huella de carbono del hormigón y aumente la capacidad colonizadora de especies en superficie. Además de un cambio en la composición del hormigón, se plantean modificaciones en el micro y macrodiseño de las estructuras marítimas creando orificios y cavidades interiores. Siguiendo este concepto de estructura medioambientalmente sostenible, se desarrolla un cajón tipo flotante con un diseño innovador de celdas abiertas comunicadas que mejora su integración en el medio marino natural y funciona como estructura antirreflejante frente a la acción del oleaje.

Palabras clave: cajón, estructura antirreflejante, hormigón bioreceptivo, estructura flotante

1. Introducción

Las infraestructuras marítimas de hormigón convencionales se diseñan con el objetivo de cumplir los requisitos técnicos y optimizar los recursos necesarios. No obstante, habitualmente se trata de estructuras con un valor ambiental reducido, ya que, desde el punto de vista ambiental, estas infraestructuras suelen ser elementos inhóspitos o poco acogedores para la vida marina.

En esta línea de investigación, se desarrolla el proyecto de I+D+i LIVINGREEFS, donde se introduce una nueva variable en el diseño de las infraestructuras marítimas, la ecología. De este modo, se pretende atraer el asentamiento y el crecimiento de especies marinas sobre la propia estructura de hormigón, generando infraestructuras marítimas activas, mejor integradas dentro del medio marino natural.

Como nuevo concepto de diseño sostenible, se plantea un cambio en el hormigón portuario utilizando un hormigón con huella de carbono reducida, denominado ec hormigón, que incluye en su composición materiales reciclados considerados como residuos naturales. Estos residuos incorporados en el hormigón pueden reducir significativamente la cantidad necesaria de cemento Portland en la mezcla, que es el mayor responsable de la alta huella de carbono del hormigón. Al mismo tiempo, estas infraestructuras actuarán activamente en la promoción del crecimiento de la flora y fauna marina gracias a un diseño innovador y un mejor acabado superficial.

Alcanzar un cambio en la apariencia y el funcionamiento de nuestros puertos y cosas requiere de una ampliación del conocimiento sobre la mejora de las infraestructuras a base de hormigones ecológicos y tomando en consideración el carácter biológico del entorno, facilitando así la implementación de tecnologías de construcción medioambientalmente sostenibles.

LIVINGREEFS es un proyecto estratégico en cooperación, financiado por el AVI o Agencia Valenciana de la Innovación, en el que participan empresas y centros de investigación de diferentes ámbitos: Ingeomar, Rover Maritime, Instituto de investigación en medioambiente y ciencia marina de la Universidad Católica de Valencia (IMEDMAR-UCV), el Instituto de ciencia y tecnología de hormigón ICITECH de la Universitat Politècnica de València (UPV) y la Universitat Jaume I de Castellón (UJI).

2. Objetivos

El proyecto LIVINGREEFS tiene como objetivo principal el desarrollo y la validación de un ec hormigón u hormigón sostenible aplicable a estructuras marítimas con un enfoque doble. Por una parte, se trata de un hormigón basado en el empleo de subproductos agrícolas o industriales y de materias naturales con necesidad de gestión. De esta manera, actuando sobre la composición del hormigón es posible disminuir su huella de carbono y, consecuentemente, reducir el impacto ambiental.

Por otra parte, para reforzar el proceso de colonización de especies se plantean actuar sobre el microdiseño superficial o rugosidad del hormigón y sobre el macrodiseño de las infraestructuras, creando cavidades y orificios específicos que favorezcan el asentamiento y crecimiento de vida marina dentro de un entorno “ecofriendly”, generando así un impacto biológico positivo.

Con todo ello, LIVINGREEFS cuenta con los siguientes objetivos específicos:

- **Objetivo científico-tecnológico:** desarrollar un nuevo concepto de infraestructuras portuarias basadas en el empleo de un ec hormigón con huella de carbono reducida gracias a la introducción de materiales reciclados o subproductos en su composición.

- **Objetivo medioambiental:** mejorar el crecimiento y las condiciones de la vida marina en las zonas portuarias y, en concreto, en el interior de las infraestructuras, evaluando la capacidad de captura de carbono de estas estructuras portuarias gracias a un diseño y a una superficie adaptada a las necesidades biológicas.
- **Objetivo social:** promover la conciencia social para alentar a las autoridades portuarias y entidades privadas de la necesidad de adoptar este tipo de soluciones sostenibles ofreciendo aplicaciones concretas validadas.
- **Objetivo industrial:** aumentar la competitividad en el sector de la construcción marítima mediante infraestructuras marítimo-portuarias adaptadas al cumplimiento de los requisitos medioambientales marcados en las estrategias europeas.
- **Objetivo económico:** reducción de los costes de construcción y mantenimiento de las infraestructuras marítimo-portuarias.

3. Desarrollo de la innovación

Para alcanzar los objetivos del proyecto, se definen dos vías de estudio. Por un lado, se desarrolla experimentalmente un nuevo ecohormigón utilizando materiales reciclados, fabricando probetas o muestras en distintas dosificaciones y llevando a cabo un estudio comparativo de estas alternativas mediante monitorización de las muestras en condiciones de inmersión submarina.

Al mismo tiempo, se estudian diferentes vías de aplicación del ecohormigón dentro del campo de las estructuras marítimas más comunes, entre ellas cajones de hormigón armado, bloques para mantos de diques en talud, muertos de fondeo o estructuras flotantes de abrigo destinadas a la acuicultura. La validación del ecohormigón aplicado a este tipo de estructuras se desarrolla mediante la construcción de prototipos que simulan algunos elementos estructurales aislados, posteriormente ensayados mediante inmersión continua y controlada en un entorno marino real.

3.1. Composición del Ecohormigón

Como característica adicional al hormigón convencional, el nuevo ecohormigón a desarrollar debe ser capaz de promover la colonización de especies marinas sobre su superficie, es decir, ser un material bioreceptivo. El concepto de bioreceptividad se define como la aptitud de un material a ser colonizado sin sufrir un bio-deterioro que sea desfavorable en su durabilidad. La bioreceptividad es un parámetro variable en el tiempo, principalmente por el crecimiento continuo de los organismos, el desgaste y comportamiento no lineal del material, las condiciones climáticas y la contaminación atmosférica. Desde finales del siglo XX, se han llevado a cabo estudios, investigaciones y ensayos de laboratorio e in-situ, con el propósito de descubrir materiales propicios para la colonización de microorganismos. Durante este proyecto se ha profundizado en la influencia de diferentes propiedades y materiales sobre la capacidad colonizadora del hormigón, introduciendo como novedad el uso de adiciones de origen agrícola como la paja de arroz y productos naturales como las cenizas volcánicas.

3.1.1. Reutilización de subproductos agrícolas

El arroz es uno de los cereales más importantes del mundo, especialmente en Asia, donde China e India concentran el 50% de la producción mundial. En España se producen más de 800.00 t/año de arroz, siendo la Comunitat Valenciana la responsable de cerca del 14% de la producción nacional. La paja de arroz es uno de los residuos más difíciles de gestionar ya que se generan en un periodo muy corto grandes cantidades de material a retirar. Como alternativa a la quema de la paja y a la contaminación que esta produce, este proyecto plantea su gestión mediante el uso como fibra de

refuerzo de hormigón en su estado natural (FPA) y como adición puzolánica en forma de ceniza de paja de arroz (CPA).



Fig. 1. Residuos de paja de arroz en la Albufera de Valencia (izq.) y fibras de paja de arroz en laboratorio (der.). Fuente: UJI

3.1.2. Uso de productos naturales de origen volcánico

El uso de materiales de origen volcánico como sustitución del cemento ha sido ampliamente estudiado en la literatura, con un efecto variable según el origen, el porcentaje de sustitución, la finura y de si están calcinadas o no. En este proyecto se plantea la utilización de ceniza volcánica procedente del volcán Cumbre Vieja en la isla de La Palma (Islas Canarias, España). En general, en base a la literatura y a los estudios experimentales realizados, se puede concluir que el uso de esta ceniza volcánica es factible para elaborar cementos de tipo II y IV, por lo que sería equivalente a una sustitución de cemento por ceniza en un porcentaje entre el 10 al 40%.



Fig. 2. Residuo volcánico Cumbre Vieja, La Palma (izq.) y ceniza volcánica molida en laboratorio (der.). Fuente: ICITECH-UPV

3.1.3. Uso de bacterias funcionales

Durante la última década, la aplicación de bacterias para la construcción se ha convertido en un tema de investigación a nivel mundial. Al igual que para el cuerpo humano, los microorganismos pueden tener efectos patógenos o probióticos y, aplicado a los materiales de construcción, su presencia puede producir una degradación o algunas mejoras en el material. En este caso, se ha estudiado un tratamiento superficial del ecohormigón utilizando bacterias del tipo *bacillus* para bioconsolidación (ACF-32).



Fig. 3. *Proceso precipitación de carbonato cálcico (izq.) y productos biológicos empleados ACF-32 y fusvicur (der.). Fuente: UJI*

3.2. Monitorización de probetas en entorno real

Para llevar a cabo la investigación, se han fabricado una serie de probetas de pequeño tamaño con distintas composiciones del ecohormigón a estudiar, ubicándolas posteriormente en un entorno marino real mediante inmersión submarina y controlada para poder realizar estudios comparativos de la capacidad de colonización de cada muestra tipo.

En una primera fase, en la UJI se desarrollan ecohormigones con adición de 10 kg/m³ fibra de paja de arroz (FPA) y con tratamiento superficial con bacterias funcionales (ACF-32). Se fabrican un total de 4 series (tipo 1 a 4) de 20 probetas cada una de tamaño 5x7x12 cm, con un acabado rugoso en todas sus caras para favorecer el proceso de colonización superficial. De cada una de las series, 18 probetas son destinadas a estudio bajo la inmersión submarina, mientras que las otras dos muestras se destinan a ensayos de resistencia mecánica y control en laboratorio



Fig. 4. *Materiales empleados con FPA (izq.) y moldes con acabado rugoso (der.). Fuente: UJI*

El estudio y desarrollo de ecohormigones con cenizas de paja de arroz (CPA) y cenizas de origen volcánico (CVLP), fue realizado en el instituto ICITECH-UPV. Se fabricaron probetas de 14,5x12,0x4,0 cm con dosificaciones variables de 15, 35 y 55% con CVLP y con 15 y 30% con CPA. En el caso de CVLP se elaboraron 20 bloques de control (tipo 5) y 20 bloques de cada una de las series (tipo 6 a 8), entregando para su inmersión en entorno real 18 bloques y almacenando 2 bloques en la UPV para su seguimiento y control. En el caso de CPA se elaboraron 16 bloques de control (tipo 9) y 16 bloques de cada tipología (tipo 10 y 11), tomando 1 bloque por serie en las

dependencias de la UPV. En todas las series fabricadas se aumentó la rugosidad de la superficie del hormigón de las probetas para mejorar la textura superficial y aumentar el proceso de colonización marina. Adicionalmente, se fabricaron 4 series de probetas de hormigón cilíndricas de 10x20 cm con las mismas dosificaciones que las prismáticas tipo CVLP, sumergidas en entorno real durante un año completo para estudiar la evolución mecánica del hormigón curado bajo condiciones de agua marina y comparar su evolución con las probetas curadas en ambiente de laboratorio.

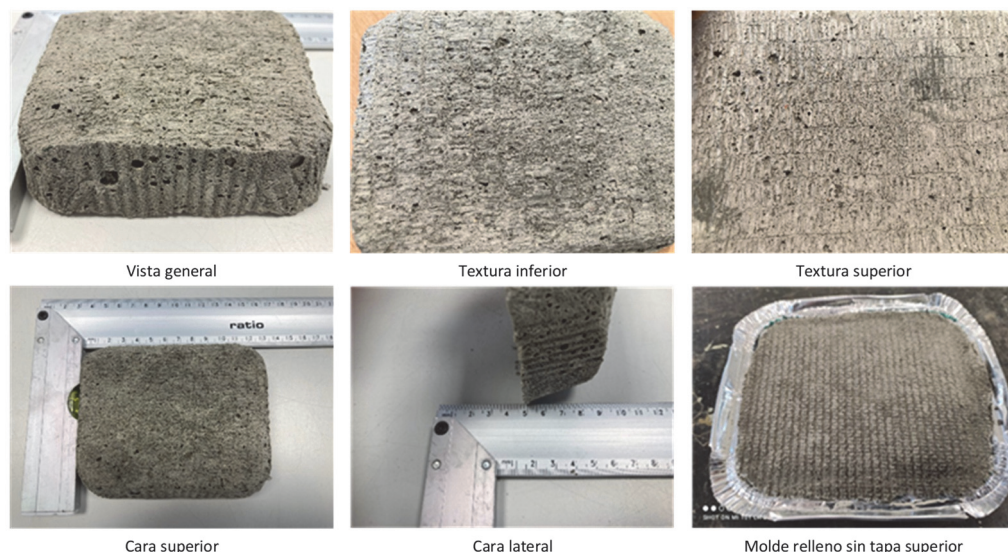


Fig. 5. *Imágenes de los bloques preparados con CVLP y CPA Fuente: ICITECH-UPV*

La siguiente tabla, resume el número de probetas y tamaño de cada una de las tipologías de ecohormigón estudiado.

Tabla 1. *Definición de las tipologías de probetas ensayadas.*

Tipo	Composición ecohormigón	Núm.	Inmersión	Tamaño (cm)
1	Hormigón de Referencia (HR1)	20	18	5x7x12
2	HR1 + ACF-32	20	18	5x7x12
3	HR1 + 10 kg/m3 FPA	20	18	5x7x12
4	HR1+ 10 kg/m3 FPA + ACF-32	20	18	5x7x12
5	Hormigón de referencia (HR2)	20	18	14,5x12,0x4,0
6	HR2 con 15% CVLP	20	18	14,5x12,0x4,0
7	HR2 con 35% CVLP	20	18	14,5x12,0x4,0
8	HR2 con 55% CVLP	20	18	14,5x12,0x4,0
9	Hormigón de referencia (HR3)	16	15	14,5x12,0x4,0
10	HR3 con 15% CPA	16	15	14,5x12,0x4,0
11	HR3 con 30% CPA	16	15	14,5x12,0x4,0
CC	Probeta de hormigón de control	3	3	Cilíndrica 10x20
C15	Probeta 15 %CVLP	3	3	Cilíndrica 10x20
C35	Probeta 35 %CVLP	3	3	Cilíndrica 10x20
C55	Probeta 55 %CVLP	3	3	Cilíndrica 10x20

Como resultado final, se instalan un total de 201 probetas de distintas composiciones de ecohormigón en la estación submarina del IMEDMAR-UCV en Calpe (Alicante, España), distribuidas en estructuras de PVC totalmente sumergidas en el fondo marino. En una primera fase, se instalaron 6 módulos con 3 réplicas de cada uno de los tipos 1 a 8 y, con un desfase de dos meses, se instalaron otros 5 módulos con 3 réplicas de los tipos 9 a 11. A lo largo de un año completo y cada dos meses desde su inmersión, se realizaron sucesivas extracciones de probetas de ambos módulos tipos, completando un total de 33 probetas para analizar por extracción, tres de cada tipo de dosificación.

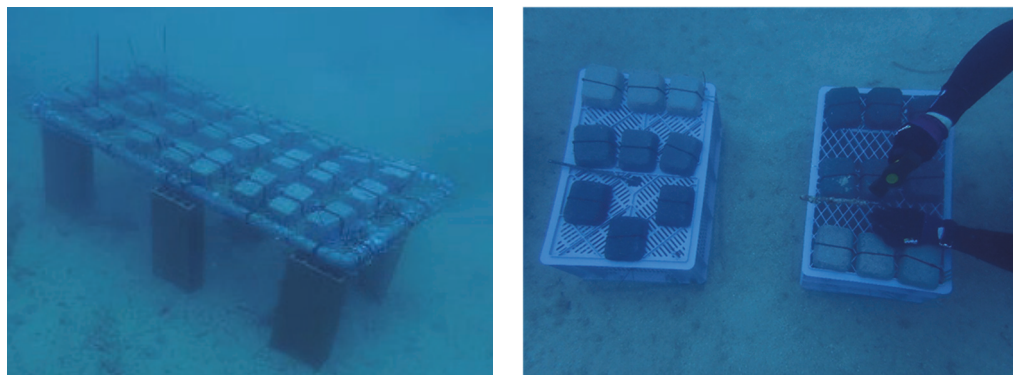


Fig. 6. Módulos instalados para tipos 1 a 8 (izq.) y tipos 9 a 11 (der.) Fuente: IMEDMAR-UCV

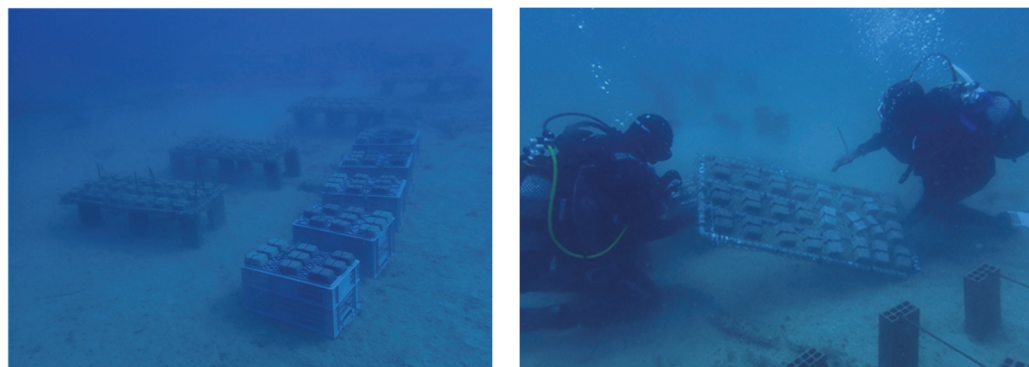


Fig. 7. Vista general de la zona de experimentación submarina (izq.) y operaciones de extracción (der.) Fuente: IMEDMAR-UC.

Una vez extraídas, sobre las muestras se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio por el IMEDMAR-UCV:

- Medición periódica de los parámetros fisicoquímicos del entorno del experimento salinidad, temperatura, clorofila-a, pH y oxígeno disuelto a 20 m de profundidad.
- Análisis *de visu* de la sucesión ecológica de la flora y la fauna adherida a las probetas hasta el mayor rango taxonómico posible.
- Comprobación de la eficiencia ecológica de las probetas en función del cálculo del Carbono Orgánico Total (TOC).
- Caracterización de la fauna y flora establecida en las probetas mediante técnicas de análisis del DNA ambiental.

- Ensayos de resistencia mecánica (compresión) sobre las probetas cilíndricas de hormigón sumergidas un año completo en entorno real.
- Ensayos no destructivos para analizar el estado del hormigón tras la exposición en entorno real con respecto a elementos no sumergidos en entorno del laboratorio.
- Ensayos de resistencia mecánica (compresión), carbonatación y penetración de cloruros tras exposición a un ambiente agresivo marino simulado, en probetas de eco-hormigón con combinaciones predefinidas de los parámetros de interés.

Además, se llevó a cabo un completo registro fotográfico de las probetas tanto antes de la extracción como durante de la realización de los ensayos de laboratorio.

De forma global, los resultados de monitorización muestran una tendencia colonizadora constante en las probetas conforme iba aumentando el tiempo de la inmersión. El análisis comparativo en cuanto a colonización de organismos muestra resultados poco beneficiosos o destacables para las series 2, 3, 4, 9, 10 y 11. No obstante, las probetas de las series 6, 7 y 8 si se observan abundancias ligeramente mayores de ciertos organismos respecto a las probetas de referencia (tipo 5). Desde el punto de vista ecológico, las probetas 6 y 7 cuentan con los mejores resultados, posiblemente por los cambios en el pH del sustrato que pueden generar la adición de cenizas volcánicas, siendo suficiente con el 15% y el 35%.

En cuanto a los ensayos de resistencia mecánica a compresión realizados, los resultados concluyen que la hidratación bajo el mar produce un mejor desarrollo de la matriz cementante, lo que se traduce en mayores valores de resistencia y módulo de elasticidad.

3.3. Diseño y fabricación de prototipos

El proyecto contempla como objetivo final la aplicación del ecohormigón desarrollado a infraestructuras marítimas reales. Por este motivo, se analizan las ventajas potenciales del ecohormigón como material de construcción y las necesidades especiales a nivel de macrodiseño superficial que se requieren para favorecer el desarrollo de vida marina.

Como estructura innovadora, se plantea un cajón flotante de ecohormigón con cavidades o celdas abiertas comunicadas que permita, por un lado, funcionar como estructura de abrigo antirreflejante y, por otro, como entorno acogedor para la colonización y proliferación de la vida marina en su interior. En este contexto, se diseñan dos prototipos o estructuras capaces de reproducir una estructura flotante con orificios interiores y las paredes de un cajón convencional.

Para la primera aplicación se diseña un bloque cúbico flotante semisumergido con hormigón tipo UHPFRC (*Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*), de dimensiones exteriores 1x1x1 m y un espesor de 5 cm. El hueco interior se fabrica con láminas de poliestireno expandido, mejorando la flotabilidad, y con un codo dissipador de energía a mitad altura atravesando dos de las caras del cubo y fabricado en dos mitades, una con hormigón FPA y otra con 35% de CVLP (C35).

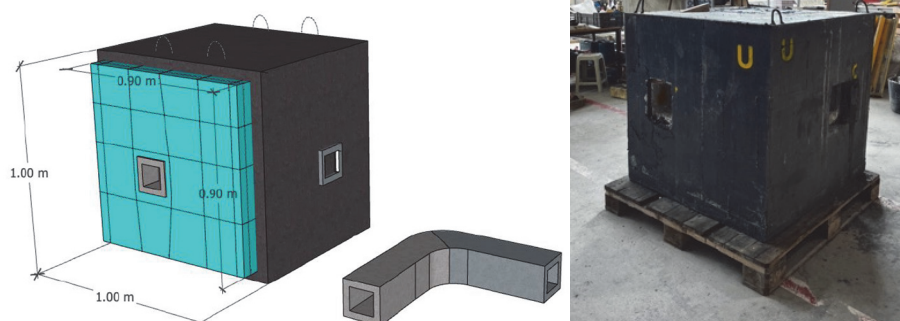


Fig. 8. Esquema y dimensiones del prototipo y codo dissipador de energía (izq.) y resultado final del prototipo de flotador (der.) Fuente: ICITECH-UPV

Para validar la segunda aplicación, se fabrican tres bloques cúbicos macizos de hormigón, de dimensiones 0,9x0,9x0,8 m, con una losa superior de 10 cm de espesor dividida en dos mitades donde se ubicará la lámina con la tipología de ecohormigón objeto de estudio. Además, las cuatro caras laterales accesibles se diseñan con orificios ciegos de distintos diámetros para analizar en ellos el crecimiento de especies marinas y las preferencias de selección de hábitat.

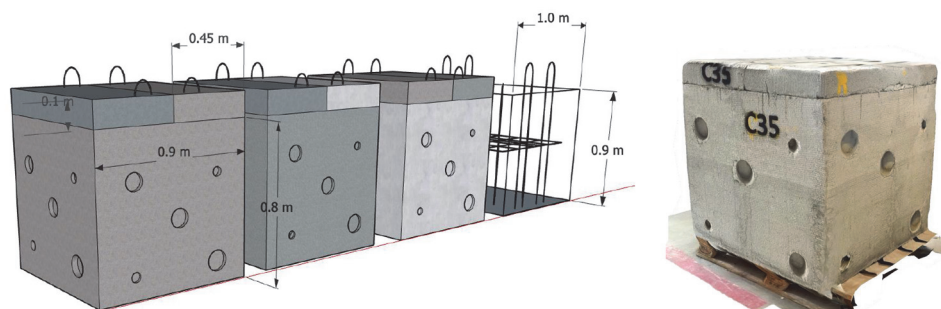


Fig. 9. Dimensiones y esquema de los bloques (izq.) y resultado final del prototipo de bloque 2 (der.) Fuente: ICITECH-UPV

La tabla 2 muestra la combinación de ecohormigones seleccionados para cada uno de los bloques prototipo que se fabricaron.

Tabla 2. Combinaciones de ecohormigones utilizados en cuerpo y láminas de los bloques prototipo.

Bloque	Cuerpo del bloque	Losa 1	Losa 2
1	Hormigón de referencia	Hormigón FPA	Hormigón CVLP 15%
2	Hormigón CVLP 35%	Hormigón CVLP 35%	Hormigón CVLP 15%
3	Hormigón FPA	Hormigón FPA	Hormigón de referencia

Finalmente, los prototipos son instalados junto al dique de Levante del Puerto de Sagunto (Valencia). Los 3 bloques macizos se instalaron en el fondo marino formando una línea paralela con el muelle y con una separación ente ellos de 3 a 4 m. De cada uno de los bloques fondeados se engancharon cadenas para la sujeción del bloque flotante central, quedando este en posición semisumergida.

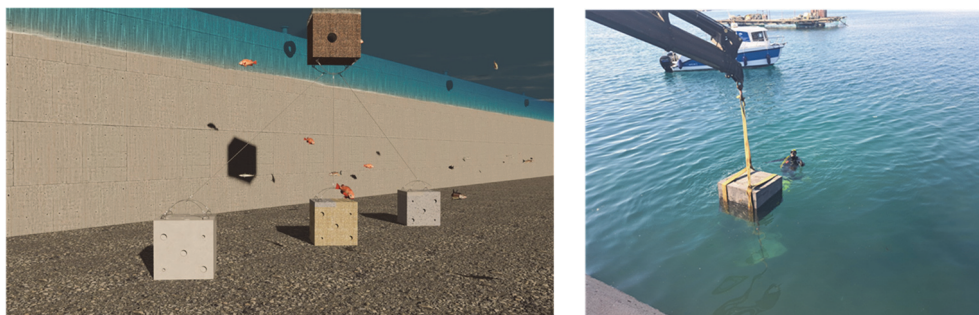


Fig. 10. Esquema de colocación de los prototipos (izq.) y colocación final del bloque flotante (der.)
Fuente: ICITECH-UPV

4. Resultados

4.1. Diseño de cajón flotante de ecohormigón

Dentro de la gran variedad de posibilidades que presenta el uso del ecohormigón en el campo de las estructuras marítimas, el proyecto se ha centrado en el diseño de un cajón flotante que, además de ejercer como estructura de protección, permita atenuar parte del oleaje incidente gracias al uso de cámaras interiores o celdas antirreflejantes. Como caso concreto de estudio, se diseña un cajón flotante tipo con un calado medio 10 m y con el objetivo de generar una zona de abrigo para instalaciones de acuicultura en un emplazamiento cercano al Puerto de Valencia,

Aprovechando la tecnología ya implementada para cajones convencionales, el nuevo cajón flotante cuenta con una geometría tipo de celdas cuadradas de 3x3 m con 5 filas en dirección manga y 15 filas en dirección eslora. En total, las dimensiones exteriores del cajón son de 48,50 m de eslora, 16,50 m de manga y 9 m de puntal. Cuenta con una solera de 40 cm de espesor, paredes exteriores de 35 cm y paredes interiores de 20 cm de espesor con chaflanes en cada una de las esquinas. En cuanto a la superestructura, se propone una losa de cierre superior de 20 cm en la mayor parte de la superficie, con un espaldón de 2,05 m altura ubicado en toda la longitud de la fila de celdas centrales y coronado a una cota de +4,66 m.

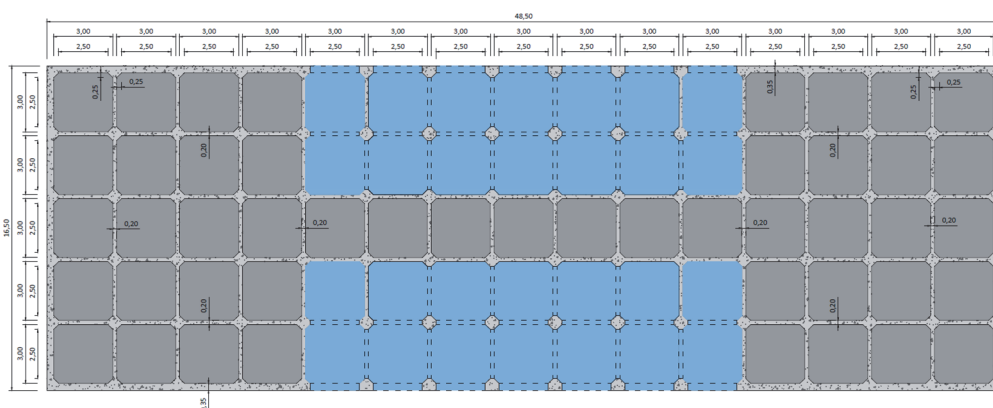


Fig. 11. Vista en planta del cajón tipo diseñado en zona superior con celdas o ventanas abiertas

Como principal novedad, LIVINGREEFS plantea el uso de parte del espacio interior de los cajones como cavidades que mejoren la integración con el hábitat natural y aumenten la proliferación y colonización de la vida marina. Para ello, se definen ventanas de 3,6 m de altura en un total de 28 celdas del cajón, 14 en lado mar y 14 en lado protegido, independizando en todo momento el lado expuesto a mar abierto. Estas ventanas se sitúan con un resguardo de 40 cm desde la parte superior o fuste del cajón y se independizan de las celdas inferiores mediante una losa intermedia de 50 cm de espesor, dejando el cajón dividido en dos zonas: una zona inferior de cámaras vacías y una zona superior central de celdas abiertas.

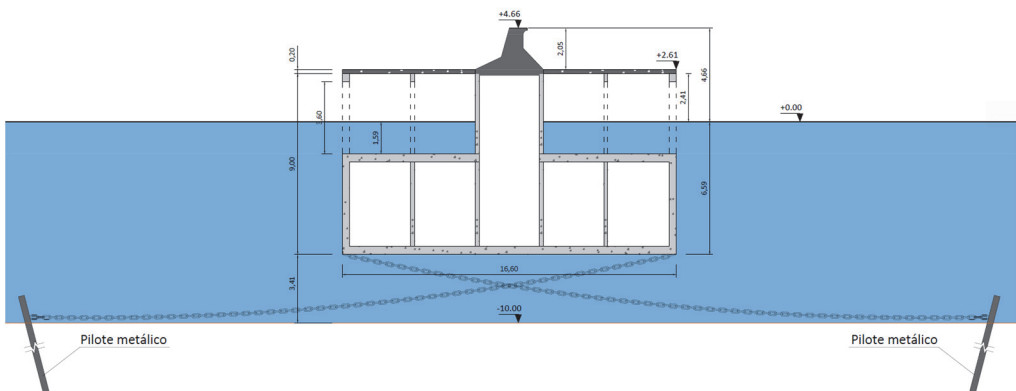


Fig. 12. *Sección tipo del cajón flotante de diseño*

Para mejorar el diseño desde el punto de vista ambiental de las celdas abiertas, se incorporan diferentes elementos lineales a modo pilares en el interior de las celdas expuestas de dimensiones 20x35 cm y 360 cm de altura, aumentando así la superficie útil disponible para la colonización de especies. En caso del lado expuesto al oleaje incidente, el propio diseño de las ventanas abiertas y la creación de subcircuitos en las cámaras interiores permite actuar al cajón como una estructura antirreflejante (Garrido y Medina, 2012), absorbiendo parte del oleaje incidente y reduciendo las ondas generadas por reflexión en la zona.

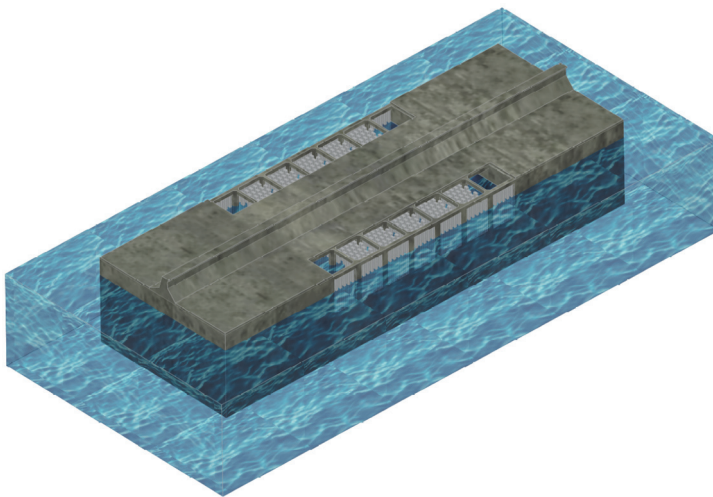


Fig. 13. *Modelo 3D del cajón flotante estudiado con celdas abiertas para aumento de la colonización*

Para verificar la estabilidad del cajón, se analiza el brazo estabilizador de la estructura para una flotación estable considerando la escora del cajón desde el lado expuesto al oleaje, verificando que el metacentro se encuentra por encima del centro de gravedad en flotación y que el radio metacéntrico es superior a 0,5 m. Como resultado, en el caso concreto de diseño, se obtiene una flotación estable con una altura de agua en el interior de las celdas de 1,59 m.

4.2. Modelización numérica del cajón tipo

Por otro lado, para analizar el comportamiento hidráulico de la estructura en condiciones estáticas, se realiza una modelización del cajón con IH2VOF, un modelo 2D desarrollado por el IH Cantabria (Losada, Lara et al., 2011), que permite estudiar a modo laboratorio virtual las fuerzas de presión sobre la estructura, la transmisión del oleaje por fondo y el rebase.

Se estudian dos casos específicos de estado de mar, en condiciones de marea baja y marea alta, basados en los datos disponibles de clima marítimo. Por un lado, se analiza un caso de régimen medio con una altura de ola de 2,17 m y periodo pico de 11,5 s. Por otro lado, se estudia un caso de diseño en régimen extremal asociado a un periodo de retorno de 237 años, con una altura de ola significativa de 4,65 m y un periodo pico asociado de 11,5 s.

Los principales resultados obtenidos confirman el diseño preliminar de la cota de coronación del cajón tipo, con un caudal de rebase medio estimado de $0,07 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ para el caso del temporal de diseño en bajamar (ver Fig. 14). Por otro lado, se evalúa la transmisión del oleaje por debajo del cajón mediante sensores numéricos antes y después del cajón, obteniendo valores máximos de alrededor del 27% del coeficiente de transmisión en todos los escenarios de estudio. La Fig.15 muestra la salida gráfica de las velocidades estimadas por el modelo en un instante de tiempo representativo para el caso del régimen medio en condiciones de pleamar, resultando un coeficiente de transmisión del 26,9% y un coeficiente de reflexión del 45,6%, verificando la capacidad de disipación de parte de la energía incidente gracias al diseño antirreflejante del cajón.

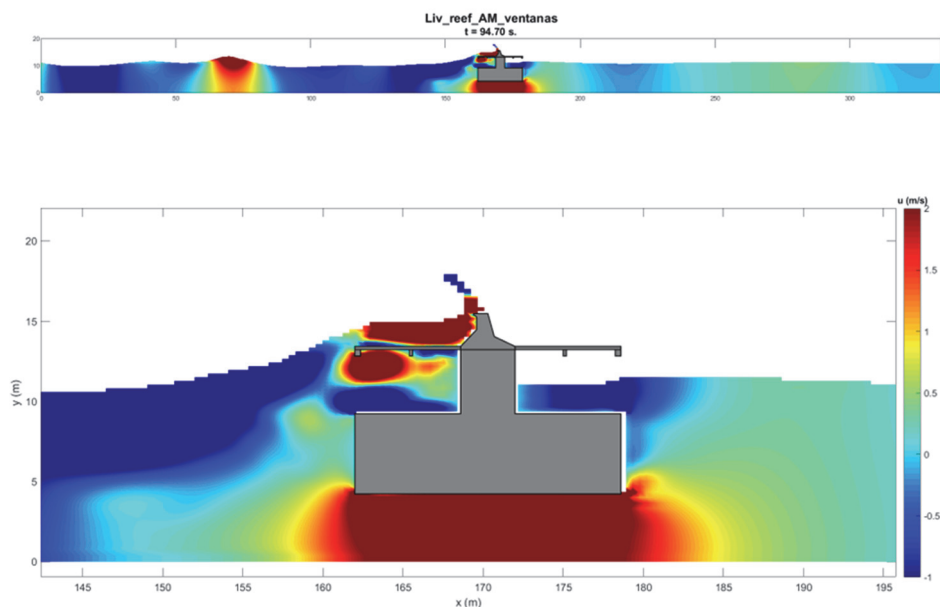


Fig. 14. Distribución de velocidades horizontales en el tiempo $t=94,7 \text{ s}$ a partir de la simulación de régimen extremo en pleamar - rebase del cajón

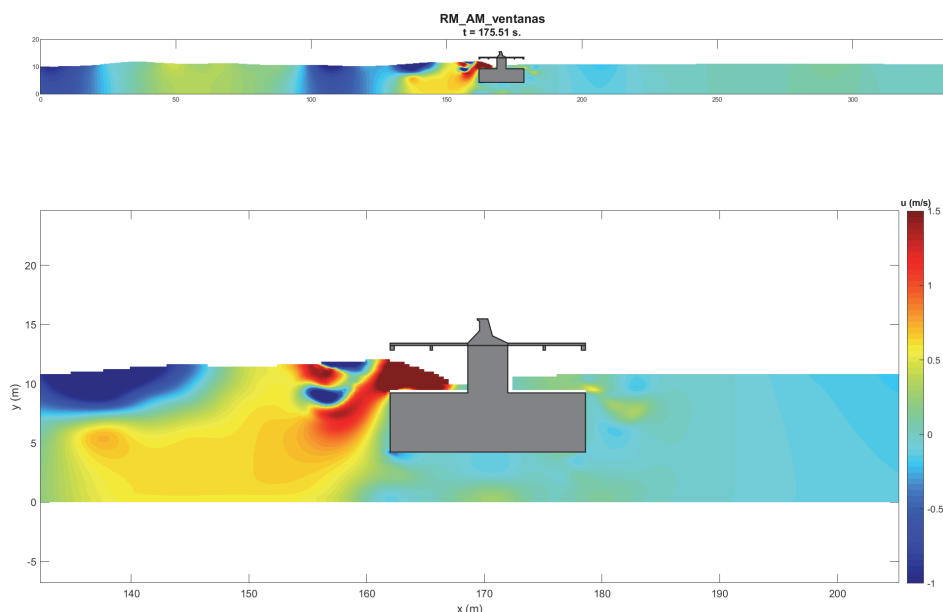


Fig. 15. Distribución de velocidades horizontales en el tiempo $t=175,51$ s a partir de la simulación del régimen medio en pleamar.

Tras el análisis de los resultados del proyecto, las estructuras tipo dique-cajón flotante presentan ventajas competitivas desde el punto de vista técnico frente a estructuras convencionales en zonas con suelos de baja capacidad portante en los estratos superiores o en casos donde existen elevadas profundidades o zonas de profundidad muy variable. Desde el punto de vista ambiental, los cajones flotantes permiten reducir el impacto visual con una menor afección a la línea del horizonte, sobre todo en zonas con elevadas carreras de marea. Además, al no encontrarse en contacto con el fondo marino, reducen la afección medioambiental en lo referido a ocupación del fondo y, consecuentemente, la destrucción de las biocenosis bentónicas que lo habitan. Por el mismo motivo, presentan una menor interferencia con las corrientes marinas y al transporte de sedimentos, mejorando la capacidad de renovación de las aguas interiores y sin ejercer de barrera completa al paso de la vida marina.

5. Conclusiones

El proyecto LIVINGREEFS plantea un cambio de la composición del hormigón, aumentando su bioreceptividad y reduciendo su huella de carbono mediante el uso del residuo de la paja de arroz, cenizas volcánicas y la adición de bacterias funcionales. Para ello, se lleva a cabo un estudio experimental comparativo en detalle de las distintas alternativas de ecohormigón mediante la fabricación de probetas ensayadas en condiciones de inmersión submarina para analizar sus características y el grado de colonización de especies. Los resultados comparativos muestran una capacidad bioreceptiva de las muestras favorable y constante a lo largo del tiempo, siendo el ecohormigón con cenizas volcánicas con una adición de entre el 15 y el 35% los que presentan los mejores resultados.

Como aplicación de este concepto de ecohormigón, se diseña un nuevo cajón tipo flotante que, además de ejercer como estructura de protección, mejora la integración de la estructura dentro del entorno marino gracias al conjunto de celdas abiertas que permite la colonización de especies marinas en su interior. Además, las ranuras de la pared expuesta al oleaje permiten aumentar la capacidad antirreflejante del cajón, reduciendo en la zona el oleaje generado por reflexión. Para validar esta estructura experimentalmente se desarrollan prototipos reducidos que simulan tanto la estructura flotante como las paredes de un cajón, y se someten a la inmersión continua dentro de un entorno portuario.

Por otro lado, el diseño se verifica mediante la reproducción del cajón tipo con el modelo numérico IH2VOF, estimando las presiones ejercidas sobre el cajón, el caudal de rebase y la transmisión del oleaje el fondo del cajón a modo de laboratorio virtual. Como resultado, se estima una transmisión máxima del oleaje incidente del 27%, lo que verifica la capacidad antirreflejante del cajón tipo diseñado.

Agradecimientos

Los autores agradecen la concesión de ayuda por parte de la Agència Valenciana de la Innovació (AVI) al proyecto LIVINGREEFS INNEST/2022/4, desarrollado en colaboración con las empresas Rover Maritime, Universitat Politècnica de València UPV-ICITECH, Universidad Católica de Valencia UCV-IMEDMAR y Universitat Jaume I UJI.

Referencias bibliográficas

- EurOtop (2016). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com.
- Garrido, J.M. and Medina, J.R., 2012. New neural network-derived empirical formulas for estimating wave reflection on Jarlan-type breakwaters. Coastal Engineering. Volume 62, April 2012, Pages 9–18.
- PIANC (1994). Floating breakwaters, a practical guide for design and construction. Report of Working Group nº13 of the Permanent Technical Committee II. Supplement to bulletin nº 85
- PUERTOS DEL ESTADO (2006) *Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias*
- PUERTOS DEL ESTADO (2012) R.O.M. 2.0-11: Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre. Criterios generales y factores de proyecto.
- Lara, J.L., Losada, I.J., Maza, M. y Guanche, R. (2011). Breaking solitary wave evolution over a porous underwater step. Coastal Engineering 58, 837-850.

Integración de AI, ML y modelización numérica para el mantenimiento predictivo en diques de escollera: aplicación a la costa Cantábrica

Integration of AI, ML and numerical modeling for predictive maintenance in rubble-mound breakwaters: application to the Cantabrian coast

Mireia López Paredes^a, Corrado Altomare^a, Bonaventura Tagliafierro^a, Manuel Viñes^a, Xavier Gironella^a, Antonio Tomas^b, Cesar Vidal^b, Iván Martínez-Estévez^c, José M. Domínguez^c, Alejandro Crespo^c, Moncho Gómez-Gesteira^c, Lohitzune Solabarrieta^d, Delia Regueira Muñiz^b, Manuel González^d, Mario Hernaez^c y Agustín Sánchez-Arcilla^a

^aUniversitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech, mireia.lopez.paredes@estudiantat.upc.edu.

^bInstituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. ^cUniversidade de Vigo. ^dAZTI.

^eAutoridad Portuaria de Bilbao

How to cite: López Paredes, M.; Altomare, C.; Tagliafierro, B.; Viñes, M.; Gironella, X.; Tomas, A.; Vidal, C.; Martínez-Estévez, I.; Domínguez, J. M.; Crespo, A.; Gómez-Gesteira, M.; Salabarrieta, L.; Regueira Muñiz, D.; Gonzalez, M.; Hernaez, M. & Sánchez-Arcilla, A. (2024). Integración de AI, ML y modelización numérica para el mantenimiento predictivo en diques de escollera: aplicación a la costa Cantábrica. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

This project's main goal is to develop a machine learning model based on Bayesian Updating to predict wave overtopping discharges for rubble mound breakwaters. The research includes creating a database from empirical formulas to train and validate the model, which was tested with data from a breakwater on Spain's Cantabrian coast. The findings show that machine learning significantly improves damage prediction, aiding in coastal structures' design, maintenance, and risk management. Additional work has been done, consisting on numerical and experimental modelling of overtopping with DualSPHysics.

Keywords: machine learning, Bayesian model, overtopping, damage, predictive maintenance.

Resumen

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un modelo de aprendizaje automático basado en la actualización bayesiana para predecir los vertidos por rebase de olas en los diques de escollera. La investigación incluye la creación de una base de datos a partir de fórmulas empíricas para entrenar y validar el modelo, el cual fue probado con datos de un dique en la costa cantábrica de España. Los resultados muestran que el aprendizaje automático mejora significativamente la predicción de daños, contribuyendo al diseño, mantenimiento y gestión de riesgos de las estructuras costeras. Futuras investigaciones explorarán la optimización de la relación costo-riesgo para aumentar la durabilidad y reducir los costos de mantenimiento. Se ha realizado un trabajo adicional, consistente en la modelización numérica y experimental del rebase con DualSPHysics.

Palabras clave: machine learning, modelo Bayesiano, rebase, daño, mantenimiento predictivo.

1. Introducción

Frente a los desafíos del cambio climático, es crucial fortalecer las defensas costeras. Ingenieros y científicos investigan las implicaciones de la creciente demanda de estructuras de protección artificial, con el objetivo de renovarlas para hacer frente a los cambios en la intensidad y frecuencia de eventos climáticos. La adopción de metodologías de ingeniería avanzadas, como los gemelos digitales, proporciona una comprensión integral de las cargas dinámicas en las estructuras a lo largo de su ciclo de servicio. El proyecto PI-BREAK (Predictive Intelligent system to optimize BREAKwater maintenance) se presenta como un pionero en esta área: su objetivo fundamental es extender la vida útil de rompeolas en escenarios de cambio climático. Integrando rompeolas a un sistema de monitorización multiplataforma, PI-BREAK utiliza herramientas de modelización híbrida que incluyen instalaciones hidráulicas avanzadas y modelos numéricos. Más información disponible en la página web del proyecto (<https://pi-break.upc.edu/>).

El enfoque clave de la investigación es la aplicación de Aprendizaje Automático (ML) e Inteligencia Artificial (AI) para desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo en diques de escollera. Este modelo se alimenta con datos sobre la evolución del daño en los diques, considerando factores como el nivel del mar, oleaje y daños previos. La información resultante permite definir estrategias secuenciales para mitigar el daño y minimizar el costo total de mantenimiento a lo largo del tiempo.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo de ML para predecir el caudal de rebase en un dique en talud, considerando datos climáticos y características estructurales. Para alcanzar este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar un análisis exhaustivo del estado del arte en la predicción de daños por rebase, incluyendo el uso de IA y ML.
2. Crear una base de datos sólida basada en fórmulas empíricas para entrenar y validar el modelo de ML, dada la baja disponibilidad de datos medidos de rebase.
3. Desarrollar un modelo de ML que incorpore datos climáticos y estructurales para realizar predicciones precisas.
4. Validar el modelo con datos reales de un dique específico.
5. Emplear el código DualSPHysics para simular flujos de superficie libre e interacción con estructuras, incluyendo bloques de protección bajo cargas generadas por las olas y acoplándose con un modelo de Discrete Element Method (DEM) [6,7]
6. Establecer las bases para desarrollar en el futuro una curva costo-riesgo que permita definir estrategias de mantenimiento que optimicen la durabilidad y reduzcan los costos de mantenimiento de las estructuras costeras.

3. Desarrollo de la innovación

3.1. Contexto del caso de estudio

Se seleccionó el dique de escollera tipo, inspirado en el de Punta Lucero en la costa cantábrica, como modelo para basar el caso de estudio del proyecto, dadas sus condiciones ambientales desafiantes (olas altas, corrientes fuertes, patrones de marea significativos) y su relevancia estratégica para el Puerto de Bilbao. Este entorno proporciona un laboratorio natural para probar métodos predictivos innovadores. A continuación, se muestra la sección tipo del prototipo de dique, sobre la cual se basará el modelo.

Dichos escenarios, con las secciones tipo resultantes, son:

1. Geometría y clima marítimo actual.

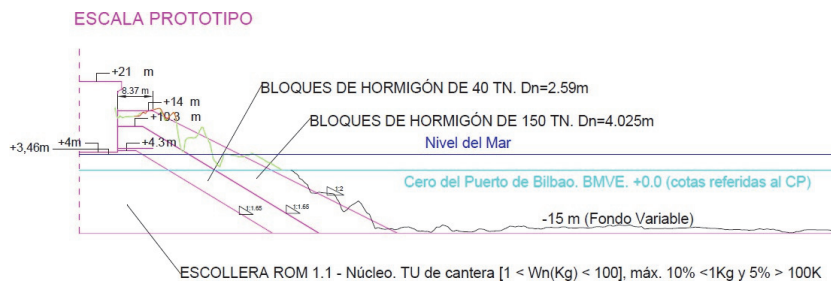


Fig. 3. Caso 0. Geometría actual. Fuente: López M. et al (2024) [5]

2. Subida del nivel del mar.

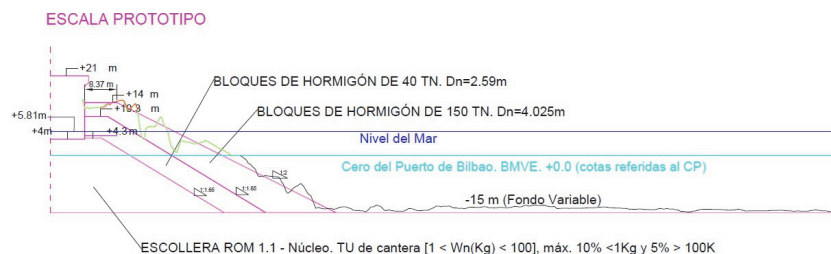


Fig. 4. Caso 1. Subida de 2.35 m del nivel medio del mar. Fuente: López M. et al (2024) [5]

3. Incremento de la altura de ola. Se utiliza la misma sección tipo de la geometría actual, pero se aplica un incremento del 20% de la altura de ola.
4. Pérdida de una capa de escollera.

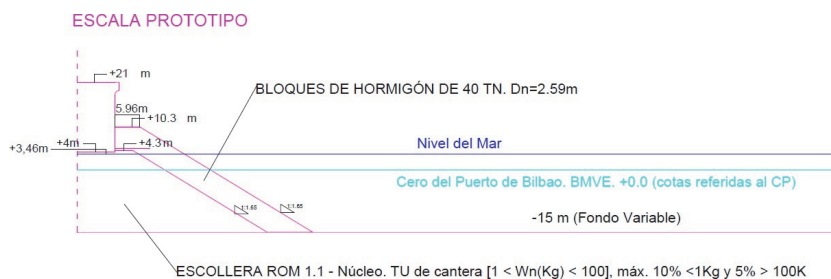


Fig. 5. Caso 3. Pérdida de una capa de escollera. Fuente: López M. et al (2024) [5]

5. Adición de una capa de escollera.

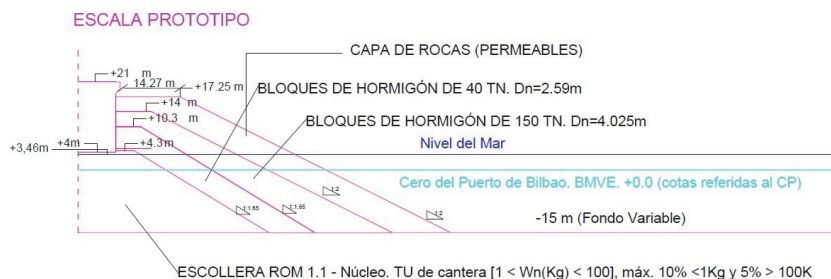


Fig. 6. Caso 4. Adición de una capa de escollera. Fuente: López M. et al (2024) [5]

6. Adición de una berma.

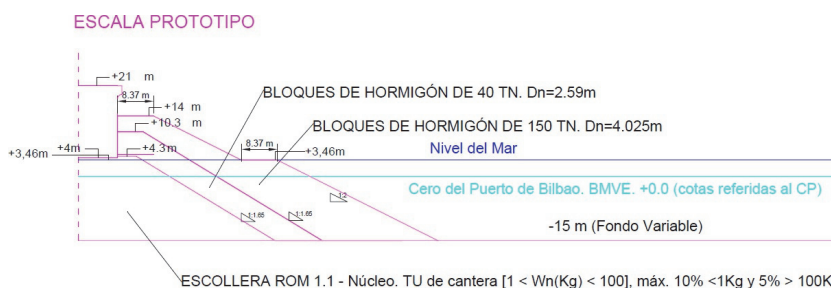


Fig. 7. Caso 5. Adición de una berma. Fuente: López M. et al (2024) [5]

7. Incremento de la altura de la berma añadida.

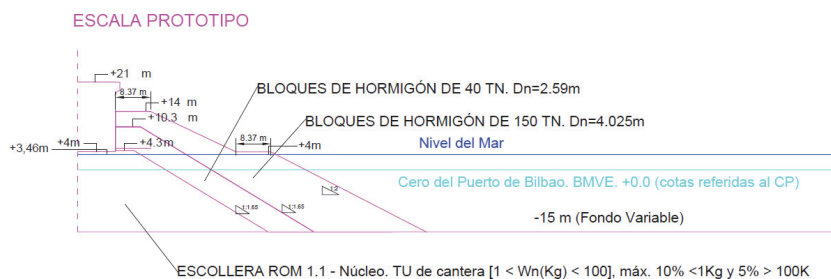


Fig. 8. Caso 6. Incremento de la altura de la berma añadida. Fuente: López M. et al (2024) [5]

8. Incremento de la anchura de la berma añadida.

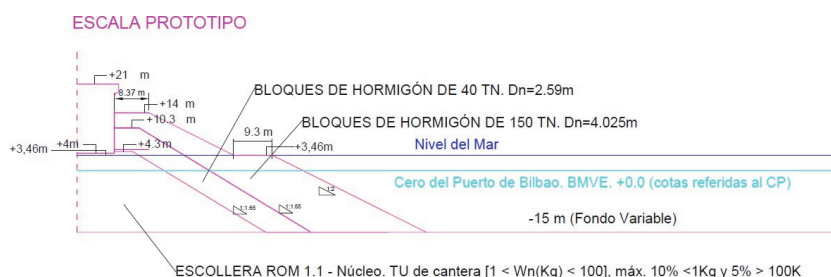


Fig. 9. Caso 7. Incremento de la anchura de la berma añadida. Fuente: López M. et al (2024) [5]

Una vez que se han definido los posibles modos de fallo y los escenarios de intervención, se puede calcular el caudal y el volumen de rebase. Este cálculo se realizará utilizando la formulación EurOtop [2] y la ANN desarrollada por la Università degli Studi di Bologna (Italia) [9].

El objetivo del cálculo de los parámetros de rebase con estos dos métodos es comparar los resultados obtenidos por cada uno de ellos y determinar qué método es más exacto y fiable para predecir el caudal y el volumen de rebase.

1.2.3. Cálculo del rebase mediante formulación EurOtop

La formulación EurOtop [2] es un método ampliamente empleado para calcular el caudal y el volumen de rebase en estructuras costeras. Basado en los trabajos de Van der Meer y Janssen [4], este enfoque se adapta al tipo de rompeolas considerado, con variaciones en las ecuaciones dependiendo de la presencia de bermas en el diseño.

En el caso del dique de Punta Lucero, un rompeolas de escollera, se aplican las ecuaciones específicas de EurOtop [2] para este tipo de estructuras. El caudal y el volumen de rebase se calcularon bajo cuatro escenarios de daño y cuatro de intervención, previamente definidos. Los resultados obtenidos sirven tanto para entrenar el modelo de aprendizaje automático (ML) como para comparar su precisión con una red neuronal artificial (ANN).

El planteamiento de diseño de EurOtop [2] incluye fórmulas como las ecuaciones (1) y (2), aplicables a pendientes pronunciadas (de 1:2 a 1:4/3), lo que permite evaluar la funcionalidad del rompeolas en distintas condiciones.

EurOtop [2] ofrece uno de los conjuntos de formulaciones más completos y avanzados para el análisis del sobrepaso de oleaje en estructuras marítimas. Su segunda edición, publicada en 2018, incorpora los desarrollos más recientes en metodologías de cálculo, validaciones experimentales y aplicaciones prácticas, lo que garantiza una alta precisión y fiabilidad. Por estas razones, se ha seleccionado como referencia principal en este estudio.

$$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_{m0}^3} = 0.1035 \cdot \exp \left(- \left(1.35 \cdot \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right) \quad (1)$$

$$V_{max} = a \cdot (\ln(N_{ow}))^{1/b} \quad (2)$$

Donde q es el caudal de rebase, g es la aceleración debida a la gravedad, H_{m0} es la altura de ola significativa a pie de dique, R_c es el francobordo, γ_f es el factor de influencia de los elementos de rugosidad en un talud, γ_β es el factor de influencia del ataque de olas oblicuas (ambos factores obtenidos del EurOtop [2]), V_{max} es el volumen de rebase, a y b son los factores de escala y forma de la distribución de Weibull asociada a los volúmenes donde N_{ow} es el número de olas de rebase.

1.2.4. Cálculo del rebase mediante la ANN

Esta herramienta de red neuronal artificial (ANN en adelante) ha sido desarrollada por la Università degli Studi di Bologna (Italia) para la evaluación del rendimiento hidráulico de estructuras costeras y portuarias.

La herramienta ANN proporciona estimaciones rápidas del caudal medio de rebase (q), los coeficientes de transmisión de las olas (K_t) y los coeficientes de reflexión de las olas (K_r). Esta red neuronal se alimenta de distintos datos, relacionados con el dique y con el clima marítimo, que se listan a continuación.

- m : cotangente del talud de la estructura.
- h : profundidad del agua en la punta de la estructura con respecto al nivel de referencia del puerto de 0,0 m.
- $H_{m0,t}$: altura de ola significativa a pie de estructura.
- $T_{m-1,0,t}$: período espectral medio de las olas con paso por cero a pie de estructura.
- β : ángulo entre la dirección de la ola y la normal a la estructura.
- h_t : profundidad de la berma de pie, si existe.
- B_t : anchura de la berma de pie, si existe.
- h_b : profundidad de la berma, si existe.
- B : anchura horizontal de la berma, si existe.
- $\cot(\alpha_d)$: cotangente del ángulo formado por la sección de la estructura bajo la berma con la horizontal, si existe.
- $\cot(\alpha_u)$: cotangente del ángulo formado por la sección de la estructura por encima de la con la horizontal, si existe.
- γ_{fd} : factor de rugosidad de la estructura por debajo de la berma, si existe.
- γ_{fu} : factor de rugosidad de la estructura por encima de la berma.
- D_d : diámetro de la unidad de escollera por debajo de la berma.
- D_u : diámetro de la unidad de escollera por encima de la berma.
- A_c : altura de la cresta de la armadura con respecto al nivel medio del mar (SWL).
- R_c : francobordo.
- G_c : anchura de la cresta.

La ANN, entrenada con 18,000 pruebas a escala modelo, es precisa para diversas configuraciones estructurales y eficaz en diseños preliminares o geometrías complejas. Los resultados incluyen el caudal medio de rebase (q_{mean}), el caudal prototipo (q_{prot}), que es equivalente al enfoque de diseño y evaluación de EurOtop [2], el caudal del límite de la banda de confianza del 5% ($q_{5\%}$) y el caudal del límite de la banda de confianza del 95% ($q_{95\%}$). Para garantizar precisión y coherencia con los valores calculados según EurOtop, se utilizará q_{prot} para comparar los resultados de la red neuronal artificial (ANN) con los resultados de EurOtop. En total, se obtienen 256 valores de caudal de rebase.

1.2.5. Comparación de los resultados obtenidos mediante EurOtop y ANN

En esta sección se compara la precisión y fiabilidad de la formulación EurOtop [2] y la ANN para predecir los caudales y volúmenes de rebase. Dado que la ANN no calcula volúmenes, la comparación se centra en los caudales.

Una comparación preliminar muestra que los resultados de la ANN se desvían de las tendencias esperadas, especialmente para altos valores de francobordo ($R_c/H_{m0} \geq 4$), lo que sugiere menor precisión en estos casos. En la siguiente figura, se muestran los resultados obtenidos con este método.

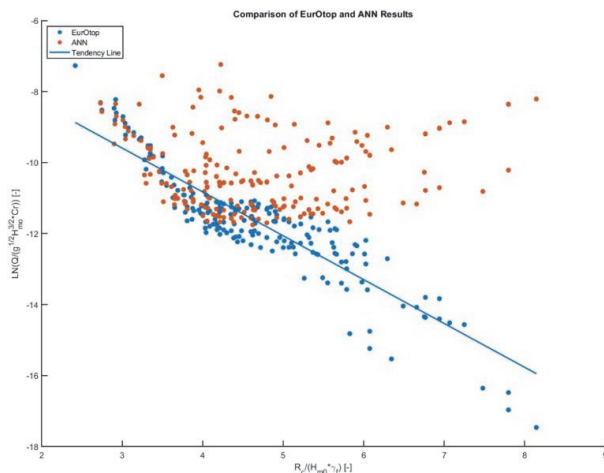


Fig. 10. Comparación preliminar de caudales. Fuente: López M. et al (2024) [2]

Después, se ha realizado un análisis detallado utilizando el marco EPR (Regresión Polinómica Evolutiva) [3], que identifica las variables más influyentes en los cálculos de rebase, incluidas H_{m0} , $T_{m-1,0}$, R_c , G_c , h , B_t y h_t .

Tal y como se muestra en la figura 11, el cociente $q_{ANN}/q_{EurOtop}$ sigue una tendencia, lo que indica que los valores son similares a medida que R_c/H_{m0} aumenta. Sin embargo, para valores de $R_c/H_{m0} \leq 3.5$, los resultados de la red neuronal artificial (ANN) crecen mucho más rápido que los resultados de EurOtop, lo que significa que la ANN no logra predecir correctamente los caudales de sobrepaso para valores altos de francobordo.

Considerando esto, y recordando que en la comparación preliminar se observó que los resultados de la ANN se desviaban de la línea de tendencia para valores altos de R_c/H_{m0} , se puede concluir que la ANN no es tan precisa ni fiable como la formulación de EurOtop para predecir los caudales de rebase, ya que en ambas comparaciones se ha llegado a la misma conclusión.

Por ello, para realizar el modelo Bayesiano, se utilizarán los resultados obtenidos mediante la formulación de EurOtop [2].

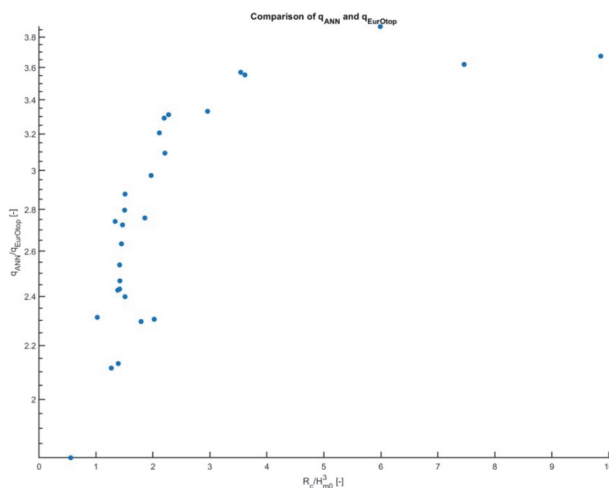


Fig. 11. Comparación de caudales con EPR. Fuente: López M. et al (2024) [2]

1.2.6. Base de datos final

La base de datos final para entrenar el modelo predictivo de IA y ML, basada en la formulación EurOtop [2] y las variables influyentes identificadas mediante el análisis EPR, consta de 182 casos (filtrados de un total inicial de 256) donde la relación $q_{ANN}/q_{EurOtop} \leq 5$. Esto asegura una mejor alineación entre los resultados de ANN y EurOtop [2]. La base de datos incluye matrices de variables independientes y dependientes, enfocándose en el caudal y volumen de rebase.

Además, se consideran los límites de daño y riesgo costero de rebase del Manual EurOtop [2] (2007), especialmente los relevantes para peatones, vehículos, instalaciones y operaciones.

Estos límites evalúan el impacto de los eventos de rebase, excluyendo los daños estructurales, ya que el estudio se centra en estados límite de servicio (SLS). Los límites de rebase se aplican a todo el conjunto de datos, proporcionando información adicional sobre escenarios aceptables basados en la altura de la ola y el volumen.

1.3. Generación del modelo Bayesiano

En esta sección se presenta la creación de un modelo predictivo de IA y ML para optimizar las estrategias de mantenimiento en el dique prototipo, utilizando los datos generados en la sección anterior. El proceso incluye varios pasos: recolección de datos (explicado en la sección anterior), pre-proceso (definición de variables y división en conjuntos de entrenamiento y validación), entrenamiento del modelo y diseño del modelo predictivo final basado en la Actualización Bayesiana.

1.3.1. Pre-proceso

La fase de pre-proceso es crucial para desarrollar el modelo de aprendizaje automático (ML). Se utilizan datos de la base generada para definir las variables independientes (e.g., altura de ola, francobordo, ancho de la cresta) y las variables dependientes (caudal y volumen de rebase).

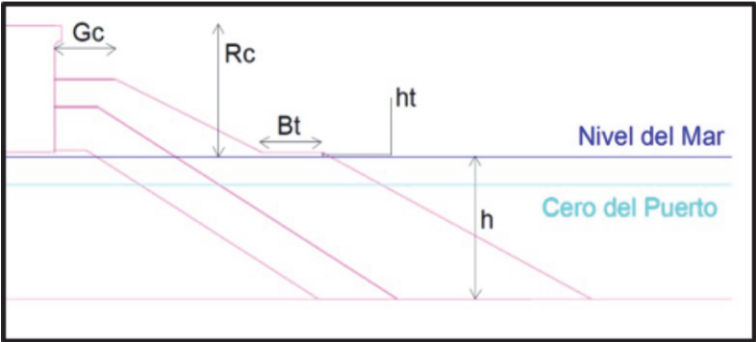


Fig. 12. Esquema de variables independientes utilizadas en el modelo. Fuente: López M. et al (2024) [5]

Los datos se dividen en conjuntos de entrenamiento (70%) y validación (30%) utilizando la función 'train_test_split' de Python. Posteriormente, se aplica una normalización que ajusta todas las variables a la misma escala, estandarizándolas con media 0 y desviación estándar 1, lo que mejora el rendimiento del modelo. Para ello, se emplearon bibliotecas de Python como pandas y scikit-learn ('StandardScaler') para calcular estadísticas y normalizar los datos. Este conjunto de datos preprocesado (182 filas) es esencial para un entrenamiento y validación efectivos del modelo ML.

1.3.2. Entrenamiento del modelo

El proceso de entrenamiento del Modelo de Actualización Bayesiana, diseñado para predecir el caudal y volumen de rebase en Punta Lucero, incluye las siguientes fases:

1. Estudio de Correlación:

Se analizan las relaciones entre variables utilizando el Coeficiente de Correlación de Pearson para identificar correlaciones significativas. Un mapa de calor visualiza estas correlaciones, mostrando que la altura significativa de ola (H_{m0}) tiene la correlación más fuerte con el caudal de rebase (q). Otras variables muestran correlaciones más débiles debido a la limitada variación en el conjunto de datos.

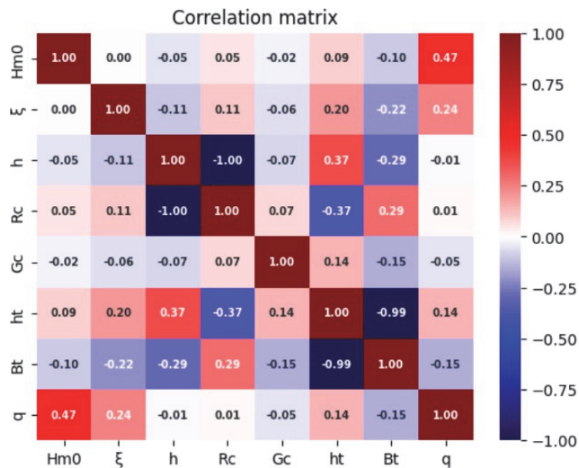


Fig. 13. Matriz de correlación de Pearson. Fuente: López M. et al (2024) [5]

2. Random Forest Regressor (RFR):

Utiliza árboles de decisión para realizar predicciones, promediando los resultados de múltiples árboles para mejorar la precisión y reducir el sobreajuste. Aunque el modelo funciona bien con el conjunto de entrenamiento, sufre sobreajuste debido al tamaño reducido del conjunto de datos, resultando en errores elevados en el conjunto de validación.

3. Linear Regression:

Es un modelo simple que predice en base a relaciones lineales entre variables y está desarrollado con la biblioteca Scikit-learn de Python. Este modelo presenta un comportamiento similar al RFR pero no captura adecuadamente las relaciones no lineales entre las variables, resultando en errores mayores.

Ambos modelos enfrentan dificultades debido al tamaño limitado del conjunto de datos. Para abordar estos problemas, se desarrollará un Modelo de Actualización Bayesiana en la siguiente fase.

1.3.3. Modelo de Actualización Bayesiana

En este modelo se determina que los datos del caudal de rebase siguen una distribución log-normal, según el manual EurOtop [5]. Para la realización del modelo, es necesario definir:

- Distribución Previa: Una PDF log-normal basada en el conjunto de datos.
- Función de Verosimilitud: Derivada de la PDF log-normal.
- Distribución Posterior: Calculada de manera iterativa con el Teorema de Bayes, actualizando las predicciones después de cada observación.

El modelo se puede implementar en Python utilizando la librería PyMC3 o funciones definidas por el usuario. Para esta tesis, se emplean funciones definidas por el usuario para calcular el modelo utilizando las ecuaciones propias del Teorema de Bayes. Las predicciones se obtienen utilizando la media de la distribución posterior. Los resultados del Modelo de Actualización Bayesiana se presentarán en la siguiente sección.

1.4. Modelado numérico

Finalmente, se emplea el modelo numerico DualSPHysics [1] basado en método lagrangian de hidrodinamica de particulas suavizada (SPH). El modelado numérico contribuye a la comprensión del fenómeno de interacción entre olas y diques en talud con bloques artificiales. La simulación avanzada mediante este método sin malla permite una evaluación detallada de la interacción fluido-estructura, incluyendo el análisis de las fuerzas ejercidas por las olas sobre las unidades individuales del dique. Este nivel de detalle resulta crucial para evaluar la estabilidad, la disipación de energía en la capa de talud y el rebase, aspectos clave para el desarrollo de diseños más eficaces que refuercen la resiliencia costera.

En la figura 14 se presentan resultados preliminares del modelo aplicado a un transecto representativo del dique de Punta Lucero: en la imagen se muestra la serie temporal de olas regular usada para la validación numérica inicial y comparada con ensayos de laboratorio y un instante de la simulación numérica, donde se puede apreciar la trayectoria seguida por las particulas de fluido. La capa de filtro y núcleo del dique, se ha replazado con una zona de absorción pasiva calibrada para conseguir el efecto disipativo de las capas menos porosas del dique. Los resultados definitivos, actualmente en fase de estudio, se integrarán en un modelo basado en aprendizaje automático (ML)

e inteligencia artificial (AI) para definir estrategias de mantenimiento predictivo a lo largo de la vida útil del dique, priorizando siempre la minimización de riesgos.

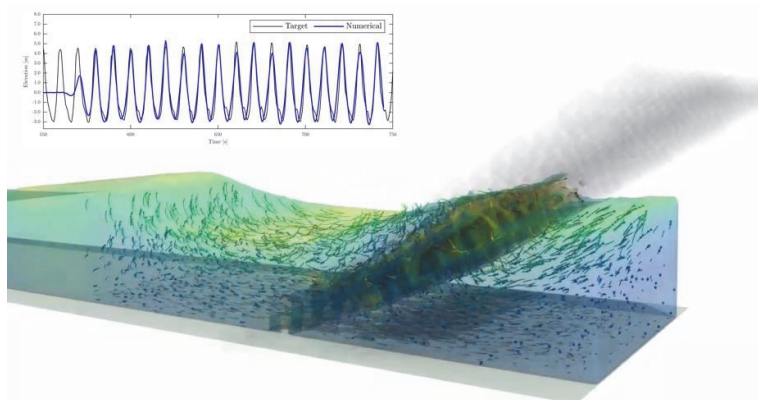


Fig. 14. Ejemplo de instante de simulación numérica y comparación de superficie libre con valores experimentales. Fuente: López M. et al (2024) [5]

4. Resultados

Se desarrolló el Modelo de Actualización Bayesiana para el cálculo de caudales de rebase en el arquetipo de Punta Lucero, obteniendo una matriz de 182 valores de predicción. Para evaluar el rendimiento del modelo, estas predicciones se compararon con los caudales reales calculados con EurOtop [2], empleando métricas de error como el MSE, MAE y MAPE. Los resultados mostraron un buen rendimiento en el conjunto de entrenamiento, pero mayor error y posibles problemas de sobreajuste en el conjunto de validación. En la figura 15, se muestra el ajuste de los datos predichos y reales.

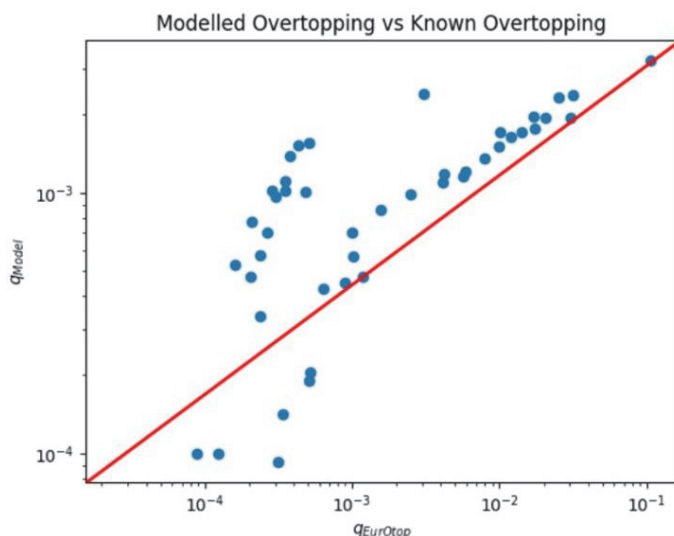


Fig. 15. Gráfico de dispersión de los caudales predichos y los reales. Fuente: López M. et al (2024) [5]

Puede observarse que los caudales de rebase predichos se aproximan a los reales, ya que se sitúan cerca del patrón de tendencia lineal. Sin embargo, para valores bajos de los caudales reales, los valores predichos se desvían de la línea de tendencia. Una explicación de este comportamiento podría ser la falta de una base de datos robusta.

Sin embargo, tal y como menciona EurOtop [2], valores de caudal de rebase por debajo del orden de 10^{-4} calculados con EurOtop [2], ya se desvían *per se* de la banda de confianza. Por lo tanto, esta podría ser otra razón de la desviación de los valores predichos de la línea de tendencia.

Para determinar el motivo exacto de esta desviación, se necesita un análisis más detallado, fuera del alcance de este proyecto.

Adicionalmente, se ha realizado un ejemplo práctico, utilizando el caso de un rompeolas de escollera en la base de datos EurOtop [2]. Los resultados predichos por el modelo se compararon con las descargas reales a través de un diagrama de dispersión, tal y como se muestra en la siguiente figura.

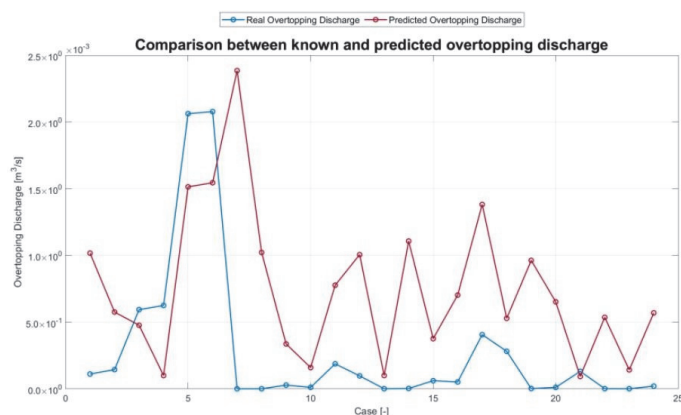


Fig. 16. Diagrama de dispersión de los caudales predichos y los reales de la base de datos de EurOtop.

Fuente: López M. et al (2024) [5]

Aunque las predicciones siguen un patrón similar a los valores reales, tienden a ser más altas, posiblemente debido a la falta de datos robustos. A pesar de las discrepancias, el modelo demuestra una capacidad aceptable para predecir descargas, lo cual es alentador para un modelo inicial.

5. Conclusiones

Este proyecto desarrolló un modelo de aprendizaje automático basado en Actualización Bayesiana para predecir el caudal de rebase de olas en diques en talud, utilizando datos de tormentas y características estructurales de la costa cantábrica. El modelo demostró buena precisión en caudales altos, aunque presenta incertidumbre en los bajos debido a limitaciones en los datos y posibles sobreajustes. En resumen, las limitaciones son:

- Incertidumbre en predicciones de caudales de rebase bajos.
- Se parte de una base de datos limitada y no completamente robusta.

Para solucionar estas limitaciones, se proponen las siguientes líneas de de investigación futura:

1. Ampliar y mejorar la base de datos, incluyendo los resultados finales de las simulaciones numericas.
2. Refinar el modelo para reducir sobreajuste.
3. Incorporar análisis costo-riesgo para optimizar el mantenimiento de estructuras costeras.
4. Ampliar el modelo a otros tipos de defensas costeras.

Estas mejoras potenciarán la precisión y utilidad del modelo en estrategias de defensa costera.

Agradecimientos

Grant PLEC2021-007810 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union NextGenerationEU/PRTR.

Referencias bibliográficas

- [1] Domínguez J., Fourtakas G., Altomare C. et al. 2022. “DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems”. Computational Particle Mechanics, 9(5), 867–895. <https://doi.org/10.1007/s40571-021-00404-2>
- [2] EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. 2018. Segunda Edición. Reino Unido: Joint FCERM Research Programme.
- [3] Giustolisi O., Savic D. A. 2009. “Advances in data-driven analyses and modelling using EPR-MOGA”. Journal of Hydroinformatics, 11(3-4), 225–236. <https://doi.org/10.2166/hydro.2009.017>
- [4] J. Van der Meer and H. Janssen. Wave run-up and wave overtopping at dikes, 1995.
- [5] López M., Altomare C., Sánchez-Arcilla A. et al. 2024. “Integración de AI, ML y modelización numérica para el mantenimiento predictivo en diques de escollera: aplicación a la costa Cantábrica”.
- [6] Martínez-Estévez, I., Domínguez, J. M., Tagliaferro, B. et al. 2023. “Coupling of an SPH- based solver with a multiphysics library”. Computer Physics Communications, 283, 108581.
- [7] Mitsui J., Altomare C., Crespo A. J. C. et al. 2023. “DualSPHysics modelling to analyse the response of Tetrapods against solitary wave”. Coastal Engineering, 183, 104315.
- [8] Puertos del Estado [6]. “Puertos del Estado: Portal Oficial”. Disponible en: <https://www.puertos.es/>
- [9] Zanuttigh B., Formentin S. M., Van der Meer J. W. 2016. “Prediction of extreme and tolerable wave overtopping discharges through an advanced neural network”. Ocean Engineering, 127, 7–22.

Almacenamiento de hidrógeno verde Offshore en plataformas marítimas tipo GBS en el marco del proyecto OCEANH2

Offshore Green Hydrogen Storage on GBS-type Maritime Platforms within the framework of the OCEANH2 Project

José Manuel González Herrero^a, Natividad Sánchez López^a, Jon Martínez Fontecha^a y Daniel Zamora Serrano^a

^a Acciona Ingeniería  jgherrer_ext@acciona.com  natividad.sanchez.lopez@acciona.com 
jon.martinez.fontecha@acciona.com  Daniel.zamora.serrano@acciona.com

How to cite: González Herrero, J. M.; Sánchez López, N.; Martínez Fontecha, J. & Zamora Serrano D. (2024). Almacenamiento de hidrógeno verde Offshore en plataformas marítimas tipo GBS en el marco del Proyecto OCEANH2. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

The aim of the project is to design a modular, flexible and intelligent offshore green hydrogen generation, storage and distribution plant from offshore renewable energy generation, hybridizing wind and floating photovoltaic technology. This paper presents the results of two components of this project. The first is the development of an innovative 150 bar compressed hydrogen tank, using composite materials. The second is a modular GBS, capable of housing the electrolyzers, green hydrogen tanks and other components of a complete hydrogen generation plant in the range of 25Mw to 900Mw.

Keywords: Green hydrogen, compressed hydrogen tank, composite material, GBS, energy island.

Resumen

El objetivo del proyecto es demostrar la viabilidad de una planta de generación, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde offshore modular, flexible e inteligente a partir de generación eléctrica renovable offshore, hibridando tecnología eólica y fotovoltaica flotante. En esta ponencia se presentan los resultados de dos componentes del proyecto. El primero es el desarrollo de un depósito innovador de hidrógeno comprimido a 150 bares, utilizando materiales compuestos. El segundo es el diseño de un GBS modular, capaz de albergar los electrolizadores, los depósitos de hidrógeno verde y demás componentes de la planta de generación de hidrógeno, en el rango de 25Mw a 900 Mw. A su vez, constituye un atraque de buques para el transporte marítimo del hidrógeno generado.

Palabras clave: hidrógeno verde, depósitos hidrógeno comprimido, materiales compuestos, estructura de gravedad (GBS), isla energética.

1. Introducción

El proyecto OCEANH2 tiene el objetivo de demostrar la viabilidad de la construcción de una planta de generación, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde offshore modular, flexible e inteligente a partir de generación eléctrica renovable offshore, hibridando tecnología eólica y fotovoltaica flotante.

Ha sido financiado con 6,44 millones de Euros por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del programa ‘Misiones Ciencia e Innovación’, subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI).

El consorcio ganador está formado por ocho empresas, a saber: ACCIONA Industrial (líder), ACCIONA Construcción, ACCIONA Ingeniería, Ariema, BlueNewables, Redexis, TSI y Wunder Hexicon.

2. Objetivos

Esta comunicación se centrará en demostrar la viabilidad de la parte desarrollada por ACCIONA Ingeniería, cuyos objetivos son:

- Desarrollar un depósito innovador de almacenamiento de hidrógeno a alta presión.
- Diseñar una estructura de gravedad (GBS, gravity base structure) modular para almacenamiento del hidrógeno verde generado, dando cabida también a otros componentes de la planta: hidrolizadores, subestaciones, atraque de buques, etc.

3. Desarrollo de la innovación

3.1. Escenarios considerados

De manera conjunta, el consorcio de empresas decidió considerar una serie de escenarios denominados genéricamente “small scale”, “medium scale” y “big scale” pero buscando siempre la modularidad y la parametrización, de manera que se pueda obtener cualquier situación intermedia fácil y rápidamente.

Así, los escenarios considerados son los indicados en la Tabla 1. Se empezó el desarrollo diseñando la planta offshore de 25 Mw mediante un módulo tipo GBS para, utilizando diversos módulos unitarios, dimensionar cualquier otro tipo tamaño de planta.

Además de los escenarios offshore se han considerado otros de tipo mixto donde sólo la generación eléctrica es offshore, estando situada en un puerto la planta de generación, producción y almacenamiento de hidrógeno, todo ello concentrado en uno o varios módulos de GBS. En este caso, se seleccionaron los puertos de Las Palmas y Carboneras (Almería) para analizar su viabilidad.

Tabla 1. Escenarios de planta considerados

Código escenario	Escala de planta [$MW_{eólica} + MW_{solar}$] y porcentaje eléctrico destinado a producción de hidrógeno [%]	Total potencia instalada para generación hidrógeno renovable [MW]	Volumen almacenamiento requerido [kg H ₂]
1	Offshore Small scale (20+5 MW) 100%	25,00	12
2	Offshore Medium scale (400 + 50 MW) 100%	450,00	227
3	Offshore Big Scale (800+150 MW) 100%	950,00	468
	<i>Escenarios intermedios, GBS en puerto</i>		

3.2. Nuevos depósitos de almacenamiento

El diseño del sistema de depósitos internos para almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso dentro del GBS se ha llevado a cabo con la inestimable ayuda de la OPI Universidad Loyola Andalucía.

Tras un estudio de mercado, se encuentra que, hoy en día, prácticamente no existen almacenes de grandes dimensiones para hidrógeno en superficie (escala decenas o millares de toneladas). Los pocos ejemplos hallados en la literatura técnica se refieren a grandes depósitos criogénicos superficiales para uso aeroespacial o almacenes subterráneos (como los almacenamientos en cavernas de sal en Teeside, UK, o Texas). Este tipo de localizaciones (junto con yacimientos de petróleo y/o gas agotados, y acuíferos) presentan grandes ventajas para el almacenamiento de hidrógeno a gran escala, pero son escasos y su localización está concentrada en determinadas áreas geográficas.

Para dar respuesta al reto tecnológico que presenta el proyecto OCEANH2, se decide investigar en paralelo dos soluciones de almacenamiento de hidrógeno en localizaciones offshore:

- **Solución convencional**, basada en el uso de depósitos comerciales con diseño y fabricación certificados conforme con los estándares de aplicación de la industria, se establece como línea base. La ventaja principal de este tipo de depósitos es que son fáciles de adquirir en el mercado hoy en día por diferentes proveedores a un precio competitivo. El inconveniente es que están diseñados principalmente para aplicaciones de movilidad terrestre, con requisitos de almacenamiento en la escala de los kilogramos, y por tanto utilizan geometrías relativamente reducidas y ligeras. El uso de estos depósitos, en la aplicación que nos ocupa (almacenamiento en el orden de toneladas), implicaría el uso de un alto número de depósitos.
- **Solución innovadora**, compuesta por unidades de almacenamiento diseñadas ad-hoc para la aplicación del proyecto y potencialmente suministradas por fabricantes con diseño y fabricación susceptibles de certificación conforme con los estándares de aplicación de la industria. Pretenden mejorar la línea base establecida en la configuración convencional. Proponen geometrías de depósito más grandes para reducir el número de unidades necesarias para la escala de almacenamiento que propone en proyecto.

3.2.1. Desarrollo del depósito innovador

Tomando como base de partida el depósito convencional, se propusieron dos tipologías de depósito:

- Solución convencional de acero o hierro fundido, con diámetros interiores entre 0,30 y 1 metro y con una longitud de 11 metros.
- Solución innovadora, de material compuesto, con liner de aluminio. En este caso se analizan diámetros entre 2 y 10 m y con una longitud de 16 m

El prediseño de la solución convencional se realizó mediante un algoritmo que calcula las tensiones axial, radial y circunferencial (hoop), comprobando que no se supera en ningún momento la tensión máxima admisible del material.

El prediseño de la solución innovadora difiere del anterior, ya que está pensado para cilindros de materiales compuestos. Para simplificar el cálculo, éste se va a sustentar en que el material que ofrece la mayor parte de la resistencia del depósito y, por lo tanto, el encargado de soportar la mayor parte de las tensiones es la fibra de carbono junto a la matriz de epoxy, luego se supondrá que todo el depósito está fabricado con dicho material.

En este caso, las variables de entrada son la presión interior del depósito, el radio interior, un factor de seguridad, la tensión máxima del material (fibra de carbono) y los ángulos de aplicación de las capas de material compuesto.

En este caso, las variables de entrada son la presión interior del depósito, el radio interior, un factor de seguridad, la tensión máxima del material (fibra de carbono) y los ángulos de aplicación de las capas de material compuesto.

El código devuelve el espesor de la parte cilíndrica y el espesor de la parte esférica (que debe ser menor).

Tras este análisis, se preseleccionaron aquellas soluciones técnicas que fueran viables en el corto plazo, lo cual exigía analizar con los fabricantes de depósitos aspectos comerciales como la potencial certificación, viabilidad de su fabricación, logística hasta el lugar de instalación, y procesos de instalación.

Como resultado de este proceso se seleccionaron cuatro alternativas innovadoras, cuyas características principales se recogen en la Tabla 2.

El análisis estructural de detalle se ha realizado mediante el método de los elementos finitos y se han utilizado las herramientas Abaqus (Dassault Systèmes) y StrULab, un código para análisis estructural de elaboración propia de Universidad Loyola.

La norma utilizada en este proyecto ha sido “ASME Boiler and Pressure Vessel Code”, que consta de un total de 12 secciones. Concretamente, se han utilizado las secciones VIII y X. La sección VIII se corresponde con las reglas de diseño de depósitos metálicos principalmente, mientras que en la sección X, se explica el diseño de depósitos de materiales compuestos. Esta última sección está en una fase menos avanzada y profundiza menos en la parte referida a tipos de análisis numéricos necesarios para diseñar los depósitos que la sección metálica. Además, se ha utilizado la sección II para la selección de los materiales según su uso y propiedades.

Tabla 2. Características de los depósitos analizados en detalle

Solución	Conventional	Innovador metálico monocasco	Innovador metálico bicasco	Compuesto baja presión (100 bar)	Compuesto alta presión (150 bar)
Normativa diseño	ASME Boiler and Pressure Vessel Code-Sección VIII			ASME Boiler and Pressure Vessel Code-Sección X	
Material	Acero al carbono SA- 373	Hierro fundido + liner aluminio 6061 T6	Hierro fundido +pernos de acero + liner aluminio	Compuesto(re sina HDPE+ fibra de carbono) + liner de aluminio	Compuesto (resina HDPE + fibra de carbono) + liner de aluminio
Diámetro interior	0,559 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m	3,00 m
Espesor	2 cm	10,5 cm	10,5	3,71 cm	5,65 cm
Long. tanque	10,97 m	11,00 m	11,00 m	11,00 m	11,00 m
Presión	100 bar	100 bar	100 bar	100 bar	150 bar
Capacidad	20,19 kg	565,25 Kg	565,25 Kg	509,00 Kg	727,00 Kg
Peso	3 t	82 t	88 t	6,2 t	9,2 t
Volumen	2,5 m ³	70 m ³	70 m ³	70 m ³	70 m ³

Como resultado final de este proceso, se seleccionó el depósito de material compuesto (resina HDPE y fibra de carbono con liner de aluminio), de 3 m de diámetro interior, 11 m de longitud, a una presión de 150 bar (Figura 1). Su capacidad alcanza los 727 kg de hidrógeno.

Téngase en cuenta que si la densidad del hidrógeno a 25° de temperatura y 1 bar de presión es de sólo 0,089 kg/m³, en las mismas condiciones de temperatura pero incrementando la presión a 150 bar, la densidad es de 13,35 kg/m³.

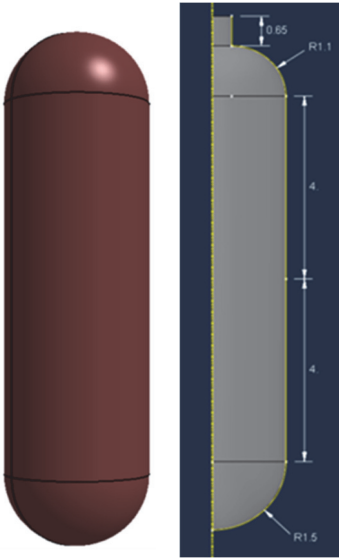


Fig. 1. Depósito innovador de material compuesto

3.2.2. Disposición de los depósitos en el GBS

Una vez definido el depósito de hidrógeno interesa buscar la disposición óptima dentro del GBS, de manera que la ocupación de espacio sea mínima o, dicho de otro modo, maximizar la densidad energética en el espacio disponible.

La distribución seleccionada para todas las variedades de depósitos innovadores estudiados en el proyecto es la disposición de los tanques en vertical, organizados al tresbolillo, de tal forma que exista como mínimo 1 metro de distancia entre cada depósito, para permitir las acciones de mantenimiento y el desplazamiento seguro de los trabajadores. En la Figura 2 se muestra la distribución óptima propuesta.

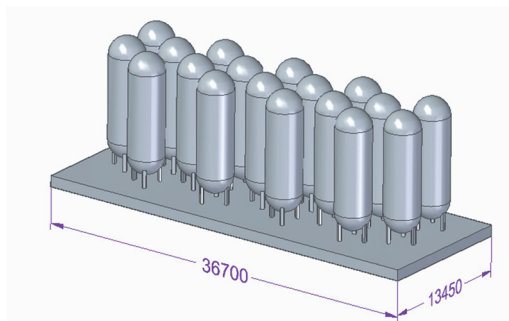


Fig. 2. Vista isométrica de la distribución de los depósitos innovadores

3.3. GBS small scale

3.3.1. Criterios de diseño

Una vez resuelta la forma de almacenar el hidrógeno producido en la planta, el paso siguiente fue dimensionar el GBS para acoger los depósitos. Como criterios de diseño, en orden a obtener una solución plenamente competitiva, se establecieron los siguientes:

- Ha de ser construible en puerto de manera integral, es decir, todas las fases contempladas en el proceso constructivo han de minimizar la ejecución de unidades de obra offshore. Esta es la única manera de acotar el coste del GBS.
- Como consecuencia de lo anterior, el calado máximo en flotación de todo el conjunto GBS (depósitos y equipos incluidos) se fija en 25,70 metros. Por tanto, el lastre sólido que puede alojar el cajón, necesario para dotar al GBS del peso suficiente para que sea estable en su ubicación definitiva, está limitado por esta condición.
- Otra consecuencia es la necesidad de disponer de un puerto auxiliar en las proximidades de la planta, para viabilizar su construcción.
- En línea con todo lo anterior, se aprovecha la muy desarrollada tecnología de construcción de cajones flotantes mediante encofrados deslizantes, en diques flotantes específicos (cajoneros).
- Ha de ser estable en su ubicación definitiva sometido a las cargas externas (agentes climáticos y sísmico) consiguiendo los coeficientes de seguridad exigidos en la ROM 05.05 para las condiciones de trabajo establecidas en la ROM 2.0-11.

3.3.2. Descripción del GBS Small scale

En base a lo anterior, se define un módulo GBS construido a partir de un cajón flotante cuya geometría interna ha sido adaptada para alojar y proteger en su interior los depósitos de hidrógeno comprimido.

Además, la propia estructura GBS sirve como plataforma marina, que puede ser utilizada para:

- Albergar en su cubierta los equipos y tuberías de la planta de generación, almacenamiento y transporte de hidrógeno, como los sistemas de electrólisis, compresores y sistemas de repostaje de hidrógeno, etc.
- Servir de obra de atraque y amarre de buques para posibilitar la carga de hidrógeno, ya sea para su uso directo como combustible o para su transporte a puerto (operaciones de *bunkering*).
- Conexión con gasoducto para distribución del hidrógeno generado en su cubierta a localizaciones en tierra.

En la Figura 3 se muestra una vista del concepto propuesto.

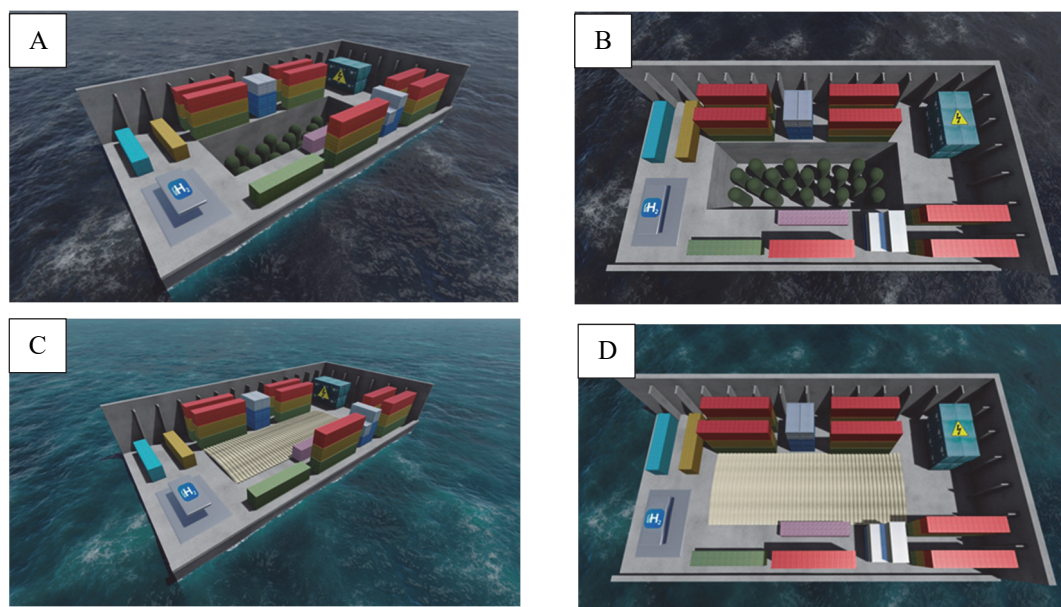


Fig. 3. Vista de pájaro de la solución de almacenamiento de hidrógeno tipo GBS desde dos ángulos diferentes, sin estructura metálica para protección de depósitos de hidrógeno A) y B), y con estructura metálica para protección de depósitos de hidrógeno C) y D)

A su vez, el módulo tipo de cajón considerado tiene unas dimensiones máximas de (Figura 4):

- Eslora: 66.85 m
- Manga: 33,30 m
- Puntal: 31,50 m

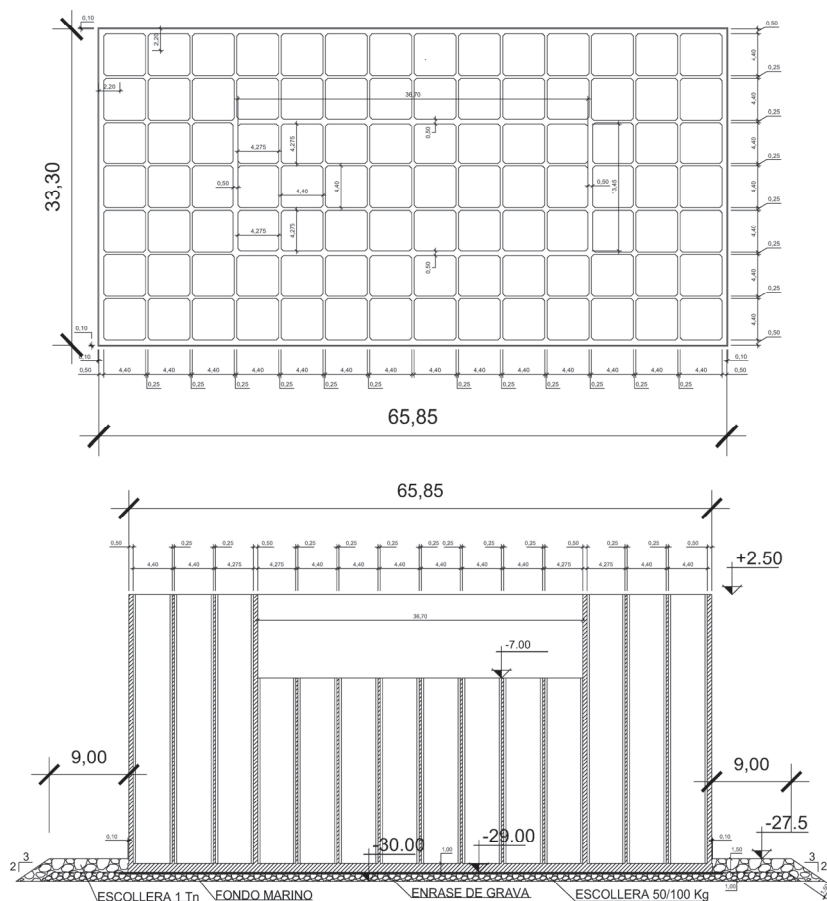


Fig. 4. *Cajón tipo. Planta y sección longitudinal*

3.3.3. Oleaje de diseño

Con vistas a demostrar la viabilidad del proyecto, se ha realizado un estudio previo de la costa española basado en un análisis de varios parámetros de oleaje y viento en una serie de nodos. En particular, los parámetros analizados de oleaje han sido: altura de ola significativa (H_s en m), período medio (T_z en s), período de pico (T_p en s) y dirección de incidencia (Dir en ° sexagesimales). Los parámetros del viento han sido: velocidad media en 1 hora (U en m/s) y dirección de procedencia (Dir en ° sexagesimales).

Los nodos han sido seleccionados de la base de datos ERA5, tomando puntos situados a lo largo de la costa del Mediterráneo, fachada Norte, Atlántico Suroeste e Islas Canarias.

Como consecuencia del análisis preliminar se seleccionaron dos localizaciones, caracterizando en cada una de ellas las condiciones meteoceánicas que influyen en el diseño e instalación de un GBS offshore a una profundidad de 30 m, considerada como límite para esta tipología.

Las localizaciones seleccionadas se encuentran ubicadas en la zona de PLOCAN, al Este de la isla de Gran Canaria, próxima al puerto de Las Palmas, y la otra en la costa de Almería, frente al puerto de Carboneras. Para cada una de estas localizaciones se han definido las condiciones de diseño.

Tabla 3. Oleaje de diseño. Las Palmas

Características oleaje	Dirección del oleaje	Hs (m)	T (sg)
H _s ,T _r =500años, 90% (para comprobación CT3,1)	NNE	5,11	12
H _s ,T _r =50 años, 90% (para comprobación CT2)	NNE	4,83	11
H _s ,50%,régimen medio=valor cuasipermanente (para comprobación CT3,31 y comprobación CT3,32)	Perpendicular paramento (cálculo conservador)	1,20 m	10

Tabla 4. Oleaje de diseño. Carboneras

Características oleaje	Dirección del oleaje	Hs (m)	T (sg)
H _s ,T _r =500años, 90% (para comprobación CT3,1)	ENE	7,26	12
	NE	5,69	12
	E	5,94	12
H _s ,T _r =50 años, 90% (para comprobación CT2)	ENE	5,53	11
	NE	4,25	11
	E	3,41	11
H _s ,50%,régimen medio=valor cuasipermanente (para comprobación CT3,31 y comprobación CT3,32)	Perpendicular paramento (cálculo conservador)	0,76 m	10

3.3.4. Ensayos de laboratorio

El objetivo de los ensayos en modelo físico a escala reducida es analizar el comportamiento frente al oleaje de un GBS small scale aislado. Las configuraciones isla de los escenarios de mediana y gran escala, que se describen más adelante, se asemejan a estructuras continuas donde existen formulaciones analíticas contrastadas para el diseño de infraestructuras marinas. A partir de los resultados de los ensayos se obtendrá información sobre los siguientes aspectos:

- Estabilidad de la banqueta de cimentación de la estructura GBS
- Estabilidad del GBS frente a los esfuerzos ejercidos por el oleaje
- Presiones y subpresiones en la estructura GBS
- Rebase del oleaje sobre la estructura.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, en concreto, en el tanque de oleaje irregular de 6.50 m de ancho, 45 m de largo y 2 m de profundidad. La escala adoptada fue 1:40.

El detalle de la metodología y programa de ensayos es objeto de otro artículo de estas Jornadas (Gallach, 2024) por lo que no se incluye aquí.

3.4. GBS Medium scale. Concepto isla energética

El agrupar elementos GBS como el descrito (de 25 MW de planta small scale) para conseguir mayores tamaños de planta, supondría una multiplicación de instalaciones (centros de transformación, buffer, elementos de medida, etc. por cada cajón) que es innecesaria.

Para los escenarios medium o big scale, se ha estudiado la posibilidad de agrupar los elementos GBS para formar una isla con el fin de alcanzar los siguientes objetivos:

- Incrementar la capacidad de almacenamiento por unidad de GBS
- Conseguir una organización de equipos y depósitos más funcional, de tal forma que se reduzcan las conducciones y que la ubicación de los mismos sea más eficiente. Reducir pérdidas eléctricas y de presión.
- Definir distintos elementos unitarios (cajones) según la función a la que se destinen. Los cajones protegidos del oleaje, al no necesitar tanto peso resistente, pueden aumentar su capacidad de almacenamiento. Este nuevo concepto de cajón puede utilizarse en terminales offshore, siempre que estén protegidos del oleaje, o dentro de puertos existentes, que dispongan del abrigo necesario.
- Reducir el número de GBS necesarios.

En todo caso, se ha mantenido la hipótesis de realizar toda la obra civil en puerto, a fin de abaratar la solución e independizarla del clima marítimo y de necesidades de material de rellenos.

Como resultado de lo anteriormente expuesto, se establecen distintos tipos de GBS según la función a la que se destinen para plantas de mayor tamaño en la configuración isla. En este sentido, se tendrían los siguientes elementos:

- GBS especializado, destinado para alojar los depósitos de hidrógeno. Para depósitos de material compuesto a 150 bares la capacidad de almacenamiento por cajón es de 727 kg x 49 Ud. = 35.623 kg.
- GBS especializado destinado para 9 conjuntos de electrolizadores.
- GBS para resto de instalaciones. (desaladora, hidrolinera, centros de transformación eléctricos, equipos de medida, compresión y descompresión...) se dispondrán en GBS iguales a los utilizados para disponer los electrolizadores.

Con esta especialización de unidades GBS según su función, se puede, de una manera relativamente sencilla, estimar el número de cajones necesarios según el tamaño de planta deseado y los requerimientos de almacenamiento asociados a ella.

En la Figura 5 se ha representado la distribución para una planta/isla energética médium scale.

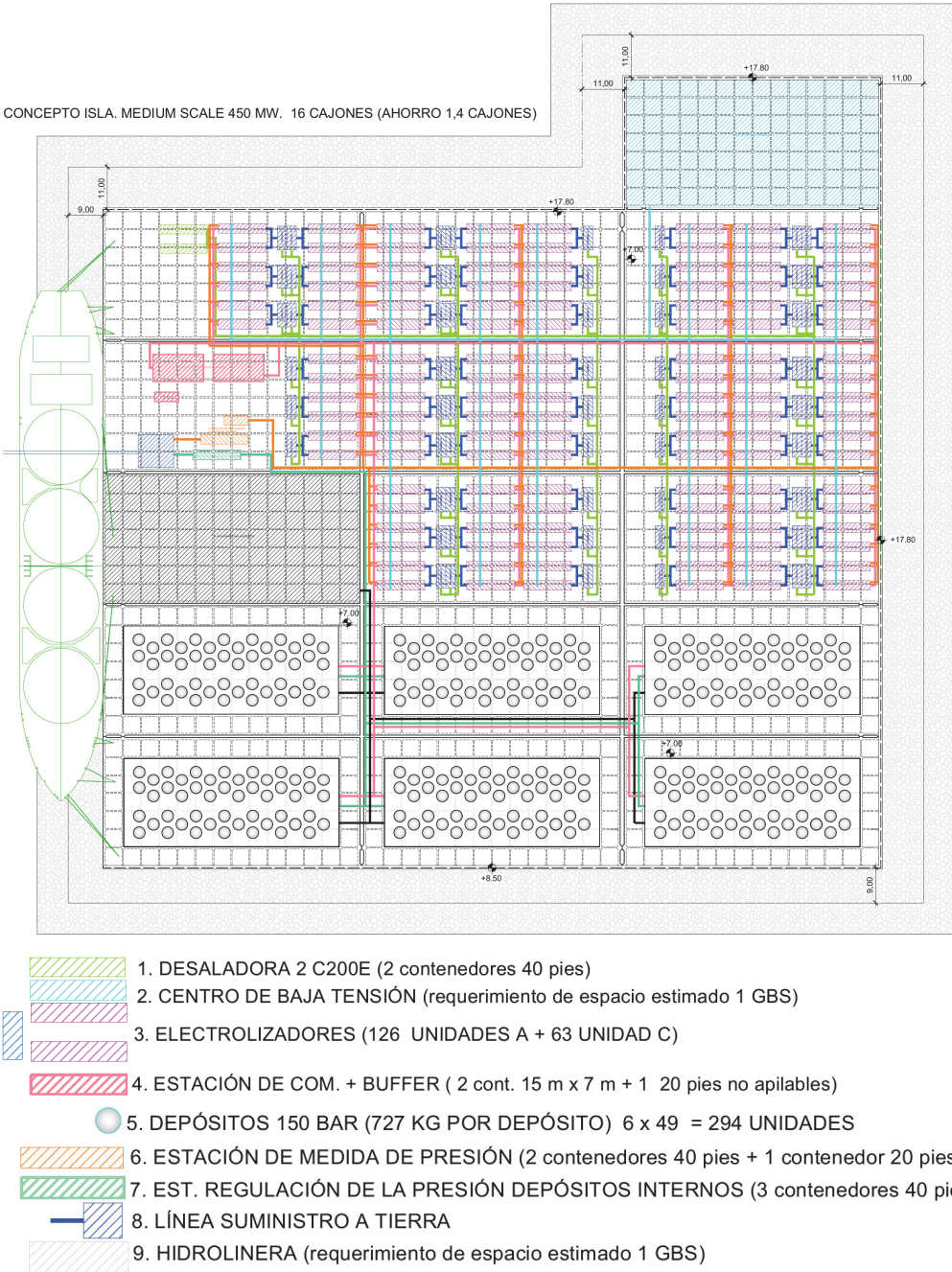


Fig. 5. Isla energética Medium scale (450 MW)

3.5. Proceso constructivo

De acuerdo con los criterios de diseño establecidos más arriba, la secuencia del proceso de construcción será la siguiente:

- Fabricación del cajón en dique flotante.

El cajón se fabrica en un dique flotante con el procedimiento habitual de cajones de hormigón armado aligerado con celdas utilizado frecuentemente en obras marítimas. En este método, en primer lugar, se prepara la armadura de la solera sobre una pontona y ésta se coloca bajo el paraguas (estructura de la que cuelga el encofrado deslizante) del cajonero. Tras ello se hormigona la solera para posteriormente, bajar el paraguas y comenzar con el deslizado del cajón según se va hormigonando el fuste del mismo. Se trata de un proceso muy controlado en donde se ha de adecuar la velocidad de deslizado para que no se produzcan arrastres que deriven en defectos de los paramentos que pudieran acarrear problemas de estanqueidad.

Una vez finalizado el cajón se procede a su botadura. Se lastran las celdas con agua de mar, si es necesario, para garantizar su estabilidad naval.

- Remolque del cajón y fondeo provisional en puerto base

El cajón se remolca desde su lugar de fabricación hasta el muelle donde se finalizará la construcción del GBS. En dicho muelle se ha de acondicionar una banqueta de cimentación de escollera. La cota de cimentación de dicha banqueta ha de ser más alta que la definitiva para poder reflotar el GBS posteriormente. El fondeo se realiza por adición de agua de mar en las celdas.

- Lastrado del cajón en puerto base, con material granular de procedencia terrestre.

La altura del lastre sólido ha de ser suficiente para dotar del peso necesario al GBS pero está limitada por el calado del muelle de tal modo que sea viable el reflote del GBS totalmente terminado. La distribución del lastre sólido en las celdas ha de ser tal que corrija las asimetrías de la estructura GBS cuando está totalmente terminada.

- Construcción de la superestructura y espaldón

Con el cajón fondeado, se procede a la construcción del resto de elementos de hormigón armado: pared perimetral e interior del espacio para almacenamiento de hidrógeno, losa inferior, pilares, losa de cubierta y espaldón.

- Implantación de equipos de la planta de H₂

Para el caso del GBS aislado se contempla colocar todos los elementos previstos: depósitos de hidrógeno, electrolizadores, desaladora, centro de transformación, etc., así como las conducciones/conexiones entre ellos. En el caso de escenarios con concepto isla, si bien todos los equipos y depósitos quedan instalados, las conexiones han de terminarse en la ubicación definitiva.

- Instalación de conexiones entre equipos

Para la solución de GBS aislado esta fase se realizará en el puerto base, quedando totalmente finalizado para su futura explotación. En el caso de las configuraciones Isla, se conectarán todos los equipos que sea posible.

- Construcción de la banqueta en ubicación definitiva

En la posición definitiva del GBS, se construye la banqueta de cimentación. Ésta se construirá con medios marítimos de tal forma que se garantice una superficie uniforme y sin irregularidades. En la programación de los trabajos es importante planificar las tareas adecuadamente para minimizar el tiempo transcurrido entre la terminación de la banqueta y el fondeo del GBS, para minimizar el riesgo de su deterioro con la acción del mar (corrientes y oleajes). La geometría de la banqueta se ha de comprobar con batimetrías periódicas.

- Reflote del GBS y transporte a ubicación definitiva

El reflote del cajón se consigue con el bombeo del lastre líquido de las celdas. Se ha de bombear el agua de manera uniforme de tal forma que no se produzcan desequilibrios que provoquen escoras del conjunto. Una adecuada sectorización de celdas permite corregir las posibles escoras que se puedan producir.

Una vez reflotado el GBS, se transporta con la ayuda de un remolcador a su ubicación definitiva.

- Fondeo del GBS en su ubicación definitiva

Para el fondeo de los GBS se ha de contar con un sistema de posicionamiento de la maniobra en todo momento. Las líneas de anclaje han de ser suficientes para poder corregir la posición del GBS.

Para posteriores GBS en configuración isla, las líneas de fondeo se apoyarán en los cajones previamente fondeados, facilitando la maniobra de fondeo de manera relevante.

4. Resultados

4.1. Depósitos de almacenamiento

Tras la comprobación del diseño innovador de depósito de hidrógeno con materiales compuestos se diseñó una estructura metálica de arriostramiento de los mismos para resistir las acciones durante el transporte del GBS.

Por último, se diseñó una cubierta ligera, curva, con chapa plegada, para el foso donde se emplazan los depósitos a fin de evitar la entrada del agua de lluvia, preservando la adecuada ventilación.

4.2. GBS small scale

La verificación final del GBS se realizó con los resultados de los ensayos en modelo físico, un total de 184 ensayos. Los resultados proporcionaron información para optimizar y verificar los aspectos siguientes:

Estabilidad de la banqueta de cimentación de la estructura GBS

Durante los ensayos se comprobó que la zona de la banqueta de cimentación más afectada por el oleaje es la zona frontal. Los vértices de la estructura GBS producen una turbulencia en superficie debido a que no tienen una forma aerodinámica óptima, creando vórtices que se propagan a la estela y laterales de la estructura. Además, en los vértices de la estructura también se produce una fuerza de succión que afecta a la banqueta de cimentación produciendo daño en la misma al provocar un movimiento de las unidades de escollera.

Por ello se cambió la escollera de 1 t por 3 t sólo en la parte frontal, comprobándose después su total estabilidad.

Estabilidad del GBS frente a los esfuerzos ejercidos por el oleaje

Los resultados obtenidos figuran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultante de la acción del oleaje sobre el GBS

Valores críticos de comprobación analítica. Las Palmas.		
V(Fz')	40,14	T/ml
H (Fx')	133,66	T/ml
Mresultante (My')	3.657,44	mT/ml

Valores críticos de comprobación analítica. Carboneras.		
V(Fz')	63,96	T/ml
H (Fx')	186,09	T/ml
Mresultante (My')	5.079,74	mT/ml

Los resultados del ensayo resultan inferiores a los utilizados en el dimensionamiento analítico previo.

Presiones y subpresiones en la estructura GBS

Los resultados de las mediciones de presión en los paramentos del GBS sirvió para la verificación de espesores de las estructuras de hormigón (paredes de cajón, espaldón y superestructura) y su armadura estimada.

Como ejemplo, se muestran en la Figura 6

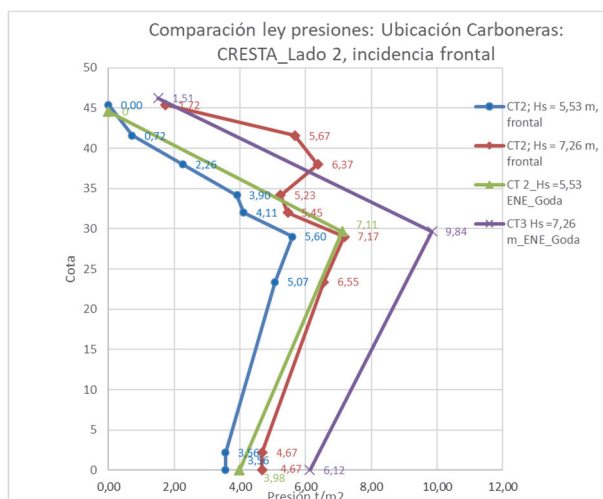


Fig. 6. Comparación de presiones entre el modelo analítico y el físico

En todos los casos analizados, la ley de presiones considerada en el dimensionamiento del GBS y obtenida con la fórmula de Goda supera a las presiones obtenidas en los ensayos, lo cual concluye que el armado previsto es suficiente.

Rebase del oleaje sobre la estructura

Para la posición con oleaje frontal de la estructura, los rebases obtenidos (promedio 0.01 l/m/s) en prototipo son inferiores a los caudales de rebase para instalaciones industriales del manual Eurotop (2018). Con ensayos adicionales, se confirma que se puede rebajar la cota de coronación del espaldón.

Para la posición con oblicuidad del oleaje se observa un pequeño rebase en la parte posterior debido a turbulencias, que será muy fácil evitar en fases posteriores de diseño.

5. Conclusiones

- El proyecto OCEANH2 ha demostrado la viabilidad técnica y económica de la generación, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde offshore, con escenarios desde 25 a 950 MW de potencia eléctrica instalada. Este artículo se centra en el almacenamiento en estructuras GBS.
- Una componente del proyecto ha sido el desarrollo de un depósito innovador de H2 comprimido a 150 bares, en material compuesto, con fibra de carbono y liner de aluminio. Su capacidad es de 727 kg de H2, con un diámetro interior de 3 metros y una longitud de 11 m.
- Se ha optimizado la distribución de los depósitos innovadores dentro del GBS para el máximo aprovechamiento del espacio disponible.
- Se ha realizado un estudio detallado de clima marítimo y de posibles ubicaciones que abarca toda la costa mediterránea y el costado Este de las Islas Canarias.
- Se han determinado los parámetros característicos y envolventes de los agentes climáticos en esas ubicaciones.
- Se ha desarrollado un GBS offshore que integra los principales componentes de la planta small scale, con sus fases constructivas y en servicio.
- Se aprovecha la tecnología de construcción de cajones flotantes y se diseña para que el montaje de todos los componentes de la planta se realice en puerto, minimizando las unidades de obra offshore,
- Se ha diseñado islas energéticas para los escenarios médium y big scale
- Con los ensayos en modelo físico queda validada la solución propuesta del GBS para las dos ubicaciones previstas.

Referencias

- ROM 2.0-11. Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución en Obras de Atraque y Amarre. Programa ROM. Puertos del Estado, 2011.
- Coastal Engineering Manual (CEM). U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2002.
- Mooring Equipment Guidelines (MEG)., Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), 2018.
- EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures.
- Gallach, D, López, A, Valdés, J.M, González, J. M. 2024. Modelo físico en canal de oleaje de una estructura GBS para almacenamiento de hidrógeno. XVII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Ibiza. 2024.

Dispersión del material de descarga en el puerto de Santander

Dispersion of unloading material in the port of Santander

María Jesus Martín^a, Alberto Rodríguez^b y Obdulio Serrano^c

^aCentro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX), Madrid, maria.j.martin@cedex.es; ^bAutoridad Portuaria de Santander, ars@puertosantander.com y ^cPuertos del Estado, obdulio@puertos.es

How to cite: Martín, M. J.; Rodríguez, A. & Serrano, O. (2024). Dispersión del material de descarga en el puerto de Santander. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

Particulate product streams are commonly found in many engineering applications and natural processes. The following are examples: dust handling, silo discharge, particle transport, snow avalanches, and other large-scale geophysical events such as sand dunes. In general, they are complex flows, involving various spatio-temporal scales, ranging from particle-particle deformation to container dimensions.

The numerical study of these problems is complex and requires the use of Fluid Dynamics codes that incorporate a discrete particle material (DPM) module such as the Fluent model, used in this study.

Keywords: *Dust emission, Discrete phasees material (DMP), Computational Fluid Dynamics(CFD).*

Resumen

Los flujos de productos particulados se encuentran comúnmente en muchas aplicaciones de ingeniería y procesos naturales. Los siguientes son ejemplos: manejo de polvo, descarga de silos, transporte de partículas, avalanchas de nieve y otros eventos geofísicos a gran escala como dunas de arena. En general, son flujos complejos, que involucran varias escalas espacio-temporales, que van desde la deformación partícula-partícula hasta las dimensiones del contenedor.

El estudio numérico de estos problemas es complejo y requiere la utilización de códigos de Dinámica de Fluidos que incorporen un módulo de material de partículas discretas (DPM) como el modelo Fluent, empleado en este estudio.

Palabras clave: *Emisión de polvo, modelos de fases discretas (DMP). Dinámica de fluidos computacional (CFD).*

1. Introducción

La importancia que en los últimos años han tomado los aspectos medioambientales hace necesario disponer, en muchas zonas portuarias, de protocolos de actuación para perseverar la calidad ambiental. En este sentido, y relacionado con la actividad portuaria, ya se dispone de unos protocolos de emergencia reglados en lo relativo a los derrames.

Aunque en la mayoría de los casos los problemas derivados de esta actividad son puntuales y fundamentalmente estéticos, la escasez de espacio, el aumento de la cantidad transportada, los requerimientos legales y la mayor concienciación de las autoridades y empresas por las afecciones al medio ambiente y sus posibles consecuencias en el público en general y en particular en los trabajadores que manipulan la mercancía, están potenciado la disposición, por parte de las Autoridades Portuarias, de medidas correctoras que minimicen estos problemas.

Establecer protocolos de gestión eficientes requiere conocer el comportamiento de la mercancía transportada frente a las variables medioambientales en el entorno que se efectúa la carga/descarga. El estudio numérico de estos problemas puede ser acometido con códigos de Dinámica de Fluidos que incorporen un módulo de material de partículas discretas (DPM). Estos modelos rastrean el movimiento de partículas discretas, como gotas, burbujas o partículas sólidas, en un flujo de fluido resolviendo la fase continua utilizando las ecuaciones de Navier- Stokes. Al mismo tiempo, la fase discreta se simula mediante el seguimiento de muchas partículas, que pasan a través del campo de flujo continuo calculado pero sin considerar la influencia de las partículas en el flujo de fluido, que, en ciertas circunstancias, puede tener un impacto sustancial. Dicha interacción es incluida en los modelos de fase discreta densa (DDPM), capaces de describir los efectos de las interacciones partícula-partícula, las colisiones de partículas y la transferencia de momento entre fases.

2. Objetivos

En este estudio se trata de determinar la extensión de la pluma del material de descarga con cuchara en las tolvas situadas en los muelles de Raos 3 y Raos 5 del puerto de Santander (figura 1) y establecer los umbrales límites de velocidad de viento susceptibles de originar emisiones con el fin establecer un sistema de alerta de parada operativa.



Fig. 1. Localización de la zona de estudio y la información disponible

3. Metodología de estudio

La descarga de los distintos productos se realiza simultáneamente en las dos tolvas y se combinan de la siguiente forma:

Sulfato (Raos 5) con Abono (Raos 3)

Cereales (Raos 5) con Abono (Raos 3)

Sulfato (Raos 5) con Cereales (Raos3)

Las características del material de descarga requeridas por el modelo numérico para reproducir la dispersión del material en su proceso de caída se recogen en la tabla 1

Tabla 1. Características del material de descarga

Producto	Tamaño partículas (mm)			Densidad aparente (t/m ³)
	Mínimo	Máximo	Medio	
Sulfato Sódico (Raos 5)	0.05	1	0.07	1.66
Abono_Nutramon (Raos 3)	0.5	5	3.6	1.04
Cereal_Trigo (Raos 3 y 5)	5	9	7	0.7

De las distintas fuentes de información de viento existentes en la zona, para realización del estudio se han considerado los datos procedentes del anemómetro del aeropuerto de Santander, suministrados por el servicio meteorológico regional de AEMET de Cantabria que se encuentra situado al sur de la zona portuaria y es considerado representativo de la zona de estudio (ver figura 1). El anemómetro está situado en 43.4286°N ,3.8314°W, a 3m de altura, aunque en el proceso de los datos se realiza la transformación a 10m. La información suministrada por el equipo es la velocidad diezminutal de la velocidad media del viento, su dirección media asociada y la velocidad de ráfaga de 3s con su correspondiente dirección de procedencia.

Asumiendo que la relación entre la velocidad media y la de ráfaga suministrada por el modelo es el factor de ráfaga de 3s y considerando las relaciones recogidas en la ROM 0-4 95 entre el factor de rugosidad superficial, z_0 , y la intensidad de la turbulencia, $I(z)$:

$$0.98$$

$$I(z) = \frac{0.98}{\ln(z/z_0)}$$

y los factores de tiempo de la ráfaga, que parecen tabulados en la ROM 0.4-95; se ha estimado el factor de rugosidad superficial que determina el perfil de velocidades de viento requerido por el modelo numérico.

Las simulaciones numéricas se han realizado con el módulo de Fase Discreta Densa (dense Discrete Phase Model (DDPM) de Fluent). El modelo es un modelo multifase en el que la fase discreta (partículas emitidas) es tratada en un marco de referencia lagrangiano y la fase continua con métodos eulerianos. Ambas fases son acopladas a través de términos fuentes en las ecuaciones de gobierno.

Para la fase continua, aire, se asume una temperatura de 25°C, presión estática y componentes iniciales de velocidad (U_x , U_y , U_z) nulas.

Como modelo de turbulencia para el dominio interior reproducido se ha seleccionado el modelo k- ω SST (Shear Stress Transport) desarrollado por Menter (2003).

El acoplamiento entre la fase discreta y continua es de un solo paso (*one –way coupling*) actualizándose la fase discreta y manteniendo el término de la fase continua. Esto implica asumir que el movimiento de las partículas se modifica por la fase continua pero la fase continua no es alterada por el flujo de partículas.

El flujo de la fase discreta se introduce “inyectando partículas”, que pueden ser referidas de distintas formas habiéndose seleccionado en estas simulaciones inyecciones a través de la superficie asociada a la parte inferior de la cuchara que se considera abierta. La cantidad de partículas inyectadas de la fase dispersa se ha establecido en términos de la velocidad de caída y la cantidad de descarga en Kg/s. La caída de material de la cuchara se realiza aproximadamente en 40-45s, la cantidad vertida está en torno a 40t, (tasa aproximada de descarga de ≈ 889.0 kg/s) y se asume que la pérdida de material que cae entre la salida de la tolva y la tanqueta del camión donde se deposita la descarga es despreciable (ver figura 2).

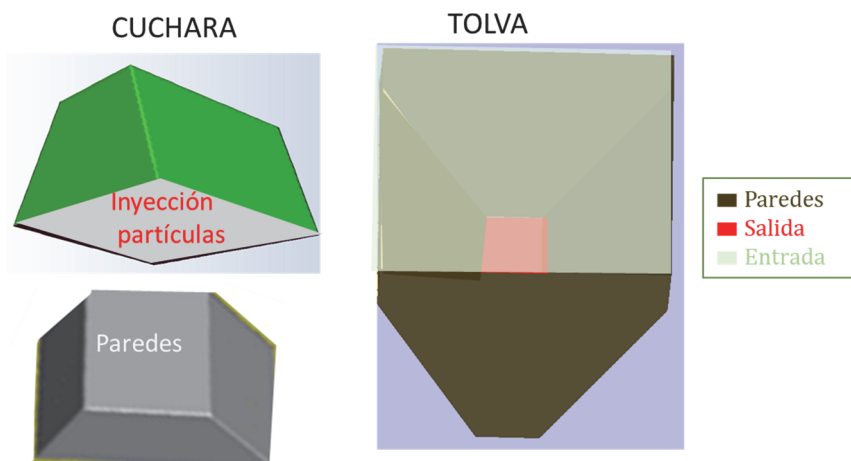


Fig. 2. Características de la cuchara y la tolva numéricas

La condición de contorno impuesta, tanto en el plano superior, como en los laterales que limitan el dominio de cálculo, ha sido de simetría (*simmetry*). Esta condición mantiene invariable las condiciones del fluido de las caras adyacentes. El contorno opuesto al de entrada es definido como contorno abierto en términos de presión (*Pressure Outlet*) imponiendo una dirección del flujo saliente normal al mismo y tomando como presión de referencia la presión estática. Con esta condición, la presión del flujo saliente es establecida como la presión total derivada de las componentes de velocidad normal a dicho contorno y la opción de *Intensity and Viscosity ratio* con valores de 5 y 10 respectivamente. La condición impuesta a las partículas es de escape lo que supone que las partículas desaparecen abandonando el dominio de cálculo. En el contorno de entrada la condición aplicada ha sido referida al perfil logarítmico asociado a las velocidades de viento establecidas por la APT, $V=8.0\text{m/s}$ y $V=15.0\text{m/s}$, asumiéndose para las partículas la condición de salida, *escape*.

El contorno inferior que limita el fondo del dominio de cálculo, así como los tinglados, tolva, cuchara y cintas transportadoras, son considerados sólidos rígidos, *wall*. La rugosidad considerada para todos ellos es 0.5 y la altura de rugosidad superficial a la que la velocidad se anula la resultante de las medias de viento para la dirección analizada $z_0=0.0023$ y 0.025m .

Para las partículas de material de descarga que por la acción del viento alcanzan, el suelo o los tinglados se asume la condición de *trapped*, lo que implica que su trayectoria se anula y desaparece del dominio fluido. El resto del dominio reproducido, excluyendo las cucharas, tolva, silos y edificios, constituye el dominio del fluido aire y de las partículas que periódicamente se descargan y se dispersan en función de la velocidad y dirección del viento incidente.

Para garantizar la convergencia, tanto de la fase continua, como de la discreta, se han realizado distintas simulaciones aumentando, para cada iteración de la fase continua, el número de iteraciones para la resolución de la trayectoria de las partículas de fase discreta. De los resultados obtenidos se seleccionó un número de pasos de 5000. Este valor, a pesar de ser elevado, no evita la aparición dentro el dominio de cálculo lo que el modelo denomina partículas incompletas, *incomplete particles*, situación indicativa de que alguna de las partículas queda atrapada en el interior en los remolinos de recirculación que se generan entre los distintos obstáculos

La zona reproducida incluye las dos tolvas y los edificios y estructuras que, por su orientación relativa con relación a la dirección del viento y las tolvas, pueden afectar a la dispersión del material de descarga (ver figura 3)

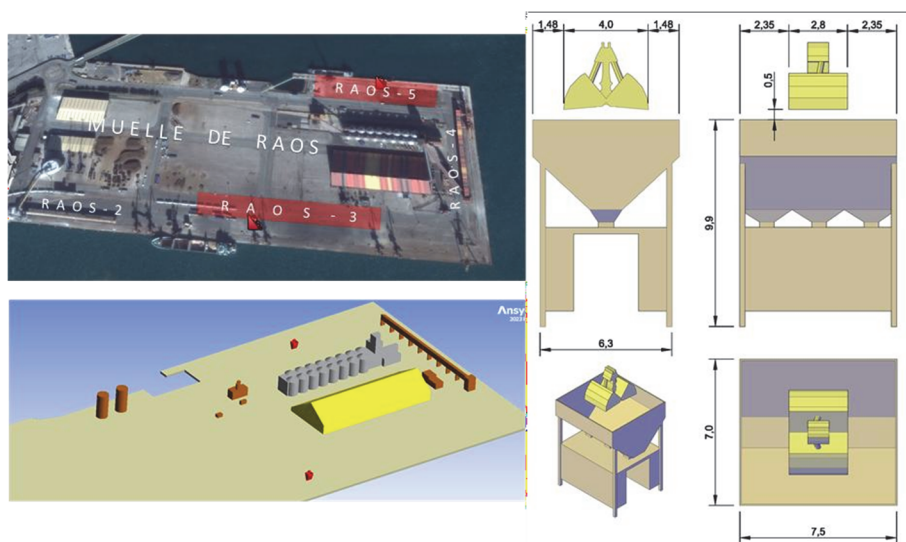


Fig. 3. Localización de la zona de estudio y la información disponible

Teniendo en cuenta la cantidad de sustancia que se descarga en una cuchara, aproximadamente 40t según la APS, y el tiempo que tarda en depositarse todo el material, unos 45s, la tasa media de descarga en ese periodo de tiempo es de unos 889kg/s. Estas condiciones se mantienen en todas las simulaciones hasta una duración total de 45s. El perfil de velocidades de viento que alimenta el modelo es reproducido a través de una subrutina, definida con el lenguaje propio del código numérico utilizado UDF (User Definition Function)

4. Resultados

Teniendo en cuenta la irregularidad del flujo de viento entre la tolva y la cuchara y en las proximidades de las estructuras reproducidas, el análisis de la variación de la velocidad de viento y la concentración de partículas se ha realizado en planos horizontales situados a 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 m del suelo (figura 4). Para el análisis de la variación de ambas variables con la distancia a las

tolvas se han definido planos verticales paralelos equidistantes 100m de la zona de sotavento del centro de la descarga hasta 400m incluyéndose un plano adicional situado a 50m de la zona referida. (figura 5 a/b).

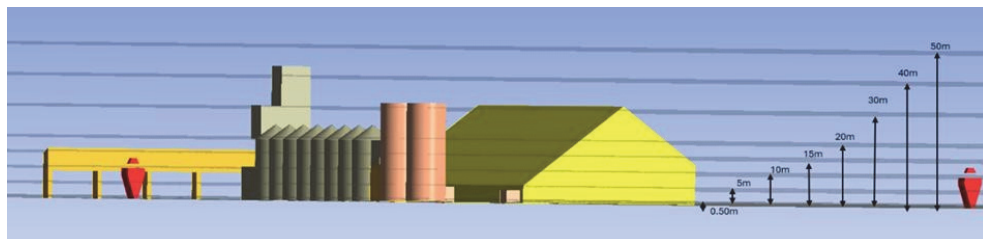
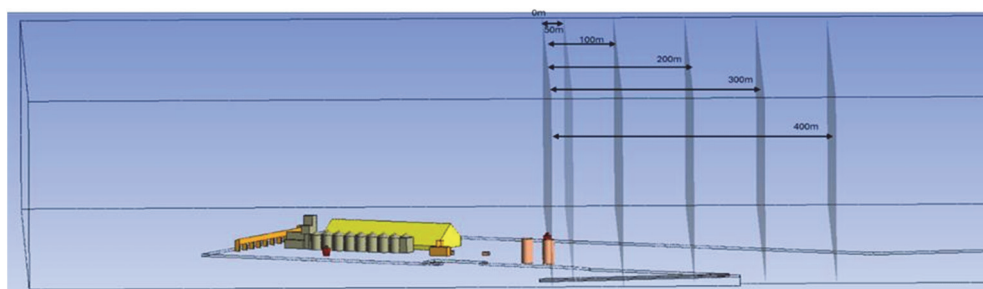
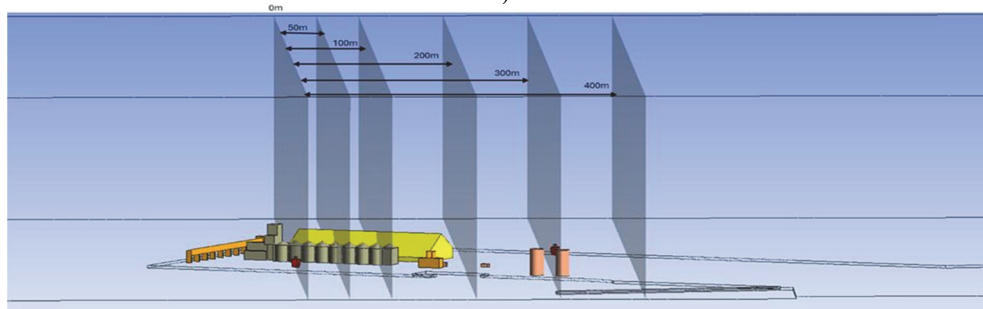


Fig. 4. *Alturas de las secciones horizontales consideradas*



a)



b)

Fig. 5. *Secciones de cálculo Verticales utilizadas*

a) *Tolva Raos 3*

b) *Tolva Raos 5*

Los resultados obtenidos, que se muestran en la figura 6, indican que la dispersión del material de descarga es prácticamente nula en altura y se concentra a 10m, que es la altura a la que el material es descargado cayendo la mayor parte de la descarga por su propio peso al interior de la tolva-

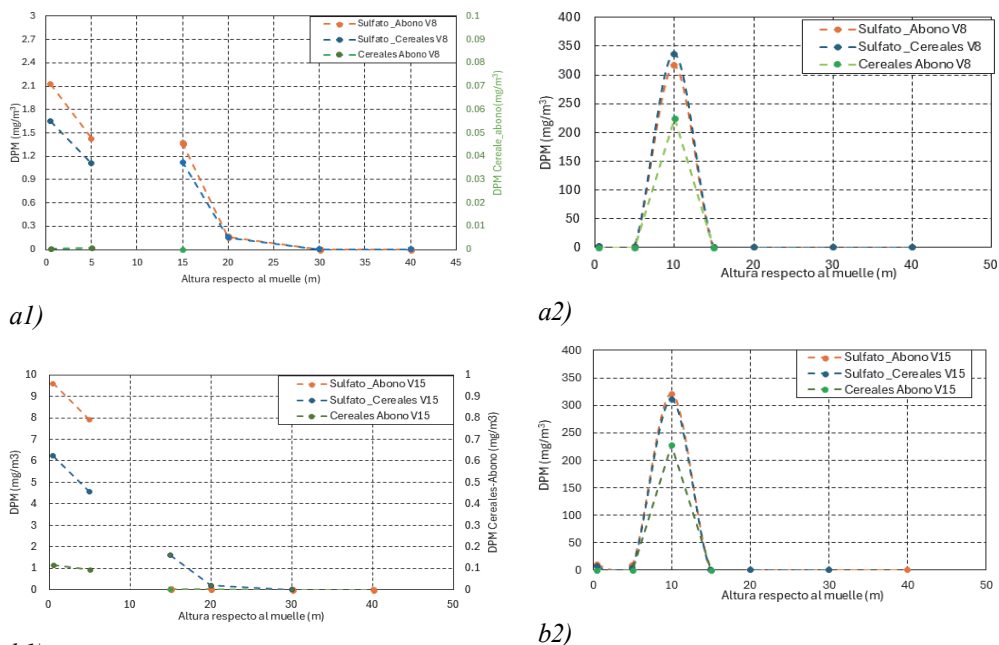


Figura 6 Variación de la concentración de partículas con la altura respecto al muelle a1-a2) Velocidad del viento 8m/s b1-b2) Velocidad del viento 15m/s

A barlovento de la zona de descarga, la dirección de viento considerada en este estudio produce una recirculación entre la cuchara y la tolva que limita el transporte de las partículas (ver figura 7)

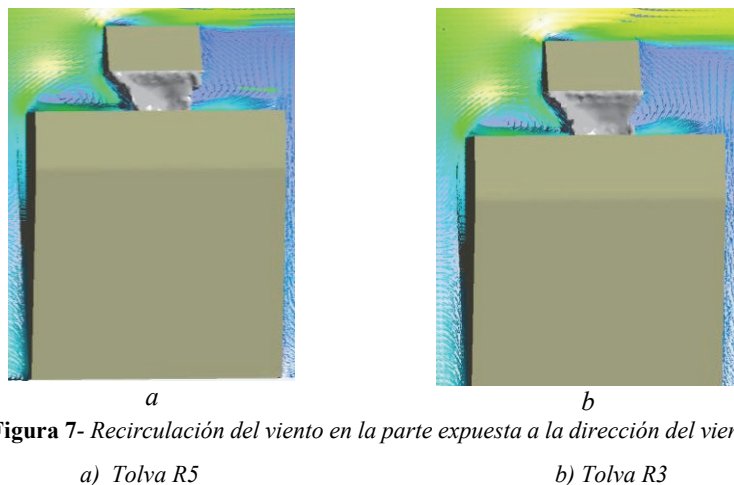
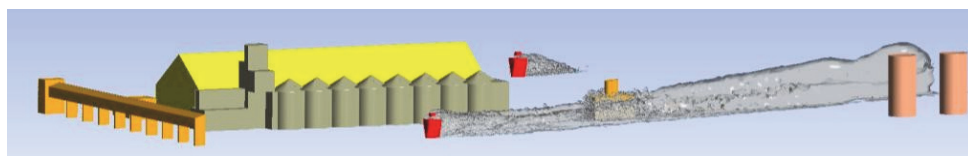


Figura 7- Recirculación del viento en la parte expuesta a la dirección del viento

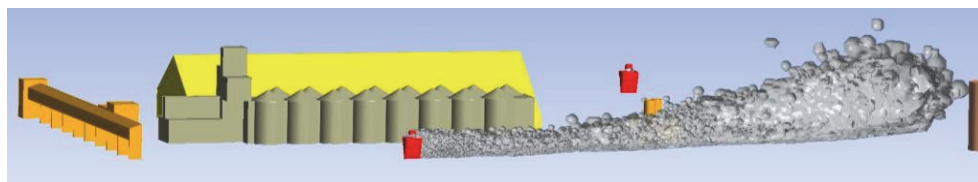
a) Tolva R5

b) Tolva R3

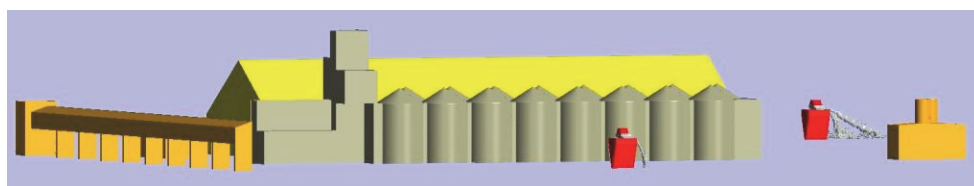
La representación del alcance de los productos en las tolvas consideradas con una concentración de $1.10^{-07} \text{ g/cm}^3$ y velocidades de viento de 15m/s se muestran en la figura 8 a-c para las distintas combinaciones de descarga consideradas. Para velocidades de viento de 8m/s la pérdida de material es prácticamente nula, salvo con el sulfato.



a)



b)



c)

Figura 8- *Dispersión de la nube de polvo de los productos de descarga con velocidades de viento de 15m/s*

a) Sulfato(R5) Abono (R3) b) Sulfato (R5) Cereal (R3) c) Cereal (R5) Abono (R3)

El efecto de la distancia de la cuchara a la tolva ha sido también analizado considerando una reducción de la distancia entre cuchara y tolva de 0.5m y una descarga simultánea de Sulfato en Raos 5 y Abono en Raos 3, con una velocidad de viento de 15m/s.

Los resultados obtenidos, que se recogen en la figura 9, muestran la misma dispersión en altura que la obtenida aumentando 0.5m la distancia. Sin embargo el alcance de la descarga en distancia se reduce en torno al 25% reduciéndose la cantidad de material con la distancia a la tolva hasta hacerse prácticamente nula a 300m de la tolva con ambas distancias.

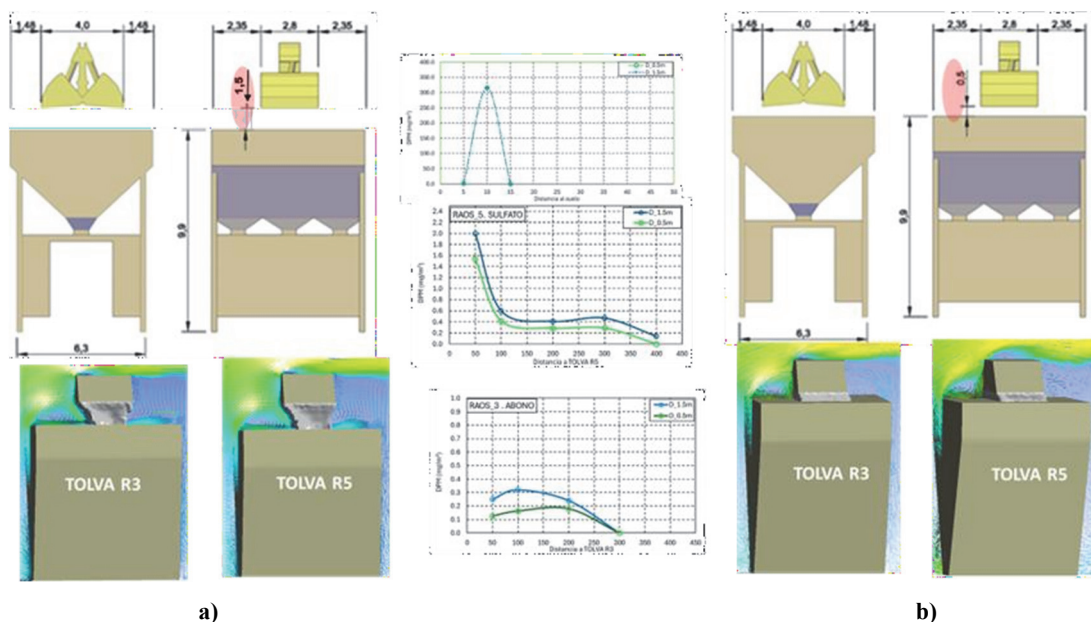


Figura 9- Efecto de la distancia entre cuchara y tolva en la dispersión de la nube de polvo de Sulfato en Raos 5 y Abono en Raos 3, con velocidades de viento de 15m/s

5. Conclusiones

La dirección de viento considerada produce una zona de recirculación entre la cuchara y la tolva que limita el transporte de las partículas y gran parte del material cae por su propio peso al interior de la tolva

Para una zona determinada, la concentración de partículas en el fluido depende de la velocidad del viento y la distribución granulométrica de las partículas siendo el sulfato el que mayor producto emite a la atmosfera y el cereal el que cae rápidamente dentro de tolva y en la zona próxima a la tolva. En la posición intermedia se encuentra el abono.

La dispersión del material de descarga es prácticamente nula en altura y se concentra a 10m, que es la altura a la que el material es descargado.

Aunque, desafortunadamente, no se dispone de medidas que permitan evaluar la representatividad de los resultados, el alcance de las partículas emitidas en el proceso de descarga de los distintos productos en cada una de las tolvas es acorde a las apreciaciones de la autoridad portuaria.

El hecho de que las medidas de concentración sólo puedan llevarse a cabo en posiciones determinadas tiene importantes consecuencias. Unos pocos grados en el ángulo formado entre la dirección del viento y la zona de emisión puede dar lugar a errores considerables en la estimación de las concentraciones calculadas. El cálculo de dicha concentración en planos reduce el error de la estimación.

Aunque la dispersión de partículas se ha reducido significativamente al cambiar el apilamiento del material a la intemperie en el muelle por la descarga en tolvas, sería conveniente, al menos para el sulfato, reducir la distancia entre la tolva y la cuchara intentando introducir la cuchara dentro de la tolva.

Referencias bibliográficas

FLUENT ANSYS S.L <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

Menter, F. R., Kuntz, m. & Langtry, R. (2003). Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Heat and Mass Transfer 4. ed. k. Hanjalic, Y Nagano and M.Tummers, Begell House, Inc. (2003) pp 625-632.
<https://www.scirp.org/journal/journalarticles?journalid=917>

Recomendaciones para Obras Marítimas. Acciones Climáticas II Viento. Puertos del Estado ROM 0.4-95. (1995). <https://widispe.puertos.es/rom/ROM-Serie-0.html>

Ingeniería marítima en tramos en los que el transporte transversal es predominante

Coastal engineering for sections where onshore-offshore transport prevails

Leonardo Monzonís Forner^a, Fernando Pérez Burgos^b, María Josefa Solernou Sanz^c, Miguel Angel Aragón Babiloni^d y David Aragón Balaguer^e

Servicio Provincial de Costas en Castellón, Dirección General de la Costa y el Mar, ^almonzonis@miteco.es, ^bfpburgos@miteco.es, ^cmjsolernou@miteco.es, ^dmaragon@miteco.es y ^edaragon@miteco.es  MITERD

How to cite: Monzonís Forner, L.; Pérez burgos, F.; Solernou Sanz, M.J.; Aragón Babiloni, M.A & Aragón Balaguer, D. (2024). Ingeniería marítima en tramos en los que el transporte transversal es predominante. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costa y Puertos. Ibiza, mayo de 2024.

Abstract

In recent decades, sedimentary contributions from rivers have been reduced and transport barriers have been producing their effects, such that some shorelines have evolved towards the equilibrium. As a result, net longitudinal transport has tended to be cancelled and onshore-offshore transport has become predominant. This justifies our paying increasing attention to the changes induced by this transport and the need to study what type of solutions can be applicable when these shorelines enter regression.

Keywords: *sediment transport, orthogonality, equilibrium perched beaches.*

Resumen

En las últimas décadas los aportes sedimentarios de los ríos se han ido reduciendo y las barreras al transporte han ido produciendo sus efectos, de tal modo que algunos tramos han evolucionado hacia la orientación de equilibri. Con ello, el transporte longitudinal neto ha tendido a anularse y el transporte tranversal se ha vuelto predominante. Esto justifica que prestemos cada vez mayor atención a los cambios inducidos por el transporte transversal y que sea oportuno estudiar qué tipo de soluciones pueden ser aplicables cuando estos tramos entran en regresión.

Palabras clave: *transporte de sedimentos, ortogonalidad, equilibrio, playas sustentadas.*

1. Introducción

Tradicionalmente, la ingeniería marítima se ha enfrentado con problemas de erosión en tramos en los que el transporte longitudinal es predominante. Sin embargo, a medida que los aportes sedimentarios de los ríos se han ido reduciendo, y las barreras al transporte han ido produciendo sus efectos, reteniendo sedimentos, algunos tramos han evolucionado hacia la orientación de equilibrio; lo cual significa que en estos tramos el transporte longitudinal neto tiende a anularse; y con ello, el transporte transversal se vuelve predominante. Esto justifica que prestemos cada vez mayor atención a los cambios inducidos por el transporte transversal y que sea oportuno estudiar qué tipo de soluciones pueden ser aplicables cuando estos tramos entran en regresión.

Partimos para ello de la validez de la hipótesis de ortogonalidad, que postula el análisis, por separado, del movimiento del sedimento paralelo a la costa y el movimiento perpendicular a la costa. Esta hipótesis ha sido cuestionada por nosotros en una publicación anterior para aquellos casos en los que la escala espacial y/o temporal son grandes. No obstante, admitimos su validez en la escala de la ingeniería marítima convencional.

Admitida esta hipótesis, vemos en primer lugar para qué morfología litoral son adecuadas las estructuras marítimas, cuando prevalece el transporte longitudinal. En Segundo lugar, analizamos si existen estructuras adecuadas que cumplan este mismo papel cuando es el transporte transversal el que predomina.

2. Hipótesis de ortogonalidad. Mecanismos que intervienen en el transporte longitudinal y en el transporte transversal

La hipótesis de ortogonalidad postula la posibilidad de analizar el movimiento del sedimento, estudiando por separado sus dos componentes: la perpendicular a la línea de costa y la paralela a ella.

Aunque, para el estudio de grandes unidades fisiográficas o el estudio de la evolución de una costa a lo largo de periodos prolongados de tiempo esta hipótesis es cuestionable, la admitimos para la escala temporal y para la escala espacial que son habituales en la ingeniería marítima. De acuerdo con ello, analizamos por separado estos dos movimientos.

2.1. Transporte longitudinal

Este tipo de transporte se produce principalmente en una franja entre la zona de rompientes y la línea de orilla. Podemos identificar esta franja con la definida hasta la profundidad de cierre activa y pueden considerarse en ella dos tipos de movimiento: el transporte en zig-zag y el netamente paralelo a la costa. El primero de los movimientos se produce en la zona de suf, donde tenemos movimientos ascendentes y descendentes del material granular. Este es un movimiento claramente perceptible cuando el material es más grueso. En playas de grava gruesa, como las ubicadas al sur del río Mijares, en el óvalo valenciano, grandes cantidades de gravas se movilizan mediante este tipo de movimiento durante los temporales de otoño e invierno. El segundo de estos movimientos se produce inmediatamente después de romper la ola. Es claramente paralelo a la costa y es más visible con material granular más fino. En el óvalo valenciano las arenas finas de diámetro en torno a 0,2 mm son movilizadas en esta franja en cantidades que pueden alcanzar caudales potenciales de 100.000 metros cúbicos al año o mayores, dependiendo del ángulo que forma la dirección de los oleajes dominantes con la línea de costa.

2.2. Transporte transversal. Corrientes de retorno o de resaca (undertow) y rip currents

También para el transporte transversal distinguimos dos modos en los que este se produce: las corrientes de retorno o resaca (undertow) y el movimiento compartimentado en células (rip currents).

En el primero de estos movimientos, el gran volumen de agua que asciende por la pendiente de la playa alcanza un nivel máximo, la cota de inundación, que depende de la energía del oleaje incidente. Este volumen desciende, después de alcanzada la cota máxima, debido al forzamiento gravitatorio.

Visto en sección, tenemos una distribución vertical de velocidades en la que la masa de agua superficial avanza hacia la costa mientras que la masa de agua más próxima al fondo marino fluye hacia aguas más profundas.

En ciertas condiciones las corrientes de resaca se canalizan concentrándose el retorno de la masa de agua en ciertos puntos separados entre sí una cierta distancia. Se forman con ello células, en el extremo de las cuales existen fuertes corrientes hacia aguas más profundas. El material movilizado por estas corrientes es capaz de alcanzar profundidades más allá de la zona de rompientes.

3. Diagnóstico y soluciones a problemas erosivos originados por defecto en el transporte longitudinal

3.1. Diagnóstico e identificación de tramos con defecto en el transporte longitudinal

Es posible observar signos que nos indican de un modo bastante certero que un tramo de costa sufre un defecto en el transporte longitudinal de sedimentos.

Está bien estudiado el origen de este defecto, que se debe básicamente a la interrupción del transporte ocasionada por barreras, ya sea que estas estén ubicadas en los cauces de los ríos o en la propia costa. Destacamos aquí otros signos observables en la evolución de la costa que nos indican que el balance entre la entrada y la salida de sedimentos en un cierto tramo es negativo.

En estos casos, podemos observar, entre otros, los siguientes signos:

- La erosión avanza en el sentido del transporte neto, en forma de onda erosiva, siendo posible identificar un frente de onda.
- Línea de costa orientándose para colocarse en la perpendicular a la dirección dominante del oleaje, en los tramos por los que ya ha pasado la onda erosiva.
- Evolución visible con cada temporal ordinario, que puede progresar en cada uno de ellos hasta varios centenares de metros. Es decir, con cada temporal el frente de onda puede desplazarse centenares de metros en el sentido que marca la dirección del oleaje del temporal, que suele coincidir con la dirección del transporte neto.



Figura 1. En la imagen 1a puede apreciarse el frente de onda (wavefront). En la 1b se aprecia el giro de la costa tras el paso de una onda erosiva. Fuente. Archivo SPC Castellón.

3.2. Soluciones a problemas debidos a defectos en el transporte longitudinal

Dependiendo de la magnitud del caudal de sedimentos que ha sido retenido por alguna barrera, ya sea en los cauces o en la propia costa, pueden implantarse soluciones más o menos intensivas. Para el caso de tramos en los que el balance negativo entre la entrada y salida de sedimentos exigiría recargas de material muy grandes o frecuentes, las estructuras longitudinales que llevan la costa a su orientación de equilibrio, son una solución técnicamente bien estudiada que puede implantarse sin grandes incertidumbres, lógicamente con las debidas precauciones con respecto sus efectos a sotavento y el impacto sobre el fondo marino.



Figura 2. Estructuras marítimas en la playa de les Marines de Nules. Fuente. Archivo SPC Castellón.

4. Diagnóstico y soluciones a problemas causados por el transporte transversal

Visto que existen soluciones eficaces para resolver problemas originados por un defecto del transporte longitudinal, la cuestión que nos planteamos aquí es si existen también soluciones técnicamente eficaces para resolver fugas de material hacia aguas profundas o hacia el continente, ocasionadas por el forzamiento del material en esa dirección perpendicular a la línea de costa.

4.1. Diagnóstico

A la pregunta de qué podemos observar en un tramo de costa con problemas de transporte transversal, podemos dar como respuesta que son visibles:

- Grandes retrocesos vinculados a temporales extraordinarios, en los que la costa se desplaza paralelamente a sí misma y perpendicularmente al flujo medio de energía (FME)
- Avances vinculados a periodos plurianuales menos energéticos.

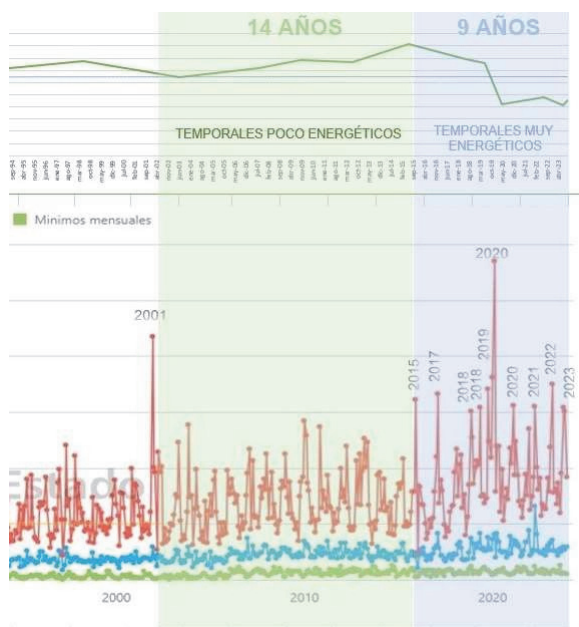


Figura 3. Gráfico de oleajes en el norte del cabo de Oropesa. Fuente. Elaboración propia SPC Castellón.

En la figura 6, correspondiente a un tramo ubicado al norte del cabo de Oropesa, en el óvalo valenciano, pueden observarse dos periodos temporales claramente diferenciados. El primero de ellos, de 14 años de duración, posteriores a un temporal extraordinario ocurrido en el año 2001, es un periodo especialmente poco energético en la suma de los movimientos de mar ocurridos durante ese periodo es relativamente pequeña. El final de este periodo, en el año 2015, coincide con el máximo ancho de playa en este tramo. Sin embargo, el periodo siguiente, entre los años 2015 y 2023 es un periodo muy energético, en el que se intercala además el año 2020, en el que se produce un temporal muy extraordinario. Este temporal, ocurrido en enero de 2020, el que produce un retroceso muy notable, y paralelo a sí mismo, de la línea de costa. Todo ello es indicativo de la predominancia del transporte transversal, con la salvedad del extremo del tramo en el que pueden producirse fugas en el sentido del transporte neto de la unidad fisiográfica.

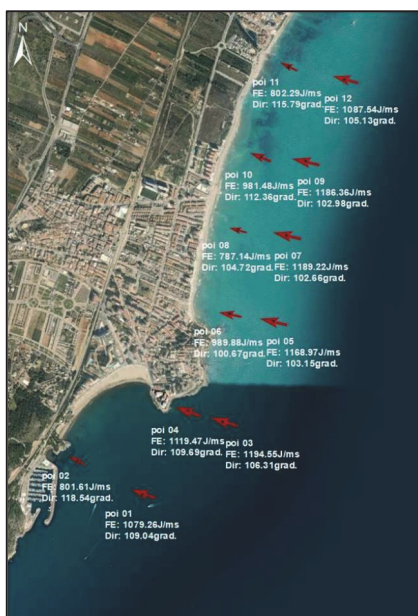


Figura 4. Flujo medio de energía (FME) en el entorno del cabo de Oropesa.
Fuente. Elaboración propia SPC Castellón.

4.2. Soluciones a tramos regresivos con predominancia del transporte transversal

Para proponer soluciones a los problemas cuyo origen se encuentra en un elevado transporte transversal es necesaria una aproximación teórica a los mecanismos que rigen esta componente del transporte de sedimentos.

Para ello se analizan aquellos parámetros que condicionan la trayectoria de la partícula de arena puesta en movimiento. De tal modo que una determinada relación entre estos parámetros produce un movimiento de la partícula hacia la línea de orilla, es decir, de acreción de la playa emergida; mientras que la inecuación contraria produce el movimiento de la partícula de arena hacia aguas profundas. En términos cualitativos, la acreción de la playa emergida se produce con trayectorias en las que el giro hacia aguas profundas de la partícula se produce cuando está en una posición más próxima al fondo o suelo de la playa sumergida.

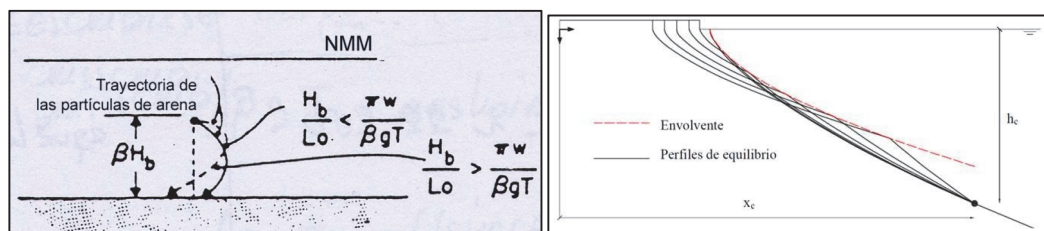


Figura 5. La figura 5a muestra los parámetros que intervienen en la trayectoria de las partículas de arena.
La figura 5b muestra la envolvente de perfiles de equilibrio.

Parámetros que intervienen de forma significativa en el movimiento de las partículas de arena son la altura de ola, la longitud de onda, la velocidad de caída del grano y el periodo de la onda. Nos encontramos pues ante un fenómeno complejo en el que no es un único parámetro el que determina las condiciones de acreción o erosión de la playa emergida sino una combinación de ellos.

En general, oleajes más energéticos, con alturas de ola mayores, tienden a erosionar la playa. No obstante, esta afirmación tiene que ponerse en relación con el hecho de que sobre un determinado perfil se suceden distintos estados de mar, que conducen cada uno de ellos un perfil de equilibrio que se alcanza cuando el estado de mar tiene una duración suficiente. El estado de mar siguiente encuentra un perfil de equilibrio anterior sobre el que actúa. La acreción o erosión depende también de la relación entre las energías de los sucesivos estados. La serie de esos estados da una envolvente de perfiles de equilibrio, que, a volumen constante en el perfil, nos da los límites de la distribución de arena hasta la profundidad de cierre.

Las soluciones a fugas transversales de sedimento pueden venir pues de algún tipo de estructura que disipe parte de la energía incidente. Ello es posible mediante la implantación en la playa sumergida de un dique de baja cota, según el esquema que se representa en la Figura 6.

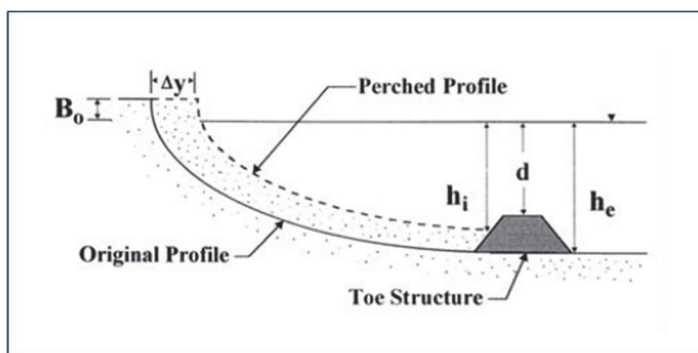


Figura 6. Esquema de un dique sumergido de baja cota que funciona como estructura de pie de una playa sustentada.

El dique sumergido funciona como el apoyo de pie de una playa sustentada o colgada (perched beach) y tiene un cierto francobordo con respecto del nivel medio del mar. Esta disposición fuerza la disipación de la energía debido a la modificación del calado a una cierta distancia de la línea de orilla, que queda determinada por el francobordo. La distancia a la línea de costa y la profundidad correspondiente son entonces parámetros fundamentales del diseño de la estructura, así como el francobordo. Distancias a la orilla demasiado cortas podrían hacer que el oleaje incidiese con inercia suficiente para provocar esfuerzos cortantes en la plataforma de playa y movilizar grandes cantidades de arena. Distancias demasiado grandes podrían permitir la reconstrucción de la ola.

No obstante, las mayores dificultades en el diseño de estas estructuras no proceden de su capacidad para disipar la energía sino de su interferencia en los procesos que conducen a los estados de equilibrio del perfil. Estas estructuras interfieren en el perfil de equilibrio, pues han de ser posicionadas a una distancia menor que la profundidad de cierre y por lo tanto en una franja en la que se producen cambios importantes en el perfil de la playa como la migración de las barras sumergidas.

Estas dificultades introducen complejidad en el estudio teórico de estos diques. A pesar de que la investigación teórica sobre la evolución de los perfiles de equilibrio avanza notablemente, la introducción de un elemento estructural en el perfil exige aún hoy que el problema requiera ser tratado de un modo experimental. La forma de abordar los ensayos experimentales, a escala, con diques de baja cota se basa fundamentalmente en el estudio de ciertos monomios adimensionales que permiten evaluar el comportamiento de la estructura en distintos estados de mar.

Una de las conclusiones más destacables de los ensayos realizados es la que se refiere a la importancia de la anchura en coronación de la estructura para la disipación de la energía incidente.

Esto nos lleva a tener que valorar dos cuestiones. Por un lado, es evidente la ventaja de estos diques en cuanto al volumen de aportación que se reduce, al estar sustentada la playa en el pie estructural. También es evidente la ventaja cuando no es deseable cubrir de arena algún espacio en el que exista fauna o flora sensible a este recubrimiento. Por otro lado, que la suficiente anchura en coronación del dique sea un requerimiento para su buen comportamiento en su función de disipar energía, implica dos desventajas notables. La primera de ellas la ocupación que el propio dique tiene del fondo marino; la segunda, desventaja se refiere al uso para el baño o los deportes náuticos en el tramo en el que se ubique la estructura. Un ancho de coronación importante implica una barrera no deseable a una distancia que puede ser alcanzada durante el uso convencional de la playa.

Todo ello nos lleva a concluir que, en el momento de desarrollo actual de esta tecnología, las ventajas de estas estructuras sólo pueden superar a los inconvenientes en los casos en los que, o bien la reducción en el volumen de aportación sea muy relevante; o bien, la preservación de fanerógamas, alguesos u otros bienes de calidad ambiental, a profundidades mayores que la del dique, sean determinante para el buen estado ecológico de la masa de agua costera.

Líneas abiertas de investigación

Tenemos en suma dos tipos de dificultades relacionadas con las soluciones para problemas cuyo origen se halla en un elevado transporte en la dirección perpendicular a la costa, es decir, en el transporte transversal.

Por un lado, las dificultades que nacen de la complejidad del estudio teórico del transporte transversal en presencia de una estructura longitudinal de baja cota. Si bien existen estudios teóricos bastante desarrollados sobre el comportamiento del perfil de una playa, está aun pendiente un estudio teórico que analice este problema cuando se implementa en este perfil una estructura.

Por otro lado, es necesario analizar el diseño de la estructura para minimizar dos efectos no deseados: la gran ocupación del fondo marino que ocasionan y el efecto que sobre el uso de la playa se genera cuando el ancho de coronación de la estructura tiene una magnitud importante.

Para resolver este segundo grupo de dificultades se están ensayando distintos diseños que podemos agrupar en tres líneas. Una primera línea trata de suavizar la estructura utilizando grandes sacos de arena en vez de escollera u otros elementos de hormigón, con el fin de contribuir a una morfología menos abrupta. Una segunda línea de trabajo consiste en generar arrecifes artificiales naturalizados mediante geotubos alimentados con corriente eléctrica de bajo voltaje, capaz de generar la consolidación de la arena alrededor del geotubo. Finalmente, una tercera línea de desarrollo trata de minimizar el tamaño de la estructura optimizando su diseño mediante piezas de hormigón con poco ancho de coronación que se centra en el efecto de pie de sustentación de la playa más que en la disipación de energía.

Referencias bibliográficas

- GARCÍA RAMOS, S. (2009). Predicción de los cambios en el perfil de playa mediante parámetros simples. Tesis doctoral. Barcelona. Universidad Politècnica de Catalunya.
- MARTÍNEZ SÁNCHEZ, J. (2013). Evolución de la línea de costa a partir del equilibrio dinámico del perfil de playa. Tesis doctoral. Santander: Universidad de Cantabria.
- MORENO BLASCO L.J. (2015). Perfil de playas sustentadas. Estudio Hidrodinámico y experimental. Directrices de diseño. Tesis doctoral. Madrid. Universidad Politècnica de Madrid.
- SUNAMURA T. y TAKEDA Y. (1993). Bar Movement and Shoreline Change. Predictive Relations en Journal of Coastal Research, 15, 125 – 140. Tesis.
- LARSON, M; KRAUS, N.C. (Julio 1989). SBEACH: Numerical model for simulating storm – induced beach change. Technical Report CERC-89-9. Washington, DC.

Pedagogía de la costa a los ingenieros de agua dulce y seco

Vicente Ibarra Damiá^a

^aGeneralidad Valenciana, Dirección General de Costas Puertos y Aeropuertos, ibarra_vic@gva.es.

How to cite: Ibarra Damiá, V. (2024). Pedagogía de la costa a los ingenieros de agua dulce y seco. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

It was the erosion of the continental lands and their transport, mainly by rivers, that gave rise to the formation of beaches in geological periods, and it has been the artificial stabilization of these lands by engineering works and the practical elimination of this transport by the regulation of the rivers (dams) that has been the main cause of their accelerated regression.

Accepting this reality and informing all engineers about it is what we have called coast pedagogy to freshwater and dryland engineers, a teaching that would be incomplete if we do not propose actions that these engineers can incorporate in all their projects to compensate for this damage.

Keywords: erosion, transport, soil stabilization, regression, internal works, compensatory works, contribution, arids

Resumen

Fue la erosión de las tierras continentales y su transporte mayormente fluvial lo que dio lugar a la formación de las playas en periodos geológicos y ha sido la estabilización artificial de esas tierras por obras de ingeniería y la práctica anulación de ese transporte por la regulación de los ríos la mayor causa de su acelerada regresión.

Asumir esta realidad e informar de ella a todos los ingenieros es lo que hemos llamado hacer pedagogía de la costa para ingenieros de agua dulce y seco, pedagogía que quedaría incompleta si no proponemos acciones que puedan incorporar estos ingenieros en todos sus proyectos para compensar este perjuicio.

Palabras clave: erosión, transporte, estabilización terrenos, regresión, obras interiores, obras compensatorias, aportación, áridos.

1. Introducción

Predicar que la protección de la costa es tarea de todos, es una obviedad que por ser una afirmación de alcance general todos comparten sin que a título individual nadie se sienta concernido.

Más comprometido es afirmar que la protección de la costa compete a todos los ingenieros, añadiendo que ahí incluimos a los de seco y agua dulce, apelativo que les damos en clave de humor, y hacerles ver que sus proyectos y obras en tierra adentro, aunque cierta pereza intelectual les induzca a desconocerlo, afectan a las playas. Y generalmente no para bien.

Pero la pedagogía quedaría incompleta si se limitara a señalarlos como culpables, dejémoslo en que por omisión, de la regresión de las playas. Apuntarles algunas de las acciones que pueden y deben emprender les permitirá tenerlas presentes en el futuro y facilitará que sean colaboradores en mejorar el estado de nuestra costa.

2. Obras que retienen áridos y medidas correctoras

Hemos incorporado los ingenieros a nuestros proyectos infinidad de estudios sobre cuestiones que antes nos parecían ajenas a nuestras obras y sin las que hoy nos parecerían proyectos incompletos.

Así, los estudios de impacto ambiental, que deben someterse a una compleja tramitación administrativa, tratan de la afección que puede causar la obra a los reinos animal y vegetal en su estado preexistente a nuestra actuación. También al paisaje; o a restos arqueológicos que pudiera haber y que habríamos de rescatar; el ruido; la contaminación lumínica ...

El iter de estos estudios ambientales debe concluir con una Declaración, en la que se impondrán medidas compensatorias y correctoras del impacto que causan, con objeto de anularlo o cuando menos minimizarlo.

Pero ningún proyecto de obra sobre una presa, por ejemplo en el Pirineo, prevé corregir la disminución de áridos que inexorablemente lleva aparejada, debida en primer lugar a la reducción de la erosión en los tramos de aguas bravas y en segundo a la retención en el fondo del embalse del poco material erosionado.

Tampoco la explotación de los embalses prevé su dragado periódico y la gestión, difícil, del material extraído, pese a los perjuicios que de modo directo les causa: reducción de volumen embalsado, colapso de los desagües de fondo...

3. Un artículo timorato en una ley enérgica

Tiene fama, merecida, nuestra ley de Costas de ser una ley enérgica. Los deslindes y sus efectos sobre las ocupaciones previas, legales e ilegales; las limitaciones de usos y volúmenes en zona de servidumbre; el establecimiento de la zona de afección, etc, mostraron al tiempo de su redacción la voluntad de recuperar una costa que por tantas causas se había deteriorado.

Pero cuando en su art. 29 se ocupa de la aportación de áridos a la desembocadura de los ríos, la limita a los que se encuentran en los tramos finales de los cauces, remitiendo a una distancia geométrica a determinar no se sabe si reglamentariamente, orden ministerial u otro instrumento con alcance normativo aún más limitado.

4. Planes hidrológicos de cuenca

La Directiva Marco del Agua impone el análisis unitario de las aguas continentales, de transición, y marinas. De la elaboración de los Planes Hidrológicos se encargan los Organismos de Cuenca. Calificar de buen estado un agua marina atendiendo sólo a su calidad, desconociendo su estado geomorfológico es incompleto y por ello erróneo e inexacto. Que se remite y conoce la Comisión Europea.

Pese a las dificultades para una rigurosa definición y cuantificación, la necesidad de establecer un caudal ecológico ha sido incorporada a estos Planes. Sólo para el agua. El establecimiento de un caudal ecológico sólido, es tarea pendiente.

Las demarcaciones hidrográficas se delimitan atendiendo a las cuencas de los ríos, pero las arenas que llegan al mar alimentan, deberían alimentar, playas ajenas a esa geografía terrestre. La desvinculación entre capacidad de erosión, transporte y vertido de áridos al mar y longitudes de litoral asignadas a cada Demarcación permite afirmar que aisladamente no son organismos idóneos para procurar el buen estado de las playas, siendo el Ebro un claro ejemplo de ello.



Fig 1 Demarcaciones hidrográficas y costa asignada

5. Medida compensatoria de alimentación de playa por revestir una cuneta

Lo que presentamos aquí es un ejemplo real de inclusión de una medida compensatoria en una obra de revestimiento de una cuneta de una carretera que dista unos 10 km de la costa.

La Dirección General del Agua de la Generalidad Valenciana acordó con la Confederación Hidrográfica del Júcar del Ministerio para la Transición Ecológica el revestimiento de una cuneta paralela a una carretera autonómica (CV 410), cuneta ésta que se convino aprovechar para la evacuación de una porción del caudal proveniente de comarcas próximas al alto y medio Turia.

La cuneta, abierta y dejada inicialmente en tierras, debía ser revestida de hormigón para asegurar su estabilidad y mejorar su capacidad hidráulica.

El revestimiento de la tierra impedía a futuro su erosión, privando por tanto a las playas de Valencia de la llegada de estos áridos. Buscando sólo hacer pedagogía con una medida compensatoria, se estimó que en los próximos 100 años el espesor erosionado sería de 5 cm, y el volumen sustraído a las playas sería el producto de ese espesor por el área hormigonada.



Fig 2 Carretera CV 410 y emplazamiento en la red comarcal



Fig 3 Cunetón acabado en tierras antes del revestimiento



Fig 4 *Cunetón revestido en hormigón*

La medida compensatoria consistió por tanto en la introducción de una unidad en el presupuesto del proyecto, consistente en la aportación a la playa que determinara la Demarcación de Costas en Valencia, que fue la de Puzol, del volumen de arenas así calculado, que debía proceder de alguna cantera en explotación al momento de la obra, en este caso Casinos, unos 40 km tierra adentro.

 GENERALITAT VALENCIANA Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica		
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA		
TIPO DE DOCUMENTO: ADENDA ACTUALIZACIÓN PRECIOS DE PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN Autor: Urbanistas Ingenieros S.A. Juan Francisco Ferrándiz Dauder Ingeniero de Caminos, colegiado nº 6.504		
FECHA: JUNIO 2022	TÍTULO: ESTABILIZACIÓN DE CAJEROS BARRANCO POZALET (CV-410)	CLAVE: CNME 18/0303/19
DIRECTOR DEL PROYECTO: D. MANUEL MARCOS GUIXOT	 AUTOR DEL PROYECTO: D. FRANCISCO JAVIER SOPEÑA MARTÍNEZ	TOMO 1 DE 2 Nº MEMORIA Y ANEJOS
Subdirecció General de Planificació e Infraestructures Hidràuliques		Servei d'Infraestructures Hidràuliques Urbanes

Fig 5 *Portada del Proyecto*

PROYECTO CONSTRUCTIVO DE ESTABILIZACIÓN DE CAJEROS BARRANCO POZALET (CV-410 VALENCIA)

MEDIDAS DE RECUPERACIÓN AMBIENTAL

ESTABILIZACIÓN DE CAJEROS BARRANCO POZALET (CV-410 VALENCIA)

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	MEDIDAS COMPENSATORIAS	1

Fig 6 *Carátula del Anejo de recuperación ambiental*

PROYECTO CONSTRUCTIVO DE ESTABILIZACIÓN DE CAJEROS BARRANCO POZALET (CV-410 VALENCIA)

1 INTRODUCCIÓN

La protección del cunetón de la CV-410 con un revestimiento de hormigón va a disminuir los aportes sólidos del cunetón al Barranco del Poyo y por lo tanto a la Albufera.

La sensibilidad de la Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient, Canvi Climàtic i Desenvolupament Rural con la protección de las costas motiva la previsión de una cantidad de arena para la recuperación de playas en el marco del presente proyecto

2 MEDIDAS COMPENSATORIAS

Las obras hidráulicas con revestimientos de hormigón disminuye los aportes sólidos al litoral, en cuanto a que la protección de márgenes que realizan evitan en su totalidad la erosión que arrastran los ríos y cunetas que desembocan en el mar.

Se establece por tanto una medidas compensatorias en las playas cercanas de un aporte de arena de 1.171 m3. Dicho valor es el resultado de estimar una erosión de 5 cm sobre el perímetro del cunetón a lo largo de su vida útil.

Fig 7 *Justificación de la medida compensatoria*

ESTABILIZACIÓN CAJEROS BARRANCO POZALET (CV-410 VALENCIA)					PAGINA: 5
CODIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN	PRECIO	IMPORTE
Capítulo 4 MEDIDA RECUPERACIÓN AMBIENTAL					
960.00201	m3	Arena en formación de playa, incluso extracción, cribado, carga, extendido y transporte hasta la zona de vertido en la playa, vertido y extendido y perfilado de playa, retirada de obstáculos a la misma y levantamiento topográfico.	1.171,090	27,04	31.666,27
Total Capítulo 4 MEDIDA RECUPERACIÓN AMBIENTAL:					31.666,27

Fig 8 *Importe incluido en el presupuesto de la obra*



Fig 9 Origen ficticio (*Aldaya*) y real (*Casinos*) de los áridos

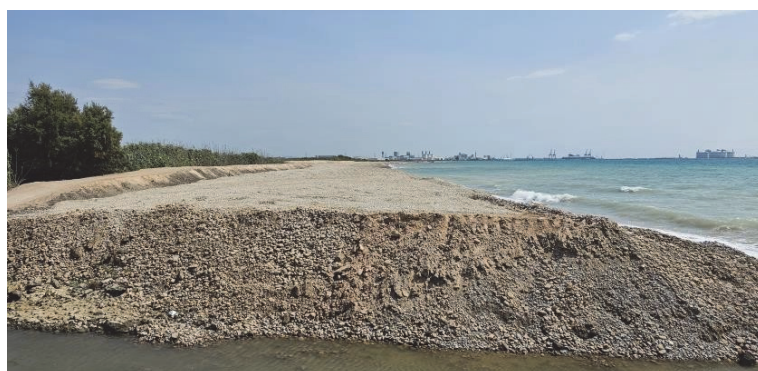


Fig 10 Áridos finalmente depositados en playa de Puzol (*Valencia*)

6. No sólo las presas ni los ingenieros de las Confederaciones: todos

Si estas últimas consideraciones ya atribuyen la falta de áridos a obras alejadas de los tramos finales de los ríos, también obras ajenas a ellos son causa de regresión. Como se ha apuntado en la Introducción, el objetivo de la ponencia ha sido, acompañando algún ejemplo real como el revestimiento de una cuneta de carretera, implicar a todos los ingenieros en la conservación de la costa, recordándoles que deben estudiar también cómo las obras, en secano, alteran la erosión que de modo natural, antes o después, llevaría áridos al mar. Y obrar en consecuencia.

No son dificultades técnicas. Es conocimiento y voluntad

Problemas y soluciones para el secado de muestras de arena en microondas

Problems and solutions for microwave-drying sand samples

Patricia Lopez-García^a, Juan J. Muñoz-Pérez^a, Antonio Contreras^b, Francisco Contreras^b, Jeanette Romero^a, Pilar Díaz-Carrasco^a, Bismarck Jigena^a

^a Escuela Politécnica Algeciras, Universidad de Cádiz, Avda. Ramón Puyol s/n 11202 Algeciras, Cádiz, España (antonio.contreras@uca.es y francisco.contreras@uca.es)

^b Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, CASEM, Universidad de Cádiz, Río San Pedro s/n, 11510 Puerto Real, España (patricia.lopezgarcia@uca.es, juanjose.munoz@uca.es, jeanette.romero@uca.es, pilar.diaz@uca.es y bismarck.jigena@uca.es).

How to cite: Pérez-Martínez, Lopez-García, P.; Muñoz-Pérez, J. J.; Contreras, A.; Contreras, F.; Romero, J.; Díaz-Carrasco, P. & Jigena, B. (2024). Problemas y soluciones para el secado de muestras de arena en microondas. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Ibiza, mayo 2024

Abstract

Since the efficiency of sand drying with a microwave has not been investigated before, the aim of this study is to compare the results of a muffle during a 12-hour sand-drying process with those of a microwave in order to identify any variations in the size parameter findings. A method was developed to get the best results and evaluate any errors. The testing included a range of power levels and durations. Additionally, samples from two beaches in the south of Spain with different sand sizes were included in this investigation since the median particle size (D_{50}) influences the porosity of sand. The error findings for D_{50} are less than 3.5% after at least five minutes of drying, which is entirely appropriate for beach nourishment. The optimum power was 462 watts; even after almost 15 minutes, a lower power of about 300 watts did not completely dry the material. Moreover, the sorting (σ) parameter had very little errors. The following guidelines must be implemented when using microwave drying techniques: the sand should be placed in a light, wide container; drying should be interrupted; and the drying process should last at least five minutes.

Keywords: sand size; sand parameters; D_{50} ; sieving; beach nourishment.

Resumen

El propósito de este estudio es determinar las diferencias en la obtención del parámetro de tamaño al comparar los resultados obtenidos con un proceso de secado de arena de 12 horas con una mufla versus con un microondas, dado que la efectividad del secado de arena con un microondas no ha sido estudiada previamente. Para lograr los mejores resultados y evaluar cualquier inexactitud, se estableció una técnica. Durante los ensayos se utilizaron varios niveles de potencia y tiempos de secado. Además, dado que el tamaño medio de grano (D_{50}) afecta a la porosidad de la arena, en este estudio se utilizaron muestras de dos playas en el sur de España con diferentes tamaños de arena.

Secando la arena durante al menos 5 minutos, los errores encontrados para el D_{50} son inferiores al 3.5%, lo cual es perfectamente aceptable para propósitos de regeneración de playas. En cuanto a la potencia, 462 vatios fue la potencia óptima; potencias menores, aproximadamente 300 vatios, no secaron completamente la arena incluso después de casi 15 minutos. Por otro lado, los errores en el parámetro de sorting (σ) fueron insignificantes. Es esencial implementar las siguientes recomendaciones en los métodos de secado con microondas: el uso de un recipiente ligero y amplio para la arena, interrupciones durante el secado y una duración mínima de 5 minutos.

Palabras clave: tamaño arena; granulometría; tamiz; D_{50} ; regeneración de playa.

1. Introducción

La regeneración de playa es uno de los métodos más populares de protección del litoral utilizado en todo el mundo. Se debe encontrar la arena idónea para reemplazar la arena natural que se ha perdido por erosión en la playa (James, 1975; Pranzini et al., 2018; Saponieri et al., 2018). Adicionalmente, se debe estimar también la cantidad de arena requerida para la regeneración de playa (U.S. Army Corps of Engineers, 2002; Pouillet et al., 2019a). Las investigaciones de la distribución del tamaño de la arena revelan información sobre el origen de la arena, el ambiente deposicional, y el historial de movimientos de transporte (Bernabeu Tello et al., 2002; Fenster et al., 2016; Grottoli et al., 2017; Hallin et al., 2019; Remo et al., 2016; Singh et al., 2007). Además, el análisis del tamaño de arena es una técnica crucial para categorizar los ambientes sedimentarios y los materiales (de Villar et al., 2019; Roman-Sierra et al., 2011; Steidtmann, 1982). Esta técnica también puede ser utilizada para predecir por cuánto tiempo y cómo la arena de la playa perdura en la playa en respuesta a las tormentas (Aguilera-Vidal et al., 2022; Bascom, 1951; de Villar et al., 2019; Grottoli et al., 2017; Larson and Kraus, 1991; Taaouati et al., 2020; Mendes et al., 2021; Moreno et al., 2018). Las medidas de las principales características del tamaño de arena, primordialmente el tamaño medio de grano (D_{50}) y el sorting o desviación típica (la distribución de los tamaños alrededor de la media, σ), son parte de los análisis llevados a cabo para investigar los procesos costeros (Blott and Pye, 2001; Kuang et al., 2021; Li et al., 2021; Romagnoli et al., 2021).

El coordinador de la regeneración de playa es el responsable de determinar la mejor localización para la arena y llevar el control de calidad en la zona de vertido. Previo al vertido de la arena en la playa, se deben llevar a cabo los procedimientos de obtención de los parámetros de tamaño de arena a bordo de la draga (U.S. Army Corps of Engineers, 1984). Obviamente, los parámetros del tamaño de la arena deben ser determinados con el mayor grado de precisión. Para los cálculos de obtención de los parámetros, se utilizaron las fórmulas desarrolladas por Folk y Ward (Folk, 1974; Folk and Ward, 1957), que están basadas en estudios anteriores de Krumbein (Krumbein and Pettijohn, 1938). Por tanto, para conseguir más precisión en la toma de datos, se podrían llevar a cabo análisis de muchas muestras de diferentes zonas, y/o realizar múltiples análisis de una misma muestra (Pouillet et al., 2019a).

Cuando se lleva a cabo una regeneración de playa, el método de tamizado es el que más se suele utilizar como análisis para determinar los parámetros esenciales del tamaño de la arena a bordo de una draga. De la misma forma, vuelven a surgir los mismos problemas: las limitaciones para examinar el tamaño de arena dentro de un buque dragador. Recordando estas limitaciones, cabe destacar el espacio de trabajo muy restringido, los materiales concretos que se requieren, la fuente de energía es inestable, y el tiempo de viaje corto entre las localizaciones de extracción de arena de préstamo y el lugar de vertido. Como resultado, cuando hay que llevar a cabo este análisis a bordo

de una draga, la técnica de tamizado manual con tamices pequeños (10 cm diámetro) debería ser la que se utilice normalmente, y la influencia del método de agitado manual ya fue estudiado por Pouillet et al. (Pouillet et al., 2019b) y ampliado por Lopez et al (Lopez et al. 2021). En este estudio se tratará otro de los pasos del proceso de obtención de los parámetros granulométricos, que también sufre las consecuencias de ser realizado a bordo de un barco: el secado de la arena previo al tamizado.

La mufla que se utiliza en laboratorio, para secar las muestras de arena antes de tamizarlas, pesa normalmente entre 70 y 90 kg y sus dimensiones son aproximadamente 90 x 70 x 60 cm; mientras que un microondas común pesa unos 6 kg y sus dimensiones pueden ser 25 x 45x 35 cm. Además del escaso espacio en una draga, los problemas antes mencionados también explican por qué se utiliza un microondas para secar las muestras en estas circunstancias, en lugar de una mufla durante 12 horas de secado como se hace en el laboratorio en tierra.

La precisión es vital cuando se determinan las características de la arena para estos trabajos de regeneración de playa (Grosskopf and Kraus, 1993). Numerosos estudios ya han establecido la eficiencia del tamizado en relación con el tiempo de agitación (Lund-Hansen and Oehmig, 1992; Pouillet et al., 2019b; Román-Sierra et al., 2013; Syvitski, 1991; U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Una de las teorías es que para tamizar materiales más finos hace falta que la duración del tiempo de tamizado sea mayor. De hecho, cuanto más fino sea el material, la arena tiene que atravesar más mallas de tamices, así que se necesita más tiempo para que los granos pasen por poros de malla más pequeños (Lopez-Garcia et al., 2021; Mizutani, 1963).

El proceso más importante antes del tamizado para asegurar resultados precisos es el secado de la muestra de arena. La porosidad de la arena depende del tamaño y forma de los granos de arena (Román-Sierra et al., 2013). Si la muestra de arena contiene un poco de agua dentro de los espacios intersticiales, la eficiencia de tamizado podría verse comprometida en términos de filtración ineficaz de la arena a través de las mallas de los tamices. La humedad de la arena podría bloquear los poros de las mallas o crear bolas de arena compactas que se podrían formar debido al proceso de agitado. Por tanto, elegir el método correcto de secado de la muestra de arena es extremadamente importante ya que podría tener un impacto relevante en la determinación de los parámetros de tamaño de arena.

Cuando los análisis se llevan a cabo en un laboratorio en tierra, las muestras de arena son secadas en una mufla a una temperatura de 110°C durante 12 horas de acuerdo con las metodologías establecidas (Román-Sierra et al., 2013; Syvitski, 1991; U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Este proceso de secado que se acaba de mencionar no se puede usar a bordo del laboratorio de una draga. La metodología que se utiliza comunmente para obtener la arena seca para tamizarla en una draga consiste en usar un microondas comercial. Las muestras normalmente se calientan durante 5 minutos a la máxima potencia que tenga el microondas (suele ser sobre 700-800w) para intentar secar completamente la arena. A veces, durante el proceso de secado dentro del microondas, la arena empieza a explotar, salpicando arena por todas las paredes y techo del interior, causando pérdida de parte del peso inicial de la muestra de arena.

Al tratarse de propósitos de regeneración de playa, algunos investigadores sugieren que se pueden esperar y/o admitir errores de hasta el 10% en los resultados (Karambas and Samaras, 2014; Muñoz-Perez and Medina, 2010). Pero, ¿cómo influyen en los resultados las circunstancias antes mencionadas? ¿Cómo de grande es el error cometido? ¿Es admisible?

Puesto que aún no se han llevado a cabo investigaciones esenciales para ver la efectividad del secado de arena utilizando un microondas, el propósito de este estudio es establecer las diferencias entre los resultados obtenidos de los parámetros de la arena usando para secarla una mufla durante 12 h y los

resultados usando un microondas. Por tanto, se desarrolló una metodología que cuantifica los posibles errores y que obtenga los mejores resultados. Los tests se llevaron a cabo con varios niveles de potencia del microondas y duraciones tiempos de secado. Además, como la porosidad de la arena depende del tamaño medio de grano, el presente trabajo se llevó a cabo con muestras de arena de dos playas con diferentes tamaños de arena en el sur de España.

2. Objetivos

La metodología llevada a cabo comúnmente a día de hoy para secar la arena previo al tamizado consiste en utilizar un horno mufla a 100°C durante 12 horas (según las indicaciones del Coastal Engineering Manual de USACE (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)). A pesar de estas indicaciones, debido a las limitaciones antes mencionadas de espacio y tiempo a bordo de un barco, el secado en un microondas es el método utilizado desde siempre en una draga durante las regeneraciones de playa. La variabilidad inducida por el tiempo y potencia programados en el microondas para secar correctamente las muestras no ha sido tampoco estudiada pese a su lógica pero todavía hipotética influencia.

A la hora de ejecutar la realimentación de arena de una playa, es necesario estudiar la idoneidad de la arena de préstamo mediante la comparación de la granulometría de ésta con la original de la playa (o nativa). Para mejorar la eficacia de este tipo de obras, se estudiarán diferentes metodologías para la obtención de esta comparativa. Por tanto, el objetivo de este estudio es encontrar el método que resulte más eficiente para mejorar los resultados en las regeneraciones de playa, respecto a la idoneidad de las arenas de préstamo. Ello permitirá el optimizar los costes derivados del dragado, transporte, vertido y perfilado de arena.

3. Desarrollo de la innovación

3.1. Zona de estudio

Las muestras de arena analizadas son de dos playas diferentes del litoral del sur de España. La razón de la elección de estas playas en particular es por su D_{50} medio. Las elegidas son las playas de Valdelagrana (D_{50} de 0.11 mm) y La Alcaidesa (D_{50} de 0.81 mm). Las playas se encuentran cerca del Estrecho de Gibraltar (Figura 1), estando La Alcaidesa situada en el lado de la costa del Mar Mediterráneo, mientras que Valdelagrana está localizada en la costa del Golfo de Cádiz (Océano Atlántico). La costa oeste de Cádiz que da al Océano Atlántico es un area mesomareal, con un rango de marea sobre los 4 metros y olas que vienen del cuadrante O-SO (Laiz et al., 2013; López-García et al., 2019). Se espera más altura de ola significativa en el Golfo de Cádiz que en la costa del Mediterráneo, por tanto estos eventos más energéticos explican por qué las partículas son más finas.



Fig. 1. Localización de las dos playas analizadas en este estudio. La playa de Valdelagrana está situada en el Golfo de Cádiz (Océano Atlántico), mientras que la playa La Alcaidesa se encuentra en la costa del Mar Mediterráneo. Ambas se sitúan cerca del Estrecho de Gibraltar en España.

3.2. Muestreo

Diez muestras de arena se recolectaron de la zona de bajamar para cada playa. La intención fue simular la arena húmeda que se extrae de la zona de préstamo y se muestrea en la cántara de una draga previo al vertido. Cada una de las muestras contiene una mezcla de arena y agua (ejemplo en Figura 2). El peso de cada muestra era de aproximadamente unos 800 gr. Después, cada muestra fue separada en 5 submuestras de unos 130 gr cada una (incluyendo un exceso de 150 gr para prevenir posibles pérdidas durante el estudio).



Fig. 2. Bolsa de muestra con 800 gr de arena con un poco de exceso de agua. Para cada playa se recopilaban 10 bolsas de muestras como la de esta figura. Cada bolsa de muestra se dividió posteriormente en 5 submuestras: 130 gr para secar en mufla, 130 gr para secar a cada una de las potencias del microondas (700w, 595w, 462w, y 300w), y 150 gr extra por si ocurriese una posible pérdida.

3.3. Análisis granulométrico

El método común descrito por Syvitski (Syvitski, 1991) se usó para analizar el tamaño de la arena, con algunas pequeñas modificaciones por Roman-Sierra et al. (Román-Sierra et al., 2013). A continuación, se indica un resumen de la metodología para el análisis de las muestras de arena.

Los pasos para obtener los parámetros de tamaño de arena consisten en el secado de la arena, su tamizado, y el cálculo de los parámetros. Antes de tamizar las muestras, la arena debe estar lo más seca posible de manera que se tamice apropiadamente a través de las mallas de los tamices. Si la arena no está suficientemente seca, parte de la muestra podría compactarse en pequeñas bolas en los tamices (Figura 3), lo cual impediría tamizar los granos correctamente. La razón principal de este estudio es determinar una metodología de secado de microondas que sea precisa y que se pueda usar a bordo de una draga para propósitos de regeneración de playa. Los siguientes procedimientos de secado se llevaron a cabo para identificar el método que diese los resultados más efectivos con un microondas, teniendo en cuenta el secado en mufla como el método estándar y el más preciso con el cual comparar los resultados.



Fig. 3. Ejemplo de un intento de tamizado de una muestra de arena que no está suficientemente seca. Las vibraciones de la máquina tamizadora crean esferas compactas con los granos de arena. También se puede apreciar visualmente cómo la humedad en la arena crea obstrucciones en los poros de la rejilla de cada tamiz.

3.4. Procedimiento de secado en mufla

Las muestras, que pesaban cada una 130 gr de arena húmeda, fueron secadas en la mufla durante 12 horas en el laboratorio. Este peso se eligió específicamente para facilitar la pasada de la muestra a través de las mallas, puesto que añadir más volumen de sedimento podría resultar en una acumulación y que no pasara la arena adecuadamente. Siguiendo a esto, cada muestra fue pesada con una balanza de laboratorio cuya sensibilidad es de 0.01 gr.

3.5. Procedimiento de secado en microondas

El criterio de selección del recipiente usado para poner la arena y secarla en el microondas es muy importante. El recipiente necesita tener bordes en los todos los laterales, pero no demasiado altos, y debe tener una base suficientemente ancha para esparcir la arena por ella (dependiendo del tamaño del plato del interior del microondas; por tanto, el recipiente debería ser lo más ancho posible, teniendo en cuenta que el plato necesita girar apropiadamente sin tropezar o pararse). El material del que está fabricado el recipiente debe ser plástico debido a su peso ligero y, obviamente, por

seguridad del microondas. La precisión del peso utilizado es de 0.01 gr como se mencionó previamente, y el peso máximo que puede medir es de 230 gr. Por ello, es necesario que el recipiente para la arena sea ligero de peso. El propósito era obtener una muestra seca de unos 100 gr para tamizarla, como se ha mencionado previamente en la sección de secado en mufla. Para empezar, la cantidad de arena húmeda que necesita ser secada es calculada en función de la densidad y porosidad de la arena. Considerando que la arena estudiada está principalmente compuesta de cuarzo (densidad específica de $\gamma = 2.7 \text{ g/mL}$) (Muñoz-Pérez et al., 2000; Santos-Vendoiro et al., 2021) y la muestra tiene aproximadamente un 40% de porosidad, con los intersticios rellenos de agua de mar (densidad de $\gamma = 1.025 \text{ g/mL}$), una muestra de arena húmeda que pese 130 gr resultará matemáticamente en unos 100 gr de arena seca. Es crucial tener en cuenta el hecho de que el exceso de agua debe ser eliminado de la muestra antes de pesarla. El exceso de agua puede ser vertido volcando ligeramente el recipiente, o retirando el agua con una cuchara. Una vez que los 130 gr de arena húmeda han sido pesados, la arena se extiende por completo por el recipiente.

El presente estudio ensayó con todas las potencias de un microondas convencional que, en este caso, disponía de los niveles de potencias de 300 w, 462 w, 595 w, and 700 w. La intención fue encontrar la manera más rápida de secar la arena al 100% al mismo tiempo que no se perdiese parte de la muestra con la explosión de granos que puede ocurrir durante el procedimiento de secado dentro del microondas.

El procedimiento y la muestra deben ser descartados si la arena explota dentro del microondas durante el procedimiento de secado (ver ejemplo en la Figura 4). Esto puede ocurrir si las condiciones descritas anteriormente no se han seguido.



Fig. 4. Vista del interior del microondas después de que una muestra de arena explotase durante el proceso de secado en microondas.

Por tanto, el tiempo de secado es específico para cada nivel de potencia. Mientras más alto la potencia aplicada, menos tiempo de secado hará falta, pero habrá una mayor posibilidad de que la muestra explote. El microondas fue pausado durante el secado cada 1~2 minutos para comprobar los siguientes indicadores del estado de la arena: control del peso (intentando alcanzar los 100 gr de peso de los 130 gr iniciales); ver si los granos de arena se adhieren a una cuchara de metal (si la arena no se queda pegada a la cuchara se asume que la arena está suficientemente seca); y una observación visual del color y la textura (ver ejemplo de los colores de la arena húmeda y seca de una misma muestra en la

Figura 5a y 5b respectivamente). Obviamente, una porción de la humedad de la arena calentada sale del microondas en forma de vapor cuando la puerta de esta se abre; por tanto, la muestra se seca más rápido si la puerta se abre repetidas veces. De la misma forma, algo de humedad se queda adherida a las paredes del microondas; por tanto, las paredes se fueron secando con toallas de papel para facilitar el método de secado cada vez que se abrían las puertas para comprobar.

Una vez que estos pasos se han llevado a cabo, la muestra se volvía a meter dentro del microondas y se seguía el procedimiento de secado. Todos los pasos anteriores de comprobación fueron repetidos en tiempos apropiados para cada nivel de potencia, de manera que se logre secar la arena por completo y determinar entonces cuánto tiempo de secado se requiere para cada potencia.

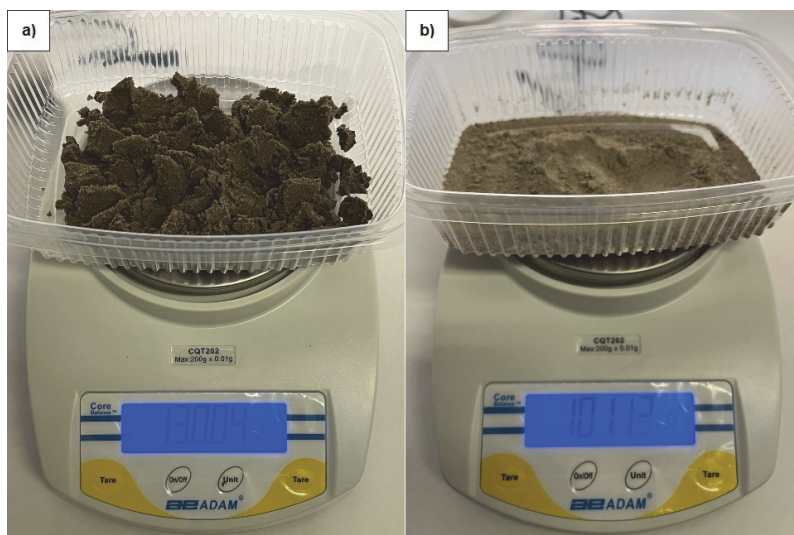


Fig. 5. (a) Muestra de arena húmeda de 130 gr extendida por la base del recipiente. (b) La misma muestra de arena pero ya completamente seca, pesando finalmente 100 gr.

3.6. Tamizado

Ocho mallas de tamices en concreto fueron utilizados para el proceso de tamizado, ya que estos tamaños específicos son los que requieren normalmente la Administración de Costas de España: 2 mm, 1 mm, 710 μm , 500 μm , 355 μm , 250 μm , 125 μm , and 62.5 μm .

Después de que se logre que la muestra de arena pese aproximadamente 100 gr seca del todo, la muestra fue puesta en el primer tamiz desde arriba (el de malla de 2 mm) de la columna de tamices de 20 cm de diámetro. Entonces, la muestra seca fue tamizada mecánicamente durante 10 minutos (el tiempo necesario propuesto por Lopez-Garcia et al. (Lopez-Garcia et al., 2021)). La arena acumulada en cada tamiz fue pesada para obtener los valores requeridos del D_{50} y del sorting (σ). Estos pasos fueron llevados a cabo para todos los casos de secado.

3.7. Cálculos para obtener los parámetros granulométricos

Las ecuaciones relevantes de Folk and Ward (Folk and Ward, 1957) fueron usadas para computar los parámetros granulométricos (Tabla 1), donde M_ϕ representa la media estimada del tamaño de grano y σ_ϕ es la desviación estándar estimada en unidades phi. Blott and Pye (Blott and Pye, 2001) crearon una guía extensa sobre este estudio.

La Ecuación 1 se puede aplicar para convertir de unidades phi (ϕ) a milímetros, o viceversa. Las ecuaciones fueron desarrolladas en escala de unidades phi.

El procedimiento de secado fue realizado diez veces por playa de manera que se identificasen posibles variaciones en los resultados. Aún así, los resultados siempre fueron los mismos. Un estudio previo (Román-Sierra et al., 2013) ya ha establecido que el secado de la mufla es el método preferido, cuando sea posible, para obtener resultados realistas y garantizar una homogeneidad en los resultados. Por tanto, el error relativo (ϵ), teniendo en cuenta el método de la mufla como referencia, fue calculado para los parámetros del D_{50} y el sorting siguiendo la Ecuación 1 y la Ecuación 2.

$$\epsilon_{D_{50}} = \left(\frac{D_{50} \text{ microondas} - D_{50} \text{ mufla}}{D_{50} \text{ mufla}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{sorting}} = \left(\frac{\text{sorting microondas} - \text{sorting mufla}}{\text{sorting mufla}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

4. Resultados

Los resultados de los diferentes niveles de potencia del microondas, cada uno necesitando diferentes tiempos de secado, se muestran en la Figura 6. El recipiente utilizado para este estudio durante el proceso de pesado y secado de la muestra (y recomendado para análisis similares) fue un recipiente de plástico, de 5 cm de alto, con un área de 20×12 cm. Como se ha mencionado previamente, el procedimiento de secado de las muestras húmedas para la playa de arenas finas (Valdelagrana) comenzó con cantidades de 130 gr de peso. En cuanto a La Alcaidesa, las muestras húmedas pesaban 120 gr inicialmente para obtener 100 gr de arena seca, porque la arena tenía granos más gruesos y, por tanto, un drenaje del agua intersticial más fácil que la otra playa. Como se representa en la Figura 6, el proceso de secado fue parado varias veces de manera que se iba comprobando cómo de seca estaba la muestra hasta que, finalmente, se podía determinar el tiempo mínimo requerido para obtener la muestra totalmente seca (aproximadamente 100 gr de muestra). Estas interrupciones fueron utilizadas para retirar la humedad de dentro del microondas y para remover y extender la arena por el recipiente nuevamente. Todas las muestras requirieron al menos 5 minutos para estar totalmente secas para todos los niveles de potencia por encima de los 462w. No se pudo conseguir secar la muestra con la potencia de 300w (incluso con intentos de 12 minutos de duración). Por tanto, la potencia de 300w se rechazó en el estudio directamente.

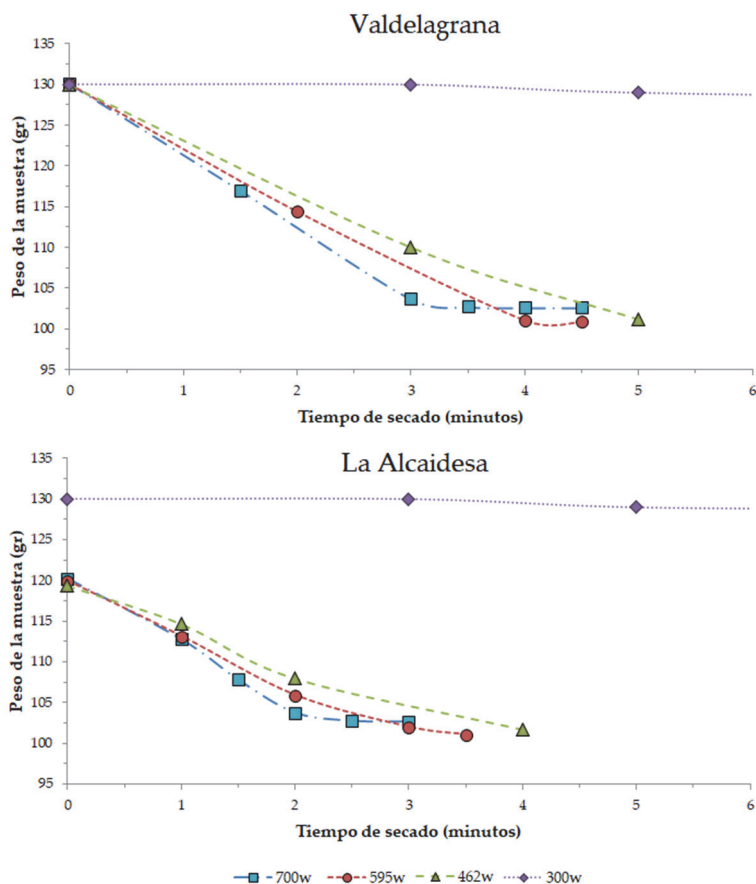


Fig. 6. Resultados medios del peso de la muestra a diferentes potencias vs tiempo de secado, para las playas de Valdelagrana y La Alcaidesa.

La Tabla 1 y la Tabla 2 muestran la media de los resultados del D_{50} (mm) y sorting (σ) de las muestras que fueron obtenidos secando cinco muestras de arena: con la mufla y con los cuatro niveles de potencia diferentes. Además, el peso (en gramos) contenido en cada malla de tamiz de la columna de tamices y otros parámetros de la arena también fueron comparados (D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , y D_5).

En consecuencia, también es posible observar cómo cada uno de los métodos difiere en cada parámetro, así como los errores (ϵ) que resultan de utilizar el secado con mufla como método de referencia debido a su probada precisión. Agregando a lo anterior, los resultados del D_{50} , σ y sus errores para cada playa se encuentran representados en la Figura 7.



Fig. 7. Parámetros D_{50} y sorting (σ), con el error (ϵ) para cada potencia de microondas, tomando como valor de referencia el resultado de la mufla (para las playas de ValdelaGrana y La Alcaldesa).

4.1. ValdelaGrana

Los siguientes resultados (Tabla 1) fueron obtenidos para la playa de ValdelaGrana, con un D_{50} medio de 0.113 mm y un σ de 0.080 mm, de acuerdo con los análisis en la mufla. Cuando se utilizó el nivel de potencia de 700w, la arena húmeda requirió 4 minutos para llegar a estar completamente seca, y los resultados fueron de $D_{50} = 0.122$ mm y $\sigma = 0.080$ mm. La potencia de 595w necesitó 4 minutos y 30 segundos de tiempo de secado, y los resultados fueron $D_{50} = 0.118$ mm y $\sigma = 0.079$ mm. La potencia de 462w precisó de 5 minutos de tiempo de secado y los resultados fueron de $D_{50} = 0.117$ mm y $\sigma = 0.078$ mm.

Como comprobación de lo mencionado en la introducción, hubo un intento de secar la muestra con el nivel de potencia más bajo que tenía el microondas, 300w. Y efectivamente, durante el proceso de comprobación de la arena durante el procedimiento de secado, se determinó que la arena estaba todavía muy húmeda (comprobado a los 12 minutos de secado). Por tanto, la potencia de 300w fue directamente descartada como procedimiento de secado dada la imposibilidad de tamizar arena húmeda.

Tabla 1. Resultados medios de los diferentes análisis (fueron 10 tests por cada potencia del microondas) para las muestras de la playa de Valdelagrana: (a) el peso (gr) para cada malla y su porcentaje correspondiente (%) de toda la muestra, y (b) los parámetros D_{50} , σ , D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , y D_5 . El error (ϵ) para los resultados de cada potencia representados tomando como referencia los resultados de la mufla.

(a) Playa de Valdelagrana												
Tamaño malla	Mufla		700 w (4 min)			595 w (4:30 min)			462 w (5 min)			Valor Medio
(mm)	g	%	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	%
2	0.60	0.60	0.09	0.09	85.0	0.11	0.11	81.7	0.12	0.12	80.0	0.23
1	0.23	0.23	0.14	0.14	39.1	0.16	0.16	30.4	0.23	0.23	0.00	0.19
0.710	0.21	0.21	0.10	0.10	52.4	0.13	0.13	38.1	0.20	0.20	4.8	0.16
0.500	0.67	0.67	0.58	0.57	13.4	0.51	0.51	23.9	0.57	0.56	15.0	0.58
0.355	3.12	3.12	3.73	3.63	19.6	3.22	3.20	3.2	3.04	3.01	2.6	3.28
0.250	4.95	4.95	7.06	6.88	42.6	5.95	5.91	20.2	5.52	5.46	11.5	5.87
0.125	28.86	28.84	36.75	35.81	27.3	34.04	33.83	18.0	33.74	33.35	17.0	33.35
0.063	59.24	59.20	52.11	50.77	12.0	54.32	53.99	8.3	55.56	54.92	6.2	55.31
<0.062	2.18	2.18	2.07	2.02	5.1	2.18	2.17	0.0	2.18	2.16	0.0	2.15
Total	100.06		102.63			100.62			101.16			101.12

(b) Playa de Valdelagrana								
Parámetros	Mufla	700 w (4 min)		595 w (4:30 min)		462 w (5 min)		Valor Medio
(mm)	mm	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm
D_{50}	0.113	0.122	7.96	0.118	4.42	0.117	3.54	0.118
σ	0.080	0.080	0.00	0.079	1.25	0.078	2.50	0.079
D_{95}	0.351	0.343	2.28	0.339	3.42	0.338	3.70	0.343
D_{84}	0.223	0.233	4.48	0.228	2.24	0.226	1.35	0.228
D_{75}	0.184	0.202	9.78	0.195	5.98	0.192	4.35	0.193
D_{50}	0.113	0.122	7.96	0.118	4.42	0.117	3.54	0.118
D_{25}	0.087	0.091	4.60	0.089	2.30	0.089	2.30	0.089
D_{16}	0.077	0.08	3.90	0.079	2.60	0.079	2.60	0.079
D_5	0.066	0.067	1.52	0.066	0.00	0.066	0.00	0.066

4.2. La Alcaidesa

Los siguientes resultados (Tabla 2) fueron obtenidos para la playa de La Alcaidesa, con un D_{50} medio de 0.810 mm y un σ de 0.550 mm, de acuerdo con los análisis en la mufla. Cuando se utilizó el nivel de potencia de 700w, la arena húmeda requirió 3 minutos para llegar a estar completamente seca, y los resultados fueron de $D_{50} = 0.804$ mm y $\sigma = 0.547$ mm. La potencia de 595w precisó de 3 minutos y 30 segundos de tiempo de secado, y los resultados fueron $D_{50} = 0.805$ mm y $\sigma = 0.546$ mm. La potencia de 462w necesitó 4 minutos de tiempo de secado y los resultados fueron de $D_{50} = 0.807$ mm y $\sigma = 0.542$ mm.

Tabla 2. Resultados medios de los diferentes análisis (fueron 10 tests por cada potencia del microondas) para las muestras de la playa de Valdelagrana: (a) el peso (gr) para cada malla y su porcentaje correspondiente (%) de toda la muestra, y (b) los parámetros D_{50} , σ , D_{95} , D_{84} , D_{75} , D_{25} , D_{16} , y D_5 . El error (ϵ) para los resultados de cada potencia representados tomando como referencia los resultados de la mufla.

(a) Playa de La Alcaidesa												
Tamaño malla	Mufla		700 w (3 min)			595 w (3:30 min)			462 w (4 min)			Valor Medio
(mm)	g	%	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	g	%	ϵ (%)	%
2	3.90	3.89	3.96	3.85	1.54	3.98	3.94	2.05	3.55	3.50	8.97	3.80
1	30.78	30.68	30.88	30.06	0.32	30.69	30.41	0.29	31.05	30.63	0.88	30.44
0.710	23.65	23.58	24.51	23.86	3.64	23.48	23.26	0.72	24.16	23.83	2.16	23.63
0.500	18.74	18.68	19.64	19.12	4.80	20.52	20.33	9.50	19.83	19.56	5.82	19.42
0.355	13.31	13.27	13.77	13.40	3.46	13.20	13.08	0.83	13.42	13.24	0.83	13.25
0.250	7.44	7.42	7.69	7.48	3.36	7.05	6.99	5.24	7.28	7.18	2.15	7.27
0.125	2.42	2.41	2.29	2.23	5.37	2.01	1.99	16.94	2.08	2.05	14.05	2.17
0.063	0.07	0.07	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	100.0	0.00	0.00	100.0	0.02
<0.062	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.31		102.74			100.93			101.37			

(b) Playa de La Alcaidesa								
Parámetros	Mufla	700 w (3 min)		595 w (3:30 min)		462 w (4 min)		Valor Medio
(mm)	mm	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm	ϵ (%)	mm
D_{50}	0.810	0.804	0.74	0.805	0.62	0.807	0.37	0.81
σ	0.550	0.547	0.55	0.546	0.73	0.542	1.45	0.55
D_{95}	1.964	1.962	0.10	1.965	0.05	1.951	0.66	1.96
D_{84}	1.605	1.596	0.56	1.603	0.12	1.592	0.81	1.60
D_{75}	1.312	1.296	1.22	1.308	0.30	1.298	1.07	1.30
D_{50}	0.81	0.804	0.74	0.805	0.62	0.807	0.37	0.81
D_{25}	0.521	0.521	0.00	0.53	1.73	0.527	1.15	0.52
D_{16}	0.422	0.423	0.24	0.433	2.61	0.429	1.66	0.43
D_5	0.286	0.289	1.05	0.295	3.15	0.293	2.45	0.29

4.3. Discusión general

Las líneas horizontales en la Figura 6 indican que el peso de la muestra permanece constante, es decir, está completamente seca (a excepción del secado con 300w). La duración del tiempo de secado no cambia entre las muestras de arena de Valdelagrana, que están en torno a los 4 y 5 minutos para esta playa situada en el Golfo de Cádiz, con un D_{50} de 0.11 mm. Sin embargo, la duración del secado para las muestras de arena de La Alcaidesa (D_{50} sobre 0.81 mm) fue de 1 minuto menos para cada potencia del microondas (entre los 3 y 4 minutos). Por tanto, se puede deducir que para granos más gruesos (con mayor facilidad de drenaje del agua intersticial) requiere menos tiempo de secado que arenas más finas. De igual manera, el error fue 10 veces mayor para los tamaños de arena menores (un 3.5% para $D_{50} = 0.11$ mm versus un 0.37% para $D_{50} = 0.81$ mm).

También se puede observar que el error se va reduciendo con la duración del secado. Por ejemplo, en el caso de la playa de Valdelagrana, el error al determinar el D_{50} disminuye del 8% al 3.5% cuando se extiende el experimento de 4 a 5 minutos. En cuanto al sorting, las diferencias han sido insignificantes.

Por último, se puede establecer que los resultados obtenidos utilizando el microondas siempre muestran diferencias ligeramente mayores, aunque no significativas, comparados con el secado con el horno mufla. Por tanto, el uso de microondas podría estar permitido a bordo de dragas siempre y cuando se cumpla lo siguiente:

- Usar un recipiente ligero de peso con una base ancha y altura baja.
- La arena se extienda uniformemente por el recipiente.
- Retirar el exceso de agua no intersticial.
- Usar una potencia mayor de 500w pero menor de 800w.
- Interrumpir en mitad del secado para permitir que la humedad generada salga, secar las paredes del microondas con papel absorbente, y remover y extender la arena por el recipiente de nuevo.

La duración del secado debe ser de al menos 5 minutos.

5. Conclusiones

El tiempo y potencia necesarios para el procedimiento de secado con microondas todavía no se había determinado. Además, para evitar la explosión dentro del microondas y obtener los parámetros granulométricos lo más precisos posible, aún no se había especificado el procedimiento.

Por tanto, una serie de tests fueron llevados a cabo consistiendo en múltiples análisis con muestras de arena de playas diferentes (y en consecuencia con diferentes tamaños de grano) y secándolas con un microondas con varios niveles de potencia y tiempos. Estos resultados del microondas fueron comparados con los resultados de secado con mufla de las mismas muestras, considerando la metodología de secado con mufla como la referencia para obtener los errores del procedimiento con microondas.

Los errores de los resultados para el D_{50} fueron menores del 3.5% cuando la duración del secado era de al menos 5 minutos, lo que es completamente aceptable para propósitos de regeneración de playa. En cuanto al nivel de potencia, 462 w es la potencia ideal mientras que, con potencias más bajas, sobre los 300 w, las muestras no alcanzaron a secarse por completo incluso tras casi 15 minutos de duración del secado. En lo que respecta al error del parámetro del sorting, fue absolutamente insignificante. Por último, la duración del secado y el error fueron menores para las playas con arenas más gruesas.

Por tanto, una metodología fácil y accesible, generalizable para cualquier otra costa, ha sido diseñada para un secado rápido y preciso.

De entre las pautas que se han dado, merece la pena señalar la importancia del uso de un recipiente ligero de peso y ancho pero con altura baja, interrumpir el secado para extraer humedad y remover la muestra, y que la duración del secado sea de mínimo 5 minutos.

Referencias

- Aguilera-Vidal, M., Muñoz-Perez, J.J., Contreras, A., Contreras, F., Lopez-Garcia, P., Jigena, B., 2022. Increase in the Erosion Rate Due to the Impact of Climate Change on Sea Level Rise: Victoria Beach, a Case Study. *J. Mar. Sci. Eng.* 10. <https://doi.org/10.3390/jmse10121912>
- Bascom, W.N., 1951. The relationship between sand size and beach-face slope. *Trans. Am. Geophys. Union* 32, 866. <https://doi.org/10.1029/TR032i006p00866>
- Bernabeu Tello, A.M., Santamaría, R.M., Pascual, C.V., 2002. An equilibrium profile model for tidal environments. *Sci. Mar.* 66, 325–335. <https://doi.org/10.3989/scimar.2002.66n4325>
- Blott, S.J., Pye, K., 2006. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: An experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology* 53, 671–685. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00786.x>
- Blott, S.J., Pye, K., 2001. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- de Villar, A.C., Gómez-Pina, G., Muñoz-Pérez, J.J., Contreras, F., López-García, P., Ruiz-Ortiz, V., 2019. New design parameters for biparabolic beach profiles (SW Cadiz, Spain). *Rev. la Constr.* 18, 432–444. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.3.432>
- Fenster, M.S., Dolan, R., Smith, J.J., 2016. Grain-size distributions and coastal morphodynamics along the southern Maryland and Virginia barrier islands. *Sedimentology* 63, 809–823. <https://doi.org/10.1111/sed.12239>
- Folk, R.L., 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas.
- Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Res.* 27, 3–26. <https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Grosskopf, W.G., Kraus, N.C., 1993. Guidelines for surveying beach nourishment projects., CETN II-31. U.S. Army Engineering Water Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA.
- Grottoli, E., Bertoni, D., Ciavola, P., 2017. Short- and medium-term response to storms on three Mediterranean coarse-grained beaches. *Geomorphology* 295, 738–748. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.007>
- Hallin, C., Huisman, B.J.A., Larson, M., Walstra, D.J.R., Hanson, H., 2019. Impact of sediment supply on decadal-scale dune evolution — Analysis and modelling of the Kennemer dunes in the Netherlands. *Geomorphology* 337, 94–110. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.003>
- James, W.R., 1975. Techniques in evaluating suitability of borrow material for beach nourishment, Technical Memorandum No. 60. Coastal Engineering Research Center (U.S.).
- Karambas, T. V., Samaras, A.G., 2014. Soft shore protection methods: The use of advanced numerical models in the evaluation of beach nourishment. *Ocean Eng.* 92, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.09.043>
- Krumbein, W., Pettijohn, F., 1938. *Manual of sedimentary petrography*.

- Kuang, C., Han, X., Zhang, J., Zou, Q., Dong, B., 2021. Morphodynamic Evolution of a Nourished Beach with Artificial Sandbars: Field Observations and Numerical Modeling. *J. Mar. Sci. Eng.* 9. <https://doi.org/10.3390/jmse9030245>
- Laiz, I., Gómez-Enri, J., Tejedor, B., Aboitiz, A., Villares, P., 2013. Seasonal sea level variations in the gulf of Cadiz continental shelf from in-situ measurements and satellite altimetry. *Cont. Shelf Res.* 53, 77–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.12.008>
- Larson, M., Kraus, N.C., 1991. Mathematical modeling of the fate of beach fill. *Coast. Eng.* 16, 83–114. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(91\)90054-K](https://doi.org/10.1016/0378-3839(91)90054-K)
- Li, Y., Zhang, C., Cai, Y., Xie, M., Qi, H., Wang, Y., 2021. Wave Dissipation and Sediment Transport Patterns during Shoreface Nourishment towards Equilibrium. *J. Mar. Sci. Eng.* 9. <https://doi.org/10.3390/jmse9050535>
- López-García, P., Gómez-Enri, J., Muñoz-Pérez, J.J., 2019. Accuracy assessment of wave data from altimeter near the coast. *Ocean Eng.* 178, 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.009>
- Lopez-Garcia, P., Muñoz-Perez, J.J., Contreras, A., Vidal, J., Jigena, B., Santos, J.J., Romero, J., Contreras, F., 2021. Error on the Estimation of Sand Size Parameters When Using Small Diameter Sieves and a Solution. *Front. Mar. Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.738479>
- Lund-Hansen, L.C., Oehmig, R., 1992. Comparing sieve and sedimentation balance analysis of beach, lake and eolian sediments using log-hyperbolic parameters. *Mar. Geol.* 107. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(92\)90072-P](https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90072-P)
- Mendes, D., Pais-Barbosa, J., Baptista, P., Silva, P.A., Bernardes, C., Pinto, C., 2021. Beach Response to a Shoreface Nourishment (Aveiro, Portugal). *J. Mar. Sci. Eng.* 9. <https://doi.org/10.3390/jmse9101112>
- Mizutani, S., 1963. A theoretical and experimental consideration of accuracy of sieving analysis. *J. Earth Sci.* 11, 1–27.
- Moreno, L., Negro, V., Garrote, L., Muñoz-Pérez, J.J., López, J.S., Esteban, M.D., 2018. An Engineering Method For The Preliminary Functional Design Of Perched Beaches. Theoretical Approach. *J. Coast. Res.* 1261–1265. <https://doi.org/10.2112/SI85-253.1>
- Muñoz-Pérez, J.J., Gutierrez-Mas, J.M., Naranjo, J.M., Torres, E., Fages, L., 2000. Position and monitoring of anti-trawling reefs in the Cape of Trafalgar (Gulf of Cadiz, SW Spain). *Bull. Mar. Sci.* 67, 761–772.
- Muñoz-Perez, J.J., Medina, R., 2010. Comparison of long-, medium- and short-term variations of beach profiles with and without submerged geological control. *Coast. Eng.* 57, 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.09.011>
- Poulet, P., Muñoz-Perez, J.J., Lopez, P., García-Lopez, S., Martell, R., Silva, R., Moreno, L., 2019a. Sand size variability inside the hopper of a trailing suction dredger for beach nourishment purposes. *Geo-Marine Lett.* 39, 513–520. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00615-w>
- Poulet, P., Muñoz-Perez, J.J., Poortvliet, G., Mera, J., Contreras, A., Lopez, P., 2019b. Influence of different sieving methods on estimation of sand size parameters. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11050879>

- Pranzini, E., Anfuso, G., Muñoz-Perez, J.J., 2018. A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coast. Eng.* 139, 32–35. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.05.001>
- Remo, J.W.F., Heine, R.A., Ickes, B.S., 2016. Particle size distribution of main-channel-bed sediments along the upper Mississippi River, USA. *Geomorphology* 264, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.012>
- Romagnoli, C., Sistilli, F., Cantelli, L., Aguzzi, M., De Nigris, N., Morelli, M., Gaeta, M.G., Archetti, R., 2021. Beach Monitoring and Morphological Response in the Presence of Coastal Defense Strategies at Riccione (Italy). *J. Mar. Sci. Eng.* 9. <https://doi.org/10.3390/jmse9080851>
- Román-Sierra, J., Muñoz-perez, J.J., Navarro-Pons, M., 2013. Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* 60, 1484–1497. <https://doi.org/10.1111/sed.12040>
- Roman-Sierra, J., Navarro, M., Muñoz-Perez, J.J., Gomez-Pina, G., 2011. Turbidity and Other Effects Resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment. *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.* 137, 332–343. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000098](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000098)
- Santos-Vendoiro, J.J., Muñoz-Perez, J.J., Lopez-García, P., Jodar, J.M., Mera, J., Contreras, A., Contreras, F., Jigena, B., 2021. Evolution of Sediment Parameters after a Beach Nourishment. *Land* 10. <https://doi.org/10.3390/LAND10090914>
- Saponieri, A., Valentini, N., Di Risio, M., Pasquali, D., Damiani, L., 2018. Laboratory investigation on the evolution of a sandy beach nourishment protected by a mixed soft-hard system. *Water (Switzerland)* 10. <https://doi.org/10.3390/w10091171>
- Singh, M., Singh, I.B., Müller, G., 2007. Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. *Geomorphology* 86, 144–175. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.08.011>
- Steidtmann, J.R., 1982. Size-density sorting of sand-size spheres during deposition from bedload transport and implications concerning hydraulic equivalence. *Sedimentology* 29, 877–883. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1982.tb00090.x>
- Syvitski, J.P.M., 1991. Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626142>
- Taaouati, M., Parisi, P., Passoni, G., Lopez-Garcia, P., Romero-Cozar, J., Anfuso, G., Vidal, J., & Muñoz-Perez, J. J. (2020). Influence of a Reef Flat on Beach Profiles Along the Atlantic Coast of Morocco. *Water*, 12(3), 790. <https://doi.org/10.3390/w12030790>
- U.S. Army Corps of Engineers, 2002. Coastal Engineering Manual-Part III.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1984. Shore Protection Manual, in: Coastal Engineering Research Center. Vicksburg, Mississippi, USA.

Los problemas del ábaco de James y una solución alternativa

Enzo Pranzini^a, Giorgio Anfuso^b y Juan José Muñoz^b

^aDpto de Ciencias de la Tierra, Universidad de Florencia, Borgo Albizi, 28, 50122 Florence, Italia, enzo.pranzini@unifi.it; ^bFacultad de Ciencias del Mar y Ambientales, CASEM, Universidad de Cadiz, Río San Pedro s/n, 11510 Puerto Real, España (giorgio.anfuso@uca.es y juanjose.munoz@uca.es)

How to cite: Pranzini E.; Anfuso, G. & Muñoz, J.J. (2024). Los problemas del ábaco de James y una solución alternativa. En libro de Actas: *Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Ibiza, mayo 2024.

Abstract

The compatibility of borrow sands with native sands on the beach is mainly based on the comparison of their respective grain sizes. The Abacus of James (1975) is the most widely used method by beach nourishment designers (providing an Overfill Factor) because only the easily obtained parameters D_{16} and D_{84} are used. However, there are two problematic zones within the abacus. When borrow sands are coarser and better classified than native ones, the nomogram is unable to discern between different borrow sources which one is the most suitable. There is also a central zone (well-classified borrow sand of similar size to the native one) where the lines are so close that small errors can lead to large volumetric differences. To overcome these problems, an alternative method is presented here that, being very easy to use by comparing the weight percentiles of each sieve, allows different borrowing sources to be classified according to their suitability. After having been applied in several beach regenerations in Italy and Spain, the method has proven its consistency and usefulness.

Keywords: beach; nourishment; borrow sand; native sand; sieves

Resumen

La compatibilidad de las arenas de préstamo con las nativas de la playa se basa principalmente en la comparación de sus respectivos tamaños de grano. El Ábaco de James (1975) es el método más ampliamente utilizado por los proyectistas de realimentaciones de playa, proporcionando un factor de sobrellenado u Overfill Factor. La razón para ello es su facilidad de uso, dado que se usan únicamente los parámetros D_{16} y D_{84} de sencilla obtención. Sin embargo, existen dos zonas problemáticas dentro del ábaco. En la correspondiente a arenas de préstamo más gruesas y mejor clasificadas que las nativas, el nomograma es incapaz de discernir entre diferentes fuentes de préstamo cuál de ellas es la más adecuada. También hay una zona central (arena de préstamo bien clasificada y de tamaño similar a la nativa) donde las líneas están tan juntas que pequeños errores pueden conducir a grandes diferencias volumétricas.

Para solventar estos problemas, se presenta aquí un método alternativo que, siendo de muy fácil utilización (comparando los percentiles en peso de cada tamiz), permite clasificar distintas fuentes de préstamo por su idoneidad. Tras haberse aplicado en varias regeneraciones de playas en Italia y España, el método ha probado su consistencia y utilidad.

Palabras clave: playa; regeneración; realimentación; proyecto; arena préstamo; nativa.

1. Introducción

Para comprobar la compatibilidad de las arenas de préstamo con las nativas de la playa nos basamos principalmente en la comparación de sus respectivos tamaños de grano. El Coastal Engineering Manual (USACE, 2002) recomienda un D_{50} de préstamo similar al nativo, consiguiendo, de ese modo, un perfil de equilibrio similar y una respuesta parecida frente a las tormentas.

Los primeros en abordar una metodología para evaluar la idoneidad de un material de préstamo fueron Krumbein y James (1965), quienes propusieron unas ecuaciones que introducen un factor de realimentación. Es decir, una estimación del volumen de arena necesario para compensar las pérdidas de finos. Otros autores (Dean, 1974; James, 1975) ahondaron en el tema, siendo el nomograma de este último (conocido como el Ábaco de James) el más ampliamente utilizado por los proyectistas de realimentaciones de playa (Fig 1), proporcionando un factor de sobrellenado u Overfill Factor (R_A). La razón para ello es su facilidad de uso dado que, para calcular los parámetros de entrada (M_ϕ y σ_ϕ), que consideran las medias y las desviaciones típicas, se usan los parámetros D_{16} y D_{84} (tanto de la arena de préstamo como de la nativa) de sencilla obtención.

Stauble (2007) proporciona una revisión de varias técnicas para determinar la estabilidad del nuevo vertido de arena en una playa. Igualmente, indica que la compatibilidad de la arena de préstamo no puede anticiparse con seguridad utilizando los métodos convencionales descritos hasta ese momento. Ergo, la distribución granulométrica de todo el huso debe de ser utilizada.

Sin embargo, cabe señalar que la hipótesis de partida de este método exige una distribución logarítmico normal de ambos sedimentos (préstamo y nativo), lo que no siempre es cierto (e.g. Hobson, 1977). Asimismo, existen dos zonas problemáticas dentro del ábaco. La zona azul de la Fig. 1 corresponde a arenas de préstamo más gruesas y mejor clasificadas que las nativas. En ese caso, se las considera simplemente como “estables”, siendo el nomograma incapaz de discernir entre diferentes fuentes de préstamo cuál de ellas es la más adecuada. Por otro lado, la zona roja (Fig. 1) corresponde a arenas de préstamo bien clasificadas y de tamaño sensiblemente similar. En este área, las líneas están tan juntas que pequeños errores pueden conducir a grandes diferencias volumétricas en su utilización. Obviamente, siempre existe la posibilidad del cálculo analítico de ese coeficiente. Sin embargo, dada la complejidad del mismo (Stauble, 2007), la mayor parte de los ingenieros proyectistas usa el ábaco.

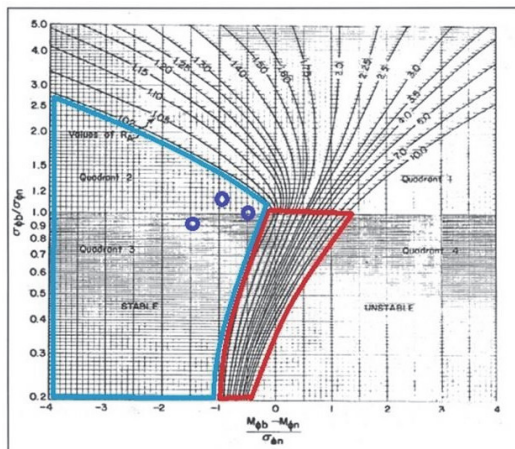


Fig. 1. Zonas problemáticas del ábaco de James. En azul, la zona donde no se discierne cuál es la muestra más adecuada. En rojo, un pequeño error de ubicación conduce a grandes diferencias en el factor de sobrellenado. Los tres puntos azules que se encuentran en la zona STABLE corresponden a las muestras de tres canteras analizadas en la sección de Resultados.

Por todo ello, el objetivo de este artículo es presentar un nuevo método que solvante los problemas del ábaco de James. Esto es, que no requiera de una distribución log-normal del sedimento, y que permita clasificar distintas fuentes de préstamo por su idoneidad.

2. Metodología

Como se ha comentado previamente, una de las razones para el uso del Ábaco de James es su relativa facilidad, ya que sólo precisa de los parámetros D_{16} y D_{84} de las muestras nativa y de préstamo para calcular los inputs de entrada en el ábaco (una comparación de las medianas en abscisas y otra comparación de las desviaciones típicas en ordenadas, ver Fig. 1).

Sin embargo, esta simplicidad resulta también en una debilidad, pues no se usa toda la información disponible en los análisis granulométricos. Datos que, en cambio, sí emplea el método de Pranzini.

Supondremos que la estabilidad de un grano de préstamo más grueso que el grano más grueso presente en la playa (nativa) es igual a 1, y dará una contribución total al volumen final de la playa después de la separación/clasificación de sedimentos por el oleaje. Por el contrario, la estabilidad de un grano de préstamo más fino que el grano más fino presente en la playa es igual a 0, y su contribución será nula al volumen final. Por lo tanto, el método considera un factor de estabilidad parcial (fs_i) de cada fracción granulométrica igual al porcentaje en peso que pasa por cada tamiz en la arena nativa (dividido por 100 para que el fs_i esté comprendido entre 0 y 1).

Definiremos el índice de estabilidad de la muestra (SI, del inglés Stability Index) como el sumatorio de los productos de cada uno de los anteriores fs_i por el porcentaje de retenido en cada uno de los tamices de la arena de préstamo. Este SI varía entre 1 (completamente estable) y 0 (completamente inestable), siendo de 0.50 para la arena nativa. Para una explicación más completa puede acudir a Pranzini et al. (2018).

Si lo anterior no quedara suficientemente claro véanse los resultados de un caso práctico presentados a continuación en una hoja Excel

3. Resultados y Discusión

Se presentan los resultados de aplicar el método a una regeneración de la playa Costa Ballena en Chipiona (Cádiz) con una arena de préstamo procedente de la cantera Los Yesos. En la tabla 1, las columnas de izquierda a derecha indican: (a) Diámetro del tamiz en unidades ϕ , (b) diámetro del tamiz en mm, (c) porcentaje en peso de la arena nativa retenido por cada tamiz, (d) porcentaje acumulado del retenido por cada tamiz, (e) porcentaje de la muestra en peso que pasa por cada tamiz, (f) factor de estabilidad parcial de cada tamiz o fs_i , correspondiente a la media de los porcentajes acumulados del tamiz en cuestión y el anterior, (g) factor de estabilidad global o SI de la arena nativa (compruébese que es 0.5), (h) porcentaje del peso retenido en cada tamiz de la arena de préstamo, (i) SI de la arena de préstamo, resultando $0.59 > 0.50$, más estable por tanto que la arena nativa. Recuérdese que $SI = fs_i \cdot \text{retenido} / 100$, o teniendo en cuenta las columnas, $SI_{\text{préstamo}} = (i) = (f) (h) / 100$

Tabla 1. Hoja Excel donde se muestra el procedimiento para el cálculo del Índice de Estabilidad (SI) de Pranzini, comparando los datos completos de las granulometrías de la arena nativa (playa Costa Ballena) con la de préstamo (cantera Los yesos). La explicación de cada columna en el párrafo anterior.

		Nativa		Costa Ballena		Nativa		Préstamo	Cantera l
a	b	c	d	e	f	g	h	i	
Tamiz (fi)	Tamiz (mm)	retenido	Acumulado	%pasa	fsi	SI	retenido	SI	
0,5	0,71	0,12	0,12	99,88	1,00	0,12	0,14	0,00	
1	0,50	0,18	0,30	99,70	1,00	0,18	0,10	0,10	
1,5	0,35	0,22	0,52	99,48	1,00	0,22	0,12	0,12	
2	0,25	0,60	1,12	98,88	0,99	0,60	0,14	0,14	
2,5	0,18	1,83	2,96	97,04	0,98	1,80	0,16	0,16	
3	0,13	8,19	11,14	88,86	0,93	7,61	15,30	14,22	
3,5	0,09	22,17	33,31	66,69	0,78	17,24	20,33	15,81	
4	0,06	23,01	56,32	43,68	0,55	12,70	35,30	19,48	
4,5	0,04	24,40	80,72	19,28	0,31	7,68	27,01	8,50	
5	0,03	10,07	90,79	9,21	0,14	1,43	0,90	0,13	
5,5	0,02	8,10	98,89	1,11	0,05	0,42	0,34	0,02	
4,5	0,04	1,11	100,00	0,00	0,01	0,01	0,16	0,00	
		100,00				0,50	100,00	0,59	
SI=fsi· retenido/100									

Asimismo, en la tabla 2, también se presentan los datos obtenidos para tres canteras diferentes (Los Yesos, San Agustín y Lebrija) siguiendo la misma metodología.

Véase que se obtienen diferentes SI para cada una de las canteras (0.59, 0.73 y 0.71) que nos permiten clasificar la mayor o menor estabilidad de cada una de las muestras de préstamo. Faltaría ver la pendiente de la playa correspondiente a cada una para comprobar que la morfología del perfil no cambia sustancialmente con respecto a la playa nativa.

Por otra parte, en la figura 1, se aprecia la ubicación de las tres muestras en el ábaco de James. Todas ellas caen en la zona de simplemente STABLE, sin ninguna información adicional que posibilite una ordenación de las mismas por perdurabilidad.

Tabla 2. Resultados del método de Pranzini aplicado a tres diferentes fuentes de préstamo de arena. Se muestran los retenidos para cada tamiz y el factor de estabilidad SI

Cantera 1	Los Yesos	Cantera 2	San Agustín	Cantera 3	Lebrija
Retenido	SI	Retenido	SI	Retenido	SI
0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
0,14	0,14	0,04	0,04	1,60	1,60
0,10	0,10	0,32	0,32	3,10	3,09
0,12	0,12	1,06	1,06	3,69	3,67
0,14	0,14	4,50	4,46	3,91	3,88
0,16	0,16	8,05	7,89	4,48	4,39
15,30	14,22	20,20	18,78	12,46	11,58
20,33	15,81	34,20	26,60	30,40	23,64
35,30	19,48	19,81	10,93	29,20	16,11
27,01	8,50	8,08	2,54	11,06	3,48
0,90	0,13	0,97	0,14	0,07	0,01
0,34	0,02	0,79	0,04	0,03	0,00
0,16	0,00	1,98	0,01	0,00	0,00
100,00	0,59	100,00	0,73	100,00	0,71

4. Conclusiones

En este artículo, se han presentado las desventajas del Ábaco de James y como el nuevo método de Pranzini las soluciona. En la tabla 3, se han esquematizado para una mejor apreciación. Vemos como la comparación de los distintos tamices entre las muestras de préstamo y la nativa, proporciona un coeficiente de estabilidad (SI) para cada muestra. Ello permite la clasificación de las mismas desde el punto de vista de su estabilidad. Por otra parte, soluciona también el problema del Ábaco de James en lo que se refiere a las líneas demasiado juntas de su parte central.

Finalmente, no todo son ventajas, el método de Pranzini todavía no proporciona un factor de realimentación o sobrellenado. Pero estamos trabajando en ello y esperamos poder presentar una solución en un futuro próximo.

Tabla 3. Comparación de los métodos del Ábaco de James y de Pranzini: Ventajas y desventajas.

ÁBACO DE JAMES	PRANZINI
Precisa distribución log-normal	Cualquiera
Sólo usa D ₁₆ y D ₈₄ de arena nativa y préstamo	Compara los sedimentos retenidos en todos los tamices
Líneas muy juntas para $\sigma_b < \sigma_n \rightarrow$ error	No ha lugar
No distingue entre muestras “stable”	Sí distingue y permite clasificar
Proporciona un factor de Realimentación	<u>Todavía</u> no

Referencias bibliográficas

- DEAN R. (1974). Compatibility of borrow material for beach fills. In: Proc. 14th Int. Conf. on Coastal Engineering, vol. 2, pp. 1319–1330.
- JAMES W.R. (1975). Techniques in Evaluating Suitability of Borrow Material for Beach Nourishment. T.M. 60. CERC, US Army Corps of Engineers, Fort Belvoir.
- HOBSON R.D. (1977). Review of Design Elements for Beach Fill Evaluation. T.P. 77-6. CERC, US Army Corps of Engineers, Fort Belvoir.
- KRUMBEIN W.C. y JAMES W.R. (1965). A Lognormal Size Distribution Model for Estimating Stability of Beach Fill Material. T.M. 16. US Army Corps of Engineers, Beach Erosion
- PRANZINI E., ANFUSO G. y MUÑOZ J.J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering* 139, pp. 32-35
- STAUBLE, D.K., 2007. Assessing beach fill compatibility through project performance evaluation. In: Coastal Sediments' 07, pp. 2418–2431.
- USACE (2002). Coastal Engineering Manual. EM 1110-2-1100, www.publications.usace.army.mil

La gobernanza del litoral: ejemplo de aplicación en la desembocadura del río Bidasoa

Coastal Governance: Example of implementation at the mouth of the Bidasoa River

Cristina Maíllo Fernández^a y Juan Pérez Martínez^b

^aJefa de Servicio de Proyectos y Obras en el Servicio Provincia de Costas de Gipuzkoa
(cmaillo@miteco.es)

^bJefe de Servicio de Proyectos y Obras en Demarcación de Costas del País Vasco (jperezmar@miteco.es)

How to cite: Maíllo Fernández, C. & Pérez Martínez, J. (2024). La gobernanza del litoral: ejemplo de aplicación en la desembocadura del río Bidasoa. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

In this article, an example of Coastal Governance brought to reality at the Txingudi Bay, within the mouth of the Bidasoa River, which remains a great environmental enclave (most of its area is included at the Natura 2000 Network and the List of Ramsar Wetlands) located at the region of Gipuzkoa, and shared with France by its right edge is presented.

Since 1991 intense work has been done in order to recover this protected space; being the institutions with competences regarding the conservation of the Txingudi Bay those who, thanks to collaboration agreements and the creation of an inter-institutional committee, have (and still) been working so a whole improvement of such an environmentally important area is preserved.

The Txingudi Committee redacted the Txingudi Main Plan, with every other implied institutions agreement, being ultimately approved by the Autonomous Region of the Basque Country in december 2015. This document, along with the continuity of the inter-institutional committee created for its development, has served as a a guide for coordination of different proposals and environmental and social improvement actions within the Txingudi Bay.

Keywords: *Integrated Coastal Zone Management (ICZM), governance, agents, coordination, competences, coastal areas, littoral, estuaries.*

Resumen

Se expone en este artículo un ejemplo de gobernanza del litoral hecha realidad en la bahía de Txingudi, dentro de la desembocadura del Río Bidasoa, el cual se trata de un enclave de gran valor ambiental (gran parte de su superficie se encuentra incluida en la Red Natura 2000 y, a su vez en la Lista Ramsar de humedades) ubicado en la provincia de Gipuzkoa y compartido en su margen derecha con Francia.

Desde el año 1991 se viene trabajando con intensidad en la recuperación de este espacio protegido; siendo las Administraciones con competencias en la conservación de la Bahía de Txingudi las que, gracias a convenios de colaboración y a la creación de una Comisión interinstitucional, han trabajado y siguen haciéndolo por la mejora integral de un espacio protegido de gran importancia ambiental.

La Comisión de Txingudi redactó el Plan Director de Txingudi, con el consenso de todas las instituciones participantes, siendo aprobado por la Comunidad Autónoma del País Vasco en diciembre de 2015. Este documento, junto con la continuidad de la comisión institucional creada para su redacción, ha servido de guía para coordinar las diferentes propuestas y acciones de mejora ambiental y social de la bahía de Txingudi

Palabras clave: *Gestión Integrada de Zonas Costeras (GIZC), gobernanza, agentes, coordinación, competencias, zonas costeras, litoral, estuarios.*

1. Introducción: La Gestión Integrada de las Zonas Costeras

A lo largo de los siglos XX y XXI, actividades económicas con un gran peso en la economía nacional han producido una importante incidencia en la franja costera de nuestro país. Dentro de las actividades económicas que se pueden encontrar en la zona costera se incluyen:

- Turismo: Actividad que representa un 11,6% del PIB (fuente: INE).
- Urbanización.
- Actividad pesquera.
- Movilidad y comercio, especialmente en zonas portuarias (transporte marítimo).
- Producción de energía.
- Producción agraria, especialmente en zonas marismales.

Sin embargo la zona litoral se caracteriza por albergar una serie de ecosistemas de alta riqueza natural y ambiental, entre los que podemos destacar:

- Zonas húmedas costeras: albuferas, marjales, marismas, esteros.
- Zonas asociadas a desembocaduras de ríos: rías, deltas y estuarios.
- Zonas dunares.
- Zonas de fanerógamas marismas: Posidonia y Zoostera.

Debido a la alta demanda de la utilización de dichos espacios por parte de las diferentes actividades, se ha generado en la zona litoral una serie de aspectos negativos, entre los que se pueden destacar:

- Concentración intensiva de población en zonas costeras.
- Sobreexplotación de recursos naturales.
- Degradación y pérdida de hábitats y biodiversidad.
- Ocupación y degradación de espacios necesarios para la protección y conservación de la costa.
- Aumento de la vulnerabilidad de la costa frente al cambio climático.

Las siguientes imágenes muestran varios ejemplos del deterioro que supone la demanda excesiva de la zona litoral:



Fig. 1. *Frente Playa de Somo (Cantabria).* Fuente: Europa Press (2014)



Fig. 2. *Urbanización Manga del Mar Menor (Murcia).* Fuente: Pinterest

En este contexto aparece el concepto de Gestión Integrada de Zonas Costeras (GIZC). Para esta herramienta existen varias definiciones dadas por diversos autores; si bien, dentro de todas, es interesante destacar la incluida en el Protocolo del Convenio de Barcelona relativo a la GIZC, el cual define en su artículo 2 dicha herramienta como un “proceso dinámico de gestión y utilización sostenibles de las zonas costeras, teniendo en cuenta simultáneamente la fragilidad de los ecosistemas y sus paisajes costeros, la diversidad de las actividades y los usos, sus interacciones, la orientación marítima de determinados usos y determinadas actividades, así como sus repercusiones a la vez sobre la parte marina y la parte terrestre”.

Es decir, se trata de una herramienta que debe buscar la integración de objetivos e instrumentos necesarios, sirviendo como mecanismo de interacción entre administraciones y abarcando el ciclo completo de tareas. En este punto es interesante resaltar los trabajos elaborados en el CEDEX por De la Peña, Lloret y Rodríguez en 1996, en los cuales, entre otros aspectos, elaboraron el siguiente esquema de pasos y aspectos a tener en cuenta en la GIZC:

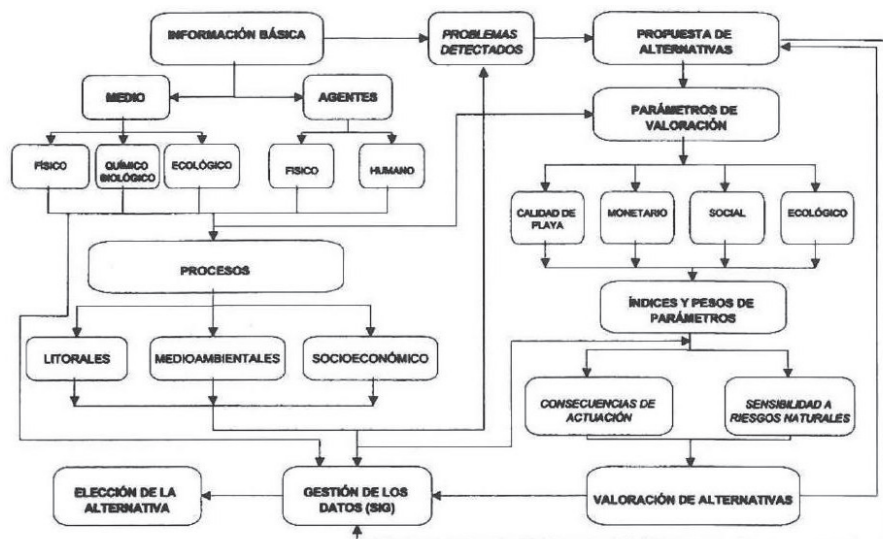


Fig. 3. Diagrama de flujos para la gestión integral de la costa. Fuente: Guía Técnica de Estudios Litorales (De la Peña, 2022).

2. Objetivo. Aplicación práctica de la GIZC en la desembocadura del Río Bidasoa

A la hora de poner en práctica la GIZC los agentes responsables de la toma de decisiones y los equipos profesionales que se encargan de coordinar acciones de gestión se enfrentan a una intensa labor de ajuste entre todos los aspectos a tener en cuenta; el medio, los agentes y los procesos. Esta herramienta implicará a un amplio abanico de partes interesadas y sectores de aplicación, por lo que será necesario manejar una gran cantidad de datos.

La zona donde se ha desarrollado la experiencia que se desarrolla en este artículo se encuentra ubicada en la provincia de Gipuzkoa, al norte de España, y más concretamente en la desembocadura del río Bidasoa, que hace frontera con el país vecino, Francia (ver Fig.3 y 4). Este espacio se conoce como el estuario del Bidasoa o la bahía de Txingudi, y se trata de un enclave de gran valor ecológico.



Fig. 3. Bahía de Txingudi en 1634.
Fuente: Atlas del Rey Planeta

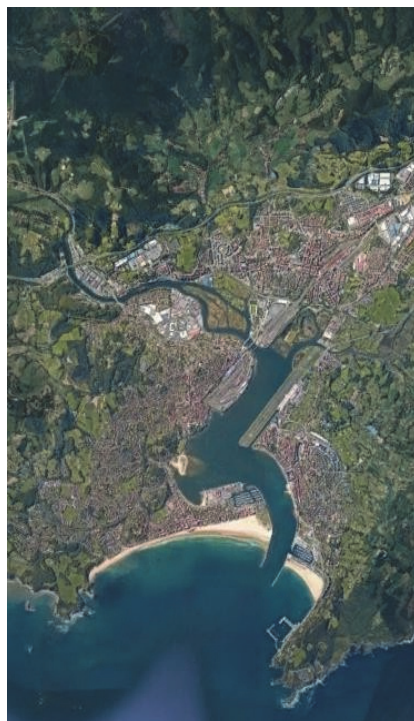


Fig. 4. Bahía de Txingudi en nuestros días.
Fuente: Google Earth

Como se observa en las Fig. 5 y 6, la mayor parte de su superficie está incluida en la red ecológica europea de áreas de conservación de la biodiversidad (Red Natura 2000), y figura incluido en la Lista RAMSAR de humedales de importancia internacional desde noviembre de 2002.



Credits: © OpenStreetMap (and) contributors, CC-BY-SA, GISCO, © EEA, Copenhagen, 2021
Created on: 19/01/2025 23:56



Fig. 5. Red Natura 2000. Fuente: Red Natura 2000 Viewer

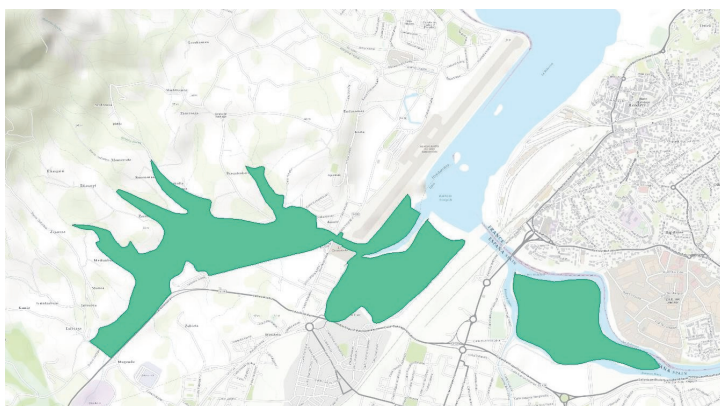


Fig. 6. *Convenio Ramsar (humedal de importancia internacional)* Fuente: Visor GeoEuskadi

Con el objeto de proteger y recuperar este espacio natural, desde las administraciones se viene trabajando de forma coordinada desde el año 1991.

La primera iniciativa fue la firma de un convenio de colaboración entre la Comunidad Autónoma del País Vasco y, la Diputación Foral de Gipuzkoa y los Ayuntamientos de Irún y Hondarribia. Los trabajos llevados a cabo dieron lugar al Plan Especial de Protección y Ordenación de los Recursos Naturales del Área de Txingudi (aprobado por *ORDEN de 29 de julio de 1994, del Consejero de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente, relativa al Plan Especial de Protección y Ordenación de los Recursos Naturales del Área de Txingudi*)

Pero fue en el momento en el que se aprobaron definitivamente las Zonas de Especial Conservación y la Zona de Especial Protección para las Aves de Txingudi (*Decreto 356/2013, de 4 de junio, por el que se designa la Zona Especial de Conservación «Txingudi-Bidasoa» (ES2120018) y se aprueban sus medidas de conservación y las de la Zona de Especial Protección para las Aves ES0000243 «Txingudi»*) cuando desde el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Vasco, en el marco de sus competencias, se impulsó la creación de una comisión interinstitucional que planteaba los siguientes objetivos:

- Unificar criterios e intereses, así como la visión de los distintos agentes públicos implicados en el espacio, buscando el mayor grado de consenso sobre las propuestas planteadas. Se buscaba la puesta en común de una forma coordinada.
- Renovar la visión sobre la recuperación del espacio y los ecosistemas estuarinos del conjunto de espacios incluidos en la Red Natura 2000.

Durante los dos primeros años de trabajo de esta Comisión se hizo un gran esfuerzo en la redacción de un documento de diagnóstico que identificara las actuaciones y necesidades más urgentes, y que además estableciera unos objetivos y directrices consensuados por los agentes participantes. Este documento se denominó *Plan Director de Txingudi 2015-2026. Plan Director para la restauración y la mejora de conectividad de los espacios naturales del entorno de la bahía de Txingudi, aprobado en diciembre de 2015*.

Se trata de un documento que ha servido de guía al trabajo de la comisión interinstitucional de Txingudi a lo largo de los años, ya que este texto incluye una planificación a largo plazo que ha permitido impulsar distintos proyectos y alternativas de forma coordinada, agilizando sus trámites en la medida de lo posible. Cabe destacar para ponernos en contexto que se trata de un documento de no obligado cumplimiento.

El documento incluye un diagnóstico y análisis de prioridades urgentes para la restauración y conectividad de las marismas de Txingudi, un estudio de alternativas a grandes rasgos y una programación de acciones valoradas con un calendario horizonte 2015-2026. Antes de plantear las alternativas se definieron 6 áreas de trabajo que sirvieron de base.

3. Comisión interinstitucional Plan Director de Txingudi

Tal y como se observa en la figura 4, la bahía de Txingudi se trata de un estuario muy antropizado que ha perdido en gran medida sus características naturales. En él encontramos tres poblaciones Hendaya, Hondarribia e Irún, un aeropuerto de interés general (el aeropuerto de San Sebastián), dos estaciones de ferrocarril internacionales (en Hendaya y en Irún) y otras dos estaciones de ferrocarril de vía estrecha. No hay que olvidar otras infraestructuras necesarias para la conexión fronteriza que salvan el río Bidasoa, que como hemos comentado en el epígrafe anterior hace de frontera entre Francia y España.

El área de estudio se encuentra sometida a la planificación hidrológica y a la legislación de costas, además de estar incluida en la Red Natura 2000.

Encontramos por tanto un cúmulo de competencias en un enclave muy reducido que es necesario coordinar, ya que no todos los agentes tienen los mismos intereses ni las mismas necesidades, e incluso los intereses en algunas ocasiones son encontrados o a veces incompatibles unos con otros. Por ello el trabajo más complicado en estos lugares es llegar a un consenso en el que todos los responsables en la toma de decisiones pongan de su parte para conseguir una convivencia armónica.

En el caso práctico que nos ocupa se celebraban reuniones periódicas entre los agentes. Se solían intercalar reuniones de la “Comisión técnica” cuyos participantes eran profesionales técnicos de las distintas administraciones o entidades públicas con reuniones de la “Comisión política” formada por los agentes responsables en la toma de decisiones de cada Administración. Durante la redacción del Plan director el calendario de reuniones fue muy intenso, se celebraban con una periodicidad mensual o bimensual, sin embargo, una vez aprobado el plan estas reuniones se han ido espaciando pasando a ser semestrales, anuales y finalmente incluso bianuales.

Para simplificar el trabajo y las reuniones de estas comisiones, en momentos puntuales en los que había que debatir proyectos más concretos, se creaban comités técnicos que llevaban a la comisión técnica las propuestas más trabajadas.

Los agentes implicados en esta comisión, para que el lector se haga a la idea de la complejidad que ataña la gestión de todos ellos, eran los siguientes:

- Departamento de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma del País Vasco: Interviniendo en su día la Dirección de Planificación Territorial y Urbanismo y la Dirección de Medio Natural y Planificación Ambiental.
- Diputación Foral de Gipuzkoa: Participando los Departamentos de infraestructuras viarias, de Movilidad e Infraestructuras, la Dirección de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas y la Dirección de Montes y Medio Natural.
- Ayuntamiento de Hondarribia
- Ayuntamiento de Irún
- Servicio Provincial de Costas de Gipuzkoa
- ADIF – en contadas ocasiones

- AENA – en contadas ocasiones
- URA – Agencia Vasca del Agua
- ETS – Euskal Trenbide Sarea
- IHOBE – Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco

Y lo que más complica la gestión es la diversidad de competencias de cada uno de ellos, entre las cuales podemos encontrar competencia en materia de medio ambiente, tráfico ferroviario, tráfico por carretera, en materia de gestión del agua, de gestión del litoral, servidumbres aeronáuticas, planeamiento, deportes y servicios a los municipios afectados.

4. Desarrollo de la herramienta

Como podemos observar de los epígrafes anteriores, sin haber definido esta experiencia como una gestión integrada de las zonas costeras (GIZC) desde el inicio, el trabajo realizado desde 1991, el resultado de los estudios, análisis y reuniones celebradas a lo largo de todos estos años nos muestran una forma de poner en práctica esta herramienta, es decir, la gestión integrada de un espacio de gran valor ambiental ubicado en una zona costera que además se encuentra integrada en un territorio muy antropizado.

Con el objeto de que esta experiencia pueda servir de base o apoyo a estudios futuros en otras zonas o espacios similares, se ha elaborado el siguiente esquema.

- Será necesario que haya una Administración que lidere y disponga de financiación económica para la elaboración de un documento de diagnóstico inicial de la zona de estudio a partir del cual comenzar a trabajar.
- Hay que buscar una colaboración interadministrativa que permita llegar a acuerdos, esto posibilita una participación pública más eficaz, ya que así ésta no sufre los desacuerdos administrativos.
- Coordinación y equilibrio entre el conocimiento científico-técnico y la toma de decisiones, para que esta se lleve a cabo basándose en la ciencia. Esto nos proporciona un enfoque riguroso y estructurado para abordar los problemas y evaluar las posibles soluciones.
- Establecer unos objetivos consensuados y avalados por la normativa.
- Analizar las amenazas o inconvenientes que podamos encontrar en el camino de la consecución de los objetivos.
- Celebración de reuniones periódicas de los agentes implicados donde debatir las propuestas.
- Puesta en común entre Agentes de las propuestas necesarias para la consecución de estos objetivos, teniendo en cuenta los intereses de cada sector.
- Establecer un programa de acciones y medidas a medio y largo plazo que nos permita conseguir estos objetivos, estableciendo un horizonte temporal realista.
- Convenios de colaboración entre los agentes para la puesta en marcha de estas medidas.
- Comisiones técnicas para asuntos más concretos.

- Reuniones de coordinación (sobre todo en los inicios) y de seguimiento del cumplimiento de las medidas (en etapas más avanzadas), de manera que todas las propuestas se ejecuten de una manera coordinada y cumpliéndose la normativa.

5. Resultados

Tras muchos esfuerzos, y como resultado de este trabajo tan complejo se citan una serie de proyectos que se han redactado y actuaciones que se han llevado a cabo o se prevé comenzar a corto plazo, indicando en cada caso los Agentes que financiarán la ejecución de la actuación.

- Itinerarios peatonales en la ría de Jaizubia, zonas de Zaldiferra y Bekoerrot, T.M. Hondarribia – DG. de la Costa y el Mar – Finalizada en 2022
- Itinerarios peatonales y para bicicletas por la calle Pierre Loti y pantalán bajo los puentes internacionales y restauración y mejora ambiental del aparcamiento y accesos del parque ecológico de Plaiaundi – Gobierno Vasco – se encuentra en ejecución
- Recuperación parcial de las marismas de Jaizubia en Hondarribia (entorno de Beko-errot) – DF. Gipuzkoa – Pendiente de finalizar las expropiaciones.
- Recuperación ambiental de las marismas de San Lorenzo “Plaiaundi” – DG. de la Costa y el Mar. Pendiente de licitación del proyecto constructivo.
- Proyecto de naturalización del canal de Artía (tramo GI-636 - Río Bidasoa) – DG. de la Costa y el Mar – en ejecución.
- Pequeñas actuaciones de renaturalización de las márgenes y de eliminación de especies alóctonas invasoras. Varios agentes

En gran medida estos proyectos están contemplados en el Plan Director de Txingudi de 2015, sin embargo, cabe destacar que este documento no es normativo ni de obligado cumplimiento, sino una declaración de intenciones que ha servido de guía para la mejora de la Bahía de Txingudi. Es por ello que se observan algunas desviaciones con respecto a las propuestas del año 2015, destacando que los proyectos en marcha y finalizados se han ejecutado de una forma coordinada entre los agentes implicados en esta Comisión.

6. Conclusiones. Cosas a mejorar

A lo largo de los años que lleva en marcha la Comisión de Txingudi, además de desarrollar un diagnóstico del entorno de la bahía de Txingudi, consensuar soluciones y materializarlas en el terreno y en un programa de acciones, se ha llevado a cabo un trabajo de comunicación y coordinación entre Administraciones sin precedentes en la provincia de Gipuzkoa. No hay que perder de vista que, en un entorno tan complejo como es la desembocadura del Bidasoa los agentes implicados son muy diversos y en muchas ocasiones las competencias y las responsabilidades no confluyen en la misma dirección.

Este trabajo nos ha permitido aprender y crecer como gestores que somos, sin embargo, como en toda experiencia, siempre hay cosas que mejorar.

En este sentido desde el punto de vista técnico hemos observado que el hecho “necesario” de que haya una Administración liderando la comisión genera situaciones de indeterminación. Un agente que lidera una comisión que afecta a gestores en todos los niveles administrativos debe comprometerse a mantenerse al mando de la Comisión incluso con los cambios de gobierno en las

diferentes legislaturas, pues la planificación se hace más allá de los cuatro años de gobierno. Si esto no se cumple traería consigo una falta de continuidad entre equipos de gobierno, con la consiguiente pérdida de información y de liderazgo.

Sería muy interesante aplicar metodologías de Gestión Integrada de las Zonas Costeras, ya desarrolladas en otros casos que puedan guiarnos en el camino.

Como cosas aprendidas se podría resaltar la importancia de utilizar herramientas de este tipo, que nos permiten analizar, estudiar y gestionar los proyectos con una visión multidisciplinar.

También esta experiencia nos ha enseñado que desarrollar proyectos de una forma coordinada con otros agentes disminuye el riesgo, es decir, evita sorpresas y malentendidos, además de tratarse de una forma de trabajar muy enriquecedora para los técnicos de las Administraciones.

Nuevo dique exterior del puerto de Génova (Italia)

Port of Genoa's new breakwater (Italy)

Elena Quevedo Baquerizo^a, Laia Ortego Valencia^b, Daniele Maroni^c, Antonio Lizzadro^d y Marco Vaccari^e

^aSener Mobility S.A.U.  elena.quevedo@mobility.sener; ^bAPM Terminals  laia.ortego@apmterminals.com; ^cSener Mobility S.A.U., daniele.maroni@mobility.sener; ^dTECHNITAL S.p.A. Antonio.Lizzadro@technital.it; ^ePorts of Genoa - Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale, marco.vaccari@portsofgenoa.com.

How to cite: Quevedo Baquerizo, E. et al. (2024). Nuevo dique exterior del puerto de Génova (Italia). Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Ibiza, mayo 2024

Abstract

Sener has participated in the design of a new 6.2 km breakwater in the Port of Genoa, one of the most important in the Mediterranean. The objective was to create a wider mouth and channel to accommodate larger vessels and improve safety, while maintaining the same level of protection as the current dock. In the first instance, Sener studied the possibility of building a floating breakwater. For this purpose, the La Condamine dock in Monaco was studied. However, due to the more energetic sea conditions and the higher wave periods in Genoa, larger dimensions were required to meet the necessary transmission coefficients. This option proved to be economically unfeasible and posed major construction challenges, so it was ultimately discarded.

Keywords: *floating breakwater; wave transmission; constructability; Genoa.*

Resumen

Sener ha participado en el diseño conceptual de un nuevo dique de 6,2 km en el puerto de Génova, uno de los más importantes del Mediterráneo. El objetivo era crear una bocana y un canal de navegación más amplios para recibir buques mayores y mejorar la seguridad, manteniendo el mismo nivel de protección que el dique actual. En la primera fase, Sener estudió la posibilidad de construir un dique flotante. Para ello, se estudió el dique de La Condamine en Mónaco, el único de similares dimensiones. Sin embargo, debido a las condiciones marítimas más energéticas y los periodos de oleaje superiores en Génova, se requerían mayores dimensiones para cumplir con los coeficientes de transmisión necesarios. Esta opción resultó inviable económicamente y presentaba grandes desafíos constructivos, por lo que fue finalmente descartada.

Palabras clave: *dique flotante; transmisión de oleaje; constructibilidad; Génova.*

1. Introducción

El puerto de Génova es uno de los más importantes y antiguos de Italia. La ensenada del Mandraccio se utilizaba como puerto natural desde el siglo V a.C. Sus primeras estructuras portuarias se construyeron en el siglo XII (il molo Vecchio).



Fig. 1. Antigua carta náutica del puerto de Génova.

En la actualidad, el puerto tiene 700 ha de terreno, 500 ha de agua, 22 km de muelles y 3 diques de abrigo exentos que suman más de 14 km.



Fig. 2. Foto aérea del puerto de Génova en la que se pueden apreciar sus 3 diques de abrigo exentos.

Fuente: Google Earth.

El dique exterior principal, de 5,3 km de longitud y situado en profundidades de hasta 25 metros, se construyó en la primera mitad del siglo XX, y protege la dársena antigua y el *bacino di Sampierdarena*. Es un dique vertical con algunos tramos protegidos por bloques, y ha sufrido varios daños y reparaciones a lo largo de su vida, los más reseñables debido a los temporales de 1933, 1934 y 1955.

Con el aumento del tráfico y del tamaño de los buques de la flota mundial, la bocana y el canal interior actuales del puerto han quedado pequeños. Por esta razón, el Puerto de Génova solicitó el proyecto de un nuevo dique de abrigo situado en profundidades mayores que el actual y la demolición de parte del dique actual. Se trataba de separar el dique de abrigo de las dársenas de

contenedores de Sampierdarena, de manera que el canal resultante y la bocana futura tuvieran mayor anchura, para poder acoger buques mayores y aumentar la seguridad en la navegación interior del puerto.



Fig. 1. *Modelo 3D del diseño propuesto para el nuevo dique del puerto de Génova.* Fuente: Sener.

2. Objetivos

El nuevo dique debía ofrecer un nivel de protección frente al oleaje similar al actual.

Los criterios de diseño para el nuevo dique se pueden resumir en:

- La bocana y el canal interior debían dimensionarse para la navegación de buques porta-contenedores de hasta 400 m de eslora (24.000 TEUs);
- La agitación interior en las áreas de navegación debía ser adecuada para la navegación segura;
- La agitación en los muelles debía ser admisible, en el caso de los muelles de Sampierdarena (situados justo a sotamar del dique), adecuada para el manejo de contenedores.
- Se debía minimizar el uso de materiales;
- Finalmente, se debía minimizar el coste de la obra y su mantenimiento.

Con estos objetivos en mente, se desarrolló un estudio de alternativas en el que se exploraron diferentes tipologías. En esta fase de proyecto, Sener analizó si el nuevo dique de Génova podría construirse según una tipología flotante, para ahorrar costes y materiales. Para ello se analizó su viabilidad técnica, económica y constructiva.

3. Análisis de la transmisión de oleaje bajo el dique flotante

El dique debía dimensionarse de manera que el oleaje transmitido fuera suficientemente pequeño. Al ser un dique flotante, la transmisión de la energía del oleaje se produce por debajo del dique, y no solamente por rebase.

El coeficiente de transmisión del oleaje se define como $K_T = \frac{H_T}{H_I}$, donde H_I es la altura de onda incidente y H_T es la altura de ola transmitida.

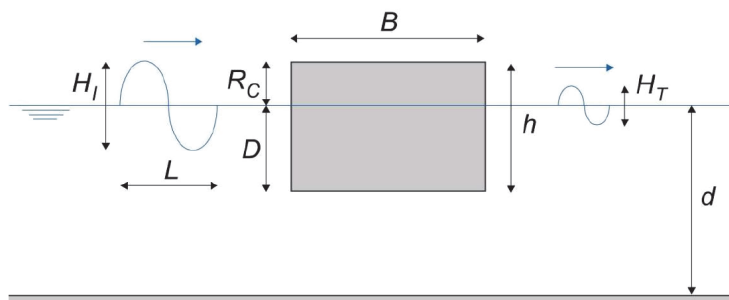


Fig. 3. Esquema de la transmisión del oleaje a través de un dique flotante y parámetros principales.

Fuente: Sener.

Teniendo en cuenta que el requisito de agitación en los muelles a sotamar del dique era no superar una altura de ola significativa de 0,5 m durante más de un 2% del tiempo anual, se tenía que el dique debía amortiguar el oleaje exterior de manera que una altura de ola significativa de 2,25m (con un periodo de entre 6 y 12,5 segundos), incidiendo sobre el dique, debía transformarse en una altura de ola significativa de 0,5m en el interior del puerto.

Es decir, se requería que el coeficiente de transmisión del dique fuera $K_T \leq 0,222$, para los periodos comprendidos entre 6 y 12,5 sg.

3.1. Revisión bibliográfica: comparación de formulaciones

Se analizaron las formulaciones existentes para estimar el coeficiente de transmisión de un dique flotante:

- Ursell, 1947, para rompeolas fijos de anchura infinitamente pequeña y gran profundidad. Formulación basada en la teoría lineal de ondas para aguas profundas, suponiendo ausencia de rebase y reflexión total en la parte superior de la columna de agua.
- Wiegel 1960. Esta fórmula considera la energía del oleaje, y es aplicable a rompeolas fijos, de anchura infinitamente pequeña, gran profundidad (teoría lineal) y sin rebase. Esta fórmula sólo depende del calado del rompeolas.
- Teoría modificada de la transmisión de energía, 1996. Se trata de una modificación de la fórmula de Wiegel.
- Macagno, 1953. Esta fórmula se aplica para un rompeolas fijo, de anchura finita, aguas profundas (teoría lineal) y no considera el rebase. Según PIANC PTC II, WG 13 «Floating breakwaters», esta formulación no es válida para valores altos de D/d ya que da valores altos (no nulos) del coeficiente de transmisión para $D=d$.
- Jones (1971) proporciona un método gráfico para obtener el coeficiente de transmisión para algunos casos particulares. Esta formulación se basa en la de Macagno, pero muestra un mayor efecto del calado.
- Ruol et al. (2012). Esta fórmula aplica a rompeolas móviles. Proporciona una aproximación para el cálculo del periodo de alteada del dique, teniendo en cuenta la masa añadida bajo el rompeolas. Se basa en la formulación de Macagno, con un factor de modificación, β , que depende del periodo relativo, definido como la razón entre el periodo de pico del oleaje y el periodo natural de alteada del rompeolas: $\frac{T_p}{T_h}$.

- Stoker (1957) resolvió el problema de un tablero fijo (con calado igual a 0), fijado en el nivel medio del mar (SWL), en aguas someras, utilizando la teoría lineal de ondas. La formulación sólo tiene en cuenta la relación entre la anchura del rompeolas y la longitud de onda: B/L .
- Carr, Healy y Stelzriede (1950) estudiaron el coeficiente de transmisión de rompeolas móviles mediante experimentos y análisis matemático, y llegaron a una formulación del coeficiente de transmisión para aguas someras, muy similar a la de Stoker pero teniendo en cuenta un calado finito.
- Wagner et al. (2011). Esta fórmula aplica a rompeolas flotantes en aguas profundas.

Cuando se comparan con los resultados de las pruebas con modelos físicos, la mayoría de estas formulaciones sobrestiman el coeficiente de transmisión de un rompeolas flotante:

Koutandos et al (2004) llevaron a cabo algunas pruebas con modelos físicos en rompeolas fijos y con movimiento vertical (alteada), bajo acción de oleaje regular e irregular, y concluyeron que el dique con movimiento de alteada opera de modo disipativo, con una reflexión mucho menor que el dique fijo simple.

Drieman (2011) comparó los resultados experimentales de Tolba (2011) con los resultados de la formulación de Carr, Haley y Stelzriede (1950) y Macagno (1953). Encontró que ambas formulaciones daban valores más altos de K_T que los resultados experimentales.

Merlevede (2012) hizo un análisis profundo de los resultados de los experimentos realizados por Tolba (1999), Koutandos et al. (2005) y Nakamura et al. (2003), y los comparó con los resultados analíticos utilizando las formulaciones de Macagno (1953), Stoker (1957), Jones (1971) y Wagner et al. (2011). Comprobó que la formulación de Wagner et al. (2011) es la que mejor se ajusta a los ensayos analizados.

3.2. Resultados: dimensionamiento del dique por transmisión

Tras el análisis de las diferentes formulaciones antes mencionadas y teniendo en cuenta que el dique de Génova estará en aguas profundas o intermedia, la formulación de Wagner et al (2011) parece ser la más adecuada para el prediseño del rompeolas.

Esta fórmula es aplicable a rompeolas flotantes en condiciones de aguas profundas y, según Merlevede (2012), es la que mejor se ajusta a los casos de prueba realizados por Tolba (1999), Koutandos et al. (2005) y Nakamura et al. (2003). La expresión del coeficiente de transmisión (K_T) es la siguiente:

$$K_T = \frac{g \cdot T^2 \sinh(k(d - D))}{2\pi^2 \left(W + d \cdot \tanh\left(3,5 \cdot \frac{D}{d}\right) \right) \cosh(k \cdot d)}$$

Según esta formulación, el coeficiente de transmisión depende del periodo del oleaje (T), de la longitud de onda (L) y de la manga (B) y calado (D) del rompeolas. Considerando una relación de $T_p = 1,1 \cdot T_z$, las figuras siguientes muestran la variación del coeficiente de transmisión (K_T) con el periodo de pico (T_p):

- para diferentes valores de la manga del rompeolas (B) y un calado fijo (D) de 25 m, en una profundidad (d) de 45 m.
- para distintos valores de calado del rompeolas (D) y una manga fija (B) de 50 m, en una profundidad (d) de 45 m.

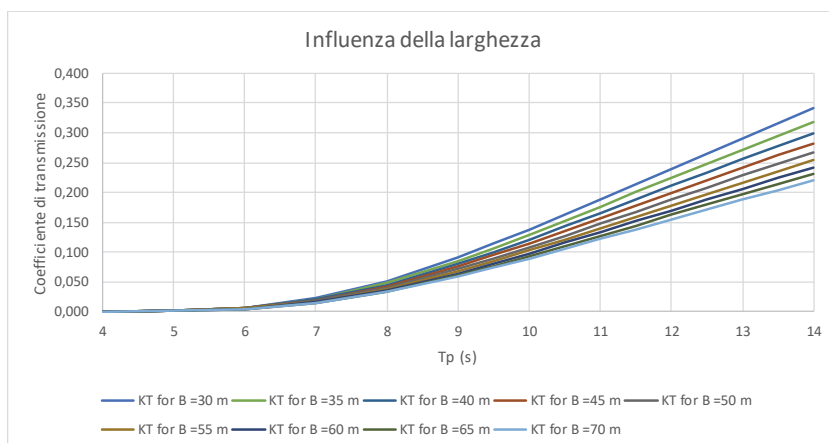


Fig. 4. Coeficiente de transmisión vs. T_p según Wagner et al. 2011, para diferentes valores de la manga y un calado fijo $D = 25\text{m}$, en una profundidad de 45m . Fuente: Sener.

Esta figura muestra que el coeficiente de transmisión aumenta a medida que lo hace el periodo de ola. También puede observarse que, para el mismo periodo, el coeficiente de transmisión disminuye a medida que aumenta la manga del cajón.

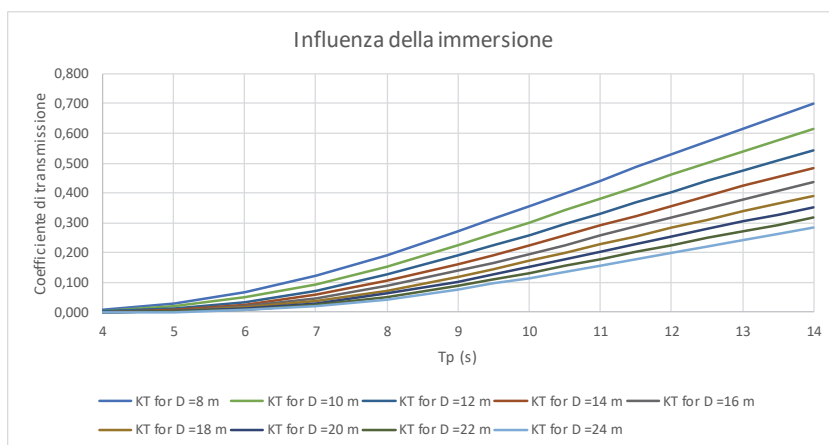


Fig. 5. Coeficiente de transmisión vs. T_p según Wagner et al. 2011, para diferentes valores del calado y una manga fija $B = 50\text{m}$, en una profundidad de 45m . Fuente: Sener.

En este caso, la figura muestra cómo el coeficiente de transmisión disminuye a medida que aumenta el calado del cajón.

Según la formulación de Wagner et al. (2011), para obtener un coeficiente de transmisión admisible ($K_T \leq 0,222$ para el rompeolas de Génova) para periodos de pico de ola de hasta $T_p \leq 12,5\text{s}$, el cajón podría definirse con uno de los siguientes pares de dimensiones:

Tabla 1. Posibles pares de dimensiones del cajón flotante: manga (B) y calado (D) que conducen a valores de KT admisibles para el dique de Génova.

Posibles dimensiones del cajón					
B (m)	30	35	40	45	50
D (m)	27,9	26,9	25,9	24,9	24,0

4. Análisis de los periodos propios del dique

La tabla siguiente muestra los periodos propios del dique, supuesto paralelepípedo, y sus alturas metacéntricas para las dimensiones antes obtenidas.

Se ha supuesto un dique de 2.000 m de longitud total, compuesto por 5 módulos flotantes de 400 m. El centro de gravedad se ha estimado suponiendo un cajón homogéneo con un francobordo de 2,9 m, sobre el que se coloca un espaldón de 5,6 m de alto y 2 m de anchura en el lado de barlomar y un lastre fijo de hormigón en sotamar para equilibrar el peso del espaldón.

Tabla 2. Periodos propios de los posibles cajones flotantes (correspondientes a los pares de dimensiones obtenidos en la tabla 1).

Caisson features					
B (m)	30	35	40	45	50
D (m)	27,9	26,9	25,9	24,9	24,0
L (m)	400	400	400	400	400
KG (m)	15,52	15,01	14,50	13,99	13,53
GM (m)	1,12	2,24	3,60	5,24	7,15
GML (m)	476,33	494,10	513,25	533,93	554,02
T heave (s)	12,7	12,8	13,0	13,1	13,3
T roll (s)	21,9	18,0	16,2	15,1	14,4
T pitch (s)	11,91	11,70	11,48	11,25	11,05
min{Theave, Troll} (s)	12,7	12,8	13,0	13,1	13,3

Aunque los periodos naturales de cabeceo son inferiores al resto, no es probable que se produzcan olas en la dirección del rompeolas. Es decir, para olas normalmente incidentes, las oscilaciones de balance y alteada de los cajones son las más proclives a verse forzadas que la oscilación de cabeceo.

Teniendo esto en cuenta, entre las diferentes dimensiones posibles del cajón flotante, las secciones con periodos de balance y alteada más altos tendrán un mejor comportamiento que el resto. Ambos deben ser suficientemente superiores a 12,5 s, que son los periodos más altos del rango de las ondas objetivo, en cuanto a operatividad y transmisión, y también superiores a 12,3 s que es el periodo de pico de las ondas de diseño.

Por lo tanto, en lo relativo al análisis de los periodos naturales, la sección preferida del cajón sería la más ancha, pero podrían aceptarse las soluciones a partir de la de 40 m de manga.

5. Análisis de la estabilidad naval del cajón flotante

La estabilidad de los cajones flotantes frente al vuelco dependerá de su altura metacéntrica, GM. Cuando el rompeolas tiene un ángulo de escora, φ , el momento adrizante (el momento del par de fuerzas peso y empuje, que hace disminuir la escora del cuerpo flotante, y por lo tanto lleva al cuerpo flotante de vuelta a su posición de equilibrio) será proporcional a la altura metacéntrica:

$$M_{righting} = W \cdot GM \cdot \sin(\varphi)$$

donde W es el peso del rompeolas y GM es la altura metacéntrica.

En la siguiente tabla se muestran las características de estabilidad de las posibles secciones de cajón flotante obtenidas en la tabla 1, tales como la altura metacéntrica, su relación con la manga, el punto de inmersión de la cubierta (ángulo de escora para el que la cubierta principal se encontrará con el mar) suponiendo que el francobordo es de 2,9 m, y el momento adrizante del cajón con un ángulo de escora de 5°.

Tabla 3. Características de estabilidad naval de los posibles cajones flotantes (correspondientes a los pares de dimensiones obtenidos en la tabla 1).

Características del cajón					
B (m)	30	35	40	45	50
D (m)	27,9	26,9	25,9	24,9	24,0
L (m)	400	400	400	400	400
KG (m)	15,52	15,01	14,50	13,99	13,53
Displ. (t)	343.170	386.015	424.760	459.405	492.000
GM (m)	1,12	2,24	3,60	5,24	7,15
GML (m)	476,33	494,10	513,25	533,93	554,02
B/D (-)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,1
GM (m)	1,12	2,24	3,60	5,24	7,15
GM/B	0,037	0,064	0,090	0,116	0,143
Righting moment (5°) (t·m / ml)	83	188	333	524	766
Point of deck immersion, α (°)	10,9	9,4	8,3	7,3	6,6
Deck immersion moment (t·m)	72.733	141.160	219.415	307.507	405.105

Los resultados muestran que el cajón con B=50m es mucho más estable que el de B=30m, ya que el primero tiene valores de GM y del momento de adrizamiento mucho mayores que el segundo, lo que contribuye a que el rompeolas vuelva a su posición de equilibrio.

Además, para que la cubierta toque la superficie del mar, debe aplicarse un momento de 405.105 t·m al cajón con B=50m, mientras que un momento más de cinco veces menor (72.733 t·m) conseguiría lo mismo en el caso del cajón B=30m.

En este sentido, es evidente que la estabilidad aumenta con la relación B/D, por lo que la solución más estable sería la de mayor manga.

Por otro lado, la constructibilidad de la solución en un astillero limitará la anchura posible del dique, y, además, la tabla anterior muestra que, aunque el calado requerido se reduce para vigas mayores,

el desplazamiento de la solución aumenta con la manga, y así lo hará también el coste de los materiales.

Por lo tanto, se ha buscado un criterio para una estabilidad aceptable. Las reglas para clasificación de buques de DNV establecen diferentes valores del parámetro GM/B para graneleros, petroleros y portacontenedores, con un mínimo de $0,05 \cdot B$, y establece «en general» un $GM = 0,07 \cdot B$, por lo que éste podría ser un criterio razonable para el rompeolas flotante.

En este sentido, la primera solución ($B=30$ m) no cumple el criterio de estabilidad de DNV para los buques, y la segunda ($B=35$ m) no parece aconsejable en términos de estabilidad. Para las soluciones restantes, cuanto mayor sea la manga, mayor será la estabilidad del cajón.

6. Dimensionamiento del dique flotante: criterios de coste y constructibilidad

En base a los razonamientos anteriores respecto a los periodos naturales y a la estabilidad naval de los cajones, se descartaron dos posibles cajones (pares de dimensiones) de la tabla 1: los correspondientes a $B=30$ y 35 m, mientras que los demás cumplían los criterios de estabilidad.

La siguiente tabla muestra el resumen de las características de los posibles cajones restantes.

Tabla 4. Posibles dimensiones de los cajones que cumplen los criterios de transmisión, periodos propios y estabilidad naval.

Caisson features			
B (m)	40	45	50
D (m)	25,9	24,9	24,0
L (m)	400	400	400
KG (m)	14,50	13,99	13,53
Displ. (t)	424.760	459.405	492.000

Para la selección de las dimensiones, nos restan los criterios de constructibilidad y coste de la solución.

En cuanto a la constructibilidad, podría ser difícil encontrar un dique seco de más de 40 ó 50 m. Por lo tanto, una solución de más de $B > 45$ m requerirá la construcción de un dique seco cerca de la costa ad hoc o un procedimiento de construcción diferente. Esto tendrá un fuerte impacto tanto en el coste final como en los plazos de construcción (retraso).

Por otra parte, el coste de los materiales y mano de obra será proporcional al peso del rompeolas, que coincide con el desplazamiento en toneladas de la tabla anterior.

Por ambas razones, se seleccionó la sección de cajón con $B=40$ m, ya que era la más barata y la más fácil de construir. En la tabla siguiente se resumen sus principales características:

Tabla 5. Resumen de características del cajón seleccionado.

Selected caisson	
B (m)	40
D (m)	25,9
L (m)	400
KG (m)	14,50
Displ. (t)	424.760
GM (m)	3,60
GML (m)	513,25

T heave (s)	13,0
T roll (s)	16,2
T pitch (s)	11,48

Y los coeficientes de transmisión de este cajón serían los siguientes, según Wagner et al (2011):

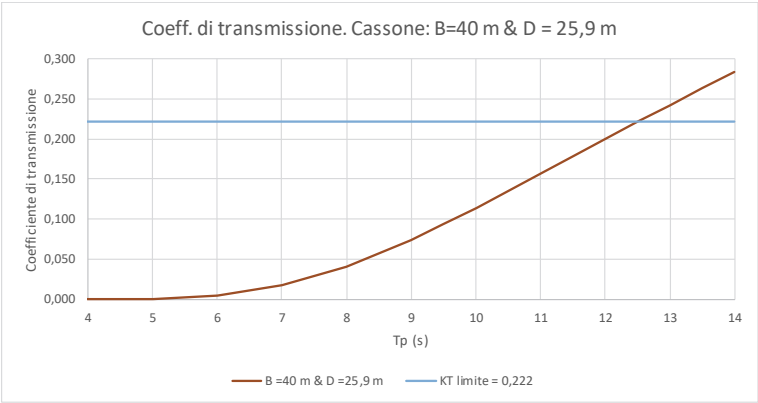


Fig. 6. Coeficientes de transmisión del cajón seleccionado para los diferentes periodos. La línea azul representa el coeficiente de transmisión límite, $K_T = 0,222$. Fuente: Sener.

6.1. Definición del flotador

La siguiente figura muestra la sección transversal del cajón flotante propuesto para el rompeolas del puerto de Génova. La longitud de cada cajón sería de 400 m. Así pues, el rompeolas estaría compuesto por 5 módulos flotantes.

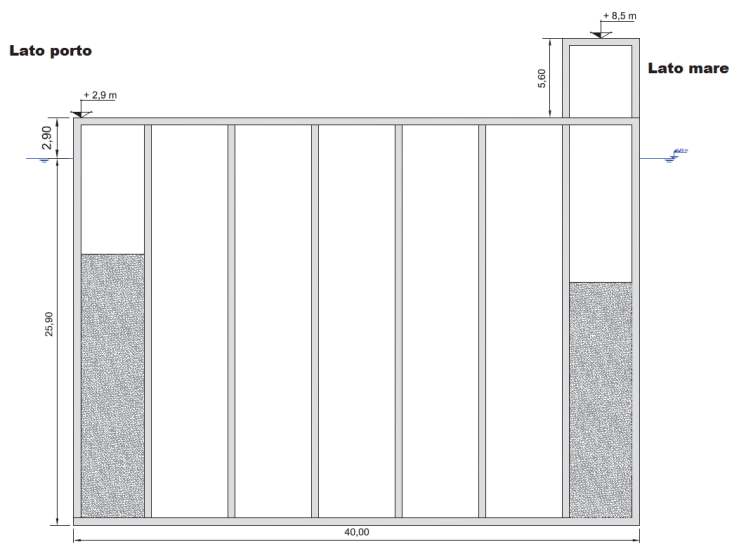


Fig. 7. Sección transversal preliminar del dique flotante. Fuente: Sener.

6.2. Definición de las cadenas y anclajes

El rompeolas flotante estaría compuesto por 5 módulos o cajones de 400 m de longitud cada uno, unidos rígidamente, y se anclaría al fondo del mar mediante un sistema de amarre compuesto por cadenas y anclas

El sistema de amarre propuesto incluía líneas desde las 2 secciones extremas del rompeolas (sus dos morros) y desde las 4 juntas entre los cajones (véase Fig. 8). En cada una de estas 6 secciones, habrá líneas del lado del mar y del lado del puerto.

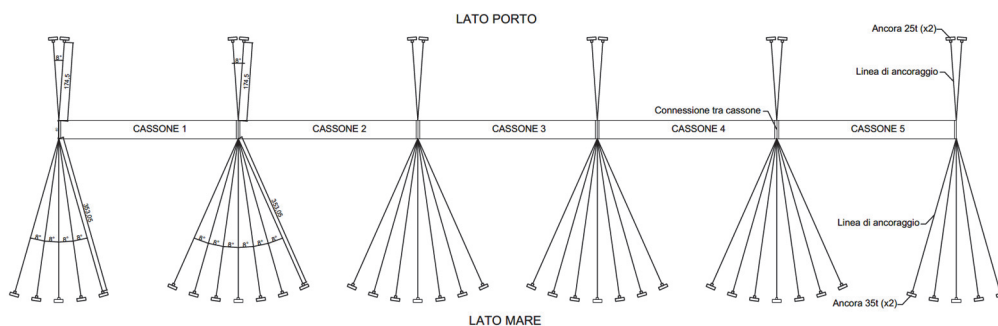


Fig. 8. Vista en planta del sistema de amarre del dique flotante. Fuente: Sener.

La elevación del fondo bajo el rompeolas es de -45 m, el nivel del mar varía de +0,00 m CD a +0,40 m CD aproximadamente, y el calado del rompeolas es $D = 25,9$ m. Teniendo en cuenta la batimetría del Puerto de Génova, las posiciones de los anclajes se seleccionaron para obtener una longitud de las líneas de amarre suficientemente larga como para poder garantizar que el ángulo de tiro en el anclaje (en el fondo) fuera adecuado a las anclas de arrastre (inferior a 3-5°) para las condiciones de diseño (oleaje de cálculo, de $H_s = 8,5$ m y $T_p = 12,3$ s). Siguiendo este criterio:

- las anclas de babor se situarán a una distancia aproximada de 170 m del eje del rompeolas, a una profundidad de -39 m CD, resultando un conjunto de líneas de amarre del lado puerto de 175 m de longitud;
- las anclas del lado del mar se situarán a una distancia aproximada de 345 m del eje del rompeolas, a una profundidad de -55 m CD, dando lugar a un conjunto de líneas de amarre del lado del mar de 355 m de longitud.

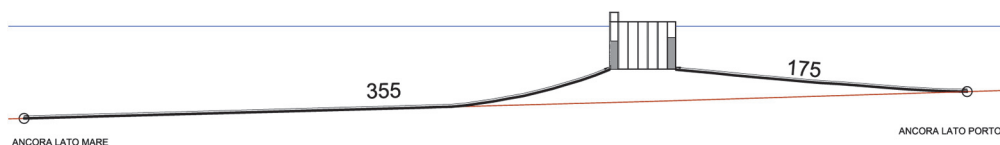


Fig. 9. *Sección transversal del cajón y su sistema de fondeo.* Fuente: Sener.

7. Conclusiones

7.1. Solución flotante

La solución flotante prediseñada es viable técnicamente.

En relación al diseño, éste requiere la realización de estudios en profundidad para analizar el comportamiento dinámico de la estructura en diferentes escenarios: en condiciones normales, en condiciones extremas de temporal, y en condiciones accidentales (con una o varias líneas rotas). Además, se recomienda la realización de ensayos de modelo físico para la comprobación del correcto funcionamiento de los cajones y de la correcta estimación de las cargas en los trenes de fondeo.

En cuanto a la constructibilidad, esta solución presenta varios retos, pues los flotadores son de grandísimas dimensiones y precisan construirse en dique seco.

Las razones anteriores, que suponían un aumento de los plazos de diseño y de construcción, junto con una gran incertidumbre en relación al coste de esta solución, propiciaron la selección de una solución más convencional para la siguiente fase del diseño.

7.2. Solución finalmente desarrollada

La solución finalmente adoptada para el proyecto de pre-factibilidad consistió en un dique vertical sobre una banqueta de grandes dimensiones debido a la gran profundidad en que se encontraba. Además, en algunos tramos del dique, el paramento vertical del lado mar se protegía con escollera o bloques de hormigón, constituyendo una solución de tipo japonés en dichos tramos.

El proyecto proponía la ejecución del nuevo dique en fases, coordinando la demolición del dique actual con la construcción del nuevo.

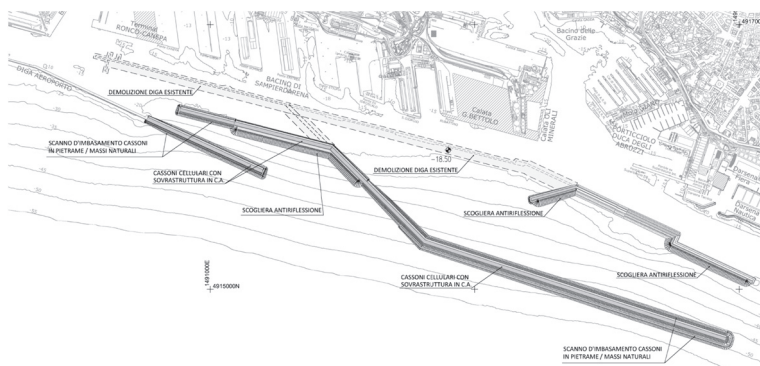


Fig. 10. Planta del nuevo dique de Génova. Fuente: Sener.

Dado que no había sido posible llevar adelante la solución flotante, que requiere muy bajos volúmenes de material, el Puerto de Génova requirió que la nueva solución reutilizara al máximo los materiales recuperados del dique actual a demoler. Por lo tanto, las nuevas secciones preveían reutilizar los bloques de hormigón y escollera recuperadas en las protecciones del lado mar, si cumplían las condiciones del peso requerido para este material. Por otro lado, el hormigón de la superestructura y el resto de bloques podían ser reutilizados, después de un proceso de machaqueo, como relleno de las celdas de los cajones. Finalmente, se proponía emplear la escollera que no cumpliera los criterios de peso para las protecciones anteriores, para la construcción de las banquetas de cimentación.

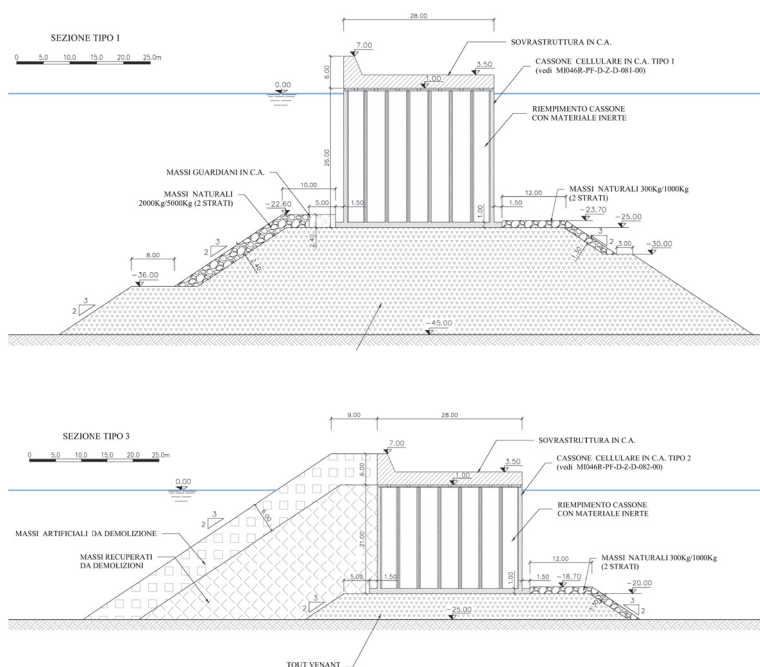


Fig. 10. Algunas secciones del nuevo dique de Génova (arriba: dique vertical, abajo: dique japonés). Fuente: Sener.

Referencias

- Carr, J. H., 1952. "Mobile Breakwaters," Proceedings of the Second Conference on Coastal Engineering, Berkeley, California, pp. 281–295.
- Carr, J.H., Healy, J.J., and Stelzriede, M.E. (1950). Reflection and transmission of water waves by floating and fixed rigid surface barriers. Progress Report for July 1950, Hydro. Laboratory, California Institute of Technology, Contract NOy-12561 (unpublished).
- DNV rules for classification of ships. Edition July 2019. Part 3 Hull. Chapter 4 Loads
- Jones, D.B. Transportable breakwater - a survey of concepts. Naval Civil Engineering Laboratory, 1971.
- Koutandos, E.K.; Prinos, P. and Gironella, X. Floating breakwaters under regular and irregular forcing: Reflection and transmission characteristics. Journal of Hydraulic Research, pages 174-188, 2005.
- Macagno, E.O. Experimental study of the effects of the passage of a wave beneath an obstacle. Proceedings of Academie des Sciences, Paris, 1953.
- Merlevede, K. Study of the functional design of a floating offshore breakwater. Master Thesis, Universiteit Gent, 2012.
- Nakamura, T.; Mizutani, N.; Hur, N. and Kim, D.S. A study of the layout of floating breakwater units. in proceedings of The International O shore and Polar Engineers Conference, 2003.
- Ruol, P.; Martinelli, L. and Pezzutto, P. Formula to Predict Transmission for π -Type Floating Breakwaters. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. Volume 139, Issue 1, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000153](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000153)
- Stelzriede, Marshall E. and Carr, John H. (1951) [Mobile Breakwater Study Interim Report](https://resolver.caltech.edu/CaltechAUTHORS:20140612-142422930). 36. California institute of Technology, Pasadena, CA. (Unpublished)
<https://resolver.caltech.edu/CaltechAUTHORS:20140612-142422930>
- Stoker, J.J. Water waves. The mathematical theory with applications, Interscience Publishers New York, 1957.
- Tolba, E. Behaviour of Floating Breakwaters under Wave Action. PhD thesis, Bergische Universität, 1999.
- Wagner, H.; Götz, A.; Reinsch, R. and Kaiser, H.J. Schwimmende wellenbrecher im einsatz in einem tagebaurestsee mitteldeutschlands. Binnenschiffahrt ZfB, 2011.

Infraestructura de conexión eléctrica a ferries en el muelle de Paraires, en el puerto de Palma

Onshore Supply System for ferries in Paraires berth at Palma Port

Jorge Martín Jiménez^a, Borja Zamácola Feijóo^b

^aÁrea de Explotación y Medioambiente, Autoridad Portuaria de Baleares, jmartin@portsdebalears.com;

^bDepartamento de Infraestructuras, Autoridad Portuaria de Baleares,  [https:// orcid.org/0009-0001-8785-998X](https://orcid.org/0009-0001-8785-998X), borjazamacola@portsdebalears.com.

How to cite: Martín Jiménez, J. & Zamácola Feijóo, B. (2024). Infraestructura de conexión eléctrica a ferries en el muelle de Paraires, en el Puerto de Palma Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

The European Union's decarbonization objectives, defined in the Fit for 55 and Green Deal measures packages, generate the need to work towards the decarbonization of maritime transport. With this purpose, facilities were undertaken in the port of Palma that would allow ships to be supplied with electrical energy during the time they remained moored (OPS), avoiding the use of their auxiliary engines, the consumption of fossil fuels during that period, the emission of polluting and other greenhouse gases and the generation of noise in the port environment.

The installation includes a medium voltage transformation center, a set of switchgear for specific operation of the OPS system, frequency converters to adapt it to the consumption of each vessel, the pipes to the edge of the dock and two electricity turrets on the edge of the dock,: one for low voltage supply and another for medium voltage supply. In addition, a cable getter is available, which allows the final connection from the electricity turret to the connection hatch enabled on the vessel.

This scheme is expected to be replicated in the corresponding facilities in the ports of Maó, Alcúdia, Eivissa and Palma.

Keywords: decarbonization, maritime transport, on-shore supply system (OPS), fossil fuels, low voltage, vessels

Resumen

Los objetivos de descarbonización de la Unión Europea, definidos en los paquetes de medidas Fit for 55 y Green Deal, generan la necesidad de trabajar hacia la descarbonización del transporte marítimo. Con esa finalidad, se acometieron en el puerto de Palma unas instalaciones que permitieran suministrar energía eléctrica a buques durante el tiempo que permaneciesen amarrados (OPS), evitando el uso de sus motores auxiliares, el consumo de combustibles fósiles durante ese periodo, la emisión de gases contaminantes y otros de efecto invernadero y la generación de ruidos en el entorno del puerto.

La instalación incluye un centro de transformación de media tensión, un conjunto de aparamenta de operación específica de sistema OPS, convertidores de frecuencia para adaptarla a la de consumo de cada buque, las conducciones hasta el cantil del muelle y dos otras en borde de cantil: un para suministro en baja tensión y otra para suministro en media tensión. Además se dispone de un equipo gestor de cable, que permite la conexión final desde la torreta hasta la escotilla de conexión habilitada en el buque.

Este esquema está previsto que sea replicado en las correspondientes instalaciones de los puertos de Maó, Alcúdia, Eivissa y Palma.

Palabras clave: descarbonización, transporte marítimo, on-shore supply system (OPS), combustibles fósiles, baja tensión, buques.

1. Introducción

Con el objetivo de reducir las emisiones contaminantes de los buques atracados en el puerto de Palma, la Autoridad Portuaria de Balears (en lo sucesivo, APB) está impulsando e implantando una infraestructura de conexiones off-shore para buques.

En efecto, se observa desde el año 2009 una presencia, cada vez más destacada, de la preocupación por la calidad del aire (en azul en la Fig. 1, adjunta) y por el cambio climático (en rosa en la Fig.1 adjunta) en las encuestas sobre las prioridades medioambientales del sector portuario. Así se pone de manifiesto en el ESPO Environmental Report presentado a finales de 2022 por la European Sea Ports Organisation.

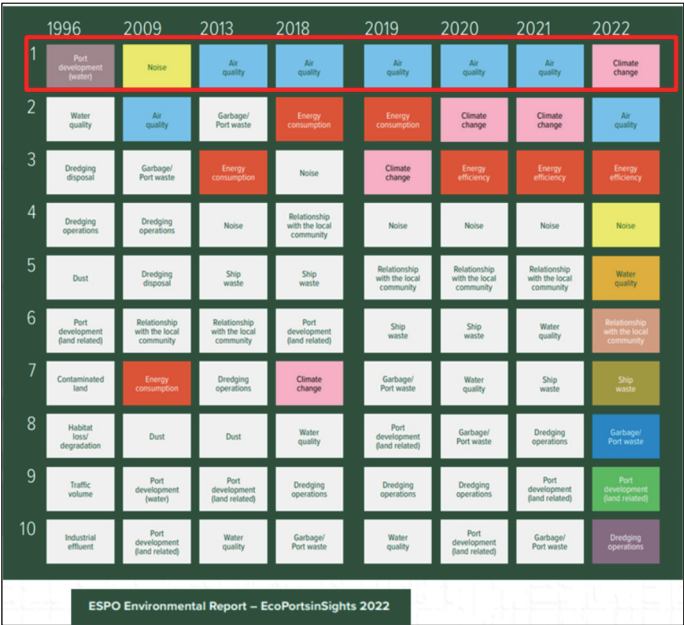


Fig. 1. Principales preocupaciones medioambientales del sector portuario. EcoPortinSights 2022. Fuente: ESPO Environmental report, (2022)

A lo largo de los últimos 20 años se ha trabajado intensamente en el campo de la mejora de la calidad ambiental de nuestros puertos y mares, con el objetivo claro de reducir las emisiones contaminantes vinculadas al transporte marítimo. En este recorrido, cabe señalar una serie de hitos que han ayudado a que el presente proyecto haya podido, finalmente, materializarse y funcionar., contribuyendo a esa mejora en la calidad de aire en los puertos y en la lucha contra el cambio climático.

Así, en mayo de 2006, se publicó la “Recomendación de la Comisión Europea sobre la promoción del uso de electricidad en puertos en los barcos durante su amarre en puertos comunitarios”.

A raíz de estas recomendaciones, la Autoridad Portuaria de Baleares elaboró un proyecto básico para instalar en uno de los muelles más próximos a la ciudad una conexión eléctrica para buques, en media y baja tensión. Este proyecto básico se materializó en la elaboración en año 2019 del proyecto de ejecución correspondiente, merced al consorcio “OPS Master Plan Spanish Ports” liderado por Puertos del Estado (España), que obtuvo una financiación europea del 20%.

El suministro eléctrico a buques mientras están en el muelle, también llamado Cold Ironing u OPS (Onshore Power Supply), les permite apagar sus generadores auxiliares mientras permanezcan atracados, y consumir energía eléctrica de origen renovable para atender su demanda desde la red eléctrica de distribución proveniente del puerto.

La principal contribución es la disminución de emisiones de efecto invernadero y otros gases contaminantes perjudiciales para la salud, tales como dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂) o partículas en suspensión (PM), como resultado de evitar el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en los buques. Previamente al desarrollo de la citada infraestructura, la generación precisa para poder cubrir su demanda energética mientras permanecen en el muelle proviene principalmente de generadores auxiliares alimentados por diésel o fuel-oil.

Este proyecto contribuye de forma relevante a los objetivos de descarbonización de la Unión Europea, definidos en los paquetes de medidas del Fit for 55 y el Green Deal. Por otra parte, al evitar encender los generadores del buque, también contribuye significativamente a limitar la contaminación acústica en el muelle y su entorno. Este proyecto contribuye favorablemente, por tanto, al bienestar de la ciudadanía, sobre todo para los residentes en núcleos poblacionales en las cercanías de los distintos muelles y terminales.

2. Objetivos

El objetivo de la presente intervención es mejorar la calidad del aire mediante la reducción de emisiones contaminantes procedentes de los motores auxiliares de los buques. También constituye un objetivo reducir la contaminación acústica derivada del uso de los mismos motores, con afección sobre las poblaciones próximas a las zonas de atraque, en este caso, en la ciudad de Palma.

De este modo se contribuye a la reducción del impacto medioambiental del transporte marítimo, reduciendo el consumo de combustibles de origen fósil y generadores de gases de efecto invernadero.

Estos objetivos se pretenden lograr mediante la implementación de un sistema OPS (On-shore Power Supply) para la conexión de buques a la red eléctrica del puerto, en el muelle de Paraires, en Palma.

3. Desarrollo de la innovación

Tras un proceso de estudio en el que participaron diferentes *stakeholders* implicados en el sector portuario y marítimo, a lo largo de los años 2021 y 2022, se desplegó y validó la infraestructura necesaria para el suministro de energía eléctrica para ferries en el muelle de Paraires, en el puerto de Palma. Se muestra en la Fig. 2 la localización del muelle objeto de la intervención. Se prepara el sistema para poder suministrar energía eléctrica a los buques tanto en media como en baja tensión.

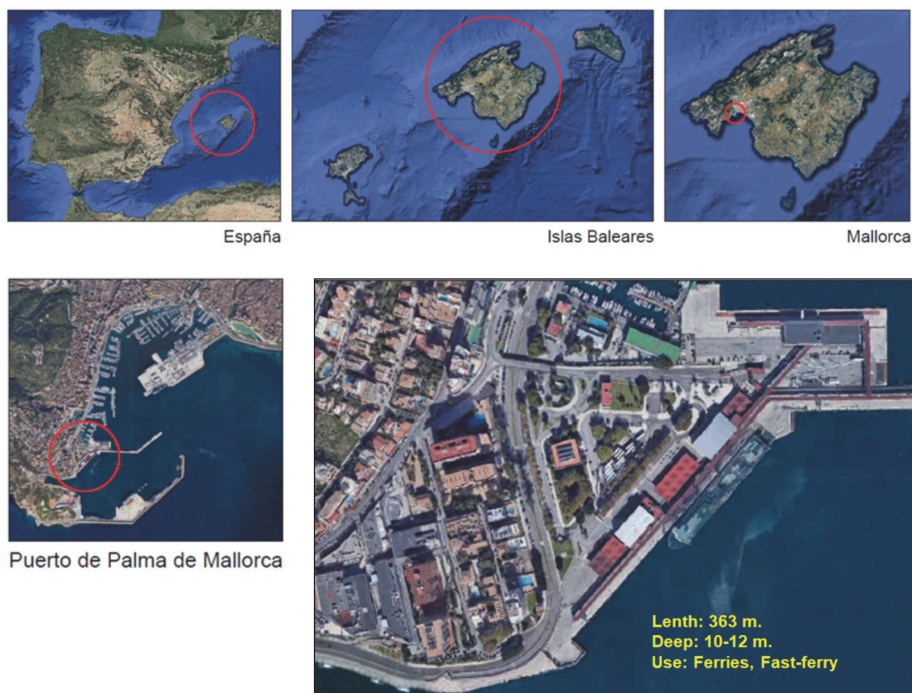


Fig. 2: Ubicación del muelle objeto de la intervención de OPS. Paraires, Palma.

Fuente: elaboración propia.

3.1. Buque tomado como referencia para el proyecto

Se eligió el barco “Eleanor Roosevelt, unos de los más modernos de la flota de la naviera Balearia –botado en septiembre de 2020- para la realización del proyecto de *on-shore power system* y pruebas subsiguientes. Este barco, fast ferry que cubre habitualmente el trayecto entre Palma, Ibiza y Denia, está equipado con motores duales de gas natural licuado (GNL), tiene 123 m de eslora, 26 de manga, capacidad para 1.200 pasajeros y 450 vehículos.

A efectos específicos del sistema *on-shore power system*, precisa conectarse en baja tensión (400 V) con una frecuencia de 50 Hz. La potencia nominal requerida por el buque es de 800 kW. No obstante, como se ha indicado, el sistema estará preparado para suministrar energía eléctrica en baja y en media tensión, y a frecuencias de 50 Hz y 60 Hz, según las necesidades específicas del buque.

3.2. Esquema del sistema OPS

3.2.1. Centro de transformación

El esquema que se establece para el sistema de conexión eléctrico consta, en una primera parte, de un Centro de Transformación (CT), al que llega la acometida de energía eléctrica de la red de la empresa distribuidora, a media tensión (15.000 V).

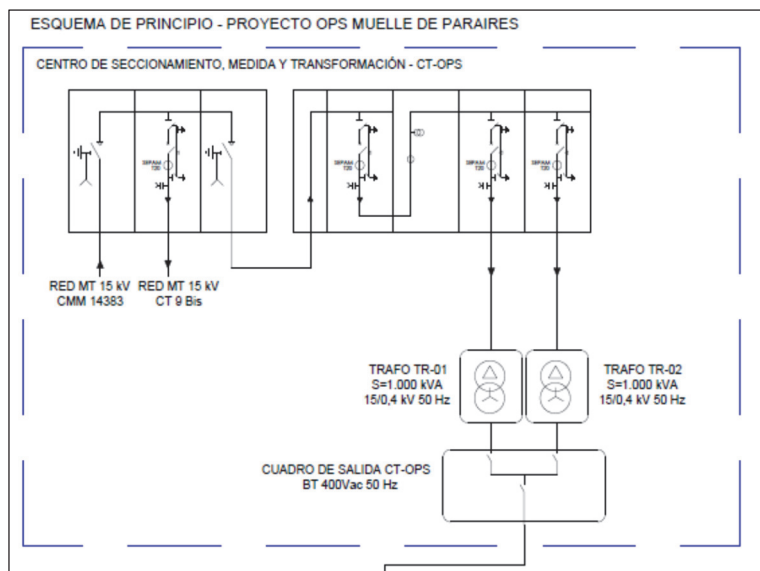


Fig. 3: Primer tramo de esquema Sistema OPS, Perares, Palma. Centro de Transformación.

Fuente: elaboración propia.

El sistema está dotado de sendos transformadores de 1.000 KVA que transformarán la tensión de la red desde los 15.000 V iniciales, a 400 V (Baja Tensión). El CT consta de la aparamenta precisa para seccionamiento y protección. Se muestra el esquema de esta primera parte en la Fig. 3. adjunta; el sistema se aloja en un edificio prefabricado de hormigón.

3.2.2. Sistema OPS

Una vez la energía eléctrica dispone de la tensión (400 V) y frecuencia (50 Hz) adecuadas, accede al sistema que específicamente controla el OPS. De aquí parte una línea hacia la caja de conexión sita en el muelle, para suministrar a baja tensión (400 V) y 50 Hz, mediante 5 tomas de hasta 350 A. Los sistemas han sido proyectados y ejecutados con estricto cumplimiento de los estándares de aplicación, en particular IEC/IEEE 80005-3.

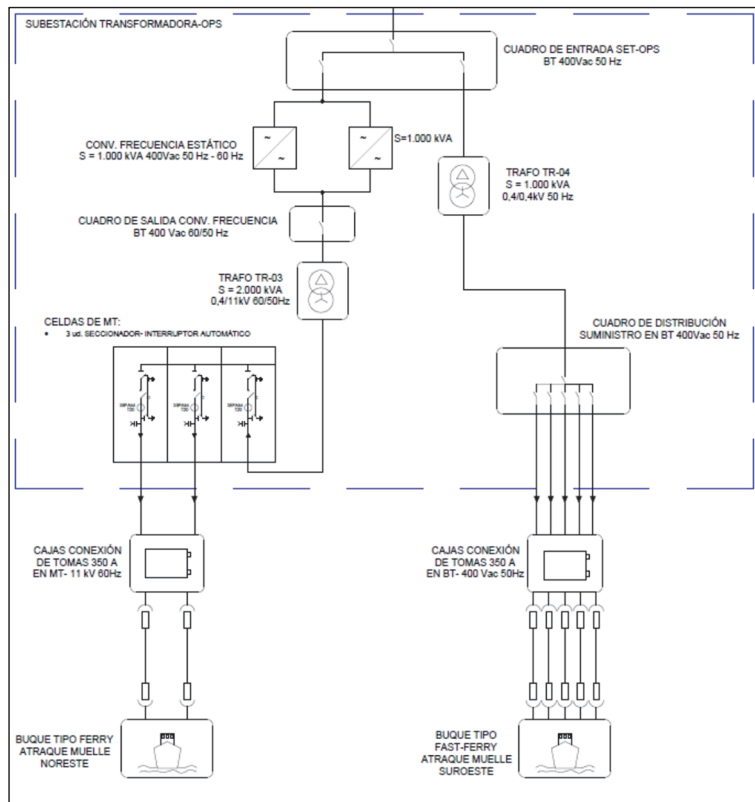


Fig. 4: Segundo tramo de esquema Sistema OPS, Paraires, Palma. Sistema OPS, convertidores de frecuencia. Fuente: elaboración propia.

Para el suministro en media tensión (11.000 V), se adecuará, en primera instancia, la frecuencia a las necesidades específicas del buque (podrán funcionar a 50 Hz o a 60 Hz). Para esto, ha de alimentarse al sistema de control del OPS con las características específicas del buque conectado a tierra (50 o 60 Hz). Tras disponer de la frecuencia precisa, la tensión se eleva de 400 V a 11.000 V, y tras su paso por las celdas de media tensión, llega a las cajas de conexión situadas en el borde del cantil. Se muestra el esquema descrito en la Fig. 4 adjunta.

Con el objetivo de proteger la instalación, se establecen transformadores entre las cajas de conexión y el cuadro de entrada en el sistema OPS, para el caso del suministro a 400 V, y entre los convertidores de frecuencia y las celdas de Media Tensión, en el caso del suministro a Media Tensión.

El conjunto del sistema de conexión eléctrica a tierra (Set OPS) se ubica en un contenedor marítimo acondicionado, adecuadamente refrigerado y protegido, para ofrecer una calidad de servicio adecuada. Este contenedor se ubica a continuación del mencionado edificio de hormigón prefabricado que aloja el sistema de transformadores.

3.3. Sistema de conexión en tierra

En el borde del cantil se ubican 2 torretas (una para media tensión y otra para baja tensión), a la que llegan soterrados los cables procedentes del SET OPS (instalación en la que se adecúa la tensión y la frecuencia a las necesidades específicas del buque y se monitoriza el proceso completo, como hemos visto).



Fig. 5: Conectores en borde de muelle, BT y MT, respectivamente. Sistema OPS en muelle de Perares, Palma. Fuente: elaboración propia.

La torreta de baja tensión cuenta con 5 puntos de conexión, y la de media tensión de 2 puntos de conexión. Se muestran los conectores en la figura adjunta, Fig. 5. Existe, adicionalmente, una conexión por fibra óptica que conecta el barco con el sistema OPS, a través de las mismas torretas.

A esta torreta en borde de muelle se conectan los cables alojados en la Unidad Gestora de Cable (UGC), que será objeto de descripción detallada posteriormente. Se puede apreciar en la Fig. 6, adjunta, la conexión de 2 cables en baja tensión.



Fig. 6: Conectores en borde de muelle en BT, conectados a buque. Sistema OPS en muelle de Perares, Palma. Fuente: elaboración propia.

3.4. Sistema de gestión de cable

Para poder conectar eléctricamente el buque a tierra es preciso que los cables que parten de la torreta de conexión situada en el muelle alcancen el punto de conexión a bordo, ubicado en torno a 6-10 m sobre el nivel del cantil. Para proceder a esta conexión, hubo de implementarse una unidad gestora de cable (UGC) constituida por una base móvil sobre la que se monta un brazo articulado y retráctil. Este brazo, con movimientos en las 3 direcciones del espacio, permite que los cables lleguen hasta la cubierta del buque en que se sitúa el dispositivo de conexión eléctrica, donde un operario conectará los extremos del cable a la cabina de abord, concluyendo de este modo el proceso de conexión.

El hecho de que la unidad gestora de cable pueda desplazarse a lo largo del muelle y que su brazo articulado sea retráctil y disponga de tres grados de libertad, permite la adaptabilidad del sistema al buque específico.

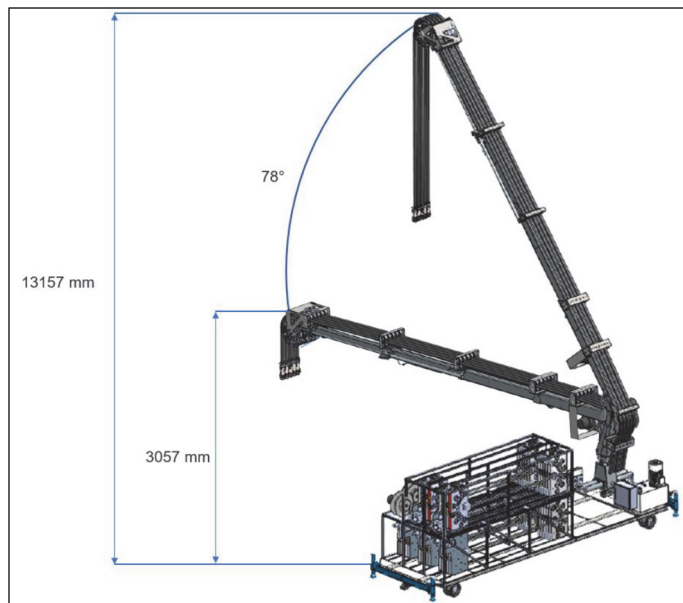


Fig. 7: Principales dimensiones de Unidad Gestora de Cable (UGC)-I. Fuente: TEC-CONTAINER (2021).

En efecto, la tecnología OPS se está implementando progresivamente en las flotas existentes, de modo que cada buque ubica los dispositivos de conexión (“cajas de conexión”) en la cubierta y zona que particularmente le resulta más adecuada. Una unidad gestora de cable (UGC) versátil es esencial para que un buen número de buques puedan ser abastecidos eléctricamente en la instalación descrita. Se muestran en las figuras adjuntas las dimensiones más relevantes de la unidad gestora de cable desarrollada para este proyecto de modo específico.

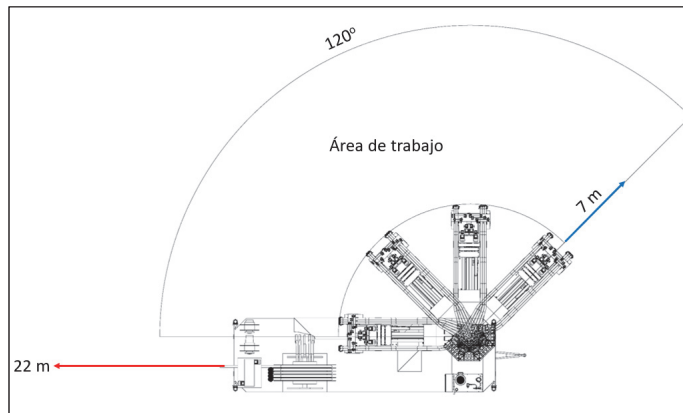


Fig. 8: Principales dimensiones de Unidad Gestora de Cable (UGC)-2. Fuente: TEC-CONTAINER (2021).

3.5. Sistema de conexión a bordo

Las empresas navieras, en su proceso de adaptación a los nuevos requerimientos legales en cuanto a emisiones del transporte marítimo, adaptan los buques de sus actuales flotas de modo progresivo, compatibilizando los usos y funciones del buque de que se trate con el adecuado acceso desde tierra de los cables a bordo. Habitualmente se dispone de un sistema de conexión en una cubierta situada entre 6 y 10 m sobre el cantil del muelle, y lo suficientemente próxima a la borda para permitir un buen acceso de los cables, manejo adecuado de los mismos, y condiciones de seguridad para los operarios en el proceso de conexión, ya que éstas son manuales en el estado actual del arte.

Se muestra en la Figura 9, adjunta, la caja de conexión en la cubierta del barco Eleanor Roosevelt, de Balària, con la conexión en media tensión ya realizada.

Tanto el diseño de la Unidad Gestora de Cable como el manejo a bordo de los cables deben respetar las condiciones precisas para los cables, entre las que destaca las curvaturas mínimas precisas.



Fig. 9: Conexión en media tensión en cubierta de buque Eleanor Roosevelt, de Baleària. Fuente: Autoridad Portuaria de Baleares (2021).

3.6. Cuadro de control en sala OPS

El sistema está monitoreado y controlado en todo momento en la sala de control OPS, ubicada en el mencionado contenedor marítimo. Se conecta con el barco mediante un cable de fibra óptica que acompaña a los cables eléctricos en su trayecto por el muelle hasta las torretas de borde de cantil. Adicionalmente, mediante una tablet, el operario puede moverse libremente por el muelle y controlar en todo momento la operación de conexión, suministro y desconexión, mediante control remoto. El software de manejo está integrado en los sistemas de gestión propios de la APB. Se muestra en la Fig. 10 el sistema del cuadro de control del conjunto del sistema OPS.

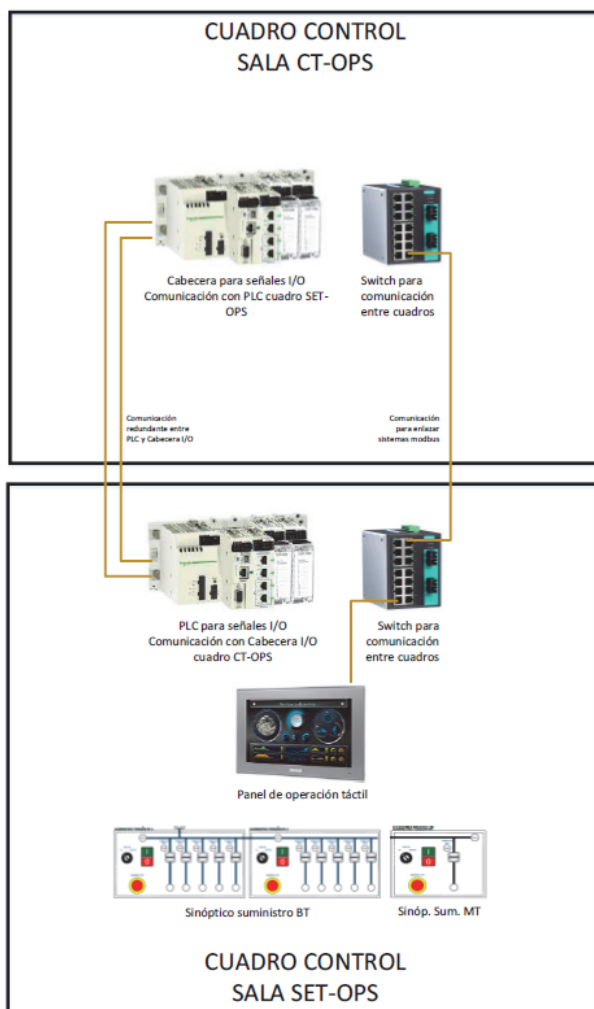


Fig. 10: Sistema de control telemático de Sistema OPS. Fuente: Autoridad Portuaria de Baleares (2021).

4. Resultados

Se estima que la reducción del uso de combustibles de origen fósil como consecuencia de la presente infraestructura es de 0,5 toneladas de fuel-oil de uso marítimo por día, lo que se traduce en 600 tn de CO₂ que han dejado de emitirse a la atmósfera, además de otros contaminantes presentes en estos combustibles.

Además, se ha mejorado la calidad ambiental de la ciudad de Palma en las inmediaciones del puerto de Palma (en la zona del Muelle de Paraires), reduciendo su impacto ambiental, dado que los atraques se sitúan muy próximos a zonas pobladas. La contaminación acústica atribuible a estos buques se ha anulado, puesto que la conexión eléctrica no genera ningún ruido, frente al funcionamiento de los motores auxiliares de abord.

5. Conclusiones

La infraestructura de conexión eléctrica a ferries en el muelle de Paraires, en el puerto de Palma descrita en el presente artículo permite que los buques mantengan su actividad habitual sin ningún tipo de alteración en el suministro durante el tiempo que permanecen atracados en el muelle y todo ello sin precisar el funcionamiento de sus motores auxiliares.

La mejora en la calidad ambiental general derivada de la reducción de las emisiones atmosféricas y de contaminación acústica que se traduce en unos mejores parámetros ambientales de calidad de aire, así como las obligaciones normativas establecida por le Unión Europea llevan a la APB a replicar el sistema de conexión eléctrica a buques a otros puertos e instalaciones pertenecientes a su zona de servicio.

Así, cabe destacar que la APB está ejecutando en la actualidad otros 4 proyectos financiados mediante el instrumento Next Generation de la Comisión Europea, en los puertos de Alcúdia (muelles de poniente), Maó (Cos Nou), Eivissa (Botafoch) y Palma (Muelles Comerciales).

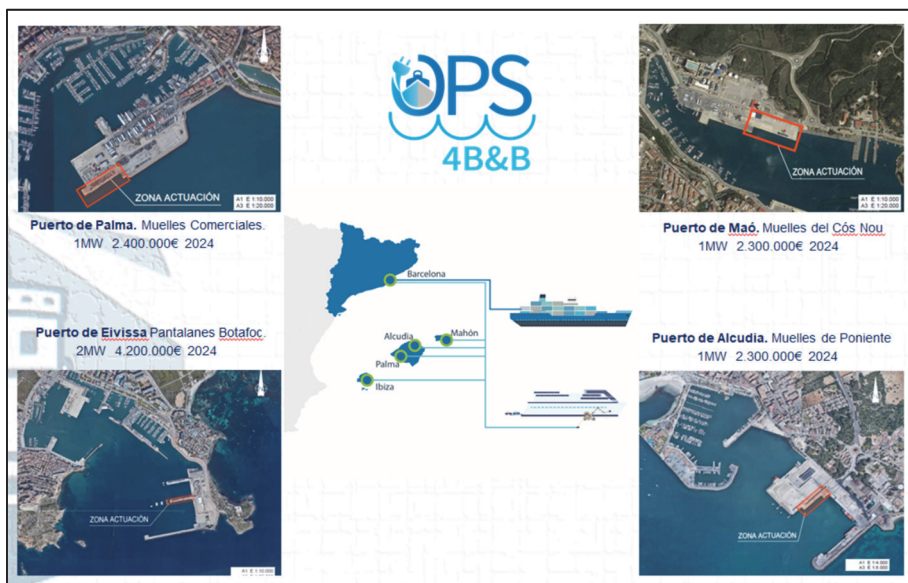


Fig. 11: Actuaciones OPS en ejecución en puertos de la APB. Fuente: elaboración propia (2022).

Adicionalmente, cabe señalar que la APB se encuentra en proceso de estudio de un siguiente nivel de desarrollo de estas infraestructuras de conexión eléctrica para buques (extendiendo su alcance a los cruceros) en más ubicaciones de los puertos bajo su jurisdicción.

El conjunto de infraestructuras mencionadas contribuyen al alcanzar los objetivos de sostenibilidad establecidos por el acuerdo Green Deal y Fit for 55.

Referencias

Commission Recommendations of 8 May 2006 on the promotion of shore-side electricity for use by ships at berth in Community ports (2006/339/EC).

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006H0339>

OPS Master Plan for Spanish Ports. Marco de Acción Nacional para el desarrollo de infraestructuras para el uso de combustibles alternativos en el sector del transporte. (2019). Madrid. Ministerio de Industria, y Turismo. Gobierno de España.

<https://poweratberth.eu/?lang=es>

Puig, M., Wooldridge, C., Mari Darbra, R. (2022). *Environmental Report 2022 EcoPorts in Sights* (2022). European Sea Ports Organisation. Bruselas, Bélgica.

[https://www.espo.be/media/ESP2959%20\(Sustainability%20Report%202022\)_V8.pdf](https://www.espo.be/media/ESP2959%20(Sustainability%20Report%202022)_V8.pdf)

Control y erradicación de plantas exóticas invasoras: el caso de Baccharis Halimifolia en la costa asturiana

Fernando de La Torre-Fernández^a, Miguel Á. Reyes-Merlo^a, Laura Fernández-Fernández^b y David Alonso-Medina^b

^a Demarcación de Costas del Estado en Asturias. Dirección General de la Costa y el Mar. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, mareyes@miteco.es; ^bTragsatec. Grupo Tragsa

How to cite: de La Torre-Fernández, F.; Reyes-Merlo, M.Á.; Fernández-Fernández, L.; Alonso-Medina, D. (2024). *Control y erradicación de plantas exóticas invasoras: el caso de Baccharis Halimifolia en la costa asturiana*. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Ibiza, mayo 2024

Abstract

Baccharis halimifolia ("chilca") is a shrub native to North America that stands out for its high invasive potential in coastal communities. It was introduced as an ornamental species in Europe, spreading along the French coast towards the Cantabrian coast at the beginning of the 20th century, where its presence was first detected in Asturias in the 1990s.

In 2002 and 2006, the "Demarcación de Costas en Asturias" promoted the control of this invasive plant in the Tinamayor estuary, located between Cantabria and Asturias. Despite this, the reappearance of this shrub in the estuary led to control and eradication efforts in 2022, covering an area of 3 hectares, with a completion period of 15 months and a budget of €743,766.15.

For adequate control and eradication, dispersion vectors (such as transportation infrastructure) must be monitored, exhaustive monitoring and supervision of the invasion must be carried out, and the coordinated action of all the involved stakeholders must be considered.

This contribution aims to highlight the different techniques used, as well as the difficulties encountered, in the control and eradication of this invasive exotic plant, which could be applied to environments with similar issues.

Keywords: *Baccharis halimifolia, invasive exotic plant, control and eradication*

Resumen

Baccharis halimifolia ("chilca") es un arbusto originario de América del Norte que destaca por su alto potencial invasor en comunidades costeras. Fue introducida como especie ornamental en Europa, propagándose por la costa francesa hacia la cornisa cantábrica a comienzos del s. XX siendo detectada su presencia en Asturias en la década de los 90.

En los años 2002 y 2006, desde la Demarcación de Costas en Asturias se promovió el control de esta planta invasora en el estuario de Tinamayor, situado entre Cantabria y Asturias. Pese a ello, la nueva presencia de este arbusto en dicho estuario motivó en el año 2022 los trabajos de control y erradicación, sobre una superficie de 3 ha., con un plazo de ejecución de 15 meses y un presupuesto que ascendió a 743.766,15 €.

Para un adecuado control y erradicación, deben vigilarse vectores de dispersión (tales como infraestructuras de transporte), acometer un seguimiento y supervisión de la invasión exhaustivo y contar con la acción conjunta de todos los gestores implicados.

Esta aportación quiere dar a conocer las distintas técnicas empleadas, así como las dificultades encontradas, en el control y erradicación de esta planta exótica invasora, que puedan ser extensibles a entornos con problemática similar.

Palabras clave: *Baccharis halimifolia*, planta exótica invasora, control y erradicación

1. Introducción y objetivos

Las especies exóticas invasoras, constituyen una de las principales causas de pérdida de biodiversidad en el mundo. Dentro del ámbito de los ecosistemas litorales destaca por su alto potencial invasor la *Baccharis halimifolia* ("chilca"), arbusto originario de América del Norte que constituye uno de los principales problemas en la cornisa cantábrica.

Fue introducida como especie ornamental en Europa, propagándose por la costa francesa hacia la cornisa cantábrica a comienzos del s. XX (Campos y otros, 2017), siendo detectada su presencia en Asturias en la década de los 90.

Este arbusto es un profundo modificador de la composición y funcionamiento de los estuarios, y como tal se recoge dentro del Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto, por el que se regula el Catálogo español de especies exóticas invasoras, así como en el Atlas de las plantas alóctonas invasoras de España (Elorza y otros, 2004), editado por el, entonces, Ministerio de Ambiente. Además, la planta se ha incorporado recientemente al listado de especies exóticas preocupantes para la UE.

En la actualidad está naturalizada, gracias a su carácter invasor bastante agresivo, en las comunidades cantábricas del País Vasco y Cantabria (Fig. 1), sin haberse registrado su presencia en Galicia.

En Asturias se ha localizado en zonas muy puntuales sobre las cuales se está intentando llevar un control exhaustivo de las poblaciones, más en concreto en el estuario de Tinamayor, límite natural entre Cantabria y Asturias.

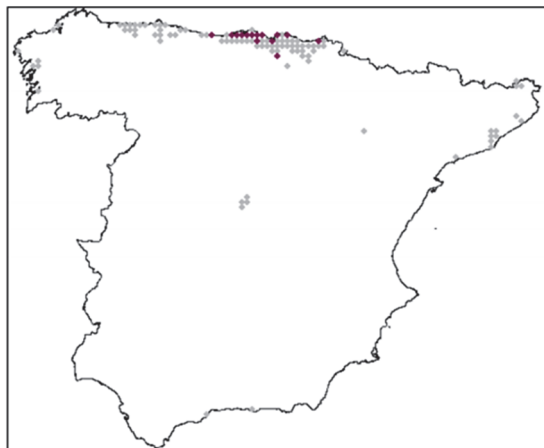


Fig. 1. Mapa de distribución real (morado) y potencial (gris) de *Baccharis halimifolia* en la península Ibérica, extraído de. Se aprecia como su límite de distribución en sentido oeste en la cornisa cantábrica es el estuario de Tinamayor. Fuente: Gassó y otros (2012).

Para evitar su propagación a lo largo del sentido occidental de la cornisa cantábrica, en los años 2002 y 2006, desde la Demarcación de Costas en Asturias se promovió el control de esta planta invasora en el estuario de Tinamayor. Transcurrida más de una década, y pese a los trabajos de erradicación acometidos, la presencia de este arbusto en dicho estuario persistió.

Por ello, en agosto de 2021 la Demarcación de Costas de Asturias promovió la redacción del “Proyecto: Eliminación de la planta invasora *Baccharis halimifolia* en el estuario de Tinamayor (T. M. de Ribadedeva, Asturias)”, donde se pretende llevar a cabo la eliminación de la citada planta invasora para evitar su dispersión por el resto de los estuarios cantábricos situados al oeste.

En noviembre del año 2022 dan comienzo los trabajos de control y erradicación, sobre una superficie de 3 ha. (Fig. 2), con un plazo de ejecución de 15 meses (incluyendo paradas vegetativas y de no interferencia en la época de anidación de aves marinas) y un presupuesto que asciende a 743.766,15 €, finalizando en mayo de 2024.



Fig. 2. Ámbito de actuación del proyecto “Eliminación de la planta invasora *Baccharis halimifolia* en el estuario de Tinamayor”, t.m. de Ribadedeva.

Esta aportación quiere dar a conocer las distintas técnicas empleadas, así como las dificultades encontradas, en el control y erradicación de esta planta exótica invasora, que puedan ser extensibles a entornos con problemática similar.

2. Metodología y condicionantes

El ámbito de esta actuación se encuentra dentro del dominio público marítimo-terrestre, incluido dentro de la Red Natura 2000, declarado Zona de Especial Conservación y Zona de Especial Protección para las aves (ZEC y ZEPA) Ría de Ribadesella-Ría de Tinamayor (ES1200319) y en la Zona de Especial Conservación del Río Cares-Deva (ES1200035).

Por tanto, los trabajos deben considerar aspectos como la nidificación de aves y descartar el uso de fitocidas, entre otros. Con estas premisas, se han desarrollado diversas técnicas para el arranque y transporte de los ejemplares para su posterior eliminación, incluyendo todas las medidas necesarias para evitar cualquier tipo de dispersión de material vegetativo o semillas que pudieran causar daño en el entorno: cuadrillas con motosierras y tijeras eléctricas, carretillas de orugas para facilitar el transporte en las zonas más pantanosas y riguroso empleo de EPIs. Asimismo, se han ensayado otras técnicas para su control, analizando sus efectos en parcelas experimentales, como cubrir los tocones con geotextil para provocar la muerte del ejemplar, privándole así de luz para rebrotar.

2.1. Acerca de la Baccharis halimifolia

Baccharis halimifolia es un arbusto caducifolio de 1,5 a 4 m. de altura, generalmente muy ramificado, aunque a veces se presenta en forma de árbol a partir de un solo pie. Destaca por tener un aparato radical muy desarrollado y profundo, crecimiento rápido (30-40 cm/año) y una elevada capacidad de adaptabilidad y rebrote (Ihobe, 2014).

Esta planta es dioica. Las flores son pequeñas (6 mm), blanquecinas las femeninas y verdosas las masculinas y están agrupadas en inflorescencias frondosas de hasta 5 flores. La floración se produce de finales de agosto a principios de septiembre, durante un par de semanas. Es una planta de luz y la temperatura óptima de germinación se sitúa entre los 15°C y 20°C. Debido a su alta producción de polen, está considerada como una planta alergógena. Los frutos (aquenios) están constituidos por una semilla (1,3-1,8 mm) con un penacho de pelos flexibles de color blanco (vilano) que alcanzan una longitud de 10-12 mm con la madurez del aquenio.

A finales de octubre y principios de noviembre, después de la maduración, los frutos se dispersan por el viento o a través de los cursos de agua, pudiendo llegar a distancias que van entre los 100 y 5.000 m y se asientan en terrenos donde germinan, pudiendo alcanzar densidades de plántulas muy elevadas.

Es una planta con una tendencia demográfica expansiva, se reproduce tanto por vía sexual como vegetativa por medio de brotes de raíz o por enraizamiento de las ramas bajas.

La *Baccharis halimifolia* forma la última banda de vegetación de dunas por encima del nivel de inundación y zonas de salinidad intermedia en marismas, condicionando los valores de salinidad y anegamiento su supervivencia y propagación. Dado que soporta mal la inundación de sus raíces por aguas salinas, su presencia no afecta a las comunidades halófilas de las marismas.

La *Baccharis halimifolia* puede tener un efecto negativo en la estrategia de parada de las aves migratorias en los hábitats invadidos, por sustitución de aliseda pantanosa y carrizal (*Phragmites* spp.).

2.1. Esquema y condicionantes de los trabajos

El esquema de trabajo para la consecución de los objetivos de actuación es el que se presenta a continuación (Fig.3) , tomado de Ihobe (2014). :

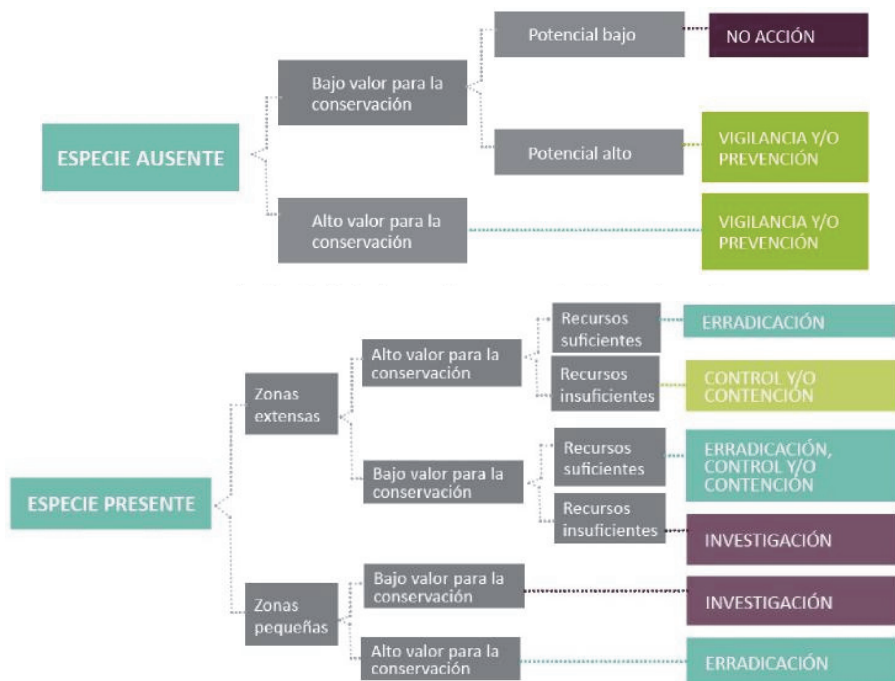


Fig. 3. Esquema de trabajo seguido para el control y erradicación de *Baccharis halimifolia*.

Dado que nos encontramos en una zona con un alto valor para la conservación, incluido en la Red Natura 2000 que define esta zona como ZEC y ZEPA, el objetivo, independientemente del tamaño de las poblaciones, es la erradicación de la planta invasora.

En las zonas en las que no se ha observado ningún ejemplar de *Baccharis halimifolia*, el objetivo prioritario es la vigilancia y/o prevención.

2.2.1. Consideraciones previas

A la hora de llevar a cabo las acciones necesarias para lograr la erradicación de la especie invasora, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Evitar/minimizar el tránsito a través de las zonas invadidas, o bien restringirlo a los periodos en los que la propagación de semillas es menos probable; para prevenir su dispersión de zonas donde está presente a otras no infestadas.
- No realizar labores de gestión en las zonas invadidas durante la época de floración y fructificación de la especie
- Gestionar los residuos vegetales de forma que se evite su posible restablecimiento en el medio.

- Restringir el empleo de métodos químicos en zonas cercanas al agua, debido al riesgo de deriva del producto.
- En el caso de invasión incipiente (individuos jóvenes o procedentes de semilla): se actuará mediante arranque manual.
- En el caso de invasión consolidada (ejemplares adultos): se optará por la roza y descuaje de la raíz mediante métodos mecánicos o manuales, combinándolos con el arranque manual de plántulas procedentes de semilla.
- Los trabajos se iniciarán a partir del mes de octubre para preservar la reproducción y la cría de las aves acuáticas.
- Preferentemente se actuará primero sobre las poblaciones satélites, tratando perimetralmente el área invadida. Posteriormente se atacará por supresión (reduciendo el tamaño y la abundancia de las poblaciones consolidadas).
- En las “manchas” (terrenos) de gran extensión, también se erradicará avanzando desde la periferia hacia el núcleo de la población. De esta forma favorecemos que las especies autóctonas se establezcan en las zonas libre de *Baccharis halimifolia* originadas.
- Se debe evitar el contacto de las raíces con el suelo, por lo que las plantas se desecharán directamente en sacos cerrados y si fuera necesario su acopio, se realizará con la raíz hacia arriba.

2.2.2. Estudio de condicionantes

Los condicionantes contemplados, ya fuesen temporales o persistentes durante la ejecución de los trabajos, se describen a continuación:

- **Terreno:** Se trata de un terreno permanentemente encharcado, barrizal, cubierto de carrizo, intransitable y con poca estabilidad para máquinas y personas.
- **Fase de dispersión de la especie invasora:** Limitar el acceso a las zonas invadidas durante la fase de dispersión de las semillas, desde finales de agosto hasta mediados de noviembre.
- **Superficie ocupada:** Subestimada la superficie ocupada por las plantas invasoras al realizar la cartografía inicial que, *in situ*, es aproximadamente un 15% mayor de lo estimado, quizás por encontrarse los individuos bajo la cubierta del carrizo y los eucaliptos existentes.
- **Banco de semillas:** En primavera se observan plántulas germinando incluso tras las labores de erradicación, producto del banco de semillas latentes en el terreno.
- **Personal:** Es necesario que el personal encargado de realizar los trabajos reciba formación acerca de cómo reconocer la planta y cómo “eliminarla” en sus distintos estadios, la existencia de especies que se deben de respetar en el entorno, cómo extraer la planta intentando minimizar el impacto y cómo evitar la dispersión fuera del área de trabajo.
- **Localización del rebrote:** En el momento del rebrote, las nuevas plántulas son difíciles de localizar entre el carrizo debido a su pequeño tamaño, y su eliminación es compleja, debido a la profusión con que germinan y lo complicado que es alcanzarlas.
- **Accesos:** los accesos a las poblaciones de planta invasora se encuentran frecuentemente encharcados, estado que empeora con cada reutilización de los caminos.

- **Mareas:** con gran influencia en la zona de trabajo, condicionan el estado del entorno considerablemente.
- **Drenaje:** El único punto de drenaje de la zona, un paso de agua bajo la vía de Feve, aparece obstruido con restos vegetales y arrastres cada vez que sube la marea o llueve, lo que provoca que desborde el canal que discurre por el área de actuación, encharcando aún más la zona.
- **Especies colonizadoras:** Al eliminar las poblaciones de *Baccharis halimifolia* se genera un vacío en la vegetación que otras especies colonizadoras, en su mayoría autóctonas e invasivas, acaban por ocupar.
- **Apreciación pública:** Zona con afluencia de personas que pasean por el lugar y son sensibles a la alteración del entorno.

3. Resumen de las actuaciones

3.1 Actuaciones proyectadas y trabajos ejecutados

En principio, se proyectaba realizar los trabajos de erradicación de la planta exótica invasora en esta zona de forma mecánica, empleando maquinaria que accedería a las poblaciones desde un camino central que atraviesa el terreno de norte a sur. Este camino conforma una especie de “dique” provocando que la zona, que de forma habitual aparece encharcada por el efecto de las mareas, presentara condiciones intransitables para las máquinas y las personas. Aparte del camino central, no existe otra forma de aproximación a las poblaciones de planta invasora para maquinaria sobre el terreno.

Por este motivo, finalmente se optó por realizar los trabajos de forma manual, con dos cuadrillas de 4 personas que desenraizarían las plantas, troceando los restos vegetales e introduciéndolos en sacos, que una vez llenos se cerrarían para evitar la dispersión de las semillas, y que posteriormente sacarían de la zona de trabajo con una mini carretilla de orugas capaz de transitar por gran parte del terreno, no sin esfuerzo. Estos sacos con residuos vegetales se retirarían a través de un gestor autorizado.

Previo al inicio de las actuaciones en noviembre de 2022, se decidió enumerar las manchas con presencia de *Baccharis halimifolia* para diferenciarlas entre sí. De esta forma resulta más sencillo llevar un registro y control de las zonas en las que se actúa y aquellas en las que, por distintos motivos, se estime oportuno no actuar o aplazar la intervención. Por tanto, el área de actuación se divide en 3 zonas: A, B y C (Fig. 4).

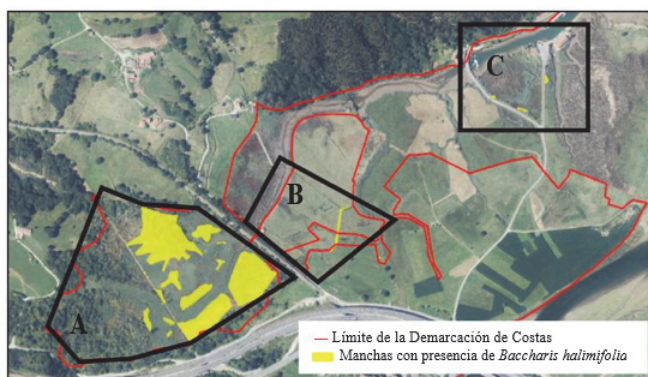


Fig. 4. Subdivisión del área de actuación en 3 zonas (A,B y C).

En cada zona, se han enumerado las manchas con presencia de la especie invasora (Fig 5):

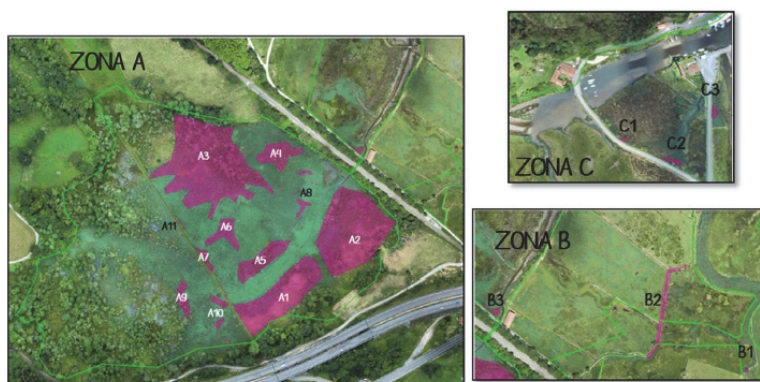


Fig. 5. “Manchas” con presencia de *Baccharis halimifolia* en cada una de las 3 zonas.

Los trabajos realizados desde el inicio en noviembre 2022, hasta el fin del mismo, en mayo 2024, han consistido en las siguientes actividades:

- Instalación de casetas para los trabajadores (vestuarios, oficinas, aseos).
- Instalación de cartelería, señales viales y señalética de obra.
- Delimitación perimetral de la zona objeto de las actuaciones.
- Prospección y muestreo de especies de flora protegidas.
- Retirada de planta invasora: extracción mediante métodos manuales de individuos en poblaciones establecidas.
- Retirada de planta invasora: extracción mediante métodos manuales de individuos en poblaciones satélite.
- Elaboración de carteles y archivo audiovisual para presentación en el Ayuntamiento de Ribadedeva y visita de la Delegación del Gobierno.
- Prospección en zonas contiguas que puedan actuar como vector (ej.: Cantabria).
- Retirada de planta invasora en zonas dispersas de influencia que puedan actuar como vector mediante métodos manuales (ej.: margen cántabra de la ría).
- Vuelo dron con ortofoto e imágenes, final de la primera fase 23/04/2023.
- Vigilancia y seguimiento de las poblaciones de Especies Exóticas Invasoras (EEI) en periodos de parada del proyecto.
- Estaquillado y revegetación empleando especies autóctonas que crecen en la zona de actuación.
- Retirada de otras especies exóticas invasoras encontradas en el entorno (ej.: *Cotula coronopifolia*, *Cortaderia selloana*).
- Vigilancia y control del rebrote tras las actuaciones.

- Batidas de limpieza y recogida de residuos dispersos.
- Gestión de residuos vegetales considerados peligrosos a través de un gestor autorizado
- Retirada de cierres perimetrales.
- Retirada de cartelería, señales viales y señalética de obra.
- Retirada de casetas para los trabajadores (vestuarios, oficinas, aseos).
- Vuelo dron con ortofoto e imágenes, final de la última fase 22/05/2024.
- Elaboración de cartografía de las actuaciones y estado final de la zona intervenida
- Redacción de informe ambiental de fin de proyecto.

El cronograma referido, según los distintos meses del año, para aplicar los distintos métodos de control, es el de la Fig. 6.

FENOLOGIA Baccharis halimifolia	LATENCIA			ACTIVIDAD FISIOLÓGICA									
				CRECIMIENTO ACTIVO						FLORACIÓN			
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	DISP*
Arranque manual													
Roza													
Cobertura tocones													
Extracción total por medios mecánicos													
Inundación temporal													
Inundación permanente													
Desbroce selectivo de inflorescencias													

DISP*= dispersión de las semillas.
Cuadro 3.1. Época idónea según la fenología de la especie para la aplicación de tratamientos mecánicos / físicos.

Fig. 6. Cronograma referido al mejor momento para aplicar los distintos métodos de control.

A continuación, en la Tabla de Fig.1, se recogen algunas imágenes detallando aspectos relevantes hasta ahora explicados, así como de los trabajos realizados.

Tabla de Fig. 1. Ilustraciones de s aspectos relevantes y de algunos de los trabajos realizados.



Plantas en fase de floración. Foto 14/11/2022.



Detalle de frutos con achenios Foto 23/11/2022.



El acceso a algunas de las manchas se encuentra inundado permanentemente.



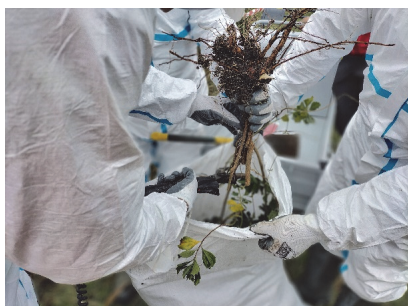
Suelo encharcado. En zonas puntuales el agua alcanza los 1,30 m de profundidad.



Poblaciones “consolidadas” con ejemplares de más de 2m de altura.



Las plantas de pequeño porte se extraen de forma manual.



Una vez arrancada la planta, se introduce en los sacos.



Los residuos se introducen en sacos, que se cierran y se transportan de forma segura hasta su eliminación por un gestor autorizado.



La mini retro de orugas tiene un menor impacto en el terreno que una máquina más pesada.



La mini retro ocasiona un bajo impacto sobre la vegetación debido a su pequeño tamaño y bajo peso.



Con terreno mojado resulta más sencillo eliminar la raíz de forma manual, previa roza del tronco.



En las zonas más alejadas, se extraen los sacos hasta el camino, donde se recogen con el "pick up" y se trasladan al contenedor.



Los sacos llenos y cerrados se transportan al contenedor, cubierto para evitar cualquier posible propagación por el aire.



Se han colocado carteles informativos de las actuaciones.



Tras la eliminación de las cepas quedan pequeños claros en el carrizo, lo que favorece su regeneración.



En las zonas intervenidas se observa el rebrote de carrizo



Se revisan las zonas en las que se ha retirado la *Baccharis* recientemente para eliminar los nuevos rebrotes.



Algunas plantas rebrotan sobre troncos de otras plantas, ya sea en pie o caídos en el carrizal.



Mancha A2 tras la retirada de la especie invasora en febrero de 2023.



Mancha A2 en enero de 2024.

3.2. Control y seguimiento ambiental

Se vigilaron los siguientes aspectos ambientales a través del control de: calidad del aire, vegetación y suelo, calidad hídrica, residuos y fauna cuyos principales objetivos y medidas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen del Control y seguimiento ambiental de distintos parámetros.

Control de Calidad del aire	Objetivo	Medida
Revisiones maquinaria y vehículos	Reducir la emisión de gases de combustión a la atmósfera.	No se adoptan medidas ya que no se ha empleado maquinaria para realizar los trabajos. Todos los vehículos de obra cuentan con ITV en vigor y mantenimientos adecuados.
Limitación de velocidad de Maquinaria y Vehículos	Reducir la generación de polvo y proteger a la fauna del entorno debido al tráfico de vehículos y maquinaria.	Existen señales de limitación de velocidad en los accesos a la obra, y el tránsito de vehículos está restringido en la zona del proyecto.
Restos periódicos de caminos y otras zonas pulvigenas	Reducir la generación de polvo y proteger a la fauna del entorno debido al tráfico de vehículos y maquinaria.	No existen elementos pulvigenos en la zona de actuación.
Control de la vegetación y suelo	Objetivo	Medida
Balizamiento o jalonamiento del entorno de trabajo	Evitar que se produzcan impactos como la circulación de maquinaria, realización de desbroces u otro tipo de trabajos en zonas donde no se contemplan	Reposición del balizamiento en mal estado y existente a largo de toda la longitud donde proceda.
Protección de la vegetación	Evitar que se produzcan daños a especies vegetales (sobretudo leñosas) ya existentes en el entorno y proteger aquellas que se planten o siembren.	Se han considerado zonas de exclusión las zonas plantadas mediante estiquillo, limitando su acceso a personal y maquinaria durante la duración del proyecto. Se ha respetado toda la vegetación arbórea existente en la zona, tanto individuos vivos como la madera muerta en pie.
Control de desbroces, podas y cortas de vegetación	Asegurar unas buenas prácticas referentes a las podas, cortas y desbroce de vegetación así como de los restos obtenidos de las mismas.	Supervisión de las actividades de poda, corta y desbroce por un técnico ambiental competente. Disponer de un inventario de arbolado identificando los pies a proteger, considerados zonas de exclusión.
Retirada de tierra vegetal y acopio de la misma	Controlar la potencial afección derivada de la apertura o ampliación de pistas y el trabajo de movimiento de tierras por la retirada y el acopio de la capa de tierra vegetal.	No se adoptan medidas ya que no se ha realizado movimiento de tierras, apertura de pistas ni acopio de tierra vegetal.
Revegetación y controles periódicos de la evolución de la revegetación	Maximizar el resultado de la erradicación de la especie invasora, y la disminución del impacto paisajístico.	Restringir el paso de personas y vehículos a las zonas revegetadas.
Prevención de incendios	Certificar que se dispone de las herramientas adecuadas y se emplean buenas prácticas que eviten los incendios en el entorno de trabajo.	Evitar concentrar los trabajos en las horas centrales de los días en los que se declare riesgo alto de incendios. Formación al personal de obra relativa a los protocolos de prevención de incendios. Existencia de extintores y herramientas de prevención de incendios asociadas a la maquinaria y zonas con personal de obra permanente.
Control de la calidad hídrica	Objetivo	Medida
Control de la recepción de las autorizaciones pertinentes solicitadas al Organismo de Cuenca.	Asegurar el cumplimiento de las normativas y minimizar los impactos al Dominio Público Hidráulico y zona de policía.	No se adoptan medidas ya que las actuaciones están comprendidas dentro del DPMT, bajo la gestión del promotor del proyecto, sin afección al DPH.
Control visual y realización de análisis químicos del agua	Evitar la contaminación de masas de agua.	No se han realizado actividades que puedan derivar en vertido a ninguna masa de agua.
Control de las aguas residuales de las instalaciones	Evitar cualquier tipo de contaminación al medio hídrico como consecuencia de vertido de aguas residuales procedente de las instalaciones necesarias para la ejecución de la obra, como son cocina, baños, duchas, vestuarios, etc.	Instalación de baños W.C. químicos móviles.
Los acopios, balsas de lavado y cualquier otro potencial punto de aporte de material al agua se localizará lo más alejado posible de las masas de aguas siempre fuera de de dph	Evitar afecciones al medio hídrico.	No se han realizado actividades que puedan derivar en vertido a ninguna masa de agua.
Control de residuos	Objetivo	Medida
Se dispondrá de un punto limpio en el que se depositarán con la debida separación todos los residuos generados. Se realizará una adecuada gestión de los residuos.	Evitar posibles afecciones y verificar la correcta gestión y tratamiento final de los residuos.	Instalación de contenedores adecuados, diferenciados y debidamente señalizados. Control frecuente de la correcta separación y gestión de los residuos.
Batidas de limpieza periódicas y limpieza final	Prevenir posibles afecciones al medio determinadas por acumulaciones o dispersiones de residuos como aceites, hidrocarburos, plásticos, papel, metales o residuos tóxicos y peligrosos.	Establecer puntos limpios próximos al avance de las obras. Limpieza o retirada inmediata de restos de materiales, residuos o infraestructuras relacionadas con las obras localizados previamente a dar por finalizadas las obras. Realizar actividades formativas y de concienciación a los trabajadores.
Control de fauna	Objetivo	Medida
Prospecciones previas del terreno y compensación de impactos	Preservar las especies del entorno y estructuras asociadas o importantes para las mismas.	Prospección del terreno para determinar la presencia de especies con algún nivel de protección o estructuras importantes para su sustento.
Temporalización de trabajos	Evitar molestias a los diferentes grupos de fauna en los diferentes momentos del día o épocas del año en los que su ciclo biológico o actividad se ve más comprometida.	Paradas biológicas en la época de anidación de aves marinas. Los trabajos se realizan fuera de horarios de mayor actividad de la fauna, evitando concentrar el trabajo al amanecer, atardecer y en horario nocturno.
Contaminación lumínica	Evitar las molestias que puedan producir los deslumbramientos derivados del uso de focos en horario nocturno.	No se realizan trabajos en horario nocturno.

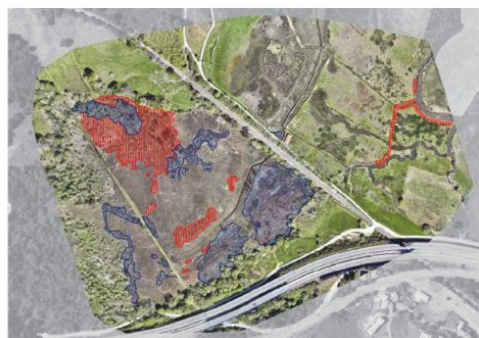
4 Resultados

Tras la primera etapa de erradicación, a lo largo de la primavera de 2023 se realizó un vuelo con dron para comprobar la evolución de las actuaciones y tomar fotos aéreas de la zona. A partir de este vuelo se estimó que la superficie intervenida comprendía alrededor de un 60% del total de superficie invadida (Tabla de Fig 2.). En mayo 2024 la superficie intervenida comprende un 100% del total.

Tabla de Fig. 2. Evolución de la presencia de la especie invasora en distintas fases de la actuación.



Ortofoto obtenida a partir del vuelo de abril 2023



En rojo las zonas pendientes de actuación en la segunda fase.

Desde finales de primavera hasta octubre de 2023 se llevó a cabo una parada biológica de 5 meses, que consistió en detener las actuaciones para minimizar al impacto sobre las poblaciones de aves nidificantes en la zona. Durante este período la vigilancia ambiental continuó, señalando las siguientes tareas: control del rebrote de las zonas tratadas, inspección del perímetro de la zona afectada para localizar nuevos focos de invasión, visita de las parcelas en donde durante los trabajos de erradicación se acopiaron/quemaron restos vegetales, entre otros.

En este período, se establecieron un par de parcelas de 1m² para estudiar la viabilidad del banco de semillas (Fig. 7). En cada visita se contaba el número de plántulas en cada parcela y posteriormente se eliminaban dichas plántulas, con el objetivo de comprobar la capacidad colonizadora de la especie y la viabilidad del banco de semillas en el terreno. Tras las primeras visitas, se comprobó como la fauna del lugar (un par de caballos, en nuestro caso) se adentraron en la zona y pisotearon las parcelas, por lo que el estudio quedó incompleto.

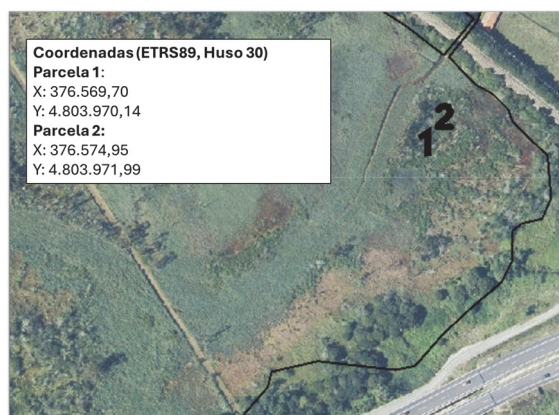


Fig. 7. Localización de las parcelas experimentales de estudio.

Aun así, tras retirar las plantas adultas con capacidad de producir semillas, si se eliminan las plántulas germinadas de semillas latentes en el suelo, la reaparición de la especie invasora tiende a ser menor, tal y como detallaremos más adelante. Los datos recopilados son los de la Tabla 2.

Tabla 2. Datos recopilados para la parcelas de estudio.

FECHA	PARCELA1*	PARCELA2*	OBSERVACIONES
03/05/2023	21	17	Se establecen las parcelas.
06/07/2023	98	0	Un par de caballos acceden a la zona y pisotean la parcela P2.
17/08/2023	41	0	No se observa germinación de la EEI en la parcela P2
24/10/2023	0	0	No se observa germinación de semillas de la EEI en las parcelas
20/12/2023	0	0	No se observa germinación de semillas de la EEI en las parcelas
22/01/2024	0	0	No se observa germinación de semillas de la EEI en las parcelas
09/02/2024	0	2	Aparecen dos plántulas provenientes del banco de semillas.
21/03/2024	0	0	Tras retirar las plántulas de la P2, no se observa nuevos brotes.
04/04/2024	0	0	No se observa germinación de semillas de la EEI en las parcelas
07/05/2024	0	0	Se retiran las parcelas. No se observa germinación de la EEI.

Tras eliminar los numerosos ejemplares de *Baccharis halimifolia* que ocupaban amplias superficies y competían por los recursos y el espacio, se generó una situación de “superficie descubierta”, creándose un nicho para la colonización de otras especies, algunas de ellas con carácter invasivo. Tal es el caso de la *Cotula coronopifolia* (especie incluida en el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras) cuya superficie ocupada se triplicó tras las actuaciones.

A principios de primavera 2024 se realizó una revegetación a partir de estaquillas obtenidas de especies autóctonas existentes en el entorno. De esta forma, se proporciona cubierta vegetal a las zonas en las que se eliminó la especie invasora, para minimizar el riesgo de recolonización de la superficie desnuda. El éxito de esta plantación dependerá de muchos factores adversos, bióticos y abióticos (salinidad del agua, entorno frecuentemente encharcado, ramoneo por ungulados, entre otros) por lo que se optó por plantar en alta densidad, considerando un éxito de la plantación del 5-10% como algo positivo.

Al inicio del proyecto se planteaba la gestión de los restos vegetales mediante quemas controladas y un posterior traslado de los residuos a gestor de residuos autorizado, con intención de minimizar la huella de carbono que generaría el transporte de estos residuos hasta la planta de dicho gestor. Por ello, puntualmente en el mes de abril se quemaron residuos vegetales de mayor tamaño en una parcela próxima a la zona de actuación, para reducir su volumen y así facilitar el traslado de los restos de residuos vegetales hasta la planta de tratamiento del gestor autorizado.

En la mancha B2 los individuos retirados, de gran porte, crecían sobre unos muros de mampostería que dividen las fincas en esa zona. Se desbrozó la parte aérea y, por el riesgo de caída de dichos muros, no se actuó en la raíz. En abril, con el reinicio de la actividad fisiológica de las plantas, se realizó un control químico de estos ejemplares.

Se observó que en las zonas en las que se habían eliminado los pies adultos y posteriormente se controló el rebrote, eliminando las plántulas de raíz e insistiendo cada vez que rebrotaban, la erradicación de la planta invasora era más efectiva. Sin embargo, para que la erradicación sea definitiva hay que asegurarse de eliminar todos los posibles aportes de semilla, vectores de dispersión e incluso las partes de la planta con capacidad de reproducirse de forma asexual: raíces, tallos e incluso ramillas con potencial de enraizar.

Parece fundamental realizar las labores de control con constancia y continuidad para que sean efectivas, no sólo por la posibilidad de persistencia de semillas en la zona, sino por el aporte de nuevas semillas desde zonas contiguas. También señalar la importancia de labores de vigilancia para evitar que, en caso de aparición de nuevos ejemplares, estos lleguen a fructificar amplificando de nuevo el problema.

Bajo esta premisa, se realizó una visita de reonomiento y estimación de la superficie invadida pasados 6 meses tras el fin de las actuaciones, el 15 de noviembre de 2024 (Fig. 8).

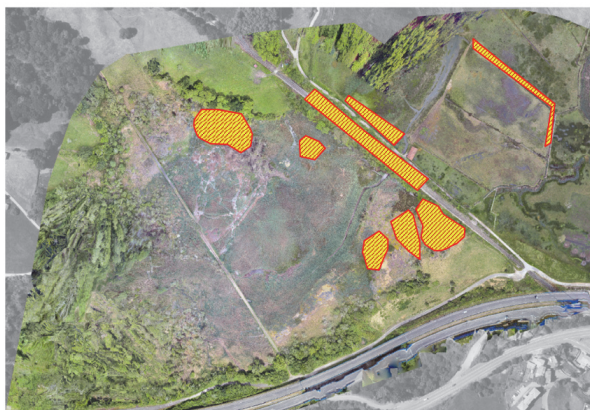


Fig. 8. Zonas visitadas con presencia de *Baccharis halimifolia* en noviembre de 2024, sombreadas en amarillo.

Se comprueba lo siguiente:

- La superficie afectada por la planta invasora no ha aumentado, aunque se observan individuos en zonas en las que anteriormente no se actuó, por no ser visibles o accesibles estos ejemplares.
- En general, las plantas brotadas ocupan entre un 10% y un 15% de la superficie intervenida, y se trata de individuos de pequeño porte, de entre 10cm y 50cm.



- En el momento de la visita se localizan algunos individuos en la fase dispersante (produciendo semillas) pero, por el tamaño de las poblaciones observadas, parece que el aporte de semilla a la zona en el período posterior a la intervención ha sido reducido.



- En las zonas donde, tras eliminar las grandes masas de *Baccharis halimifolia* existentes, se creó un vacío en la cubierta vegetal, se han instalado otras especies de flora invasora, ocupando el espacio disponible y reduciendo la posibilidad de recolonización de la chilca.



- En una de las zonas en que las plantas invasoras se desarrollaban encima de unos muros de mampostería, se realizó una roza de la parte aérea de la planta y se empleó tratamiento químico en las raíces remanentes. Se comprueba en la visita que varios de estos ejemplares aparecen muertos, otros, diezmados pero con pequeños rebrotes, y algún individuo muestra la misma vitalidad y capacidad de rebrote que antes del tratamiento.



- De forma frecuente, las plántulas de la especie invasora aparecen con mayor densidad bajo el arbolado, en zonas donde el suelo no permanece encharcado, con tendencia a desarrollarse en zonas del terreno más elevado o sobre tocones muertos. Por otro lado, las zonas más encharcadas se cubren de cótula (*Cotula coronopifolia*) que llega a crear un tapiz continuo.



5. Conclusiones

Una de las conclusiones más evidentes es la importancia que tienen, por su labor de contención, las actuaciones de este tipo, encaminadas a reducir el alcance de las invasiones de especies tan expansivas y transformadoras de habitats como la chilca (*Baccharis halimifolia*).

En cuanto a la logística de los trabajos, la primera conclusión estriba en una adecuada organización de los estos de forma que se evite o minimice las actuaciones en el momento de producción de semillas, es decir, durante la fase dispersiva, comprendida desde finales de agosto hasta principios de noviembre.

Tras la experiencia adquirida se comprueba que el desbroce de la parte aérea de la planta no sólo no disminuye la invasión, si no que provoca una «sobreproducción» de rebrotes y brotes de rizomas, por lo que siempre debe ir acompañado de la eliminación del sistema radical y de todas las partes de la planta con capacidad reproductora.

Si bien la superficie afectada en nuestra actuación es reducida, las labores de control de la especie invasora resultan complejas. En el caso de ámbitos estuarinos, como es el de nuestra zona de estudio, nos enfrentamos a entornos permanentemente encharcados, bajo condiciones de climatología adversa en múltiples ocasiones. De entre todos las metodologías ensayadas, los mejores resultados se obtuvieron con en el arranque manual de los ejemplares, empleando mínimamente maquinaria ligera (mini retro de orugas y vehículos ligeros) a modo de apoyo.

En lo referente a la labor de control de la invasión, a pesar de resultar laboriosa, parece factible si se hace un seguimiento exhaustivo de la evolución de la vegetación y se realizan las pertinentes labores de control y eliminación de rebrotes de forma continuada y constante.

Referencias bibliográficas

- CAMPOS PRIETO, J.A., CAÑO PÉREZ, L. y HERRERA GALLASTEGRI, M. (2017). *La invasión de Baccharis halimifolia en la costa cantábrica*. Ambianta 109:78-91.
- ELORZA, M. S., SANCHEZ, E. D. D., VESPERINAS, E. S., y NACIONALES, O. A. P. (Eds.). (2004). *Atlas de las plantas alóctonas invasoras en España*. Organismo Autónomo Parques Nacionales.
- IHOBE. (2014). *Manual de Gestión de Baccharis halimifolia*. Ed. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco.

- GARCÍA HOYOS, P. (2017). *Acciones para la contención y eliminación de la chilca en el ámbito del proyecto Life Miera*. Conservación de la Biodiversidad en el Río Miera. LIFE13 NAT/ES/000899.
- GASSO, N., THUILLER, W., PINO, J., y VILA, M. (2012). *Potential distribution range of invasive plant species in Spain*. NeoBiota, 12, 25-40.
- GLOBAL BIODIVERSITY INFORMATION FACILITY (GBIF). (2023). Global Biodiversity Information Facility (GBIF) data portal. Online. Enlace: <https://www.gbif.org/> (consultado: 2023).
- ROZAS ORMAZABAL, M., BETETA MERINO, E., PÉREZ HIERRO, J.C. y URRUTIKOETXEA GARCÍA, A. (2012). *Control y eliminación de la especie exótica invasora Baccharis halimifolia en Urdaibai. Proyecto LIFE+ Estuarios del País Vasco*. Revista Foresta nº 55 especial País Vasco-Euskadi. Ed. Colegio Oficial Ing. Tec.Forestales.

El proyecto de dragado y programa de vigilancia ambiental de la Ría de O Burgo

The dredging project and environmental monitoring programme of the O Burgo Estuary

Carlos Gil Villar^a, Rafael Eimil Apenela^a, Ricardo Babío Arcay^a, Ana Lloret Capote^b, Miguel Nieto Matamoros^c, Antonio Durán Maciñeira^c, Victoriano de la Torre Cancelo^e, José Antonio Martínez Prieto^d

^aDemarcación de Costas de Galicia, cgil@miteco.es, rbabio@miteco.es; ^bCEDEX, Ana.Lloret@cedex.es; ^cPROYFE S.L. antonio.duran@proyfe.com; ^dAdantia, S.L. v.delatorre@adantia.es; ^eUTE ACCIONA-MAB_Ría do Burgo, jamartinezpr@accionna.com.

How to cite: Gil Villar C, Eimil Apenela R, Babío Arcay Ra, Lloret Capote A, Nieto Matamoros M, Durán Maciñeira A, de la Torre Cancelo V, Martínez Prieto J.A. (2024). El proyecto de dragado y programa de vigilancia ambiental de la Ría de O Burgo. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Ibiza, mayo de 2024

Abstract

The O Burgo estuary is located in the metropolitan area of A Coruña. This coast has been the recipient for years of numerous spills that deteriorated the quality of its waters and created a layer of polluting sediments.

The removal of these materials from the estuary and their partial restitution with pollution-free sediments will improve the quality of the waters and bottoms of the estuary, promote the recovery, productivity and quality of the shellfish beds, and promote recreational-playful uses.

This project included dredging 662,488 cubic meters in the estuary and a total investment of approximately €40,000,000. The complexity of this dredging is conditioned by three factors:

- It is environmental dredging, it is only necessary to remove the contaminated sediments, which constitute a very shallow layer (50 cm) and replace them with clean sediment.*
- It is a closed estuary with a shallow draft, subject to large tides, with suspended mud that lacks bearing capacity and its removal can disperse pollution.*
- It has great environmental conditions, being an estuary of high environmental value, with a great wealth of wintering birds, phanerogam meadows in its interior and where shellfish fishing is an important socio-economic activity.*

Keywords: *environmental dredging; coastal engineering; mud; geotubes contamination; flocculants; zosteria; A Coruña.*

Resumen

La ría de O Burgo se sitúa en el área metropolitana de La Coruña. Esta costa, ha sido receptora durante años de numerosos vertidos que deterioraron la calidad de sus aguas y crearon una capa de sedimentos contaminantes.

La retirada de estos materiales de la ría y su restitución parcial por sedimentos libres de contaminación permitirá mejorar la calidad de las aguas y los fondos de la ría, favorecer la recuperación, productividad y calidad de los bancos marisqueros, y potenciar los usos lúdico-recreativos.

Este proyecto contempló un dragado de 662.488 metros cúbicos en la ría y una inversión total aproximada de 40.000.000 €. La complejidad de este dragado está condicionada por tres factores:

- Es un dragado ambiental, solo es necesario retirar los sedimentos contaminados, que constituyen una capa muy somera (50 cm) y reponerlos con sedimento limpio.*
- Es una ría cerrada de poco calado, sometida a grandes mareas, con lodo en suspensión que carece de capacidad portante y que su remoción puede dispersar la contaminación.*
- Tiene grandes concionantes ambientales, siendo una ría de elevado valor ambiental, con gran riqueza de avifauna invernante, praderas de fanerógamas en su interior y donde el marisqueo es una importante actividad socio-económica.*

Palabras clave: dragado ambiental; ingeniería costera; fangos; contaminación geotubos; floculantes; zostera; A Coruña.

1. Introducción

La ría de O Burgo, que forma parte de una Reserva de la Biosfera y es parte de la ZEPA Corredor migratorio galaico-cantábrico occidental, recoge aguas del río Mero, bajo el puente viejo de O Burgo y varios arroyos a lo largo de su perímetro. Incluida en el área metropolitana donde confluyen los términos municipales de La Coruña, Culleredo, Cambre y Oleiros, tiene un gran valor socioeconómico siendo zona de esparcimiento para 350.000 habitantes y además se lleva a cabo la explotación marisquera.

Esta área costera, ha sido receptora durante años de numerosos vertidos que deterioraron la calidad de sus aguas y crearon una capa de sedimentos contaminantes procedentes de vertidos industriales y urbanos.

La retirada de los materiales contaminados de la ría y su restitución parcial por sedimentos libres de contaminación permitirá mejorar la calidad de las aguas y de los fondos de la ría, favorecer la recuperación, productividad y calidad de los bancos marisqueros allí localizados, y potenciar los usos lúdico-recreativos de la zona.

2. El Proyecto de dragado

2.1. Alcance general y condicionantes

Las obras del proyecto de Dragado Ambiental de los sedimentos de la Ría de O Burgo (A Coruña), fueron llevadas a cabo por la Dirección General de la Costa y el Mar del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Gobierno de España), de acuerdo a la Declaración de impacto Ambiental (DIA) y el Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) donde se incluyen los controles y medidas de seguimiento de las actuaciones.

En el proyecto se contemplaba el dragado ambiental de la ría, para lo que previamente, se dividió su superficie en 19 sectores, clasificados de acuerdo a la caracterización de realizada de sus sedimentos (Categoría I, II y IIIa).

El volumen de dragado fue de 662.488 m³ en la ría y una inversión total aproximada de 40.000.000 €.

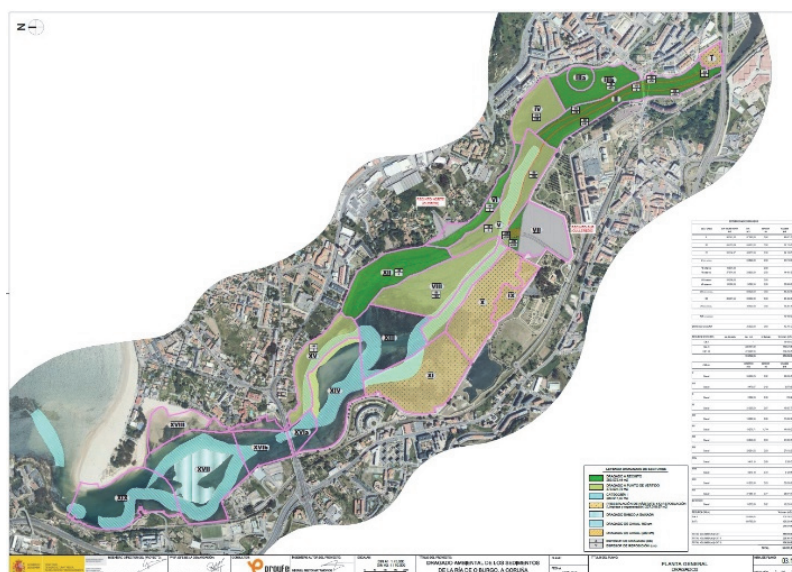


Fig. 1. *Planta General dragados.* Fuente: Proyecto Dragado Ambiental de los sedimentos de la Ría de O Burgo, A Coruña. (2017)

La complejidad de este dragado ha estado condicionada por tres factores:

- No es un dragado ordinario donde el objeto sea obtener arena o aumentar calado, sino que se trata de realizar un dragado ambiental. Para ello, ha sido necesario retirar solo los sedimentos que están contaminados, que constituyen una capa muy somera (50 cm) y reponer posteriormente con sedimento limpio.
- Se trata de una ría cerrada con muy poco calado, sometida a grandes mareas, con lodo en suspensión que carece de capacidad portante y que su remoción puede dispersar la contaminación. Además, hay grandes superficies que la marea en pleamar alcanza unos pocos centímetros de calado, lo que supone una mayor complejidad de ejecución y la necesidad de empleo de maquinaria específica.

- Tiene unos grandes concionantes ambientales, pues es una ría con gran riqueza de avifauna invernante, con praderas de fanerógamas en su interior y donde el marisqueo tanto a flote como a pie es una importante actividad socio-económica.

2.2. Descripción de la actuación

Este proyecto contempla un dragado ambiental, mediante el que se pretende eliminar la capa de sedimentos superficial que se encuentra contaminada, particularmente en su fracción fina, con un volumen total de sedimentos movilizados de 662.488 m³ en la ría.as fuentes, tamaños y espacios que deben usarse son las indicadas en este documento, que puede ser empleado como plantilla.

2.2.1. Fases de ejecución

Las fases de ejecución para la realización del dragado fueron:

- Construcción recintos de confinamiento de Culleredo y Oleiros.
- Dragado zonas caracterizadas con sedimentos de Categoría IIIa y II con toxicidad positiva y vertido a geotubos en los recintos.
- Dragado zonas de sedimentos con categoría II y vertido al mar.
- Extracción materiales de categoría I y utilización para recubrimiento de zonas ya dragadas.

2.2.2. Construcción recintos de confinamiento de Culleredo y Oleiros

Como fase previa a las actuaciones de dragado, fue necesaria la construcción de dos recintos para el confinamiento del material dragado de categoría IIIa y II con toxicidad positiva, uno en Culleredo y otro en Oleiros. Ambos situados sobre la desembocadura de un cauce, cuya continuidad se aseguró mediante un encauzamiento.

Se ejecutaron mediante muros con cimentación de hormigón ciclópeo y alzado de escollera hormigonada, colocando en su trasdós una lámina impermeabilizante.

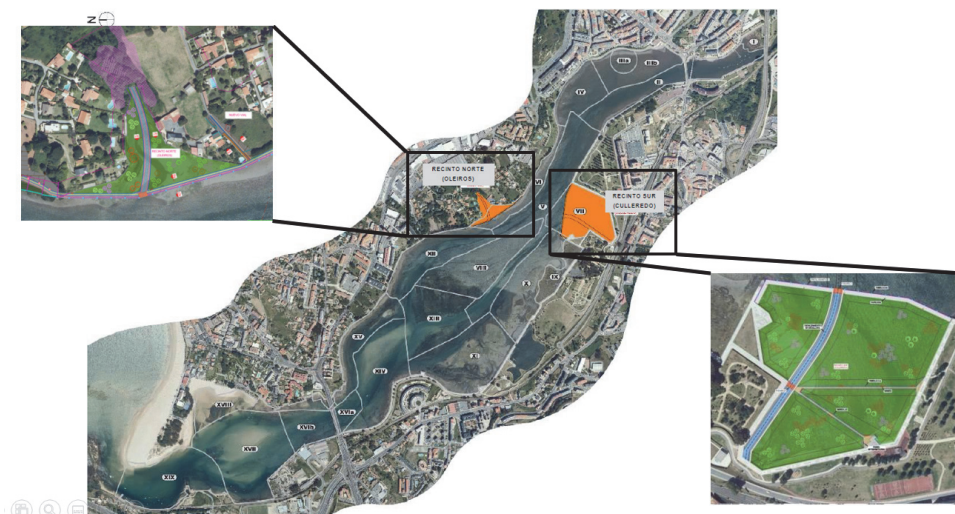


Fig. 2. Recintos de confinamiento. Fuente: Proyecto Dragado Ambiental de los sedimentos de la Ría de O Burgo, A Coruña.

Tras la finalización de las actuaciones, se urbanizaron estos recintos de confinamiento, creando zonas verdes e itinerarios peatonales, con lo que se consiguió:

- Generar 70.000 m² de espacios públicos para disfrute de la población.
- Permitir la conexión en todo el borde de la ría, completando los paseos peatonales ya existentes en parte de su borde litoral.



Fig. 3. Espacios públicos ganados con el material dragado. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

2.2.3. Dragado zonas caracterizadas con sedimentos de Categoría IIIa y II con toxicidad positiva y vertido a geotubos en los recintos.

Como fase previa a las actuaciones de dragado, fue necesaria la construcción de dos recintos para el confinamiento del material dragado de categoría IIIa y II con toxicidad positiva, uno en Culleredo y otro en Oleiros. Ambos situados sobre la desembocadura de un cauce, cuya continuidad se aseguró mediante un encauzamiento



Fig. 4. Geotubos. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

El agua expulsada de los geotubos, se bombeó a la Laguna de Fonteculler, donde se decantó y mediante un sensor de turbidez en continuo se monitorizó su turbidez antes de su retorno a la ría (con niveles de turbidez inferior a 10 NTU).

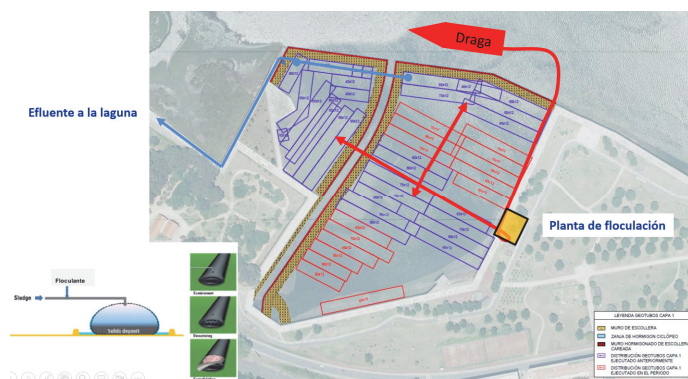


Fig. 5. Esquema dragado y confinamiento geotubos. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

Una vez finalizado el confinamiento de los sedimentos de Categoría IIIa y II con toxicidad positiva en los geotubos, se sellaron los recintos de confinamiento, recubriéndolos con material de relleno y tierra vegetal, generando espacios verdes y dando continuidad a sendas y paseos.

2.2.4. Dragado zonas de sedimentos con categoría II y vertido al mar

El material de menor contaminación (Cat II-) se depositó en un punto de vertido al mar situado fuera de la ría a 5 millas náuticas de la costa, en una zona habilitada con un riguroso control ambiental (ZONA 2 - P09). En este lugar es donde se depositan los materiales procedentes de dragados portuarios.

Debido a las limitaciones de calado que presenta la ría, el dragado del material se realizó mediante la siguiente secuencia:

1. Carga del sedimento desde equipos anfibios a barcas de reducido calado.
2. Traslado de las barcas hasta el gánguil situado en punto habilitado en el interior de la ría y traspaso de la carga.
3. Traslado y vertido en punto de vertido en alta mar por gánguil.

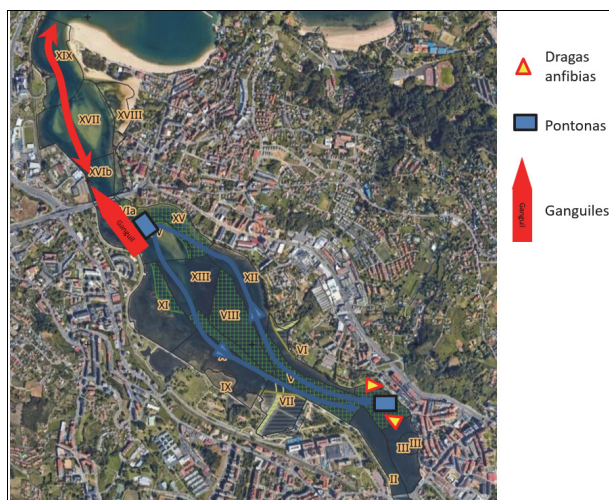


Fig. 6. Esquema secuencia dragado material Cat II. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

2.2.5. Extracción materiales de categoría I y utilización para recubrimiento de zonas ya dragadas

Una vez finalizado el dragado de los sectores con áridos contaminados, se procedió a extraer sedimentos en los sectores catalogados como Categoría I, para su aporte en los sectores dragados, con la finalidad de:

- Recuperación de la zona intermareal.
- Restauración de canales.
- Mejora de bancos marisqueros.
- Regeneración del fondo de la laguna de Fonteculler (utilizada para control del efluente).
- Aporte para la regeneración de la playa de Santa Cristina, situada en la desembocadura de la ría.



Fig. 7. Aporte Playa de Sta. Cristina. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

2.2.6. Medidas de protección medioambiental

De forma previa y durante la ejecución de las actuaciones, se llevaron a cabo diversas medidas para preservar el medioambiente como:

- Preservación de hábitats.

Las marismas de Culleredo, de más de 227.000 metros cuadrados, han sido intencionadamente excluidas de la intervención con la finalidad de preservar las praderas de fanerógamas y los hábitats principales de aves invernantes.

- Retirada y resiembra de especies marisqueras

Previo al inicio de los trabajos se realizó la recogida de las especies marisqueras afectadas y su traslado a zonas de la ría que no se verían afectadas por las actuaciones.

Al finalizar los trabajos de dragado, se realizó la resiembra de la ría con semillas procedentes de viveros (hatchery) de las mismas especies presentes en la ría (aproximadamente 14,5 millones de especímenes).

- Trasplante de fanerógamas

En la ría del Burgo, hay una presencia importante de la fanerógama marina protegida “*Zostera Noltii*”.

Se realizó un trasplante de esta fanerógama desde los sectores centrales que se verían afectados por el dragado a las zonas de preservación, con el fin de posibilitar su recuperación en la ría, realizándose un seguimiento del mismo. Estos trabajos se recogen con detalle en otro artículo presentado en este congreso.



Fig. 8. *Trasplante Zostera.* Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

- Eliminación especies exóticas invasoras

Se eliminaron especies exóticas invasoras como el carrizo de la pampa “*Cortadeia Selloana*” y “*Carpobrotus sp*”, principalmente presentes en la playa de Santa Cristina y en la zona interior de la ría respectivamente.

En estos trabajos se ha contado con la experta colaboración de los mariscadores de la ría, grandes conocedores del terreno y las especiales circunstancias de su labor por la mejora de la calidad ambiental de la ría de O Burgo.

2.3. Control ambiental y técnico de las actuaciones

Durante la ejecución de las obras, se ha seguido para su control el Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) indicado en la Declaración de impacto Ambiental (DIA) del proyecto.

En el Plan de Seguimiento Ambiental se estableció un minucioso control ambiental que comprendía un seguimiento de las obras en fase preoperacional (antes de las obras), en fase operacional (durante las obras) y en fase postoperacional (después de las obras).

Dentro del Plan de Vigilancia ambiental se realizaron controles de:

- Calidad de las aguas y sedimentos

Se realizó un seguimiento de la calidad de las aguas y los sedimentos, tanto en la zona de dragado como en el punto de vertido. Se realizaron ensayos periódicos de caracterización química y biológica en los puntos de control indicados en la DIA.

Se instalaron cortinas antiturbidez para confinamiento de la turbidez y se realizó el seguimiento de la turbidez mediante sensores en continuo tanto en el interior de la ría como en la laguna de Fonteculler, al estar este parámetro limitado en la DIA, al generarse por la fracción fina (que es la que puede contener mayoritariamente la contaminación).



Fig. 9. Boyas con sensores de turbidez en continuo. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

- Presión sonora

Para mitigar la presión sonora se instalaron barreras acústicas en los sectores próximos a zonas pobladas. Realizando mediciones acústicas periódicas en los puntos de control más próximos a las zonas de actuación.

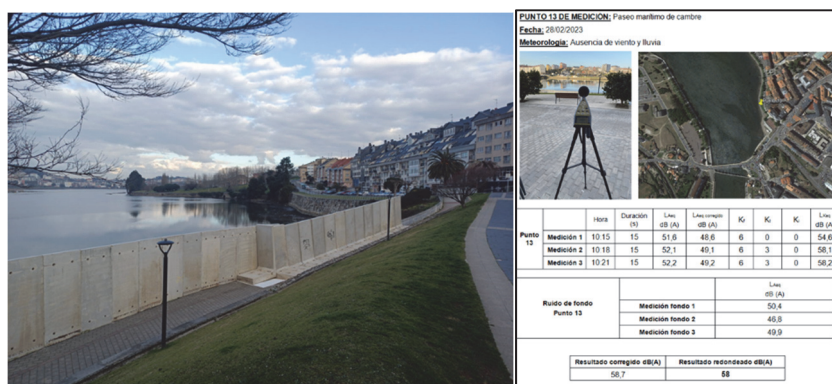


Fig. 10. Punto de control sonoro en proximidad núcleo urbano. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

- Bivalvos

Control en 25 estaciones de bivalvos en el interior de la ría (PAHs, metales, organoclorados y PCBs).

- Avifauna

La ría del Burgo es un espacio con gran riqueza de avifauna invernante, realizándose un seguimiento de la misma, mediante censo quincenales, concluyendo que no se vio afectada por las obras.



Fig 11. Censo de avifauna y procedencia. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

- Arqueológico

Debido a la presencia en la ría de elementos arqueológicos, se realizó un seguimiento arqueológico durante los trabajos de dragado. e

- Seguimiento rebrotes especies invasoras

Tras la retirada de especies exóticas invasoras, se realizó seguimiento para evitar rebrotes.

- Seguimiento Zoostera noltii

Se controló la evolución del trasplante realizado de la fanerógama *Zoostera noltii* (extensión, densidad, etc)..

- Evolución playa de Sta. Cristina

Se realizó un seguimiento de la evolución de la línea de cota “0” de la playa de Sata. Cristina, tras los trabajos de dragado de la ría y regeneración del arenal.

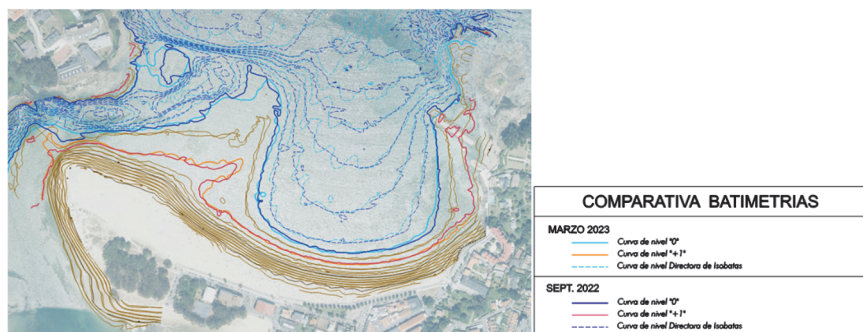


Fig 12. Comparativa evolución línea cota “0” playa Sta. Cristina. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

Para un completo control de las actuaciones de dragado, se dotó a las dragas y gánguiles de transmisores GPS y cámaras, para conocer su posición en todo momento, así como sus trayectorias.

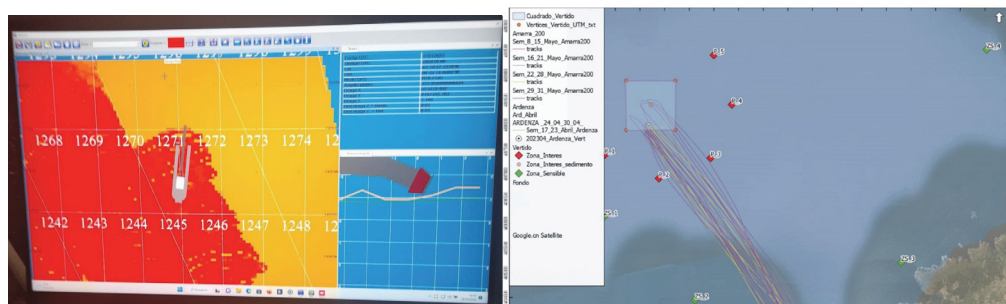


Fig. 13. Pantallas de control de posicionamiento GPS. Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

3. Estado final de la ría

Se refleja en las siguientes imágenes, el estado actual de la ría tras las actuaciones llevadas a cabo y que han supuesto una mejora ambiental, al mejorar la calidad de las aguas y los sedimentos del fondo de la ría, lo que favorece su recuperación y potencia su uso lúdico-recreativo.



Fig 14. *Imágenes del antes y después de la actuación.* Fuente: Seguimiento audiovisual del proyecto.

4. Conclusiones

Para realizar esta obra ha sido necesaria la realización de estudios y procesos novedosos, técnicas de confinamiento nunca antes realizadas en España, seguimientos y controles exhaustivos que han permitido ejecutar la actuación con la mayor relevancia ambiental realizada por la Dirección General de la Costa y el Mar (cofinanciada por los Fondos Europeos de desarrollo regional 2014-2020 y el MITECO).

Referencias bibliográficas

Si se quiere tener información más detallada de esta actuación:

<https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/actuaciones-proteccion-costa/a-coruna/150736-dragado-o-burgo.html>

Programa de vigilancia ambiental integral de las obras de estabilización de la playa en Premià de Mar (Maresme, Barcelona)

Ferran Vallespinós^a, Roberto Pillado^b, Asterio Recio^c y Ana María Castañeda^d

^aE-CO2NSULTING, S.L, C/València 11D, 08392 Tiana (Barcelona)  ferran.vallespinos@hotmail.com;

^bPROES CONSULTORES, S.A. C/ Virgilio, 2, edificio 328223 Pozuelo de Alarcón, roberto.pillado@proes.es;

^cGEOMY TSA, S.A. C/Marqués de Urquijo, 21 28008 Madrid, asterio.recio@geomytssa.es y ^dDermarcación de Costas en Cataluña (Barcelona), c/ Marina 16 08005 Barcelona, acastaneda@miteco.es

How to cite: Vallespinós, F.; Pillado, R.; Recio, A. & Castañeda, A. M. (2024) Programa de vigilancia ambiental integral de las obras de estabilización de la playa en Premià de Mar (Maresme, Barcelona). Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

Environmental monitoring programmes for the control of beach stabilisation works are mandatory according to the legal framework for impact assessments. These programmes are becoming increasingly complex, with new factors to consider and of longer duration to cover all the phases of a project. The zero-state study, prior to the initiation of the works, is essential to define reference values for monitoring the impacts. The publication shows the results of a case study, which allows to analyse the most important factors to be considered in a beach stabilisation project.

Key words: regression, stabilisation, impact, monitoring, methodology, initial, dredging, results.

Resumen

Los programas de vigilancia ambiental para el control de obras de estabilización de playas son obligatorios de acuerdo con el marco legal para las evaluaciones de impacto. Cada vez son más complejos, con nuevas variables a considerar y de mayor duración para incluir todas las fases de un proyecto. El estudio de estado cero, antes del inicio de las obras, es fundamental para definir unos valores de referencia para el seguimiento de los impactos. En la publicación, se presentan los resultados de un caso concreto, que permiten analizar los aspectos más importantes a tener en cuenta en una obra de estabilización de playas.

Palabras clave: regresión, estabilización, impactos, vigilancia, metodología, inicial, dragado, resultados.

1. Introducción

La regresión de las playas, que responde a causas suficientemente conocidas, se incrementará notablemente en cualquiera de los escenarios previstos para el cambio climático, con fenómenos extremos cada vez más frecuentes e intensos. La única medida eficaz de corrección, a corto y medio plazo, consiste en la aportación de materiales procedentes de yacimientos marinos profundos, de trasvases de acumulaciones litorales a causa de la interrupción de la dinámica litoral o bien de origen terrestre.

Independientemente de la fuente de áridos, los Proyectos de regeneración o de restauración, han de someterse obligatoriamente al proceso de evaluación del impacto ambiental (EIA), con un alcance que depende del volumen total de arena implicado en la actuación. En consecuencia, se dispone finalmente de una declaración de impacto ambiental (DIA) que impone diversas condiciones para la ejecución de la obra entre ellas, la aplicación de un programa de vigilancia ambiental (PVA).

Si se analizan las DIA de los últimos tres años en relación a obras de ingeniería en costas y puertos, se constata en primer lugar la incorporación de nuevas variables (como, por ejemplo, medidas acústicas submarinas o la pesca y traslado de poblaciones de bivalvos antes del inicio de la aportación de arenas) y también la prolongación de la vigilancia ambiental una vez finalizadas las obras. Por tanto, la tendencia es a incrementar la complejidad de los PVA, más allá del control de los vectores tradicionalmente considerados (como la calidad de los materiales o la turbidez).

Las playas de la comarca del Maresme (provincia de Barcelona) están sometidas a un proceso recurrente de erosión, producida fundamentalmente por la interrupción de la dinámica litoral por la construcción de diversos puertos deportivos y también por la disminución de los aportes terrestres. Para la corrección de la situación se elaboró una estrategia (CEDEX, 2014), de la que forman parte las obras de estabilización de la playa en Premià de Mar. Junto a algunas actuaciones complementarias, han consistido (Figura 1):

- La Recarga de las playas de Bellamar y Pla de l'Ós (351.000 m³, extraídos mediante una draga de succión en marcha) de la zona situada al sur del Puerto de Premià de Mar y vertida a través de una tubería flotante.
- La construcción de dos espigones (135.000 t. de escolleras y todo uno de cantera):
 - El espigón de Poniente, cuya misión es efectuar el apoyo lateral de la arena vertida, ya que el transporte litoral tiene dirección de NE a SW.
 - El espigón exento situado aproximadamente en medio de la zona de actuación y cuya finalidad es crear un hemitómbolo en la playa e incrementar su estabilidad en planta.

Las obras han dispuesto de un PVA contratado por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar del MITECO. Se han realizado dos fases: la preoperacional y la constructiva

En esta publicación se expone la metodología utilizada y los resultados obtenidos, que son valorados en el marco de las exigencias crecientes para el seguimiento ambiental. Todo ello puede ser de utilidad para futuros desarrollos de programas de vigilancia ambiental.

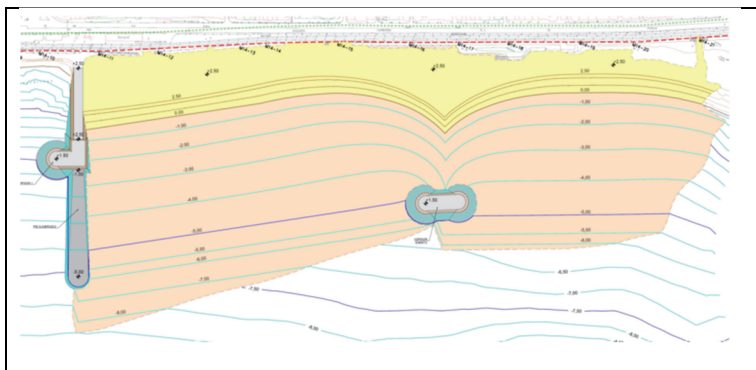


Fig. 1. Obras de estabilización de la playa de Premià de Mar al sur del puerto.

2. Objetivos

El objetivo fundamental del programa de vigilancia ambiental es dar cumplimiento a las medidas incluidas en el Proyecto y en la Declaración de Impacto Ambiental, a fin de verificar su implantación, su eficacia y a la vez identificar posibles impactos ambientales no previstos o de mayor intensidad. Ese objetivo general, se concretará en una serie de objetivos parciales:

- Constituir un elemento de garantía para el cumplimiento de las indicaciones y medidas minimizadoras del impacto propuestas en la evaluación y en la declaración de impacto y también en el informe de compatibilidad con las estrategias marinas.
- Establecer procedimientos de medida, muestreo y análisis que permitan la caracterización ambiental de la zona de influencia del proyecto durante las obras a fin de comprobar que la calidad del medio es mejor que los umbrales de contaminación definidos mediante los valores de referencia
- Medir el grado de ajuste entre los impactos que supuestamente producirá la actuación según el análisis prospectivo realizado en el estudio de impacto ambiental con los efectos que realmente se producirán en el medio.
- Finalmente, el programa de vigilancia ambiental posibilitará reacciones oportunas frente a impactos inesperados que puedan surgir durante las obras, sobre todo en variables de difícil predicción, para lo que se dispondrá de un abanico previo de soluciones (fichas de procedimiento) cuya aplicación deberá ser justificada.

3. Desarrollo de la innovación

El seguimiento ambiental ha de centrarse en una serie de vectores representativos (Spellerberg, 2009). No existe ningún listado genérico que permita identificar las variables ambientales que han de ser objeto de seguimiento, ya que depende de las condiciones concretas del emplazamiento y del tipo de actividades que comprenda la obra. Por ejemplo, la presencia cercana de espacios de interés natural (como Red Natura 2000) o las incidencias sobre la población residente situada cerca de las vías de transporte de materiales son causas determinantes en la elección de las variables y también en la intensidad de la toma de datos. que serán propios de cada emplazamiento y del tipo de obras a realizar. En el caso de Premià se han seleccionado las que se incluyen en la Figura 2, tanto el ámbito terrestre como marino.

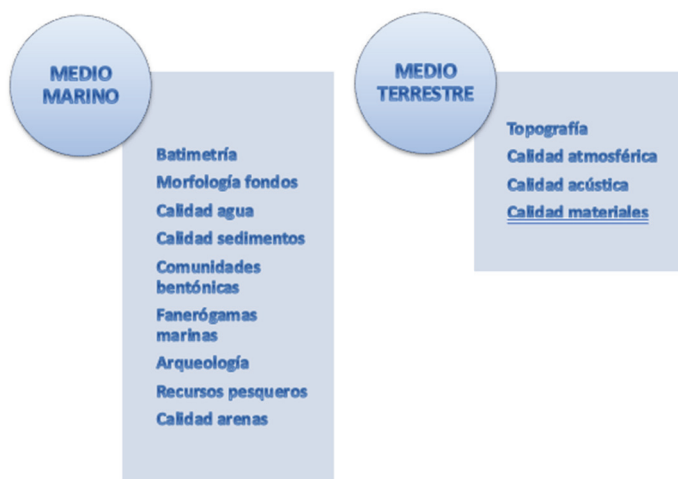


Fig. 2. Selección de variables significativas para el seguimiento ambiental

El desarrollo de un programa de vigilancia ambiental debe estructurarse en una serie de fases:

- Previa al inicio de las obras, cuyo contenido principal son las revisiones documentales del contratista y el estudio de estado cero en el que se definen las condiciones del emplazamiento antes de la actuación, en base a una recopilación de antecedentes y la realización de un campaña de mediciones y toma de muestras (tanto en la zona de extracción de los materiales como en la de aportación), que en el caso de Premià ha tenido el alcance que se indica en la Tabla 1. Como consecuencia de toda la información, se definen los vectores de referencia. También corresponde a esta fase la realización de operaciones singulares (por ejemplo, traslado de recursos marisqueros).

Tabla 1. Alcance de la toma de datos para la definición del estado cero

FASE	NÚMERO	LOCALIZACIÓN
CALIDAD AGUA	2	Zona aportación (1), Zona dragado (1) Turbidez: En toda el área (14), playa (4)
CALIDAD SEDIMENTOS	14	Zona aportación (4), Zona dragado (6), Zona zanja (2), Zona referencia (2)
CONTAMINACIÓN ACÚSTICA	5	Cantera. (1), Vías acceso. (3), Zona aportación (1)
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	2	Cantera (1), Zona aportación (1)
COMUNIDADES BENTÓNICAS	14	Igual que sedimentos
SUPERFICIE DE COMUNIDADES BENTÓNICAS AFECTADAS		Cartografía de detalle (SBL)
OTRAS VARIABLES		Distribución fanerógamas marinas Poblaciones de <i>Callista chione</i> : extracción y trasplante Prospección arqueológica

- b) Durante las obras, con la realización de un seguimiento de los vectores ambientales. Su comparación con los valores de referencia permite detectar situaciones de alerta que deben corregirse con medidas correctoras adicionales. También corresponde a esta fase el control de la aplicación de las medidas correctoras y del sistema de gestión ambiental. En esta fase pueden realizarse operaciones especiales (como el dragado de yacimientos submarino de áridos) que requieren programas específicos (Figura 3).

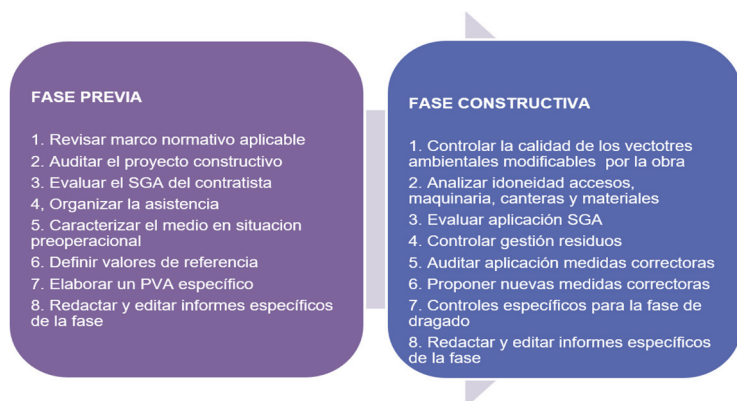


Fig. 3. Fases principales en el desarrollo de la vigilancia ambiental

Los impactos pueden cuantificarse como alteración de los vectores ambientales “normales” de la zona. Pero un mar marcadamente estacional como el Mediterráneo, numerosas variables ambientales críticas (temperatura, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa fitoplanctónica, etc.) experimentan cambios naturales a lo largo del ciclo anual.

4. Resultados

La campaña preoperacional ha permitido establecer los valores del estado cero en toda a zona de actuación, cuyos resultados más relevantes se recogen en la Figura 4. Los trabajos (excepto de prospección arqueológica) se realizaron en el período de la transición primavera-verano, lo que debe tenerse en cuenta sobre todo en relación a la calidad del agua:

Los resultados preoperacionales permiten concluir:

- Calcular los niveles acústicos de la zona de obras, cantera y vías de acceso. La principal distorsión es el tráfico de la carretera N-II y de la C-60 así como el paso de trenes de la R-1.
- La situación para las distintas fracciones de partículas en suspensión es equivalente
- La calidad del agua es la típica de la época. No hay estructuración térmica en la columna de agua ni en la zona de aportación ni en la de dragado, dada su escasa profundidad. Las concentraciones de nutrientes son muy bajas de acuerdo con la oligotrofia del Mediterráneo y no se detectan contaminantes metálicos. La turbidez suele ser más elevada en la zona de aportación a causa de la agitación del oleaje.
- Las características sedimentarias tampoco muestran ninguna desviación de valores naturales y la analítica realizada confirma la idoneidad de los materiales de la zona de extracción para ser aportados a la playa (ITEA, 2010).

- La cartografía de las comunidades bentónicas (realizada mediante SBL y apoyada por filmaciones) en un área amplia entre los puertos de Premià y Masnou, permite establecer el tipo de fondos y las comunidades existentes (Tabla 2).

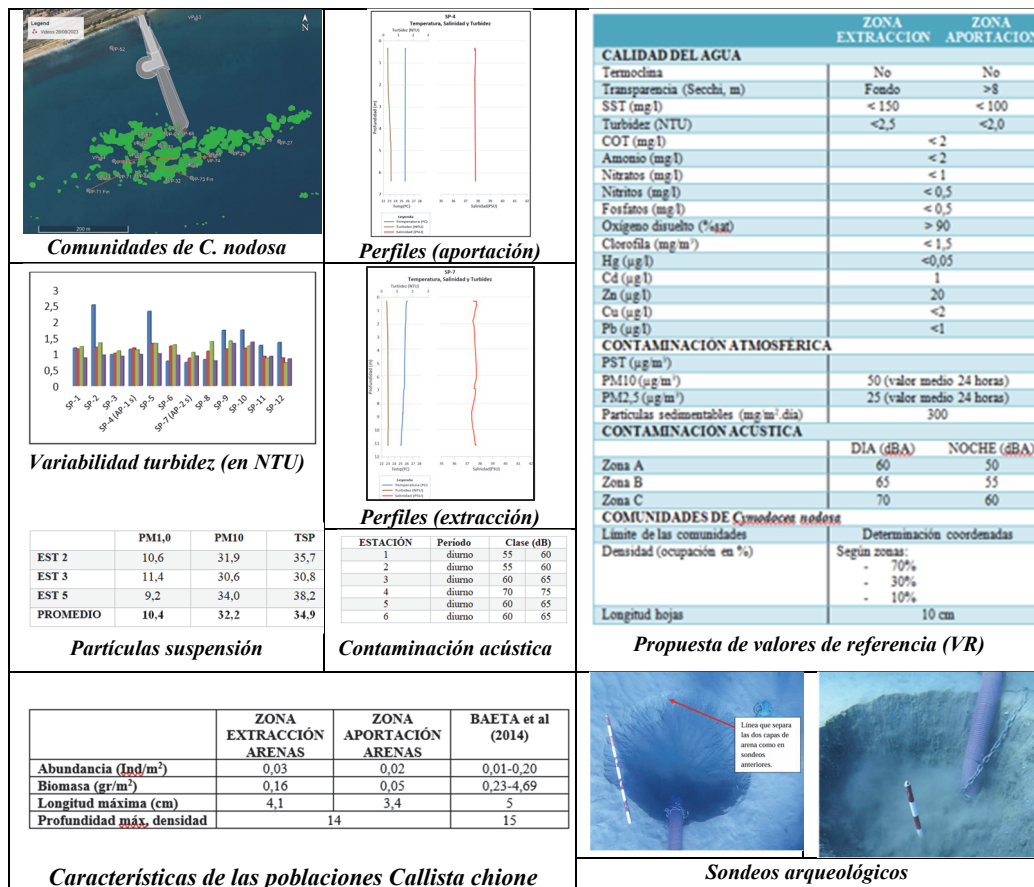


Fig. 4. Resultados principales de la campaña preoperacional y propuesta de valores de referencia

Tabla 2. Tipo de comunidades bentónicas presentes en el área y superficie ocupada

Tipo de fondo	Superficie (m ²)	%
Material de escollera y/o antrópico	0	0 %
Afloramientos rocosos y/o materiales compactos	1196	<0,2 %
Vegetación: comunidades de <i>Cymodocea nodosa</i> .	5781	0.7%
Sedimentos no consolidados tipo arenas fina	82080	9.8%
Sedimentos no consolidados tipo arena media y gruesa con formación de <i>ripples</i>	751142	89.4%
Total	840198	100%

Las únicas comunidades de interés son las de fanerógamas marinas; en la Figura 4 se han cartografiada las más cercanas a la zona de construcción del futuro espigón.

- Ni las prospecciones ni los sondeos realizados para localizar materiales arqueológicos subacuáticos han detectado ninguna interacción con el patrimonio cultural subacuático de la zona del proyecto.
- En la zona hubo un caladero muy importante de “petxina lluenta” (*Callista chione*) que fue sobreexplotado, prohibiéndose desde 2015 cualquier captura. Las pescas experimentales realizadas demuestran que el recurso no se ha recuperado y que la biomasa existente se sitúa por debajo del umbral de interés pesquero. No obstante, los ejemplares capturados fueron trasladados a poniente del espigón.

Durante las obras se ha procedido a un seguimiento ambiental de los vectores identificados, con la misma metodología que en el estudio preoperacional, para que los resultados sean totalmente comparables, y con frecuencia variable según el caso. Asimismo, se han llevado a cabo una serie de controles ambientales a pie de obra (Tabla 3).

Tabla 3. Listado del alcance del seguimiento ambiental controles a pie de obra (fase sin dragado)

SEGUIMIENTO AMBIENTAL	CONTROLES A PIE DE OBRA
MEDIO MARINO	TRANSPORTE MATERIALES
CONTROLES DARIOS	14. Comprobación origen
• Turbidez en cuatro puntos de la zona de aportación	15. Comprobar que la extracción de material se realiza en la zona asignada
CONTROLES SEMANALES	16. Análisis idoneidad accesos
En 14 estaciones:	17. Caja cubierta transporte granulares
• Transparencia (disco de Secchi) • Medida turbidez superficial	18. Cumplimiento límite velocidad
CONTROLES MENSUALES	19. Cumplimiento frecuencia máxima
En 2 estaciones	20. Control entrada obra
• Transparencia disco de Secchi • Medida parámetros océano-gráficos en toda la columna • Toma muestras de agua en dos estaciones a tres niveles	21. Circulación obra
pH	22. Condiciones descarga
Redox	23. Uso señales acústicas
Sólidos en suspensión totales	26. Barido viales
COT	27. Aplicación de riegos
Nutrientes	28. Mantenimiento viales
Cinco metales	29. Señalización viales
• Sedimentos en dos estaciones • Bentos en dos estaciones • Filmación comunidades de <i>Cymodocea nodosa</i>	30. Control de las emisiones de polvo y partículas
	31. Supervisión de las modificaciones aprobadas por la Dirección de Obra
	32. Vigilancia de la calidad de los materiales usados
	33. Control de áreas ocupadas e instalaciones auxiliares de obra.
	34. Control de estado y limpieza final de la zona de obras.
	MAQUINARIA
	36. Impermeabilización zona estacionamiento. <i>Geotextil</i>
	37. Realización operaciones mantenimiento
	38. Gestión residuos

MEDIO TERRESTRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y ACÚSTICA - Ruidos y partículas en suspensión en cinco estaciones - Partículas sedimentables en dos estaciones	39. Control velocidad 40. Control de las operaciones de transporte y acopios de materiales 41. Supervisión de la velocidad de los camiones 42. Supervisión de la eliminación de señales de obra 43. Acústicos de señalización de marcha atrás 44. Comprobar el correcto balizamiento de la zona 45. Vigilancia de las zonas de tránsito de maquinaria 46. Comprobación emisiones maquinaria RESIDUOS 48. Existencia punto limpio 49. Separación correcta materiales 50. Desbordes contenedores 51. Gestión de los residuos 52. Inspección de la zona de acopio de residuos. 53. Limpieza general de la obra USO DEL AGUA Y VERTIDOS 55. Sanitarios en obra 56. Conexión red alcantarillado 57. Principales consumos 58. Contaminantes en el agua, presencia o no de flotantes. 59. Mantenimiento de los desagües de rieras SUELO 61. Compactación suelo 62. Medidas evitar contaminación arenas playa 63. Posibles riesgos por inundación de terrenos
---	--

Con los datos obtenidos, se elabora un informe mensual que incluye todos los resultados analíticos, que se comparan con los valores de referencia (Figura 5) que es una forma muy intuitiva para detectar los incumplimientos, variables según las circunstancias. Constituye la base para evaluar la suficiencia de las medidas correctoras y moderadoras del impacto.

GRADO DE CUMPLIMIENTO			
TOTAL		PARCIAL	NULO
	ZONA EXTRACCIÓN	ZONA APORTACIÓN	GRADO CUMPLIMIENTO
CALIDAD DEL AGUA			
Termoclina	No	No	
Transparencia (Secchi, m)	Fondo	>8	
SST (mg/l)	< 150	< 100	
Turbidez (NTU)	<2,5	<2,0	
COT (mg/l)		< 2	
Amonio (mg/l)		< 2	
Nitratos (mg/l)		< 1	
Nitritos (mg/l)		< 0,5	
Fosfatos (mg/l)		< 0,5	
Oxígeno disuelto (%sat)		> 90	
Clorofila (mg/m³)		< 1,5	
Hg (µg/l)		<0,05	
Cd (µg/l)		1	
Zn (µg/l)		20	
Cu (µg/l)		<2	
Pb (µg/l)		<1	

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA			
PST (µg/m³)			
PM10 (µg/m³)	50 (valor medio en 24 horas)		
PM2,5 (µg/m³)	25 (valor medio en 24 horas)		
Partículas sedimentables (mg/m².día)	300		
CONTAMINACIÓN ACÚSTICA			
	DÍA (dBA)	NOCHE (dBA)	
Zona A	60	50	
Zona B	65	55	
Zona C	70	60	
COMUNIDADES DE <i>Cymodocea nodosa</i>			
Límite de las comunidades	Determinación coordenadas		
Densidad (ocupación en %)	Según zonas: - 70% - 30% - 10%		
Longitud hojas	10 cm		

Fig. 5. Comparativa de los resultados obtenidos durante el seguimiento y los valores de referencia (noviembre 2024)

Durante la fase de dragado para aportación de materiales en playa (draga de succión en marcha y descarga por tubería flotante, Figura 6), se ha diseñado un PVA específico adaptado a las características de la actuación. Durante esta fase, se han mantenido los controles a pie de playa y además un equipo de inspectores ha permanecido constantemente a bordo de la draga.

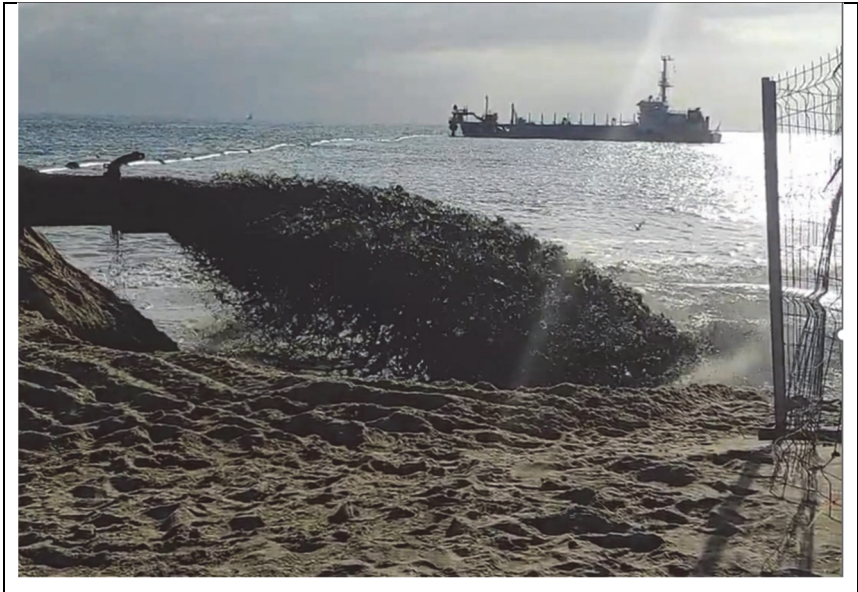


Fig. 6. Fase de dragado (fotografía D.C.)

Tabla 4. Listado del alcance de los controles durante la fase de dragado

CONTROLES A BORDO DE DRAGA	CONTROLES EN PLAYA
CONTROL VIAJE Y POSICIÓN	COLOR Y TAMAÑO GRANO ARENAS
NIVEL LLENADO CÁNTARA	MAQUINARIA EN PLAYA (RUIDOS, ETC)
TOMA DE MUESTRAS	BALIZAMIENTO ZONA
MODA Y D50 APARENTE	PÉRDIDAS ACEITE MAQUINARIA
VOLUMEN (M ³)	<i>Callista chione</i>
LAVADO DE FINOS	RESTOS FANERÓGAMAS
REBOSE	PECES
INCIDENCIAS	AVISTAMIENTOS
LIMPIEZA CÁNTARA	Tortugas
AVISTAMIENTOS: CETÁCEOS/TORTUGAS	Mamíferos
BALIZAMIENTO	RESTOS ARQUEOLÓGICOS
FAUNA CAPTURADA	GESTIÓN RESIDUOS
RESTOS ARQUEOLÓGICOS	CUMPLIMIENTO SGA
CUMPLIMIENTO SGA	ESTANQUEIDAD TUBO DE DESCARGA
CUMPLIMIENTO SGA	SEGUIMIENTO PLUMA TURBIDEZ
	TOMA MUESTRAS TURBIDEZ EN PLAYA

5. Conclusiones

El diseño del Programa de Vigilancia Ambiental, en sus dos fases, se ha mostrado adecuado para los objetivos planteados en la Declaración de Impacto. La determinación del estado cero, antes del inicio de las obras, es una fase fundamental para el posterior seguimiento de los vectores ambientales y detectar las situaciones de alerta relacionadas con impactos de mayor intensidad o no previstos.

Los parámetros que habitualmente han superado los valores de referencia durante toda la obra (contaminación acústica, por partículas en suspensión o sedimentables) se debe por causas totalmente ajenas a la actuación. Tanto el tráfico por la N-II como por la C-60 son las fuentes predominantes de emisión en la zona de contaminantes particulados y también acústicos (en este caso se añade la línea de ferrocarril R1 de Rodalies). Controles específicos de las emisiones de maquinaria, camiones y draga, demuestran una escasa participación a los niveles acústicos. Por otro lado, la obra se realiza a una cierta distancia de núcleos residenciales, directamente afectados por las otras fuentes.

Las investigaciones realizadas demuestran también que las obras no han tenido impacto sobre los recursos marisqueros o el patrimonio arqueológico, dada su inexistencia en la zona.

La calidad del agua muestra el mantenimiento de las condiciones propias y preoperacionales (Flo, 2017). Solo la turbidez y los sólidos en suspensión se alteran puntualmente durante el vertido de escollera, el dragado y la aportación de playa, en una amplitud que depende de la pluma de dispersión (y que se ha controlado durante las obras). No obstante, las medidas correctoras adoptadas y la escasa profundidad de la zona de actuación hacen que se recuperen rápidamente los valores de normalidad. En todo caso, los controles realizados en meses sin actividad demuestran claramente que la calidad del agua no ha resultado afectada permanentemente, que han sido impactos temporales y sin repercusión en el ecosistema (ni en la calidad de los sedimentos ni sobre las comunidades de fanerógamas).

El seguimiento de los límites de distribución de *Cymodocea nodosa* a lo largo de la obra demuestra que las comunidades han sufrido retrocesos evidentes que no guardan ninguna relación ni con el vertido de escollera ni con el dragado (que se ha realizado siempre fuera de los límites ocupados por la fanerógama). Los meses de permanencia en este tramo de litoral nos han permitido concluir que el principal factor de regresión de estas comunidades son las situaciones de temporal, donde la fuerza del

oleaje arranca las plantas (situadas en aguas someras) y las transporta hasta la playa en forma de arribazones con gran cantidad de biomasa. En la Figura 7 se muestran materiales recogidos después de un fuerte temporal: se observan los rizomas totalmente desnudos a la vez que la escasa longitud de las hojas pone de manifiesto que son plantas en las primeras fases de su desarrollo (Pérez y Romero, 2009). Este hecho, demostrado en este trabajo, plantea la necesidad de conocer bien este fenómeno natural durante el diseño de estructuras respetuosas con la distribución de *Cymodocea nodosa* dada su labilidad.



Fig. 7. Aspecto arribazones de *Cymodocea nodosa* después de un temporal (fotografías D.C.)

Finalmente, la experiencia obtenida a lo largo de la asistencia realizada permite identificar algunos limitantes que suelen condicionar los programas de vigilancia ambiental (Tabla 5). Su consideración puede resultar de utilidad para futuras asistencias relacionadas con una obra de estabilización de playas.

Tabla 5. Algunos condicionantes de los PVA y sus consecuencias

CONDICIONANTE	CONSECUENCIA
Tiempo excesivo entre la redacción del Proyecto, DIA, adjudicación obra y asistencias	- Puesto que la actuación es en una playa que está en regresión, el proceso habrá continuado y la situación en el momento de inicio de las obras puede ser muy distinta (por ejemplo, falta de playa para el acceso de maquinaria y camiones)
Retraso para la obtención de determinadas autorizaciones	- Por ejemplo, para la prospección arqueológica o la realización de pescas experimentales. Puesto que el tiempo para los trabajos preoperacionales suele ser escaso, se corre el riesgo de no poder realizar los trabajos antes del inicio de las obras
Alteración de las cartografías del proyecto en relación a comunidades de fanerógamas	- Los temporales o su ausencia pueden modificar de modo significativo la distribución de estas comunidades
Falta de artes pesqueros para la realización de determinados trabajos	- Si una zona está cerrada a una pesquería, ya no existirán ni embarcaciones ni artes para determinadas capturas condicionadas en la DIA.
Falta de concreción en el tipo de draga	- El equipo que finalmente se utiliza en una obra es un tema en general de oportunidad del mercado. En consecuencia, resulta difícil planificar algunas actividades del PVA sin conocer las características de un elemento tan importante en la obra

Referencias

- CEDEX. Estrategia de actuación en el Maresme. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid (2014)
- Flo, E. Opening the black box of coastal inshore waters in the NW Mediterranean Sea: environmental quality tools and assessment. Tesis Doctoral. (2027)
- ITEA. Instrucción Técnica para la gestión ambiental de las extracciones marinas para la obtención de arenas. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid (2010)
- Pérez, M. y J. Romero (2009). Spatial variability in ecological attributes of the seagrass *Cymodocea nodosa*. *Botanica Marina* 52(5):429-438 (2009)
- Spellerberg, I.A. Environmental monitoring programmes. Cambridge University Press (2009)

Adaptación costera frente al cambio climático: implementación de metodologías de inteligencia artificial con un enfoque probabilístico

Coastal adaptation to climate change: Implementation of artificial intelligence methodologies with a probabilistic approach

Nerea Portillo Juan^a, Javier Olalde Rodríguez^b, Vicente Negro Valdecantos^c y Peter Troch^d

^aUniversidad Politécnica de Madrid, , nf.portillo@upm.es; ^bUniversidad Politécnica de Madrid, , jolalde@increa.eu; ^cUniversidad Politécnica de Madrid, , vicente.negro@upm.es y ^dGhent University, , Peter.Troch@ugent.be

How to cite: Portillo Juan, N.; Olalde Rodríguez, J. Negro Valdecantos, V. & Troch, P. (2024). Adaptación costera frente al cambio climático: implementación de metodologías de inteligencia artificial con un enfoque probabilístico. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

Artificial Intelligence (AI), although originating in the 1990s, is now transforming sectors such as medicine and engineering, gradually extending its reach to various fields. However, its application in maritime engineering remains limited. Despite advances demonstrating its efficiency, traditional numerical models continue to dominate. This study introduces an innovative AI-based methodology for adapting coastal structures to climate change, focusing on structural applications—an area still largely unexplored, as most AI studies focus on maritime climate characterization.

The proposed methodology combines Monte Carlo simulations with neural networks. The simulations generate a synthetic database projected to the temporal horizons of 2035 and 2050, while the neural networks process this data to calculate the necessary structural adaptations. Additionally, genetic algorithms were implemented to optimize the model, achieving greater efficiency and reduced computational times.

This approach was applied to the North Breakwater of the Port of Valencia, targeting its most critical sections. The results indicated height increases of up to 1.8 m for the vertical breakwater and of 0.4 m for the composite breakwater, highlighting the potential of this hybrid methodology in maritime engineering.

Keywords: Climate change, Ports, Artificial Intelligence, Artificial Neural Networks, Monte Carlo simulations, Coastal engineering.

Resumen

La Inteligencia Artificial (IA), aunque con origen en los años 90, está transformando sectores como la medicina y la ingeniería, extendiéndose gradualmente a diversos campos. Sin embargo, su aplicación en la ingeniería marítima sigue siendo limitada. Pese a los avances que han demostrado su eficacia, los modelos numéricos tradicionales continúan predominando. Este estudio presenta una metodología

Adaptación costera frente al cambio climático: Implementación de metodologías de inteligencia artificial con un enfoque probabilístico innovadora basada en IA para la adaptación de estructuras costeras al cambio climático, enfocándose en el ámbito estructural, una área aún poco explorada, ya que la mayoría de los estudios que aplican IA lo hacen para caracterizar el clima marítimo.

La metodología propuesta combina simulaciones de Monte Carlo y redes neuronales. Las simulaciones generan una base de datos sintética proyectada en los horizontes temporales 2035 y 2050, mientras que las redes neuronales procesan esta información para calcular las adaptaciones estructurales necesarias. Además, se implementaron algoritmos genéticos para optimizar el modelo, logrando una mayor eficacia y reducción de tiempos computacionales.

Este enfoque se aplicó al Dique Norte del Puerto de Valencia, en sus secciones más críticas. Los resultados indicaron incrementos de hasta 1.8 m en altura para el dique vertical y de 0.4 m en el dique compuesto, evidenciando el potencial de esta metodología híbrida en la ingeniería marítima.

Palabras clave: Cambio climático, Inteligencia Artificial, Redes Neuronales, Simulaciones de Monte Carlo, Ingeniería costera.

1. Introducción

Nuestros puertos y costas son unos de los sistemas más vulnerables al cambio climático (Antolínez et al., 2019). Las proyecciones futuras muestran un aumento significativo en los eventos climatológicos extremos, tanto en frecuencia como en intensidad (Croquer et al., 2023). Esto ha hecho que la comunidad científica dedique gran parte de sus esfuerzos en estudiar cómo el cambio climático va a afectar a nuestros sistemas portuarios y costeros. Sin embargo, gran parte de la literatura existente se centra en la evolución del litoral, mientras que los estudios sobre cómo los puertos pueden adaptarse al cambio climático son más limitados.

Además, la mayoría de estos estudios se enfocan en el análisis del clima de marítimo o en la evolución del litoral. Las investigaciones sobre la adaptación de estructuras costeras se centran principalmente en evaluar el desempeño de diversas alternativas de adaptación (Sergent et al., 2014; Sierra et al., 2017; Toimil et al., 2020; Xuan et al., 2022). Sin embargo, en lo que respecta a la adaptación estructural e hidráulica de las estructuras costeras, hay menos estudios.

Takagi et al. (2011) fueron de los primeros en evaluar el comportamiento de las estructuras costeras bajo nuevas condiciones de oleaje. Suh et al. (2012) presentaron una nueva metodología para incorporar los efectos del cambio climático en el diseño de diques. Mase et al. (2013) utilizaron un enfoque probabilístico para evaluar la estabilidad de diques compuestos, mientras que Sekimoto et al. (2013) aplicaron una metodología similar para analizar las estructuras costeras bajo escenarios de cambio climático. En los últimos años, destacan estudios como el de Formentin et al. (2021), que evaluaron el rendimiento hidráulico y estructural de la coronación de diques con muros. Allsop (2022) documentó dos casos de adaptación de diques en Reino Unido, y Radfar y Galiatsatou (2023) emplearon el análisis de valores extremos no estacionarios para desarrollar un análisis de fiabilidad de estructuras costeras.

La mayoría de las investigaciones sobre la adaptación de estructuras costeras utilizan modelos numéricos (Croquer et al., 2023; Lucio et al., 2019; Suzuki et al., 2022; Tomas et al., 2019). Los modelos numéricos son la metodología establecida en ingeniería marítima y costera. Se trata de modelos muy avanzados que ofrecen un rendimiento excepcional, pero que suelen tener un gran coste computacional.

En los últimos años, los modelos de IA han irrumpido en el ámbito científico, ganando visibilidad y demostrando un ahorro en los tiempos computacionales (Portillo Juan et al., 2023). Tras realizar una revisión bibliográfica en Web of Science utilizando las palabras clave "Artificial Intelligence" y "Machine Learning", filtrada por el campo de Ingeniería Oceánica, se comprobó una clara tendencia creciente en el tiempo en nuestro campo a la hora de implementar modelos de IA. Entre 2010 y 2013, se indexaron aproximadamente 20 estudios por año, cifra que aumentó a 50 entre 2015 y 2017. Desde entonces, el número de estudios se ha duplicado anualmente, lo que refleja una adopción acelerada de metodologías de IA entre los investigadores de ingeniería marítima y costera (Figura 1). Aquí es donde se centra nuestro estudio.

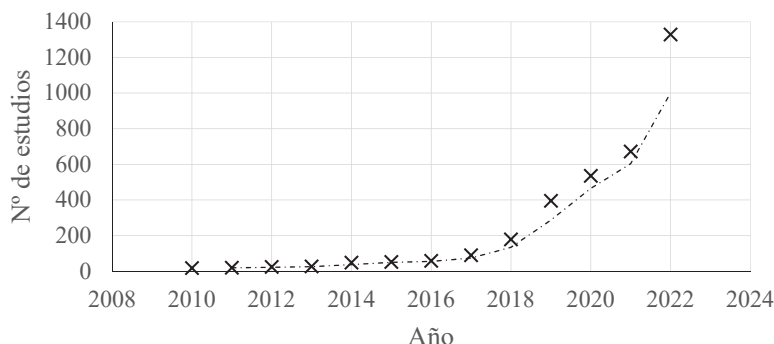


Fig. 1. Evolución del número de estudios que aplican IA en ingeniería marítima y costera.

2. Objetivos

Aunque las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) se gestaron en los años 90, su impacto en la sociedad se ha consolidado recientemente, transformando modelos, mercados y prácticas científicas. Sectores como la medicina, telecomunicaciones e ingeniería hidrológica han experimentado notables avances gracias a la implementación de la IA. Sin embargo, en la ingeniería marítima, aún persiste cierta reticencia hacia la adopción de estos modelos (Portillo Juan y Negro Valdecantos, 2022). Hasta ahora los estudios que han aplicado técnicas de IA han conseguido modelos de gran precisión, y con menos coste computacional que aplicando técnicas tradicionales (Portillo Juan et al., 2023). La gran parte de estudios de ingeniería portuaria y costera que aplican IA lo hacen para caracterizar el clima, pero su aplicación a estudios estructurales sigue siendo muy limitada.

Este estudio tiene como objetivo principal abordar este desafío, presentando una metodología alternativa basada en técnicas de IA para analizar la adaptación de estructuras costeras al cambio climático. El enfoque se aplicará al Puerto de Valencia, uno de los más importantes de España, ubicado en una región altamente vulnerable. Además, el puerto participa en el proyecto ECCLIPSE, que utiliza IA para desarrollar modelos de predicción temprana que faciliten la adaptación al cambio climático, lo que lo convierte en un entorno idóneo para la presente investigación.

3. Desarrollo de la innovación

La innovación propuesta en este estudio radica en la aplicación de técnicas de IA para analizar la adaptación de estructuras costeras frente al cambio climático, un enfoque menos explorado en ingeniería marítima y costera. En este contexto, se ha diseñado una metodología basada en modelos

de aprendizaje automático, específicamente adaptada para evaluar el rendimiento hidráulico y estructural de los diques del Puerto de Valencia bajo escenarios de cambio climático.

El presente estudio propone un modelo híbrido que integra dos enfoques complementarios: las simulaciones de Monte Carlo y las redes neuronales. Las simulaciones de Monte Carlo se utilizan para generar una base de datos que caracteriza de manera probabilística el problema, mientras que el modelo de redes neuronales se nutre de estos datos para obtener las medidas necesarias para la adaptación de las estructuras costeras al cambio climático. Este modelo híbrido busca combinar las ventajas de ambas metodologías, la capacidad de generar datos de las simulaciones de Monte Carlo, y la eficacia de explotar estos datos de la inteligencia artificial.

El primer paso en la metodología desarrollada fue la recolección y preprocesamiento de datos. Se caracterizó el clima marítimo en aguas profundas y se estudió estadísticamente para realizar proyecciones en dos horizontes temporales, 2035 y 2050. Se utilizaron los datos climáticos históricos de la boya en aguas profundas de Valencia de Puertos del Estado. Una vez estudiados los datos y caracterizados estadísticamente se procedió a realizar las simulaciones de Monte Carlo para generar una base de datos sintética de oleaje del presente al horizonte temporal 2050.

Seguidamente, se propagaron los diferentes estados del mar con el modelo numérico SWAN (Booij et al., 1999) y se realizó un estudio de todos los diques del Mar Mediterráneo para su caracterización estadística. Posteriormente, se llevaron a cabo los cálculos estructurales necesarios y se alimentó el modelo de redes neuronales. Además, con el objetivo de optimizar el modelo de redes neuronales y de reducir el tiempo computacional, se implementaron algoritmos genéticos, lo que permitió mejorar considerablemente la eficacia del proceso.

Para el desarrollo de los modelos de redes neuronales se probaron diferentes arquitecturas, algoritmos e hiperparámetros, llegando finalmente a los modelos optimizados con las características mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del modelo.

Características	Dique Vertical	Dique Compeusto
	<i>Red Neuronal</i>	
Arquitectura	[12-47-2]	[13-39-3]
Algoritmo	Levenberg–Marquardt	Levenberg–Marquardt
Funciones de transferencia	Sigmoide y lineal	Sigmoide y lineal
Nº epochs	100	100
División de datos	Aleatorio 70-15-15	Aleatorio 70-15-15
Función de pérdida	RMSE y MSE	RMSE y MSE ^{1*}
Output	SSC ^{2*} , Incremento de altura	SSC, Incremento de altura y de peso
	<i>Algoritmos Genéticos</i>	
Nº iteraciones	100	100
Tamaño población	200	200
Porcentaje Crossover	80%	80%
Porcentaje Mutación	20%	20%
Función de Selección	Roulette wheel	Roulette wheel
Normalización	Sí	Sí

^{1*}RMSE y MSE es el *Root Mean Square Error* y *Mean Square Error*, respectivamente, es decir, la raíz del error cuadrático medio y el error cuadrático medio (Ecuaciones 1 y 2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - u_i)^2} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - u_i)^2 \quad (2)$$

Donde o_i es el *output* del modelo y u_i el valor real.

^{2*} SSC son las siglas de coeficiente de seguridad al deslizamiento en inglés.

Una vez obtenidos los modelos óptimos, se procedió a su entrenamiento y validación y se aplicaron en las secciones más críticas del dique Norte de Valencia, es decir, en el morro (dique vertical) y el último tramo del tronco (dique compuesto), obteniendo los incrementos de altura y peso necesarios para la adaptación de dichas secciones al cambio climático.

4. Resultados

Las condiciones de diseño del Dique Norte de Valencia fueron $H_s=6.84$ m y $T_p=7.44$ s (Grau et al., 2012) para un periodo de retorno de 475 años. Por ello, se analizaron y calcularon las medidas de adaptación para un conjunto de estados de oleaje correspondientes a un periodo de retorno de 475 años en 2035 y 2050.

Al calcular los coeficientes de seguridad al deslizamiento, ambas secciones cumplieron con los criterios con un margen de seguridad bastante amplio, por lo que se consideró innecesario analizar estos resultados.

Por lo tanto, esta sección se centrará en las otras dos variables: el aumento de altura necesario para que las secciones cumplan con los requisitos de seguridad frente al rebase y el incremento de peso de talud en el caso del dique compuesto.

La Figura 2 muestra el aumento de la altura del dique vertical necesario para cumplir con las condiciones de diseño, representado como una función de la altura y el periodo de ola proyectados. Este aumento de altura varía desde 0 m para las condiciones de diseño iniciales hasta 1.8 m para los escenarios caracterizados por mayores alturas de ola y periodos más largos. Como se puede ver en la figura, el diseño de un dique vertical es muy sensible al periodo del oleaje. Las presiones, fuerzas, transmisión y otros fenómenos que afectan su comportamiento estructural e hidráulico dependen del periodo. Alturas de ola más altas requieren medidas de adaptación más sustanciales, pero, además, para alturas de ola menos extremas, pero acompañadas de periodos relativamente altos, son necesarios aumentos considerables en la altura del dique.

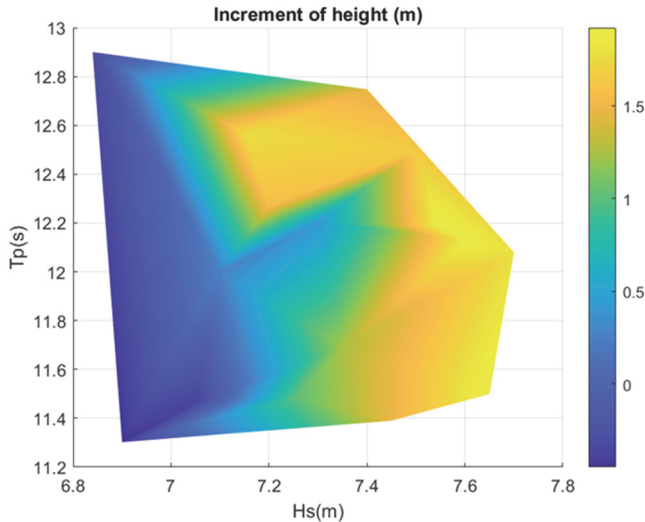


Fig. 2. Incremento de altura del dique vertical para diferentes estados de oleaje en 2035 y 2050.

La Figura 3 ilustra el escenario análogo para el dique compuesto. En este caso, la altura de la ola transmitida por el dique se representa en el eje x. Según la figura, el aumento de la altura del dique compuesto varía mucho menos con las condiciones de oleaje, manteniendo un valor consistentemente más bajo (aproximadamente 0.4 m en todos los casos). Al igual que en el dique vertical, el periodo de oleaje juega un papel crucial en la definición del diseño de un dique compuesto. Considerar el periodo de oleaje es igualmente crucial para calcular la adaptación, de diques compuestos, particularmente cuando se trata de periodos más largos acompañados de olas de tamaño medio, las cuales generalmente requieren medidas de adaptación más robustas.

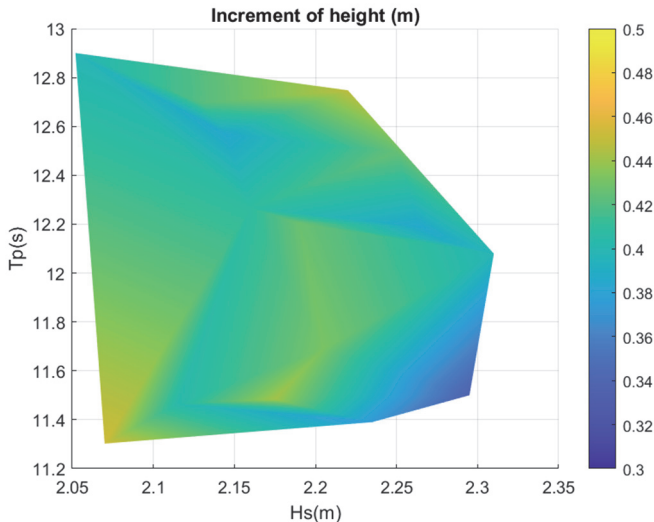


Fig. 3. Incremento de altura del dique compuesto para diferentes estados de oleaje en 2035 y 2050.

En la Figura 4, se muestra el incremento de peso necesario para cumplir con los estándares de seguridad, determinado mediante el cálculo de la variable daño de los bloques N_{od} . Dependiendo de las condiciones de oleaje prevalentes, los ajustes al dique compuesto pueden requerir aumentos de peso de hasta 1 tonelada. Nuevamente, especialmente críticas son las alturas y los periodos de oleaje altos, como se ilustra en el área amarilla en la esquina superior derecha de la figura.

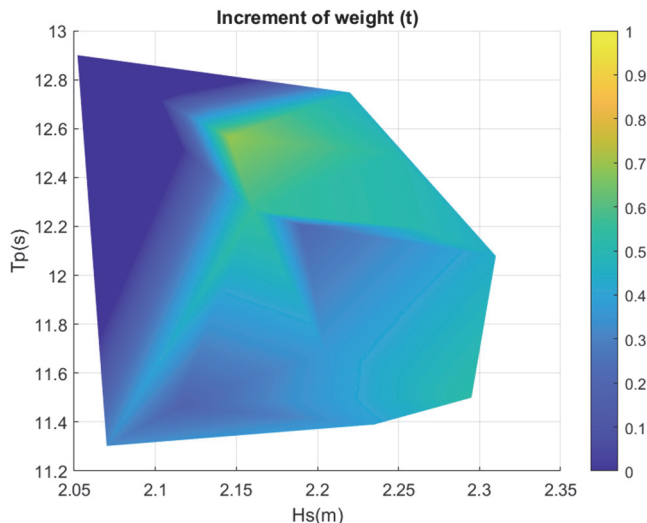


Fig. 4. Incremento del peso del dique compuesto para diferentes estados de oleaje en 2035 y 2050.

Los resultados derivados de la aplicación de los dos modelos al Puerto de Valencia resaltan la necesidad de desarrollar planes de adaptación para las estructuras costeras frente al cambio climático. Eventos climatológicos extremos como la Tormenta Emma en 2018, Gloria en 2020 o Filomena en 2021 destacan la importancia crítica de alinear nuestras estructuras con las nuevas condiciones climáticas. Con los eventos climatológicos extremos aumentando en frecuencia e intensidad anualmente, las repercusiones económicas y sociales también lo están haciendo. Para evitar consecuencias más graves, es fundamental realizar estudios exhaustivos de las estructuras situadas a lo largo de la costa mediterránea. Este estudio revela la necesidad de aumentar la altura de coronación hasta 1.8 m en la sección del morro del Dique Norte del Puerto de Valencia y aumentar el peso de la sección compuesta. La implementación de estas medidas de adaptación requiere realizar un análisis y evaluación de diferentes alternativas, lo que requiere un estudio detallado del área de Valencia. Las diferentes alternativas incluyen aumentar la altura de coronación del dique, añadir más bloques al revestimiento, construir un dique arrecife o explorar soluciones basadas en la naturaleza, como la utilización de praderas de posidonia, que generan efectos equivalentes. Las futuras líneas de investigación deberían centrarse en examinar estas diversas alternativas, con el objetivo de encontrar la solución óptima para el Puerto de Valencia.

5. Conclusiones

La IA es uno de los grandes temas y tecnologías de la sociedad actual. En diferentes disciplinas científicas están surgiendo diversos modelos que están demostrando la eficacia de esta técnica y a su vez están haciendo una gran competencia a los modelos tradicionales. Aunque los modelos basados en IA han logrado avances significativos en numerosos campos, el ámbito de la ingeniería marítima y costera parece estar algo rezagado. El potencial de los modelos impulsados por IA es

altamente prometedor, mostrando ventajas en eficiencia computacional, precisión y rendimiento general. Dado el carácter transformador de estos avances, es muy importante que nuestro campo no se quede atrás. Adoptar la IA en nuestra disciplina es fundamental para mejorar los modelos ahora, y sobre todo, en un futuro. Este artículo presenta una propuesta inicial de una metodología basada en IA para adaptar las estructuras costeras al cambio climático, utilizando redes neuronales y algoritmos genéticos.

El modelo se ha aplicado y validado en el Puerto de Valencia. En el caso específico del Dique Norte del Puerto de Valencia, se recomienda aumentar la altura de coronación hasta 1.8 m en la sección del morro (dique vertical) y aproximadamente 0.4 m en el tramo cuatro de la sección del tronco (dique compuesto) para alinear ambas secciones con las demandas del cambio climático. Además, sería necesario el refuerzo del manto en el caso del dique compuesto.

Referencias bibliográficas

- ALLSOP, W. (2022). Climate Change Threats to Two Breakwaters [Article]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), Article 1613. <https://doi.org/10.3390/jmse10111613>
- ANTOLÍNEZ, J. A. A., MÉNDEZ, F. J., ANDERSON, D., RUGGIERO, P., y KAMINSKY, G. M. (2019). Predicting Climate-Driven Coastlines With a Simple and Efficient Multiscale Model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(6), 1596-1624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018JF004790>
- BOOIJ, N., RIS, R. C., y HOLTHUIJSEN, L. H. (1999). "A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- CROQUER, S., DIAZ-CARRASCO, P., TAMIMI, V., PONCET, S., LACEY, J., y NISTOR, I. (2023). Modelling wave-structure interactions including air compressibility: A case study of breaking wave impacts on a vertical wall along the Saint-Lawrence Bay *Ocean Engineering*, 273, Article 113971. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113971>
- FORMENTIN, S. M., PALMA, G., y ZANUTTIGH, B. (2021). Integrated assessment of the hydraulic and structural performance of crown walls on top of smooth berms. *Coastal Engineering*, 168, 103951. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103951>
- GRAU, J. I., BURGOS, M. A., BARQUÍN, G. G., CARVAJAL, A. L., y ALBIACH, J. C. C. (2012). *Diques de Abrigo en los puertos de interés general del Estado* (P. d. Estado, Ed.).
- LUCIO, D., LARA, J., TOMAS, A., y LOSADA, I. J. (2019). *Probabilistic hydraulic design of non-conventional breakwaters in shallow water conditions*. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_027
- MASE, H., TSUJIO, D., YASUDA, T., y MORI, N. (2013). Stability analysis of composite breakwater with wave-dissipating blocks considering increase in sea levels, surges and waves due to climate change. *Ocean Engineering*, 71, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.037>
- MATHWORKS. (2021). *MATLAB version: 9.11.0 (R2021b)*. In Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. . <https://www.mathworks.com>
- PORTILLO JUAN, N., y NEGRO VALDECANTOS, V. (2022). "Review of the application of Artificial Neural Networks in ocean engineering." *Ocean Engineering*, 259, 111947. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111947>
- PORTILLO JUAN, N., OLALDE RODRÍGUEZ, J., NEGRO VALDECANTOS, V., y IGLESIAS, G. (2023). "Data-driven and physics-based approach for wave downscaling: A comparative study." *Ocean Engineering*, 285, 115380. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115380>

- RADFAR, S., y GALIATSATOU, P. (2023). Influence of nonstationarity and dependence of extreme wave parameters on the reliability assessment of coastal structures-A case study. *Ocean Engineering*, 273, Article 113862. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113862>
- SEKIMOTO, T., ISOBE, M., ANNO, K., y NAKAJIMA, S. (2013). A new criterion and probabilistic approach to the performance assessment of coastal facilities in relation to their adaptation to global climate change. *Ocean Engineering*, 71, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.01.032>
- SERGEANT, P., PREVOT, G., MATTAROLO, G., BROSSARD, J., MOREL, G., MAR, F., BENOIT, M., ROPERT, F., KERGADALLAN, X., TRICHET, J.-J., y MALLET, P. (2014). Adaptation of coastal structures to mean sea level rise. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, 6, 54-61. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014063>
- SIERRA, J. P., GARCIA-LEON, M., GRACIA, V., y SANCHEZ-ARCILLA, A. (2017). Green measures for Mediterranean harbours under a changing climate. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, 170(2), 55-66. <https://doi.org/10.1680/jmaen.2016.23>
- SUH, K.-D., KIM, S.-W., MORI, N., y MASE, H. (2012). Effect of Climate Change on Performance-Based Design of Caisson Breakwaters. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering-asce*, 138. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)jww.1943-5460.0000126](https://doi.org/10.1061/(asce)jww.1943-5460.0000126)
- SUZUKI, T., GARCIA-FEAL, O., DOMINGUEZ, J. M., y ALTOMARE, C. (2022). Simulation of 3D overtopping flow-object-structure interaction with a calibration-based wave generation method with DualSPHysics and SWASH [Article]. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 1003-1015. <https://doi.org/10.1007/s40571-022-00468-8>
- TAKAGI, H., KASHIHARA, H., ESTEBAN, M., y SHIBAYAMA, T. (2011). Assessment of future stability of breakwaters under climate change. *Coastal Engineering Journal*, Vol.53, 21p.
- TOIMIL, A., LOSADA, I. J., NICHOLLS, R. J., DALRYMPLE, R. A., y 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/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103611>
- TOMAS, A., ALVAREZ DE EULATE, M., BARAJAS, G., LARA, J., LOSADA, I., SEGOVIA, M., y FRANCISCO, E. (2019). *A New Methodology to Simulate Three-DimensionalHydraulic Loads on a Vertical Breakwater along its LifeCycle*. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_023
- XUAN, T. L., BA, H. T., THANH, V. Q., WRIGHT, D. P., TANIM, A. H., y ANH, D. T. (2022). Evaluation of coastal protection strategies and proposing multiple lines of defense under climate change in the Mekong Delta for sustainable shoreline protection. *Ocean & Coastal Management*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106301>

Análisis de tráfico marítimo en la demarcación levantino Balear y en la demarcación Marina Canaria año 2022

Maritime Traffic in the Levantine Balear Region and in Canary Marine Region 2022

Marta Susana Jiménez Saavedra^a, José María Grassa Garrido^a, Elvira M. García-Bellido^b

^aCentro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), Madrid, ; ^bMinisterio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD); marta.jimenez@cedex.es; jose.m.grassa@cedex.es emgbellido@miteco.es

How to cite: Jiménez Saavedra, M. S.; Grassa Garrido, J. M. & García Bellido, E. M. (2024). Análisis de tráfico marítimo en la demarcación levantino Balear y en la demarcación Marina Canaria año 2022. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

The progress in adopting measures to mitigate collisions between ships and cetaceans is a constant priority for the parties involved. Scientific communities organize sighting campaigns, focusing on the most vulnerable species, to better determine their location. Meanwhile, maritime traffic studies focus on specific areas or vessels whose characteristics increase the risk of accidents. This study analyzes maritime traffic in two key areas considered priority habitats for these species “Canary Marine Region” and “Levantine Balear Region” and within the latter, the Ibiza Channel and the Mallorca Channel.

Keywords: *Maritime traffic, collision, strike, hazard.*

Resumen

El avance en medidas para mitigar colisiones entre buques y cetáceos es una prioridad constante para las partes implicadas. Las comunidades científicas organizan campañas de avistamiento, centradas en las especies más vulnerables, para determinar mejor su localización. Por su parte, los estudios de tráfico marítimo se enfocan en áreas específicas o en buques cuyas características incrementan el riesgo de accidentes. Este estudio analiza el tráfico marítimo en dos áreas clave consideradas hábitats prioritarios para estas especies, la demarcación marina canaria y dentro de la demarcación levantino balear, las aguas del mar Mediterráneo delimitadas por el canal de Ibiza y el canal de Mallorca.

Palabras clave: *tráfico marítimo, colisión, peligrosidad, riesgo.*

1. Introducción

Los estudios de tráfico marítimo tienen aplicaciones clave en diversas áreas entre las que destacan la seguridad marítima, la gestión del tráfico, la planificación portuaria y la gestión medioambiental. Dentro de esta última un aspecto que ha cobrado especial interés en los últimos años es el impacto de las colisiones de buques con cetáceos, particularmente con especies cuyas características físicas, como su gran tamaño las hacen especialmente vulnerables. Estas colisiones sumadas a las perturbaciones acústicas provocadas por el tráfico marítimo representan una amenaza significativa para estas especies.

En la edición anterior, se presentó un estudio que analizaba este impacto en una zona marina protegida, el Corredor de Migración de Cetáceos del Mediterráneo, en esta área se constató la presencia de grandes cetáceos como el rorcual común (*Balaenoptera physalus*) y el cachalote (*Physeter macrocephalus*). Las comunidades científicas de expertos promueven y planifican con detalle las campañas de avistamientos de estas especies con especial énfasis en aquellas más vulnerables con el fin de ayudar a precisar su localización. En las XVII Jornadas de Puertos y Costas se ha dado un paso adelante en los estudios de navegación marítima, abordando un análisis detallado del tráfico marítimo en áreas específicas que forman parte del hábitat de estas especies, la demarcación marina canaria y dentro de la demarcación levantino balear las aguas del mar Mediterráneo delimitadas por el canal de Ibiza y el canal de Mallorca. El trabajo se realizó por encargo de la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación (DGBBD) del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD), en el marco del correspondiente encargo.

2. Objetivos

El objeto de este trabajo es analizar el tráfico marítimo en un entorno de las islas Baleares y en la demarcación marina canaria. Este análisis junto con el levantamiento de las campañas de información relativas a la biodiversidad constituye la base de partida para la elaboración de un conjunto de medidas que permitan mitigar las colisiones entre buques y cetáceos. En este sentido el análisis se aborda desde la perspectiva de riesgos asociados al transporte marítimo y los resultados que se obtienen se complementan con un análisis de la peligrosidad que dicho tráfico puede representar para los cetáceos.

3. Desarrollo de la innovación

La metodología aplicada se basa en realizar una aproximación al análisis cuantitativo y estructural del tráfico marítimo a partir de registros de mensajes AIS (Automatic Information System) que emiten los barcos en ruta. La evaluación del tráfico de forma estructural emplea como dimensión principal las relaciones entre puertos origen y destino de cada viaje.

De forma muy esquemática el análisis se inicia con la obtención de los datos Ais de posición/estáticos dentro de la región de interés y periodo de estudio definido. Estos datos se componen para cada barco en una o varias trazas, secuencias continuas de desplazamiento y escalas dentro de la región. Estas trazas a su vez se descomponen en viajes entre puertos. Una vez realizada esa descomposición es posible realizar estudios agrupados por ruta, por tipo de barco por época... etc y llevar a cabo mapeados de densidad de tráfico marítimo, expresada en km de recorrido por unidad de superficie km², asociada a esas rutas. Una vez cuantificado el tráfico bajo esta magnitud, se puede abordarse la peligrosidad sobre la misma cartografía utilizada para el cálculo de la densidad evaluado de acuerdo con la formulación de Vanderlaan y Taggart (2007) que evalúa la probabilidad de efectos letales de una colisión como función de la velocidad del barco y recogida bajo el denominado Índice de peligrosidad.

4. Resultados

DEMARCACIÓN LEVANTINO BALEAR (DLB)

La figura 4.1 muestra las zonas o áreas de estudio bajo este apartado, la demarcación levantino balear como región principal, y dentro de ésta dos subregiones, canal de Ibiza y canal de Mallorca, proporcionadas por el equipo que lleva a cabo el levantamiento de información relativo a la biodiversidad.

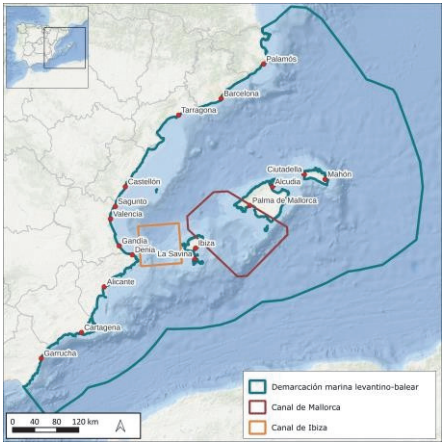


Fig. 4.1 Áreas de estudio DLB, Canal de Ibiza, Canal de Mallorca

La información de partida previa a la agregación de mensajes está constituida por el número de mensajes y buques registrados en la zona y periodo de estudio, así la tabla 4.1 muestra el número de buques registrados en la demarcación para los años indicados.

Tabla 4.1 N° buques registrados DLB

Año	Recreo	Alta velocidad	Pasaje	Mercantes	Tanques	Totales
2019		30	270	3 591	1 968	5 859
2021		31	249	3 534	1 907	5 721
2022	868	34	281	3 615	2 197	6 995

Con la metodología anterior y a partir de la agregación de los mensajes y la constitución de las trazas de los buques en trayectos, puede extraerse la información relativa a los viajes, por ejemplo, una relación de orígenes y destinos (O/D).

Tabla 4.2 Relación de viajes O/D en la DLB 2022

OD	Aldúia	Barcelona	Cartagena	Denia	Eivissa	Gandia	La Savina	Palma	Tarragona	Valencia	Rumbo NE	Rumbo E	Rumbo SW	Rumbo N	Total
Aldúia	22	517	9	2	3			16	6		97	22	31	17	742
Barcelona	460	989	75		711			1 271	186	1 026	1 156	736	1 403	262	8 275
Cartagena	23	59	1 307	1	11	1		29	149	138	92	368	996	59	3 233
Denia	3	1	2	324	475	7	275	9		12	1	4	11	5	1 129
Eivissa	4	677	14	478	3 935	2	17 588	742	8	1 023	70	53	40	85	24 719
Gandia			2	8		20			16	8	11	18	10	4	97
La Savina				273	17 705		669	2			1			62	18 712
Palma	19	1 239	31	8	783	2	2	687	11	1 231	298	204	150	110	4 775
Tarragona	4	243	122		2			17	274	64	212	322	822	72	2 154
Valencia	5	710	79	12	895	10	1	1 311	117	1 121	398	524	1 547	50	6 780
Rumbo NE	32	1 230	965	10	44	47	2	176	698	1 057	2 396	247	134	436	7 474
Rumbo E	1	12		2	20			26	3	1	50	635	13	10	773
Rumbo SW	58	1 491	80	3	93	1	25	240	235	458	29	33	2 173	27	4 946
Rumbo N	8	231	103	9	104	4	124	110	113	165	158	31	33	4 572	5 765
Total	639	7 399	2 789	1 130	24 781	94	18 686	4 636	1 816	6 304	4 969	3 197	7 363	5 771	89 574

La tabla 4.2 recoge una síntesis de los datos más representativos, es decir, aquellas columnas que presentaron un valor superior a 2000 viajes indicativo de un tráfico numeroso, excepcionalmente se incluye Denia y Gandía. Este tráfico representa aproximadamente un 80% de los viajes realizados en el año 2022.

El análisis del conjunto de datos tabulados, focalizado en los puertos de las islas Baleares y sus conexiones con la península, proporciona los siguientes resultados:

El número total de viajes en el interior de la DLB durante el año 2022 fue de 112.741 viajes incluyendo la categoría de los buques de recreo. Los puertos de Eivissa y Palma experimentan un crecimiento muy notable de sus tráficos. El tráfico de tránsito se mantiene estable alrededor del 25%. Tras el año 2021 se reactiva la conexión Palma-Barcelona. El puerto de Valencia sigue manteniendo una cuota de actividad muy considerable centrada en las rutas con destino Palma, Eivissa y dirección SW.

La tabla 4.3 muestra para cada categoría de buque el número de viajes realizados en la demarcación a lo largo de los años 2019, 2021 y 2022, la velocidad media empleada en esos viajes y la distancia media recorrida. El descenso en el número de viajes entre los años 2019 y 2021 se recupera en el año 2022.

Tabla 4.3 N° total buques por categoría, distancia media recorrida y velocidad media

Tipo de buque	N° total viajes			Distancia Media (millas n)			Velocidad media (nudos)		
	2019	2021	2022	2019	2021	2022	2019	2021	2022
Recreo			8 612			77.8			7.7
Alta Velocidad	19 104	15 821	18 057	17.5	19.6	17.5	22.9	23	22.3
Pasaje	44 486	36 240	46 144	55.6	53.2	60.4	20.6	19	19.5
Mercantes	31 100	29 150	27 536	184.6	183.3	186.2	12.9	13.2	13.2
Tanques	11 574	12 222	12 392	193.2	186.3	192.2	12	12.1	11.6
Total viajes	106 264	93 433	112 741						

Destacan los siguientes resultados:

Resulta muy notable el progreso experimentado por la categoría de los buques de pasaje, con un total de 46.144 viajes. Los valores correspondientes a la velocidad se mantienen en los habituales para cada categoría de buque, por otro lado, las diferencias que se obtienen para los valores de las distancias medias recorridas (a excepción del recreo son poco significativas). El mapa de densidad de tráfico marítimo (figura 4.2) correspondiente a los viajes llevados a cabo en la DLB visualiza el crecimiento experimentado entre los años 2021 y 2022.

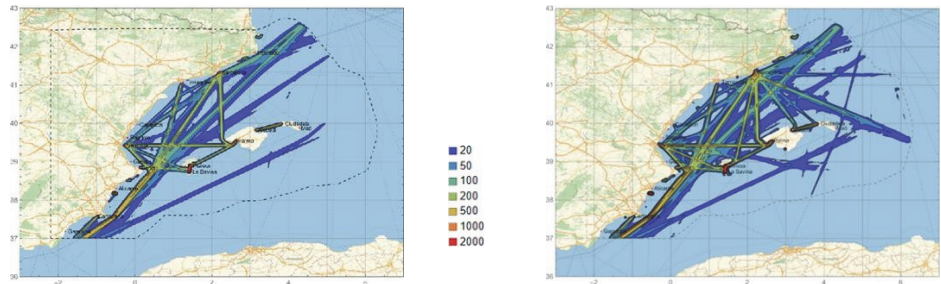


Fig.4.2 Mapas de densidad de tráfico marítimo (km/km2) en la DLB 2021 / 2022

IBIZA

El canal de Ibiza se presenta como una subregión dentro de la demarcación levantino balear entre el este peninsular, cabo de la Nao y la isla de Ibiza. Las características generales del tráfico por categoría de buque son las que se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 N° viajes por categoría de buque canal de Ibiza 2022

Año	Recreo	Alta Velocidad	Pasaje	Mercantes	Tanques	Total
2022	601	903	3 997	10 026	4 464	19 991

El número de viajes en esta área es de 19.991 representando un 17,8% del tráfico de la demarcación. Dicho tráfico presenta un fuerte carácter de tránsito pues solamente los viajes correspondientes a las categorías de mercantes y buques tanque suponen el 72% del total.

La totalidad de los viajes 19.991 a lo largo del 2022 se distribuyen de acuerdo con los pares de valores que unen origen con destino. El análisis de resultados de estos valores pone de manifiesto:

El grueso viene recogido por los viajes asociados al tránsito, sin origen o destino en puertos de la demarcación, con un total de 9.558 que representa el 47,8%, este dato confirma la importancia del tráfico de tránsito que caracteriza la zona. Un tercio del tráfico del puerto de Valencia está constituido por los viajes que tienen como destino Eivissa. Esta ruta en sus dos sentidos supone un 9,5% sobre el total de viajes en el canal y si a ello se añaden los viajes con origen/ destino en Denia desde/hacia Eivissa el porcentaje aumenta, es decir, Eivissa ejerce un efecto “polo” de atracción y generación de viajes sobre los puertos de Denia y Valencia. Desde el puerto de Denia otra ruta con menor peso pero que genera más de un viaje al día es la conexión Denia-La Savina. Una vez identificados los viajes más frecuentes se elaboran los mapas de densidad, correspondientes a cada categoría de buque que se muestran a continuación, con sus correspondientes escalas colorimétricas:

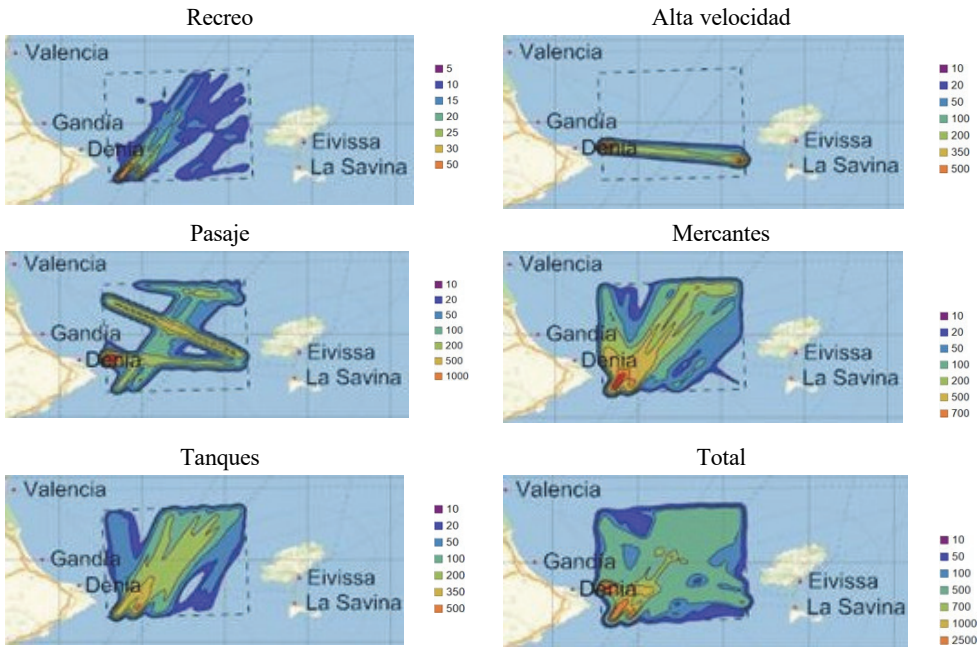


Fig.4.3 Mapas de densidad de tráfico marítimo (km/km²) canal de Ibiza 2022

La última figura resulta de la agregación de las anteriores en una única malla, dando como resultado zonas críticas en las que se producen mayores densidades de tráfico, próximas al Cabo de la Nao, en las inmediaciones al puerto de Denia y en el dispositivo de separación de tráfico, coincidiendo con el cuadrante inferior izquierdo de la zona de estudio. La elaboración del mapa del índice de peligrosidad correspondiente al tráfico total se muestra en la figura 4.4 concentrando los mayores valores de este índice en las zonas recientemente mencionadas

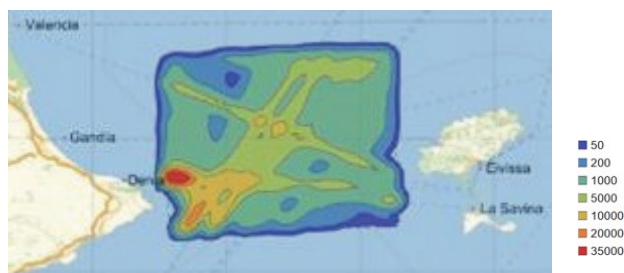


Fig.4.4 Mapa de densidad Índice de peligrosidad Ibiza 2022

MALLORCA

Otra región de interés en este estudio es la situada entre Mallorca y las islas de Ibiza y Formentera denominada canal de Mallorca. Bajo la superficie de estas aguas se encuentran un conjunto de montañas submarinas responsables del mantenimiento de una compleja cadena alimentaria. Las corrientes marinas, unidas a los cambios con la profundidad hacen de estas aguas un lugar idóneo como hábitat para una variedad de especies.

El tráfico que afecta a esta zona se analiza en base al polígono de la figura 4.1. Tras la aplicación de la metodología expuesta anteriormente y siguiendo un esquema similar al planteado en el canal de Ibiza se expone a continuación un breve análisis de los resultados obtenidos:

Los primeros datos analizados muestran que de los 112.741 viajes llevados a cabo en la demarcación en el año 2022 un 16,4% atraviesa el canal de Mallorca, con un total de 18.162 viajes. De todos ellos un 47,7% corresponde a viajes realizados por los buques de pasaje, seguidos con un 22% de viajes realizados por mercantes y un 22% de viajes de recreo; en menor proporción figuran los viajes correspondientes al tránsito de buques tanque y a la alta velocidad. El número de viajes registrados por tipología de buques en esta segunda zona es la que se muestra a continuación:

Tabla 4.5 N° viajes por categoría de buque canal de Mallorca 2022

Año	Recreo	Alta Velocidad	Pasaje	Mercantes	Tanques	Total
2022	4 075	176	8 805	4 219	1 187	18 462

Del análisis obtenido puede deducirse que la caracterización del tráfico en esta zona es muy diferente a la presentada para el canal de Ibiza. El pasaje es prácticamente el responsable de casi la mitad del tráfico en esta zona con una marcada presencia de los viajes asociados al recreo siendo mucho menos importante el tráfico ocasionado por la alta velocidad y los buques tanque.

La totalidad de los viajes a lo largo del año 2022, 18.462 viajes, se distribuyen de acuerdo con los pares de valores que unen origen con destino. El análisis de resultados de estos valores pone de manifiesto:

Un 94.6% de los viajes que salen de Barcelona tienen destino en las islas Baleares, afectando en sus tramos finales al canal definido. De aquellos viajes con origen en el puerto de Valencia, los viajes hacia Palma y Eivissa suponen el 70%, y la navegación de tránsito que atraviesa directamente el canal en dirección W-E desde el puerto de Valencia supone un 3.1% sobre el total de viajes en el canal. Una vez identificados los viajes más frecuentes se elaboran los mapas de densidad, correspondientes a cada categoría de buque que se muestran a continuación, en este caso todas las figuras presentan la misma escala colorimétrica:

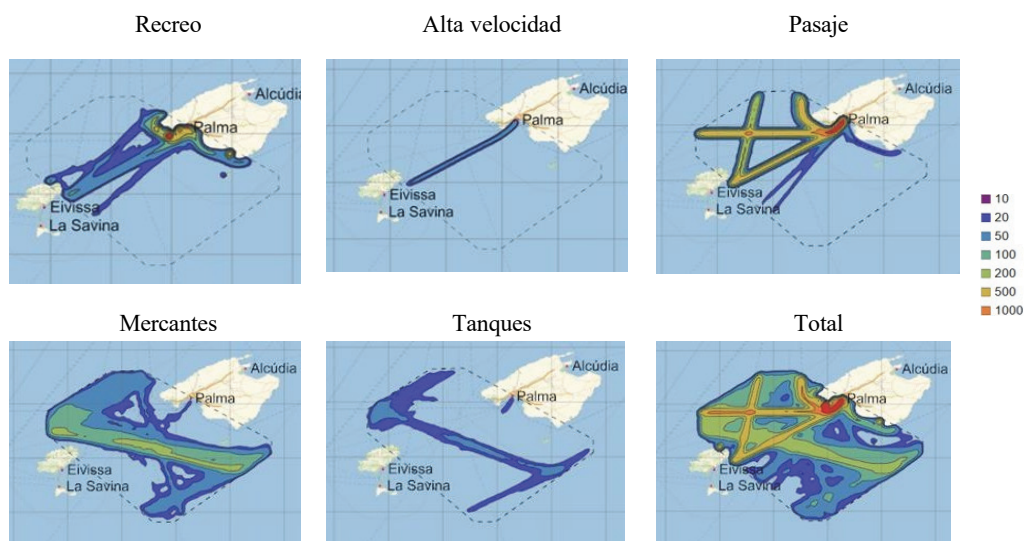


Fig. 4.5. Mapas de densidad de tráfico marítimo por categoría de buque (km/km²) 2022

La última figura resulta de la agregación de las anteriores en una única malla, dando como resultado una zona crítica en las proximidades al puerto de Palma, que concentra todos los tráficos. Le siguen las rutas de pasaje con origen o destino en Palma y muy por debajo, los tránsitos dirección este-oeste. La elaboración del mapa del índice de peligrosidad correspondiente al tráfico total se muestra en la figura 4.6 que guarda similitud con su correspondiente mapa de densidad de tráfico marítimo, arrojando una zona crucial en las inmediaciones del puerto de Palma, y de menor intensidad en las rutas ya comentadas y en los corredores de tránsito.



Fig. 4.6. Mapa de densidad Índice de peligrosidad Mallorca 2022

DEMARCAION MARINA CANARIA

Con el fin de elaborar un conjunto de medidas para mitigar las colisiones entre buques y grandes cetáceos se lleva a cabo un estudio de tráfico marítimo similar en la demarcación marina canaria.

Durante el año 2022, se registraron un total de 7.270 buques (tabla 4.6), que aportaron un conjunto de 4.682.366 registros en la demarcación marino-canaria. El análisis de los datos, para esta área, arroja un elevado número de registros y buques para la categoría de buques mercantes (46,7% y 66,3% respectivamente), que unidos a los resultados de los buques tanque, 26% de registros y 27,3% de buques, implican una enorme actividad de estos barcos en la demarcación. El número de embarcaciones destinadas a tráfico de pasajeros es bastante inferior.

Tabla 4.6 *Tráfico Demarcación marina canaria 2022*

	Recreo		Alta velocidad		Pasaje		Mercantes		Tanques		Totales
	Total	(%)	Total	(%)	Total	(%)	Total	(%)	Total	(%)	
Nº Registros	261 842	5.6	353 535	7.6	659 642	14.0	2 185 599	46.7	1 221 748	26.1	4 682 366
Nº buques	267	3.7	12	0.2	179	2.5	4 823	66.3	1 989	27.3	7 270

El análisis detallado de los viajes que se llevan a cabo entre los distintos puertos canarios considerados presenta los siguientes resultados:

En el año 2022 se llevaron a cabo un total de 68.009 viajes en esta demarcación. El conjunto de todos los viajes en tránsito representa el 32% de los viajes totales, es decir, aproximadamente uno de cada tres viajes que se llevan a cabo en esta demarcación es un viaje sin origen ni destino dentro de la misma. Las direcciones con viajes más cuantiosos presentan componente N y NE, junto con S y SW, direcciones congruentes con la disposición geográfica de las islas.

El tráfico originado por los puertos de Corralejo y Playa Blanca representa un 21% sobre el total de viajes, si bien es cierto que la distancia entre ambos puertos es pequeña no deja de ser un elevado número de viajes, uno de cada cinco corresponde a este trayecto. El tráfico ocasionado por los puertos de Las Palmas y Santa Cruz de Tenerife representa respectivamente un 28% y 20,1% sobre el total de viajes. El 65% del tráfico que tiene destino en Las Palmas (9.538 viajes) procede de las conexiones con el puerto de Santa Cruz de Tenerife, Morro Jable, Arrecife y los viajes de procedencia S-SW. El 82% del tráfico que tiene destino en Tenerife (6.832 viajes), procede de los puertos de Agaete 36%, Las Palmas 32% y del SW un 13%.

En la distribución de viajes por categoría de buque el grueso de viajes se reparte con cifras muy similares entre la alta velocidad 29,6%, el pasaje 26,8% y los buques mercantes 30,8%, si bien la distancia media asociada a cada uno de esos viajes es diferente. Los viajes asociados a los buques tanque implican el 11,5% y los buques de recreo se apropian tan solo del 1,2% del tráfico con distancias medias próximas a las 147 millas náuticas (tabla 4.7).

Tabla 4.7 *Nº total buques por categoría, distancia media recorrida y velocidad media*

Tipo de buque	Nº total viajes	Distancia Media (millas n)	Velocidad media (nudos)
Recreo	810	147.4	9.3
Alta Velocidad	20 162	30.8	27.4
Pasaje	18 239	39.5	19.2
Mercantes	20 957	191.4	13.1
Tanques	7 841	205.8	11.7

Una vez identificados los viajes más frecuentes se elaboran los mapas de densidad, correspondientes a cada categoría de buque, la agregación de todos ellos da como resultado la imagen de la figura 4.7 que se muestran a continuación, junto a ella, la correspondiente al índice de peligrosidad:

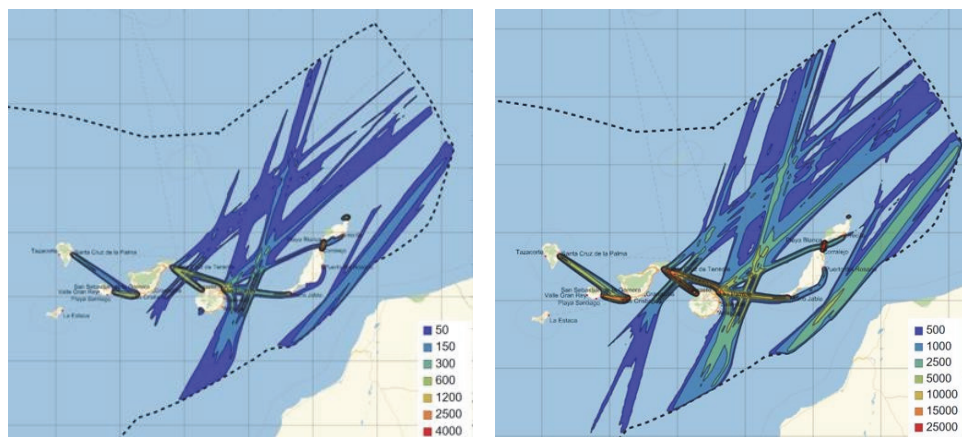


Fig. 4.7. Mapas de densidad de tráfico marítimo (km/km^2) e Índice de peligrosidad 2022

En la última figura se identifican como áreas con elevado índice de peligrosidad las inmediaciones de los puertos de Santa Cruz de Tenerife, Los Cristianos y Las Palmas; así como las rutas o trayectos siguientes: Corralejo-Playa Blanca, Santa Cruz de Tenerife-Agaete, Santa Cruz de Tenerife-Las Palmas, San Sebastián de la Gomera-Los Cristianos o Arrecife-Morro Jable entre otros.

5. Conclusiones

La navegación en la **Demarcación Levantino-Balear** define el marco general en el que se desarrolla el tráfico marítimo, afectando directa e indirectamente al entorno de las Islas Baleares. Durante el año 2022, se observó una tendencia al alza en comparación con 2021, siendo esta la principal conclusión del análisis. Además, la zona se caracteriza como un corredor de tránsito marítimo, principalmente debido al tráfico de buques mercantes y tanqueros, que en conjunto representan más del 80% del volumen total de tráfico marítimo en la región.

En el **canal de Ibiza** la navegación por buques catalogados como alta velocidad cubren las rutas desde Denia hacia Ibiza y La Savina, mientras que los buques mercantes y tanqueros colonizan fundamentalmente el tráfico de tránsito. Otras rutas con importante densidad de tráfico marítimo son las efectuadas por los buques de pasaje desde Valencia o Dénia hacia/desde Ibiza, así como el corredor NE/SW en las inmediaciones al puerto de Denia. Como consecuencia las zonas o áreas que presentan los mayores valores del índice de peligrosidad se ubican en el cuadrante suroeste del polígono que define el canal de Ibiza, es decir, en las proximidades del puerto de Denia y en el dispositivo de separación de tráfico.

En el área definida por el **canal de Mallorca** el análisis de la densidad de tráfico marítimo para la categoría de recreo pone de manifiesto la enorme tradición náutica que existe en la isla, así la costa que se extiende desde el sur cabo Salinas hacia el oeste junto con la conexión de Palma e Ibiza son las que presentan mayores valores de densidad de tráfico marítimo. El pasaje es responsable de casi la mitad de los viajes que se llevan a cabo, las rutas de Palma con Barcelona, Valencia e Ibiza se muestran como zonas de alta densidad de tráfico después de la confluencia en las inmediaciones al propio puerto. Como consecuencia final, las zonas que reflejan mayores índices de peligrosidad quedan ubicadas próximas al puerto de Palma en las rutas comentadas y en los corredores de tránsito.

La **Demarcación Marina Canaria** es una demarcación extensa caracterizada por una enorme actividad de buques mercantes y tanques, cuyos viajes asociados revela que los puertos canarios participan en muchas escalas que forman parte de rutas internacionales hacia/desde la península desde/hacia Europa/ u otros destinos como África o América, además de constituirse como zona de tránsito. Dada la extensión de esta demarcación la densidad de tráfico marítimo depende de la categoría de buque considerada, los focos principales se ubican en las inmediaciones de los puertos de Santa Cruz de Tenerife, Los Cristianos, y Las Palmas, así como las rutas Playa Blanca- Corralejo o Santa Cruz de Tenerife-Agaete, zonas en las que también se presenta un elevado índice de peligrosidad.

En todos los casos estudiados los análisis se realizan con el fin último de ayudar en la toma de posibles medidas de protección que mitiguen los efectos de colisiones entre barcos y cetáceos. Los indicadores espaciales de potencial peligrosidad obtenidos han de interpretarse desde un punto de vista cualitativo, destinados a identificar aquellas áreas más conflictivas desde el punto de vista del tráfico marítimo, pues los valores cuantitativos obtenidos responden a la propia dinámica del tráfico marítimo y como tales no permanecen constantes a lo largo del tiempo

Referencias

- ITU. RECOMENDACIÓN ITU-R M.1371-5. (2015) *Características técnicas de un sistema de identificación automático mediante acceso múltiple por división en el tiempo en la banda de ondas métricas del servicio móvil marítimo*
- VAES, T., DRUON, J.N. (2013). Mapping of potential risks of ship strike with fin whales in the western mediterranean whales. *Ecosphere* Vol. 4(4) art 43
- VANDERLAAN, A.S.M., TAGGART, C.T. (2007). Vessels collisions with whales: the probability of lethal injury based on vessel speed., *Marine Mammals Science*. 23(1) :144-156

Proyecto “Bosque Marino Autoridad Portuaria de Cartagena. 2022-2025”

Alberto Echeita Diez

Eurofins Munuera S.L.U, Consultoría Ambiental Marina, Murcia, España, ecomarina@laboratoriosmunuera.es

How to cite: Echeita Diez, A. (2024). Proyecto “Bosque Marino Autoridad Portuaria de Cartagena. 2022-2025”. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

1. Introducción

Eurofins Munuera inicia en 2022 el Proyecto de “Bosque Marina de la Autoridad Portuaria de Cartagena”, integrado dentro del contrato de “Control de la Calidad de Aguas” de la Autoridad Portuaria de Cartagena, en el que se realizan toda una serie de controles periódicos asociados a la calidad de las aguas, sedimentos y comunidades marinas durante los últimos 10 años, resultados que abalan las muy buenas condiciones ambientales y de calidad del entorno, y por lo tanto, la viabilidad de restauración ambiental con fragmentos de *Posidonia oceanica*, de aquellas zonas potenciales para el desarrollo de Praderas de Fanerógamas Marinas.

El Proyecto se desarrolla íntegramente en Zona 1 de la Autoridad Portuaria de Cartagena, siendo ésta la primera vez que se ha llevado a cabo un proyecto de esta índole en aguas de un puerto industrial con las características del puerto de Cartagena, 1er puerto de España en movimiento de graneles sólidos y líquidos.

El “Bosque Marino de la Autoridad Portuaria de Cartagena”, cuenta con la correspondiente AUTORIZACIÓN ADMINISTRATIVA PARA LA EXTRACCIÓN Y REPLANTE DE FRAGMENTOS DE *Posidonia oceanica* EN EL PUERTO DE CARTAGENA (MURCIA), CON FINES DE CONSERVACIÓN (Ref.: SGBTM/BDM/AUTSPP/55/2023.

2. Metodología

El Proyecto de “Bosque Marina de la Autoridad Portuaria de Cartagena”, ha contemplado las siguientes fases entre los años 2022 – 2025:

2.1. Selección del entorno, atendiendo a la capacidad potencial del hábitat para el desarrollo de Praderas de Fanerógamas Marinas (*Posidonia oceanica*)

Se han seleccionado dos localizaciones, incluidas en la Zona 1 de la Autoridad Portuaria de Cartagena, en la que el lecho marino está consolidado, con presencia del balastro. Las ubicaciones finales han sido el entorno del Tajo de los Cuervos y Trinca Botijas entre las costas de 10 – 20 metros de profundidad.

2.2. Recolecta de Fragmentos de *Posidonia oceanica*

Se ha escogido el método de reforestación por fragmentos arrancados de manera natural por temporales.

2.3. Mantenimiento de fragmentos de *Posidonia oceanica*. Atado a sistema de anclaje

Durante esta fase, los fragmentos se mantienen en aguas interiores del Puerto de Cartagena, con el requisito de una calidad óptima de las aguas, posteriormente se atan al sistema de anclaje y se vuelven a mantener en las aguas interiores del Puerto de Cartagena a la espera de ser plantados.

2.4. Plantación fragmentos de *Posidonia oceanica*

La plantación se efectúa de forma manual directamente en el sustrato con el apoyo de un estribo que le sirve de anclaje, con cuidado de no dañar las raíces del fragmento en la operación.

3. Resultados 2022- 2025

- Tajo de los Cuervos. Tasa de supervivencia Global del 74 %. Abril 2022 – enero 2025.
- Trinca Botijas. Tasa de supervivencia Global del 88 %. Abril 23 – enero 2025.



Ilustración 1. Entorno Tajo de los Cuervos.
Enero 25

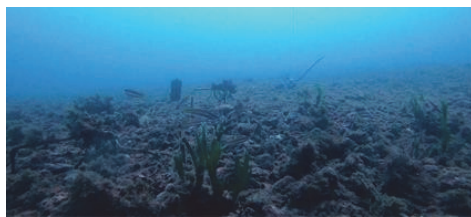


Ilustración 2. Entorno Trinca Botijas. Enero 25.

4. Aplicaciones

4.1. Desarrollo de Ecosistemas fijadores de Carbono

En cumplimiento de la Línea estratégica nº 11 Puertos Eco-Proactivos, contribuir a la mitigación del cambio climático, reducción de la huella de Carbono, fijar el CO₂ en infraestructuras portuarias.

4.2. Mejora de la biodiversidad del ecosistema

Proyectos de Restauración Ambiental, con fanerógamas marinas, de hábitats potenciales degradados en el pasado, una vez eliminados los factores antropogénicos.

4.3. Educación Ambiental

Concienciación de la ciudadanía para conservar estas valiosas Praderas de *Posidonia oceanica*.

Agradecimientos

- Al Departamento de Sostenibilidad de la Autoridad Portuaria de Cartagena, por la oportunidad de desarrollar el Proyecto de Bosque Marino.
- Equipo de Buceadores/Científicos Consultoría Ambiental Marina de Eurofins Munuera: Rosa María García Murcia, María Jose Sorroche Mateos, Estibaliz Peinado Navarro, Ander Retuerto Alegría, Manuel Victor Trives Escudero, Salvador Imbernón de Alvaro y Juan Diego Mora Gomez.

Referencias

Redeia. Guía plantado *Posidonia oceanica*.

https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/Guia-plantado-posidonia-oceanica-nov_0.pdf

Bosque marino Eurofins Munuera <http://www.youtube.com/@BosqueMarinoEurofinsMunuera>

Estudio para la resiliencia de zonas costeras en las provincias de Cádiz y Málaga ante el desafío del cambio climático. Caso práctico playa de la Hierbabuena en Barbate (Cádiz)

Antonio Contreras-de-Villar^a, Juan Jose Muñoz-Perez^a, Francisco Contreras-de-Villar^a, Juan Manuel Vidal^b, Cristina Pérez-Moreno^a, José Juan Alonso del Rosario^b, Cristina Torrecillas^c, Patricia López-García^a, Bismarck Jigena^a

^aCoastal Engineering Research Group, Univ. of Cadiz, Puerto Real, 11510, Spain. juanjose.munoz@uca.es, francisco.contreras@uca.es, bismarck.jigena@gm.uca.es, cristina.perezmoreno@gm.uca.es, patricia.lopezgarcia@uca.es

^bCASEM - Escuela de Ingeniería Naval y Oceánica, Univ. of Cadiz, Puerto Real, 11510, Spain. juan.vidal@uca.es, josejuan.alonso@uca.es

^cUniversidad de Sevilla, ETSI, Dpto. Ingeniería Gráfica, Av. de los Descubrimientos s/n, Sevilla, Spain. torrecillas@us.es

How to cite: Contreras-de-Villar, A.; Muñoz-Perez, J. J.; Contreras-de-Villar, F.; Vidal, J. M., Pérez-Moreno, C.; Alonso del Rosario, J. J.; Torrecillas, C.; López-García, P. & Jigena, B. (2024). Estudio para la resiliencia de zonas costeras en las provincias de Cádiz y Málaga ante el desafío del cambio climático. Caso práctico playa de la Hierbabuena en Barbate (Cádiz). Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

Coastal flooding and erosion are a threat to coastal systems. The current trend of rising sea levels due to climate change shows extensive and potentially catastrophic risks for ecosystems, human populations, built infrastructures and economies of coastal areas. Coastal resilience allows us to explore current and future risks of coastal hazards and compare the profitability of nature-based solutions, versus artificial or technology-based ones, with the objective of integrating (white) policies to reduce risks, avoid damage and, ultimately, help make adaptation decisions.

Given the current trends of rising sea levels, an increase in the frequency of storms and their wave height is expected. This study aims to obtain sufficient data to know the hazards we will face in the medium and long term and the resilience of the Andalusian coast. The results show a practical case of Hierbabuena del Barbate beach (Cádiz).

Keywords: Beach, climate change, resilience, sea level, flooding, methodology.

Resumen

Las inundaciones del litoral con la consistente erosión es un amenaza para los sistemas costeros. La tendencia actual de subida del nivel del mar por el cambio climático muestran riesgos extensos y potencialmente catastróficos para los ecosistemas, las poblaciones humanas, las infraestructuras construidas y las economías de las zonas costeras. La resiliencia costera permite explorar los riesgos actuales y futuros de los peligros costeros y

Estudio para la resiliencia de zonas costeras en las provincias de Cádiz y Málaga ante el desafío del cambio climático. Caso práctico playa de la Hierbabuena en Barbate (Cádiz)

comparar la rentabilidad de las soluciones basadas en la naturaleza, frente a las artificiales o basadas en la tecnología, con un objetivo de políticas de integración (blancas) para reducir riesgos, evitar daños y, en definitiva, ayudar a la toma de decisiones de adaptación.

Dadas las tendencias actuales de subida del nivel del mar, es de esperar que se produzcan un incremento de la frecuencia de temporales y la altura de ola de los mismos. Este estudio tiene por objeto, obtener datos suficientes con los que conocer los peligros a los que nos enfrentaremos a medio y largo plazo y la resiliencia de la costa andaluza. Se muestra en los resultados un caso práctico de la playa de Hierbabuena en Barbate (Cádiz).

Palabras clave: Playa, cambio climático, resiliencia, nivel del mar, inundación, metodología.

1. Introducción

Nuestro planeta se encuentra amenazado por el cambio climático (Gilman et al., 2008; Thuiller et al., 2005; Sheffield and Landrigan, 2011). Las emisiones de gases de efecto invernadero causado por las actividades humanas, están provocando consecuencias a gran escala, como el aumento de las temperaturas globales, elevación del nivel del mar, eventos climáticos extremos y acidificación de los océanos (Kweku et al., 2018; Liu et al., 2019; Assessment, 2009). La escasez de agua, la inseguridad alimentaria, las migraciones masivas, así como problemas de salud son consecuencias también de estas emisiones (Nhemachena et al., 2020; Hrabok et al., 2020). El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), la Organización Meteorológica Mundial (OMM) o el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) son entidades que publican informes y publicaciones referidas al clima mundial (IPCC, 2022; VMO, 2023; PNUMA, 2024).

Como ya se ha descrito, la subida del nivel del mar es una de las consecuencias del cambio climático. Esta subida del nivel del mar lleva consigo inundaciones del litoral con la consistente erosión y amenaza para los sistemas costeros (Sánchez-Artús et al., 2023; Grases et al., 2020). Se han escrito numerosas publicaciones que tratan el cálculo a diferentes escalas (globales, regionales y locales) de la subida del nivel del mar en entornos naturales o antrópicos (Calvillo García et al., 2015). La tendencia actual de subida del nivel del mar por el cambio climático (Holgate & Woodworth, 2004; Amblar et al, 2017; IPCC, 2022; Jigena et al., 2021; Rodimiro-Ramos et al., 2016; Finlayson et al., 2013) muestran riesgos extensos y potencialmente catastróficos para los ecosistemas, las poblaciones humanas, las infraestructuras construidas y las economías de las zonas costeras (Aguilera-Vidal et al., 2022).

La resiliencia es un concepto utilizado para analizar la resistencia y recuperación de los sistemas en disciplinas como la física, ecología (Angulo et al., 2017) así como la capacidad de recuperación de un sistema socioeconómico ante impactos como crisis económicas, pandemias, desastres naturales,... (Fernández et al., 2012, Fang et al., 2018).

En relación con la costa, la resiliencia permite explorar los riesgos actuales y futuros de los peligros costeros y comparar la rentabilidad de las soluciones basadas en la naturaleza, frente a las artificiales o basadas en la tecnología. Reducir riesgos, evitar daños y, en definitiva, ayudar a la toma de decisiones de adaptación es el propósito (Toimil et al, 2023; Agulles and Lionello, 2022; Klein and Nicholls, 1999; Nicholls, 2002; Pendleton et al., 2010; Toubes et al., 2017).

La subida del nivel de mar, es de esperar que produzca un incremento de la frecuencia de temporales y la altura de ola de los mismos (Wolf et al., 2020; Grabemann and Weisse, 2008). El aumento de la cota de inundación del litoral y de la erosión costera tendrá una incidencia importante en las playas y marismas.

Desde su creación en 1988, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha facilitado evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. Actualmente trabaja en el Sexto Informe de Evaluación (AR6) en el informe anterior, AR5 (IPCC, 2013) ya se prevé el incremento del nivel del mar en función de distintos escenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 Y RCP8.5) y para unos periodos de tiempo determinados (2046-2065 y 2081-2100).

El Ministerio para la Transición Ecológica y el reto Demográfico (MITECO) ha elaborado una metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española a través del IHCantabria (Ramírez Pérez et al., 2019). El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) en España, constituye el marco para la coordinación entre administraciones públicas en las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático (Ministerio para la Transición Ecológica, 2020).

La costa del sur de España han sido objeto de estudio en distintos ambitos (Muñoz-Pérez, 1996; Contreras et al., 2019; Contreras et al., 2017; Martínez-García et al., 2021; Contreras-de-Villar et al., 2023) realizandose estudios de inundabilidad de la costa (Jurado et al., 2012; Ojeda et al., 2011) teniendo en cuenta el incremento del nivel del mar, pero sin considerar en la inundación costera los efectos del run-up de oleaje. El gobierno de España a través del Instituto de hidraulica ambienal de la Universidad Cantabria elaboró (Software IOLE), unos mapas de peligrosidad y riesgo para todo el litoral español (Gobierno de España. Ministerio de Agricultura, 2010).

Conocer por tanto la tendencia de subida del nivel del mar en los próximos años, junto con la previsión de temporales en función de los distintos escenarios, es fundamental para estimar las zonas de inundación a medio y largo plazo. Diferentes metodologías se han descrito para estimar la subida del nivel del mar en áreas urbanas (Alcocer-Yamanaka et al., 2016; Ojeda et al., 2009; Ezer, 2022).

El objetivo por tanto de este estudio, es conocer los peligros a los que nos enfrentaremos a medio y largo plazo en la costa andaluza. Las zonas de estudio elegidas han sido las provincias de Cádiz y Málaga. Estas dos provincias tienen características distintas (existencia o no de marea, diferente porcentaje de ocupación del litoral, ...) pero representativas del resto de provincias andaluzas. El trabajo permitirá el desarrollo de una metodología amplia que permita la fácil extrapolación de los modelos al resto del litoral andaluz.

Con la toma de datos (campana de levantamiento topográfico, fotografías aéreas e imágenes de satélite) de las playas representativas de la costa de las provincias de Cádiz y Málaga, y con las condiciones climáticas extremas a partir de los distintos escenarios de variaciones del nivel de mar provocadas por el cambio climático, se elaboran mapas de inundación, con el objetivo de analizar los riesgos y amenazas en la costa y que ayuden a la toma de decisiones en la planificación costera.

2. Zona de estudio

La zona de estudio está localizada al sur de la costa de España entre las provincias de Cádiz y Málaga, en el océano atlántico y el Mar Mediterráneo, cerca del estrecho de Gibraltar. La costa de Cádiz tiene una longitud de 285 km, mientras que la de Málaga su longitud es de 175 km. Dada la elevada extensión de ambas costas, cuatro playas han sido estudiadas en la zona de Cádiz (Playa de los Torruños, Playa de la Hierbabuena, Playa del Rinconcillo y Playa de Torreguadiaro) y una en la zona de Málaga (Playa de la Malagueta). Aunque la playa de Torreguadiaro se encuentra en la provincia de Cádiz, presenta características similares a las de la provincia de Málaga (playas sin marea, tamaño del sedimento, color). En la **Figura 1** se muestra la localización del área de estudio.



Figura 1. Localización del área de estudio.

Las aguas costeras de Cádiz pueden considerarse como una región de transición debido a la confluencia del mar Mediterráneo y del Océano Atlántico. La situación entre dos mares le confiere unas características únicas. Sus costas poseen unas condiciones ambientales diferentes según nos encontremos en la vertiente atlántica o en la mediterránea (Hidtna, 2013). Además, el Estrecho de Gibraltar se conforma como lugar de intercambio de aguas entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo dando lugar a unas condiciones oceanográficas muy singulares. La costa de Málaga se sitúa en su totalidad en el mar Mediterráneo presentando una mayor uniformidad en sus características.

La costa de Cádiz se encuentra en una zona mesomareal, con una amplitud de marea que varía entre los 3,8 m y 1,40 m, mientras que la costa de Málaga está situada en una zona micromareal con mareas máximas de 1 m. La dirección del oleaje incidente en la zona atlántica oscila generalmente entre el oeste y el suroeste, con una altura media significativa de ola de 0,5-2,0 m, alturas extremas de ola de 6 m y periodo medio de ola de 5-12 s. En la zona mediterránea el oleaje oscila entre el Este y el Suroeste, con una altura de ola media significativa de 0,5 a 1 m., alturas de olas extremas de 4 m. y periodo medio de ola de 3-9 s (www.puertos.es, 2022).

La dirección dominante del oleaje en la vertiente Atlántica como Mediterránea provoca un transporte de sedimentos hacia el sur. En la costa Atlántica el transporte es NW-SE, mientras que en la costa Mediterránea es NE-SW.

La zona estudiada ha sido objeto de numeros estudio relacionados con el transporte de sedimento (Muñoz-Pérez & Medina, 2010), las características de los sedimentos de las playas (Pouillet et al., 2019; Lopez-Garcia et al., 2021; Muñoz-Pérez et al., 2012; Contreras et al., 2020) y sobre regeneraciones de playas (Gómez-Pina et al., 2007; Pranzini et al., 2018; Santos-Vendoiro et al., 2021).

3. Metodología

El régimen de inundaciones en la costa debido a la acción conjunta de la dinámica marina y meteorológica es un fenómeno especialmente complejo, tanto por el gran número de elementos que intervienen en el proceso de inundación, como por la interacción entre dichos elementos.

El fenómeno de inundación en una playa, o tramo de costa cualquiera, está caracterizado por un nivel de marea (NM), compuesto por la marea astronómica (MA) y la marea meteorológica (MM), un oleaje incidente y una topografía-batimetría. El oleaje rompiente en la playa produce un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil “Run-Up” (RU). Algunos de estos factores están relacionados entre sí (Marea meteorológica y oleaje), con la complicación añadida de ser variables aleatorias y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad. A todos estos condicionantes, hay que añadir el impacto del cambio climático con la consecuencia del nivel del mar.

Por consiguiente, cada evento de inundación dependerá del incremento del nivel del mar provocado por el cambio climático, en nivel de marea astronómica, meteorológica y el oleaje incidente. A continuación se detallan las bases de datos de cada unos de estos puntos.

3.1. Bases de datos

Se describen las bases de datos históricas utilizadas para el nivel del mar y oleaje (Marea Astronómica, Marea Meteorológica, Nivel de Referencia y Oleaje), batimetría y topografía utilizadas, así como las proyecciones de cambio climático referidas a las variaciones del nivel del mar y el oleaje.

3.1.1. Datos topográficos y batimétricos

Los datos batimétricos se han obtenidos a partir del estudio ecocartografico realizado en la provincia de Cádiz (UTE Ecoatlantico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013) y Málaga (Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar. UTE INTECSA-INARSA, 2004). Los datos topográficos han sido tomados por el equipo de trabajo del presente estudio mediante GPS diferencial y escaner 3D (*Figura 2*).



Figura 2. (A) Imagen de la toma de datos con GPS. (B) Imagen de la toma de datos con escaner 3D

3.1.2. Nivel de referencia

El nivel de referencia utilizado ha sido el cero hidrográfico. En el caso de datos que estaban referenciados respecto al nivel medio del mar de Alicante, estos han sido transformados al cero hidrográfico.

3.1.3. Datos del nivel del mar y oleaje actual

Los datos del nivel del mar actuales han sido obtenidos a partir de los mareógrafos situados en el litoral de Cádiz y Málaga. Los mareógrafos utilizados son: Bonanza 2, Tarifa, Algeciras y Málaga 3. La máxima pleamar astronómica de cada uno de los mareógrafos ha sido utilizada para definir el nivel del mar actual. En la siguiente tabla se muestra los valores del nivel del mar para los diferentes mareógrafos a partir de los datos oficiales del Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y de Puertos del Estado (UTE Ecoatlantico, 2013).

Tabla 1 Valores del nivel del mar para los diferentes mareógrafos a partir de los datos oficiales del Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y de Puertos del Estado.

Mareografos	Nivel del mar (m) actual (cm)
Bonanza 2	3,63
Tarifa	1,65
Algeciras	1,42
Málaga 3	1,26

A partir de los datos de la **Tabla 1**, en la **Tabla 2** se muestran los niveles del mar para las diferentes playas de estudio.

Tabla 2. Niveles del mar para las difrentes playas de estudio (UTE Ecoatlantico, 2013)

Zona de estudio	Nivel del mar (m)
Playa Los Torruños (El Puerto de Santa María)	3,70
Playa de la Hierbabuena (Barbate)	2,60
Playa del Rinconcillo (Algeciras)	1,42
Playa de Torreguadiaro (San Roque)	1,35
Playa de la Malagueta (Málaga)	1,26

3.1.4. Datos marea meteorológica

Para la determinación de la marea meteorológica se ha realizado a través de la información que se dispone sobre los residuos de los mareógrafos como diferencia entre los valores del nivel del mar medidos y os valores de marea astronómica que se predice del análisis armónico. Los únicos mareógrafos cercanos a la zona de estudio que proporcionan información sobre el residuo son los REDMAR. En el Atlas de inundación del litoral peninsular español (Dirección General de la Costas & Universidad de Cantabria, 2006) se muestran los residuos de cada uno de los mareógrafos. En nuestro caso los mareógrafos que afectan son los de Huelva y Málaga.

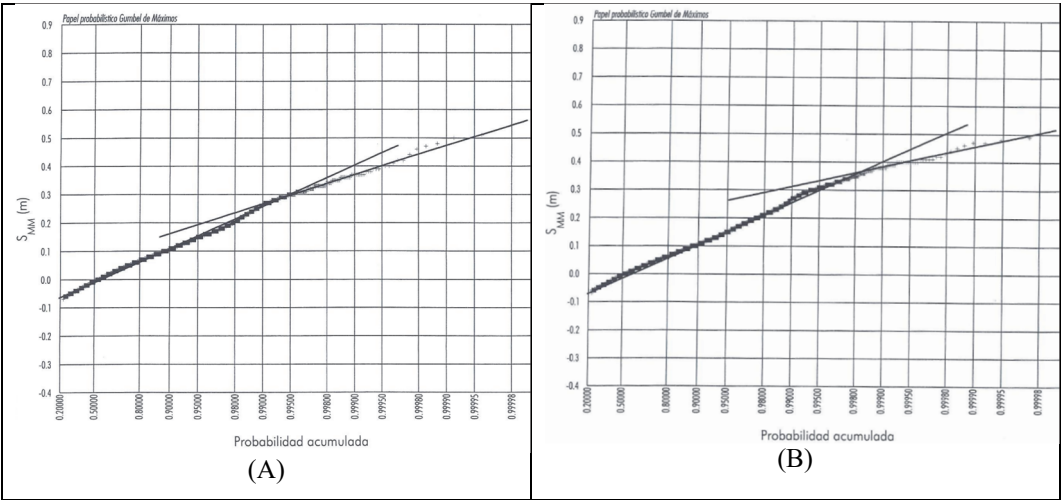


Figura 3. Residuos de los mareografos de Huelva (A) y Málaga (B) para la determinación de la marea meteorológica (S_{MM}) según el Atlas de Inundación del Litoral Peninsular Español (Dirección General de la Costas & Universidad de Cantabria, 2006).

Para una probabilidad acumulada de excedencia de 12 horas al año (0,9986) obtenemos una marea meteorológica para las playas de la costa atlantica (mareografo de referencia de Huelva) de 0,36 m, mientras que en el caso de las playas de la vertiente mediterránea (mareografo de referencia de Málaga) la marea meteorológica es de 0,39 m.

3.1.5. Oleaje

Los datos de oleaje para cada una de las playas han sido obtenidos a partir del análisis del regimen medio de oleaje de las boyas de oleaje y los puntos SIMAR cercanas a las zonas de estudio.

3.1.6. Proyecciones del nivel del mar y oleaje provocado por el cambio climático

La guía de escenarios regionalizados del cambio climático sobre España (Agencia Estatal de Meteorología, 2017) muestra las proyecciones de cambio climático para España realizadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) mediante la utilización tanto de métodos estadísticos como dinámicos. Estas proyecciones se han obtenido a partir de los modelos globales participantes en el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2022) y del proyecto CORDEX (acrónimo inglés de COordinated Regional Downscaling EXperiment) para el uso en los diferentes sectores sensibles a las condiciones climáticas.

En el AR5 se utiliza un conjunto nuevo de cuatro escenarios que consideran las políticas climáticas, las denominadas Sendas Representativas de Concentración o Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) (IPCC, 2013). Estos RCP se definen como escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de los GEI y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (Moss et al., 2010).

Tabla 4. Forzamiento radiativo total (FR), tendencia del FR y concentración de CO₂ para los nuevos RCP (Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), 2017)

	FR	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m ²	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m ²	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m ²	creciente	936 ppm

Dado que las proyecciones de altura de ola significantes van decreciendo en los distintos escenarios para las diferentes proyecciones, se utiliza la opción más desfavorable, que es la altura de ola significantes excedida 12 horas al año indicada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Los incrementos aplicados debido al cambio climático se añaden a los datos del nivel del mar expuestos en la Tabla 2. Las distintas proyecciones y escenarios son los siguientes:

Tabla 5. Incrementos de MSL en cada zona de estudio según el periodo y escenario RCP previstos, obtenidos del visor C3E realizado por el Instituto de Hidráulica ambiental de la Universidad de Cantabria.

Zona de estudio	INCREMENTO MSL (m) POR CAMBIO CLIMÁTICO			
	2026-2045		2081-2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Playa Los Torruños (El Puerto de Santa María)	0.1454	0.1532	0.4142	0.5635
Playa de la Hierbabuena (Barbate)	0.1454	0.1532	0.4142	0.5635
Playa del Rinconcillo (Algeciras)	0.1454	0.1532	0.4142	0.5635
Playa de Torreguadiaro (San Roque)	0.1454	0.1532	0.4142	0.5635
Playa de la Malagueta (Málaga)	0.1353	0.1482	0.4009	0.5515

Una vez realizado el sumatorio sobre el Nivel medio del mar aplicando los efectos del cambio climático y la marea meteorologica en la zona de caso práctico, resulta:

Tabla 6. *Altura total del nivel medio del mar aplicando el incremento del cambio climático en cada zona de estudio.*

Zona de estudio	MSL (m) APLICADO EL CAMBIO CLIMÁTICO			
	2026-2045		2081-2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Playa de la Hierbabuena (Barbate)	3.1454	3.1532	3.4142	3.5635

3.2 Perfiles longitudinales

Se trazan perfiles longitudinales en Civil 3D situados en las playas elegidas para el estudio, sobre la batimetría y topografía aportada, obteniendo los datos de las cotas de cada perfil que serán utilizados en el software IH2VOF de IH Cantabria.



Figura 4. *Perfiles longitudinales de batimetría y topografía, realizados en Civil 3d.*

A continuación, dado que de los perfiles se pueden obtener los datos de las cotas del perfil longitudinal, realizamos los diferentes perfiles para luego esos datos de cotas introducirlos en el software IH2VOF y de esta manera calcular el run up con el perfil real de playa Figura 5.

3.3 Cálculo cotas de inundación

Para el cálculo de las cotas de inundación se introduce en el software IH2VOF de simulación realizado por IH Cantabria, los datos anteriormente descritos. Comenzando por dibujar el perfil de playa con los datos obtenidos de los perfiles longitudinales, marcar donde se encuentra el nivel del mar dado los datos de nivel del mar e incrementos debidos al cambio climático y los datos de oleaje expuestos anteriormente.

Alineación 1.2 – (1) PROFILE

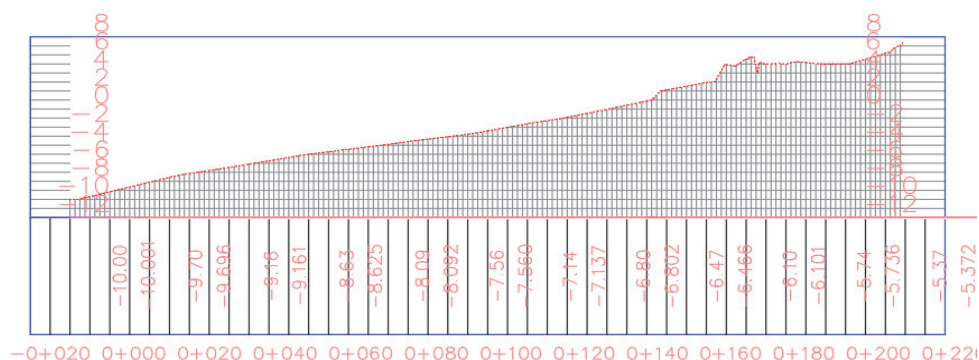


Figura 5. Perfil longitudinal de uno de los perfiles realizados en Civil 3d, con el fin de obtener datos de cotas para tratar en IH2VOF (IH Cantabria).

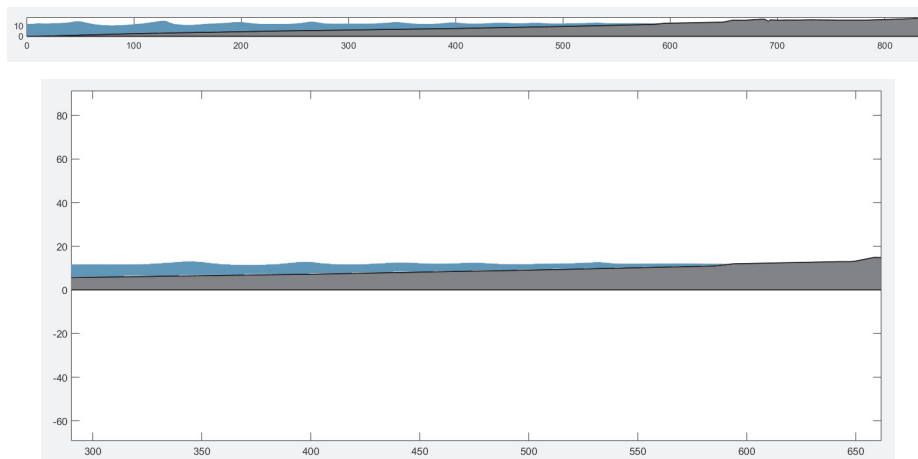


Figura 6. Proceso de cálculo y simulación de comportamientos según las características dadas para los perfiles de estudio en IH2VOF (IH Cantabria).

4. Resultados para el caso práctico de playa de la Hierbabuena (Barbate)

Debido a que el presente proyecto de investigación se encuentra actualmente en desarrollo, en esta ocasión sólo se presentan los resultados obtenidos para el caso práctico de una de las playas citadas, la playa de la Hierbabuena en Barbate.

De los cálculos realizados mediante la metodología desarrolla anteriormente se han obtenido los siguientes resultados, manifestandose en cotas de máximo run up que puede alcanzar el nivel del mar para cada perfil.

Tabla 7. Altura y en el cual alcanza el máximo Run-up para cada perfil de playa.

	COTA “Y” DE INUNDACIÓN PARA RUN-UP MÁXIMO (m)			
	2026-2045		2081-2100	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Playa de la Hierbabuena(Barbate)				
Perfil 1.2	0.720	0.810	0.560	1.010

Con los datos de máximo Run-up alcanzado de cada perfil de playa se pueden realizar los mapas de inundación, donde se mostrará de forma sombreada hasta donde alcanzara el nivel del mar para cada periodo y situación prevista.

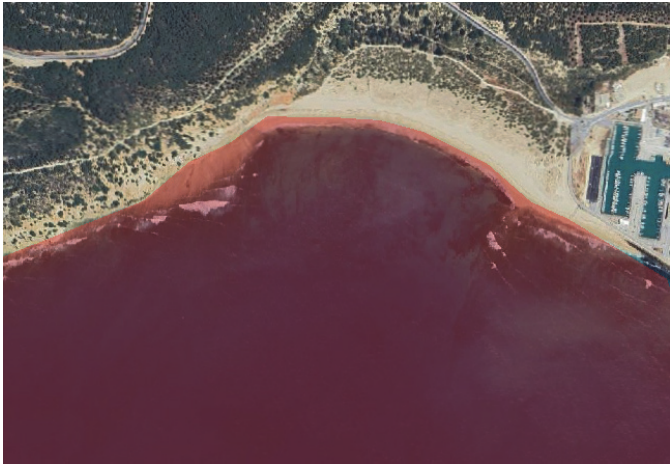


Figura 7. Mapa de inundación en perfiles de playa la Hierbabuena (Barbate) para un periodo de 2026-2045 y un RCP de 4.5.

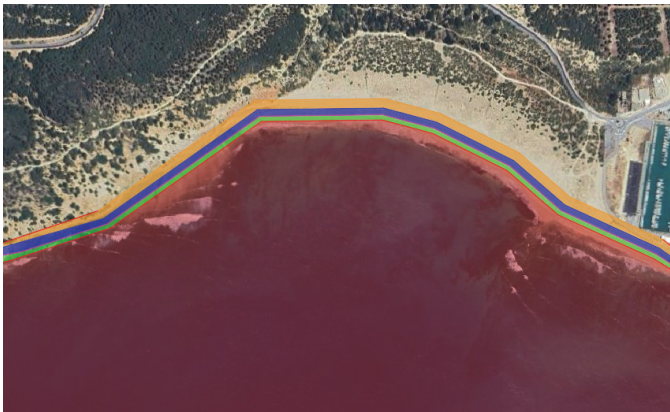


Figura 8. Mapa de inundación en perfiles de playa la Hierbabuena (Barbate) para diferentes periodos de 2026-2045 y 2081-2100, con RCP de 4.5 y 8.5.

Agradecimientos

Esta investigación está siendo realizado gracias a la convocatoria de ayudas a proyectos de I+D+I, en régimen de concurrencia competitiva, en el marco del Plan Complementario de Ciencias Marinas y del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de la Junta de Andalucía, financiado por la Unión Europea – Next Generation EU.

Referencias

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5* (Ministerio).
- Aguilera-Vidal, M., Muñoz-Perez, J.J., Contreras, A., Contreras, F., Lopez-Garcia, P., & Jigena, B. (2022). Increase in the Erosion Rate due to the Impact of Climate Change on Sea Level Rise: Victoria Beach, a Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1912.
- Agulles, M., Jordà, G., & Lionello, P. (2021). Flooding of Sandy Beaches in a Changing Climate. The Case of the Balearic Islands (NW Mediterranean). *Frontiers in Marine Science*, 8, 760725. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2021.760725/BIBTEX>
- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Alborno-Góngora, P. M. (2016). Methodology for Generating Flood Risk Maps in Urban Areas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(5), 33–55. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500033&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Ambiente, M. de M., Dirección General de Costas, & Cantabria, U. de. (2006). *Atlas de inundación del litoral peninsular español*.
- Amblar, P., Casado, M.J.; Pastor, A., Rodríguez, E. (2017). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España. A partir de los resultados del IPCC-AR5. *Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente Agencia Estatal de Meteorología Madrid*. Retrieved from https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/guia_escenarios_ar5.pdf
- Angulo, A.M.; Mur, J.; Trivez, F. J. (2017). Measuring resilience to economic shocks: An application to Spain. *Ann. Reg. Sci.* 2017, 60, 349–373.
- Assessment, U. E. N. C. for E. (2009). *Greenhouse gases: evidence for atmospheric changes and anthropogenic causes*.
- Calvillo García, Y., Ramírez-Herrera, M. T., Delgado-Trejo, C., Legorreta-Paulin, G., Corona, N., Calvillo García, Y., ... Corona, N. (2015). Modeling sea-level change, inundation scenarios, and their effect on the Colola Beach Reserve - a nesting-habitat of the black sea turtle, Michoacán, Mexico. *Geofísica Internacional*, 54(2), 179–190. <https://doi.org/10.1016/J.GI.2015.04.013>
- Contreras-de-Villar, F., García, F. J., Muñoz-Perez, J. J., Contreras-de-Villar, A., Ruiz-Ortiz, V., López-García, P., & Jigena-Antelo, B. (2023). Analysis of Topographic Surveys with RPAS in Steep Coastal Dunes. *Land* 2023, Vol. 12, Page 1729. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/land12091729>

- Contreras, A., Gómez-Pina, G., Muñoz-Pérez, J., & Chamorro, G. (2017). Tipologías de perfiles de playa en el litoral de la Provincia de Cádiz. In U. P. de València (Ed.), *XIV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Alicante* (pp. 71–82).
- Contreras, A., Muñoz-Perez, J. J., Contreras, F., Gomez-Pina, G., Ruiz-Ortiz, V., Chamorro, G., & Cabrera, P. (2020). A design parameter for reef beach profiles-a methodology applied to Cadiz, Spain. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/JMSE8050323>
- Contreras de Villar, A., Gómez-Pina, G., Muñoz-Pérez, J., Contreras de Villar, F., López-García, P., & Ruiz-Ortiz, V. (2019). New design parameters for biparabolic beach profiles (SW Cadiz, Spain). *Revista de La Construcción*, 18. Nº3(DOI: 10.7764/RDLC.18.3.432), 432–444.
- Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar. UTE INTECSA-INARSA, G. Y. T. (2004). *Ecocartografía del litoral de la provincia de Málaga*.
- Ezer, T. (2022). A Demonstration of a Simple Methodology of Flood Prediction for a Coastal City Under Threat of Sea Level Rise: The Case of Norfolk, VA, USA. *Earth's Future*, 10(9), e2022EF002786. <https://doi.org/10.1029/2022EF002786>
- Fang, Y.-P.; Zhu, F.-B.; Qiu, X.; Zhao, S. (2018). Effects of natural disasters on livelihood resilience of rural residents in Sichuan. *Habitat Int.* 76, 19–28.
- Fernández, J. et al. (2012). Escenarios-PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica. En "Cambio climático: Extremos e Impactos. *Publicaciones de AEC. Serie A, N8*, 63-72. Retrieved from <http://www.meteo.unican.es/node/73108>
- Finlayson, C. M., Davis, J. A., Gell, P. A., Parton, R. T., & Kingsford A., K. (2013). The status of wetlands and the predicted effects of global climate change: the situation in Australia. *Springer. Aquatic Sciences*, 75:73–93. <https://doi.org/DOI 10.1007/s00027-011-0232-5>
- Gobierno de España. Ministerio de Agricultura, A. y M. A. (2010). *ELABORACIÓN DE LOS MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO REQUERIDOS POR RD 903/2010 EN LA COSTA ESPAÑOLA*.
- Gómez-Pina, G., Fages, L., Ramírez, J.L., Muñoz-Pérez, J.J., Enriquez, J. (2007). A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years. *Coastal Eng., Proc.* 2006, 4167–4178.
- Grabemann, I., & Weisse, R. (2008). Climate change impact on extreme wave conditions in the north sea: An ensemble study. *Ocean Dynamics*, 58(3–4), 199–212. <https://doi.org/10.1007/S10236-008-0141-X/METRICS>
- Grases, A., Gracia, V., García-León, M., Lin-Ye, J., & Sierra, J. P. (2020). Coastal Flooding and Erosion under a Changing Climate: Implications at a Low-Lying Coast (Ebro Delta). *Water* 2020, Vol. 12, Page 346, 12(2), 346. <https://doi.org/10.3390/W12020346>
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático IPCC. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. B. and P. M. M. (eds. . (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Hidtna S.L. (2013). *UTE Ecoatlántico. Estudio ecocartográfico del litoral de la provincia de Cádiz. Referencia 28-4983*.
- Holgate, S. J., & Woodworth, P. L. (2004). Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. *Geophysical Research Letters*, 31(7).
- Hrabok, M., Delorme, A., & Agyapong, V. I. O. (2020). Threats to Mental Health and Well-Being Associated with Climate Change. *Journal of Anxiety Disorders*, 76, 102295. <https://doi.org/10.1016/J.JANXDIS.2020.102295>
- IPCC, Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. O. (eds.). (2022). Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Pp. 3-33*. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
- IPCC, I. P. O. climate change. (2013). *CLIMATE CHANGE 2013 The Physical Science Basis*.
- Jigena Antelo, B., Berrocoso Domínguez, M., & Vidal Pérez, J. (2021). Determinación del nivel medio del mar en el mar de Bransfield. Aplicación a la determinación del geoide en islas Decepción y Livingston, Islas Shetland del Sur (Antártida). *Revista Cartográfica*, (102), 69-97. <https://doi.org/https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.835>
- Juan J. Santos-Vendoiro, Juan J. Muñoz-Perez, Patricia Lopez-García, Jose Manuel Jodar, Javier Mera, Antonio Contreras, F. C. and B. J. (2021). Evolution of Sediment Parameters after a Beach Nourishment. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Land*, 10, 914–92(EISSN 2073-445X).
- Jurado, P. F., & Zújar, J. O. (2012). Evaluación de la peligrosidad asociada al aumento de la superficie inundable por la subida del nivel medio del mar en la costa entre Cádiz y Tarifa. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (12), 329–348. Retrieved from <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/248>
- Klein, R. J. T., & Nicholls, R. J. (1999). Assessment of Coastal Vulnerability to Climate Change on JSTOR. Retrieved November 4, 2024, from Springer Nature on behalf of Royal Swedish Academy of Sciences website: <https://www.jstor.org/stable/4314873>
- Kweku, D., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K., Danso, K., Oti-Mensah, E., ... Adormaa, B. (2018). Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. *Journal of Scientific Research and Reports*, 17(6), 1–9. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2017/39630>
- Liu, D., Guo, X., & Xiao, B. (2019). What causes growth of global greenhouse gas emissions? Evidence from 40 countries. *Science of The Total Environment*, 661, 750–766. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.01.197>
- Lopez-Garcia, P., Muñoz-Perez, J. J., Contreras, A., Vidal, J., Jigena, B., Santos, J. J., ... Contreras, F. (2021). Error on the estimation of sand size parameters when using small diameter sieves and a solution. *Journal Frontiers in Marine Science. Coastal Ocean Processes*, 8(eISSN: 2296-7745).

- Martínez-García, F. P., Contreras-de-Villar, A., & Muñoz-Perez, J. J. (2021). Review of Wind Models at a Local Scale: Advantages and Disadvantages. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 318–330(eISSN: 2077-1312).
- Ministerio para la Transición (MITECO), y el R. D. E. (2020). *Plan nacional de adaptación al cambio climático 2021-2030*.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... y Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature Communications* 2023 14:1, 463(7282),.
- Muñoz-Pérez, J. J. (1996). *Análisis de la morfología y variedad de playas apoyadas en las rocosas. Tesis doctoral*. Universidad de Cádiz.
- MUÑOZ-PÉREZ, J. J., PAYO, A., ROMAN-SIERRA, J., NAVARRO, M., & MORENO, L. (2012). Optimization of beach profile spacing: an applicable tool for coastal monitoring. *SCIENTIA MARINA*, 76(4)(ISSN: 0214-8358), 791–798. <https://doi.org/10.3989/scimar.03417.15A>
- Muñoz-Pérez, J., & Medina, R. (2010). Comparison of long-, medium- and short-term variations of beach profiles with and without submerged geological control. *Coastal Engineering*, 57(3), 241–251.
- Nhemachena, C., Nhamo, L., Matchaya, G., Nhemachena, C. R., Muchara, B., Karuaihe, S. T., & Mpandeli, S. (2020). Climate Change Impacts on Water and Agriculture Sectors in Southern Africa: Threats and Opportunities for Sustainable Development. *Water* 2020, Vol. 12, Page 2673, 12(10), 2673. <https://doi.org/10.3390/W12102673>
- Nicholls, R. J. (2002). Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(32–34), 1455–1466. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00090-6](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00090-6)
- Ojeda, J., Álvarez, J. I., Cajaraville, D. M., Fraile, P., Vallejo, I., & Marquez, J. (2011). Análisis preliminar de la vulnerabilidad de la costa de Andalucía a la potencial subida del nivel del mar asociado al Cambio Climático. *Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Unión Europea. Fondo Europeo de Desarrollo Regional*. Retrieved from https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Ojeda%2C+J.%3B+Álvarez%2C+J.+I.%3B+Cajaraville%2C+D.+M.%3B+Fraile%2C+P.%3B+Vallejo%2C+I.+y+Marquez%2C+J.+2011.+Análisis+preliminar+de+la+vulnerabilidad+de+la+costa+de+Andalucía+a+la+potencial+subida+d
- Ojeda, José, Álvarez, J., Cajaraville, D., & Fraile, P. (2009). El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *GeoFocus (Artículos)*, Nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157, 9, 83–101. Retrieved from http://geofocus.rediris.es/2009/Articulo4_2009.pdf
- Pendleton, E. A., Thieler, E. R., & Williams, S. J. (2010). Importance of Coastal Change Variables in Determining Vulnerability to Sea- and Lake-Level Change. *Journal of Coastal Research*, 26(1 (261)), 176–183. <https://doi.org/10.2112/08-1102.1>
- PNUMA. (2024). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. Retrieved from <https://www.unep.org/es>

- Poulet, P., Muñoz-Perez, J. J., Poortvliet, G., Mera, J., Contreras, A., Lopez, P. (2019). Influence of different sieving methods on estimation of sand size parameters. *Water*, 11(5), 879.
- Pranzini, E., Anfuso, G., Muñoz-Perez, J. J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, 139, 32–35.
- Ramírez Pérez, M., Menéndez, M., Paula, G., Braña, C., Losada Rodríguez, I. J., Lobeto, H., ... Díaz, P. (2019). ELABORACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y BASES DE DATOS PARA LA PROYECCIÓN DE IMPACTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO A LO LARGO DE LA COSTA ESPAÑOLA. *Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico (MITECO)*.
- Rodimiro Ramos Reyes, Campillo, L. M. G., Gómez, J. C. N., Hernández, R. S., Trejo, H. H., & Álvarez, O. R. (2016). Adaptation of coastal vulnerability model in the coast of Tabasco to climate change. Retrieved November 4, 2024, from Revista mexicana de ciencias agrícolas website: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342016000902551&script=sci_arttext&tlng=en
- 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. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1125138. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2023.1125138/BIBTEX>
- Sheffield, P. E., & Landrigan, P. J. (2011). Global climate change and children's health: Threats and strategies for prevention. *Environmental Health Perspectives*, 119(3), 291–298. <https://doi.org/10.1289/EHP.1002233/ASSET/BE69DD69-3B6E-4C5C-9D6F-BD7A238F2AF5/ASSETS/GRAPHIC/EHP-119-291F2.JPG>
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(23), 8245–8250. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0409902102>
- Toimil, A., Losada, I. J., Álvarez-Cuesta, M., & Le Cozannet, G. (2023). Demonstrating the value of beaches for adaptation to future coastal flood risk. *Nature Communications* 2023 14:1, 14(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39168-z>
- Toubes, D. R., Gössling, S., Hall, C. M., & Scott, D. (2017). Vulnerability of Coastal Beach Tourism to Flooding: A Case Study of Galicia, Spain. *Environments* 2017, Vol. 4, Page 83, 4(4), 83. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS4040083>
- UTE Ecoatlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, U. E. (2013). *Estudio ecocartográfico del litoral de la provincia de Cádiz. Estudio de Mareas*.
- VMO. (2023). World Meteorological Organization. Retrieved from <https://wmo.int/>
- Wolf, J., Woolf, D., & Bricheno, L. (2020). *Impacts of climate change on storms and waves relevant to the coastal and marine environment around the UK*. <https://doi.org/10.14465/2020.ARC07.SAW>

Plataformas portuarias flotantes para la producción industrial de turbinas eólicas marinas

Floating port platforms for the industrial production of offshore wind turbines

Cristian Menéndez-Fernández^a, Alderic Blanc^b, Mario López^c

^aSAFINTAST SL, , cristian.menendez@safier-ingenieriesa.com; ^bSAFINTAST SL, alderic.blanc@safier-ingenieriesa.com; Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, 
mario.lopez@uniovi.es

How to cite Menéndez-Fernández, C; Blanc, B. & López, M. (2024). Plataformas portuarias flotantes para la producción industrial de turbinas eólicas marinas. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

Given that an increase in demand for port spaces is expected in the coming years, a resilient solution to changes in marine climate conditions is needed. In this context, floating modular port platforms are being proposed as an alternative to traditional port extensions. The construction of modular platforms depends on the development of connection technologies between modules. C2C[®] enables the connection of precast concrete caissons while floating, creating monolithic and rigid structures of the required size for subsequent applications, facilitating construction, launching, transportation, and installation. Through the development of this technology, it is possible to create sustainable and environmentally friendly port spaces for various applications. One example is the industrialized fabrication of floating offshore wind turbines, allowing their storage and enabling their maintenance and dismantling, as pursued in the ALFOWT project (Assembly Line Floating Offshore Wind Turbines). The application of C2C[®] technology to floating modular platforms and the studies conducted to understand the behaviour of ALFOWT are presented, including a study using numerical models based on the Boundary Element Method (BEM) and its subsequent structural verification.

Keywords: VLFS, floating structure, modular platform, caisson structure, port extension, prefabrication, precast concrete, FOWT assembly

Resumen

Debido al esperado aumento en la demanda de espacios portuarios para los próximos años, se requiere una solución resiliente a los cambios en las condiciones climáticas marinas. En este contexto, se proponen plataformas portuarias flotantes modulares como alternativa a las extensiones portuarias tradicionales. La construcción de plataformas modulares depende del desarrollo de tecnologías de conexión entre módulos. C2C[®] permite la conexión rígida de cajones de hormigón prefabricados en flotación, creando estructuras monolíticas y

rígidas del tamaño requerido para aplicaciones posteriores, facilitando su construcción, botadura, transporte e instalación. El desarrollo de esta tecnología permite crear espacios portuarios sostenibles y respetuosos con el medio ambiente para diversas aplicaciones. Un ejemplo es la fabricación industrializada de turbinas eólicas flotantes, permitiendo además un espacio para su almacenamiento, mantenimiento y desmantelamiento, como se persigue en el proyecto ALFOWT® (Assembly Line Floating Offshore Wind Turbines). En este artículo se presenta la aplicación de la tecnología C2C® a las plataformas modulares flotantes y los estudios realizados para comprender el comportamiento de ALFOWT®, incluyendo un estudio utilizando modelos numéricos basados en el Método de Elementos Frontera (BEM, de sus siglas en inglés Boundary Elements Method) y su posterior verificación estructural.

Palabras clave: VLFS, estructuras flotantes, plataforma modular, extensiones portuarias, prefabricación, ensamblaje de FOWT

1. Introducción

La energía eólica marina se perfila como la principal fuente renovable para sustituir los combustibles fósiles en Europa debido a sus altos factores de capacidad, estabilidad y capacidad de previsión en la generación, así como a su capacidad de complementarse con otras energías renovables durante períodos de baja generación. En particular, el desarrollo de tecnologías flotantes es crucial por la profundidad de las costas europeas (MITECO, 2021).

Por otro lado, los puertos desempeñan un papel clave en la economía global, siendo nodos esenciales para el comercio y las cadenas de producción. Según Hanson & Nicholls (2020), se prevé que la demanda de infraestructuras portuarias aumente significativamente para el año 2050 debido al cambio climático, el aumento del comercio marítimo y la subida del nivel del mar. Además, se incrementará la necesidad de terrenos portuarios para la construcción, ensamblaje y mantenimiento de turbinas eólicas flotantes, requiriendo espacios grandes, grúas especiales y otras instalaciones (Verschuur et al., 2022).

El nivel del mar ha aumentado desde finales del siglo XIX a un ritmo global de 1.7 mm por año, con un ritmo en los últimos años de 3.2 mm anuales desde 1993 según Frederikse et al. (2020). Este aumento es causado principalmente por la expansión térmica del agua y el deshielo, especialmente en Groenlandia (Isiaka et al., 2023). Otros factores antropológicos, como determinadas actividades industriales o la contaminación, también contribuyen. Las consecuencias varían según la región, siendo críticas en algunos lugares (Frederikse et al., 2020).

Hein & Kirwan (2024) estiman que el nivel del mar podría aumentar hasta 1 m durante el siglo XXI, lo que causará fenómenos ambientales extremos más frecuentes, como tormentas, erosión y desbordamientos, afectando zonas habitadas y agrícolas. La afección a los puertos ha sido investigada por Verschuur et al. (2022). En los puertos, este fenómeno supondrá desafíos operativos, como la reducción del francobordo y cambios en las dinámicas de las olas, impactando la estabilidad de estructuras y aumentando los costos operativos, como el dragado (Oppenheimer et al., 2019; Yang et al., 2018).

Además, las investigaciones de Hanson & Nicholls (2020) revelan que la demanda de áreas portuarias será de 2 a 4 veces mayor en 2050 comparado con 2010, con un aumento de hasta siete veces en el comercio global. Según la OECD (2012), para 2030 las capacidades portuarias serán insuficientes. Para enfrentar estos retos, los puertos deberán adaptarse al aumento del nivel del mar y mantener su operatividad, mientras mantienen su operatividad y operaciones comerciales, haciendo los puertos más resilientes.

Una solución prometedora son las infraestructuras flotantes, que pueden aumentar el espacio disponible siendo resilientes frente al aumento del nivel del mar. Estas estructuras ya han sido propuestas y probadas en diferentes contextos, demostrando su utilidad en el desarrollo portuario sostenible (Penning-Rowse, 2020).

En este artículo se presenta la tecnología C2C[®], que permite la conexión rígida de módulos de hormigón en flotación, obteniendo estructuras monolíticas del tamaño necesario. Como aplicación de esta innovación, se desarrolla la plataforma ALFOWT[®], de sus siglas en inglés *Assembly Line for Floating Offshore Wind Turbines* (**Fig. 1**). Esta estructura tiene como finalidad dar respuesta a la demanda de espacio portuario y de instalación de turbinas eólicas flotantes albergando una cadena de montaje industrializado de flotadores metálicos. El estudio de plataformas flotantes requiere de análisis hidrodinámicos para determinar su comportamiento en el ambiente marino donde operarán.

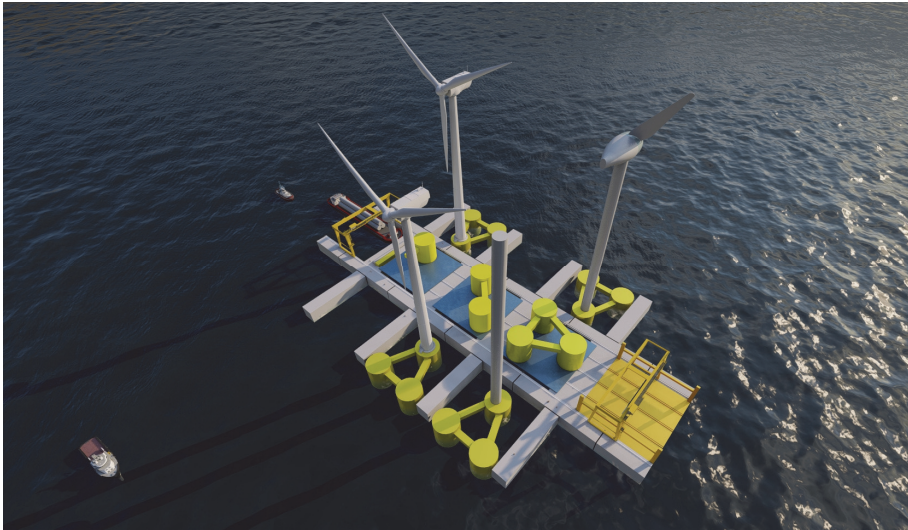


Fig. 1. Modelo 3D de la plataforma ALFOWT[®]. Fuente: Propia.

En este estudio se realiza un primer análisis hidrodinámico de un módulo de hormigón. Para ello se han empleado dos softwares diferentes: Orcaflex (Orcina, 2024) y Ansys AQWA (ANSYS, 2021). El objetivo primero de este estudio es la obtención de un modelo hidrodinámico de base para los análisis hidrodinámicos, de instalación y estructurales

Además, este estudio constituye un paso preliminar fundamental para sentar las bases de un futuro análisis estructural detallado de una plataforma flotante destinada al ensamblaje de flotadores para aerogeneradores flotantes basada en el proyecto ALFOWT[®].

2. Tecnología propuesta

2.1. Assembly Line of Floating Offshore Wind Turbines (ALFOWT[®])

El estudio realizado tiene la finalidad de sentar las bases para determinar una metodología de cálculo para crear grandes plataformas flotantes con distintas finalidades. En este caso, se presenta la patente ALFOWT[®] (Fig. 1), destinada a ser una cadena de ensamblaje flotante para turbinas eólicas flotantes construida mediante módulos flotantes de hormigón basada en la patente C2C[®] (Sección 0). Tiene

el objetivo de responder a la demanda energética del mercado y cumplir las metas ambiciosas de las distintas instituciones europeas en cuanto a la potencia instalada en energía eólica marina flotante.

Esta plataforma modular se construye con distintos módulos de hormigón, como el descrito en la sección 0. unidos de forma rígida para albergar en su parte superior la cadena de ensamblaje de flotadores metálicos y turbinas eólicas. La plataforma cuenta con railes donde se van instalando y ensamblando los flotadores, hasta llegar a la parte final de la misma, donde un dispositivo de montacargas lo pondrá en flotación. Posteriormente, se remolca el flotador a la zona de almacenamiento en flotación y se instala la turbina eólica. El último paso es conducir el flotador totalmente instalado a su posición de producción. Además, en estas zonas de almacenamiento también se podrían realizar labores de mantenimiento y, al final de su vida útil, el desmantelamiento.

La finalidad de esta plataforma es el montaje de forma sencilla, industrializada y económica de las turbinas eólicas flotantes, abaratando los costes de producción, transporte y mantenimiento. Una vez utilizada en una localización determinada, se puede remolcar a otras zonas donde se deseen instalar turbinas eólicas flotantes.

2.2. Tecnología C2C®

El estudio realizado en este artículo está basado en la tecnología C2C®, patente de la empresa Safier Ingenierie SAS. Esta tecnología permite la unión en flotación de dos módulos de hormigón de forma que se puede obtener una estructura monolítica y rígida, con continuidad en toda la sección. La finalidad de esta tecnología es posibilitar la construcción de estructuras del tamaño necesario para su aplicación final.

El proceso de unión se realiza en zonas de sombra como puertos o bahías naturales, donde las aguas estén en calma. Los dos cajones se acercan limitando sus movimientos relativos a unas tolerancias mínimas, hasta estar finalmente unidos mediante elementos provisionales, como se ha visto en el sector de las obras marítimas anteriormente. Entre ambos módulos, existe una cavidad impermeable por la instalación previa de una junta elastómera en uno de los módulos, que será comprimida por el segundo cajón durante la unión temporal (Fig. 2). Gracias a la compresión la cavidad será estanca. A continuación, se realiza un bombeo del agua vaciando la cavidad, y se procede a la instalación del armado activo y pasivo y, finalmente, al hormigonado. Una vez fraguado el hormigón, se desmontan los elementos auxiliares, obteniendo una estructura monolítica y continua, de longitud igual a los dos módulos.

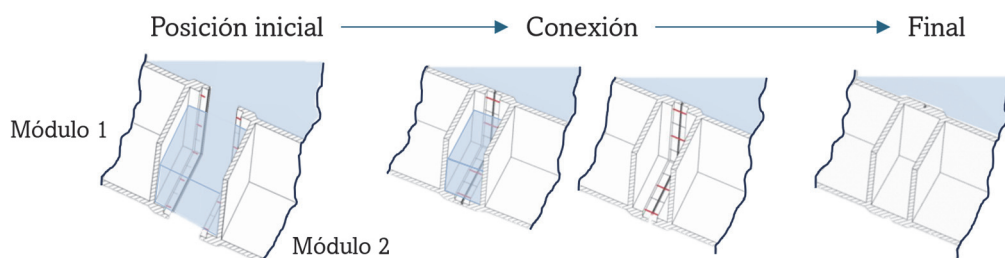


Fig. 2. Infografía de la unión entre dos cajones de hormigón en flotación mediante C2C®. Fuente: Propia.

2.3. Descripción del módulo

El módulo de hormigón analizado tiene forma de cruz, 80 m de largo y 45 m de ancho en su mayor sección, siendo las uniones de 24 m de longitud (Fig. 3). Se divide interiormente en diferentes cavidades mediante mamparos de hormigón que tendrán de forma preliminar 500 mm de grosor. En

posteriores análisis estructurales, estas dimensiones pueden ser modificadas en función de las necesidades del proyecto. Cuatro de las cavidades se utilizarán como tanques de lastre en trabajos futuros.

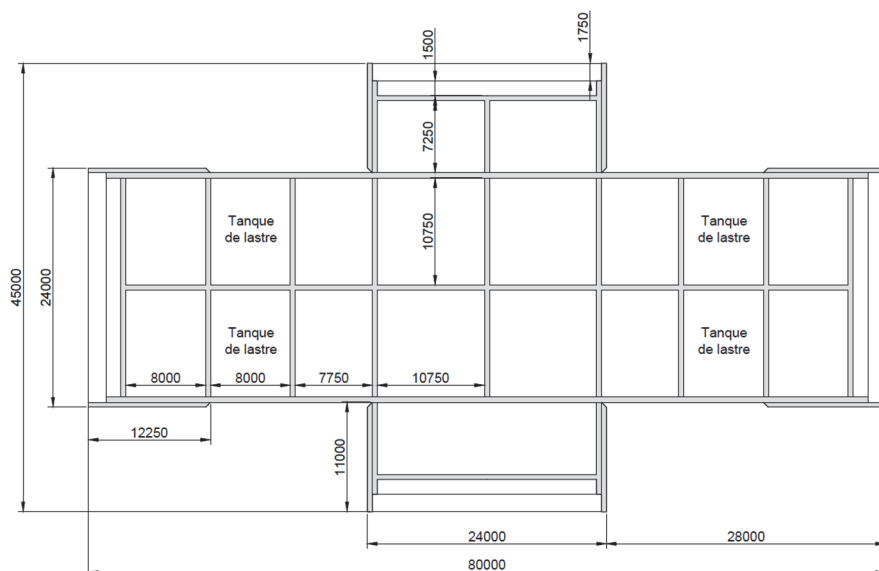


Fig. 3. Geometría del módulo analizado (cotas en mm). Fuente: Propia.

3. Materiales y métodos

3.1. Códigos empleados

Para realizar un análisis hidrodinámico de una estructura flotante se pueden utilizar diferentes softwares. En este caso, se realiza una comparación entre dos de ellos: Orcawave y Ansys AQWA. Ambos códigos pueden ser utilizados para realizar análisis en el dominio de la frecuencia y estudiar de forma sencilla estructuras complejas y la combinación de cargas ambientales típicas de un ambiente marino (Ramachandran et al., 2024; Wang et al., 2020).

El paquete Ansys proporciona herramientas para el modelado, análisis hidrodinámico, análisis de la respuesta ante el fenómeno de radiación o el análisis de la interacción amarre-estructura. El estudio de la estructura asume esta como un sólido rígido y aplica la teoría del potencial.

Orcawave permite realizar el análisis en el dominio de la frecuencia, aunque el modelado de la estructura debe hacerse a través de un software externo. En este caso, se utiliza el software Rhinoceros 3D que permite la creación de una malla adecuada de entrada al software de Orcina.

Adicionalmente, se ha utilizado el software Matlab para el tratamiento y la comparación de datos, y extraer los datos requeridos de ambos códigos.

3.2. Bases teóricas

Tanto Ansys AQWA como el módulo de Orcina para análisis en el dominio de la frecuencia Orcawave aplican la teoría del potencial, definida a continuación. Para ello, se asume que el fluido, en este caso, el agua del mar es incompresible y no viscoso y, además, el flujo de este es considerado irrotacional.

En el análisis en el dominio de la frecuencia se enfrenta la estructura a distintos oleajes regulares de diferente periodo y dirección para conocer los parámetros hidrodinámicos y el comportamiento de la estructura en flotación libre, sin amarres.

La base de la teoría del potencial es la ecuación de Laplace para el potencial de velocidad (φ):

$$\nabla^2 \cdot \varphi = 0 \quad (1)$$

Desarrollando la ecuación (1) y estableciendo un eje de coordenadas cartesianas $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$ el movimiento del fluido alrededor del módulo se define por el potencial de velocidad (Cebada-Relea et al., 2022; Chakrabarti, 1987):

$$\varphi(\mathbf{X}, t) = \text{Re}[\varphi(\mathbf{X})e^{-i \cdot \omega \cdot t}] \quad (2)$$

donde:

- t es el tiempo,
- Re representa la parte real de la expresión que hay entre corchetes,
- $\varphi(\mathbf{X})$ es el potencial de velocidad en función de las coordenadas espaciales, y
- ω es la frecuencia angular

El método de cálculo utilizado por ambos es el método de elementos frontera (BEM de sus siglas en inglés *Boundary Element Method*). Las condiciones de contorno de este método son las siguientes:

- El flujo en el fondo marino es nulo. Matemáticamente se expresa:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \text{ en } Z = -25 \text{ m} \quad (3)$$

- Superficie libre. La presión sobre la superficie libre del agua es igual a la presión atmosférica.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \text{ en } Z=0 \quad (4)$$

- La velocidad normal de las partículas del fluido en la superficie de la estructura flotante es igual a su velocidad.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

donde $\partial/\partial n$ representa la variación en la dirección normal a la superficie del cajón y $\mathbf{n}$ es el vector unitario perpendicular a la superficie de la estructura.

- Por último, la condición de radiación, donde la perturbación del fluido se disipa a largas distancias de la estructura flotante. Matemáticamente:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} (\varphi) = 0 \text{ para } R = (X^2 + Y^2)^{0.5} \quad (6)$$

La ecuación de movimiento en el dominio de la frecuencia se define matemáticamente según la ecuación

$$[-\omega^2 \cdot (\mathbf{M} + \mathbf{A}) - i \cdot \omega \cdot \mathbf{B} + \mathbf{C}] \cdot \boldsymbol{\chi} = \mathbf{f}(\omega) \quad (7)$$

- $\mathbf{M}$ es la matriz de masa de la estructura,
- $\mathbf{A}$ es la matriz de masa añadida, que define el efecto de la aceleración de las partículas producida por el movimiento de la estructura,

- **B** es la matriz de amortiguamiento lineal, que define el fenómeno de radiación del oleaje de los cuerpos flotantes,
- **C** es la matriz de rigidez hidrostática,
- **χ** es la amplitud de movimiento del cajón en cada grado de libertad, y
- **f(ω)** es el vector de fuerzas unitarias y momentos que actúan sobre la superficie mojada del cuerpo.

Las matrices **A** y **B** son coeficientes hidrodinámicos que dependen de la frecuencia del oleaje, la geometría del cuerpo y la profundidad del mar. Matemáticamente se expresan según las ecuaciones (8) y (9), respectivamente:

$$\mathbf{A} = \frac{\rho}{\omega} \cdot \int_{S_0}^{\int [\varphi_r]} \text{Im} \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = -\rho \cdot \int_{S_0} \text{Re}[\varphi_r] \cdot \mathbf{n}_j \cdot dS \quad (9)$$

donde Im es la parte imaginaria del interior de los corchetes. Además, las matrices **A** y **B** son simétricas debido a que el cajón estudiado es un cuerpo flotante con velocidad de avance nula, y los elementos fuera de las diagonales principales son nulos debido a su geometría en los planos XZ e YZ. Estos elementos son los que se comparan entre los resultados obtenidos de Orcawave y Ansys AQWA para validar ambos modelos para futuros análisis.

Cada software tiene particularidades y muestran ventajas y desventajas en según qué análisis. Orcawave es ideal para estudios en el dominio de la frecuencia, y calcula de forma precisa los coeficientes hidrodinámicos y fuerzas de excitación en el rango de frecuencias indicado. Se trata de un software adecuado para realizar este tipo de análisis para cuerpos con geometrías complejas o donde las interacciones con el agua del mar son determinantes. Generalmente, se utiliza para generar una base de datos hidrodinámicos que servirán para futuros análisis en el dominio del tiempo mediante Orcaflex. Por su parte, Ansys AQWA permite realizar análisis en el dominio del tiempo partiendo de los resultados del análisis en dominio de la frecuencia más directamente, integrados todos los análisis en la misma interfaz.

3.3. Malla computacional

Para el análisis en el dominio de la frecuencia se construye la malla del módulo tras la realización de un análisis de convergencia de malla, donde diferentes tamaños de malla son seleccionados y se utiliza, finalmente, un tamaño de malla de 0.85 m. Para ello, se siguen las recomendaciones de la norma DNVGL-RP-N103 (DNV, 2017), según la cual las recomendaciones de tamaño de malla para estructuras flotantes son:

- La longitud de la diagonal de cada elemento ($d_{element}$) debe ser inferior a 1/6 de la longitud de onda mínima (λ_{mn}) analizada.
- En áreas donde la geometría tenga cambios bruscos con respecto al resto de la estructura, como bordes o esquinas, se debe refinar la malla con elementos más pequeños.
- Cuando se realice un modelo de una estructura que tenga agua a ambos lados del panel, el tamaño de cada elemento de malla en esa zona debe 3-4 veces inferior al grosor de dicho panel.
- Cuando se estén calculando fuerzas de arrastre, la malla debe ser más fina en torno a la superficie del agua en contacto con la estructura.

- La superficie del plano de agua y el volumen del modelo deben coincidir con los de la estructura real.

El mallado final de la estructura se muestra en la Fig. 4.

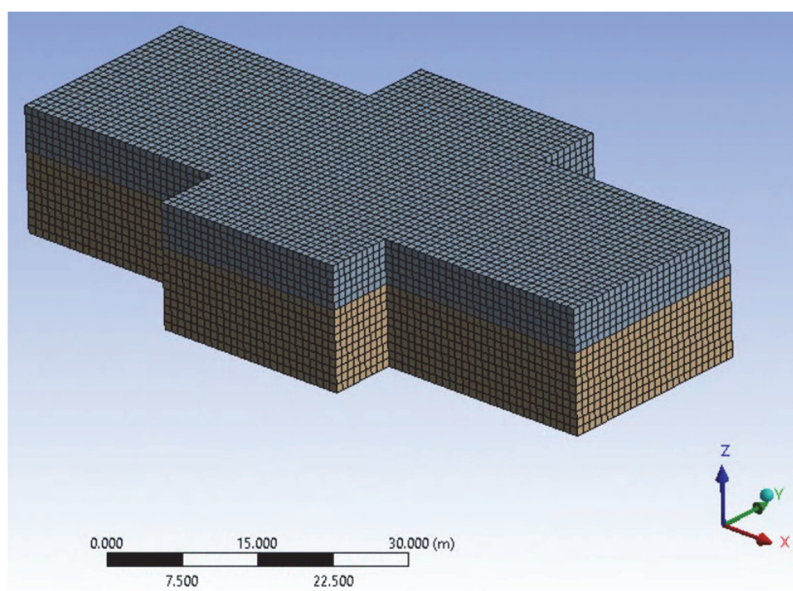


Fig. 4. Mallado final de la estructura. Fuente: Propia.

4. Resultados

Las matrices de masa añadida y de amortiguamiento se obtienen para cada frecuencia analizada y para cada grado de libertad. Los grados de libertad vienen determinados por las posiciones en la matriz, X, Y, Z, RX, RY y RZ en las posiciones 1 a 6 respectivamente. Las matrices de masa añadida y de amortiguamiento obtenidas se representan en gráficos con los valores de cada grado de libertad en cada frecuencia analizada, como se representa en la Fig. 5 y Fig. 6, respectivamente.

Los resultados obtenidos en Ansys AQWA se representan con un asterisco (*) mientras que los de Orcawave solo con la línea correspondiente a cada grado de libertad. Se observa que, en los elementos representados de las diagonales principales, A_{ii} y B_{ii} la correlación de resultados es total, mientras que en los elementos A_{24} y B_{24} hay mayores diferencias.

Se obtienen valores negativos en los elementos de fuera de las diagonales. Esto se debe a la incapacidad de este tipo de softwares de modelar el arrastre para el análisis en el dominio de la frecuencia, factor a tener en cuenta en los análisis futuros en el dominio del tiempo.

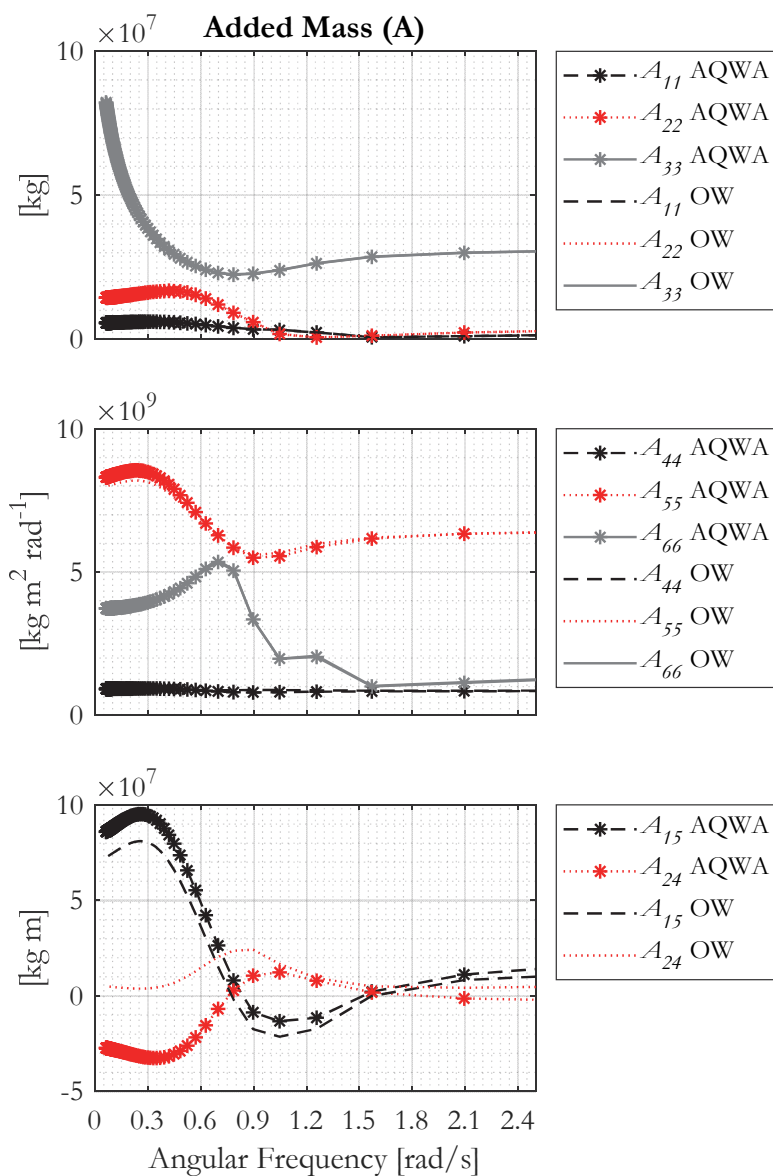


Fig. 5. Resultados de la matriz de masa añadida con Orcawave (OW) y AQWA. Fuente: Propia

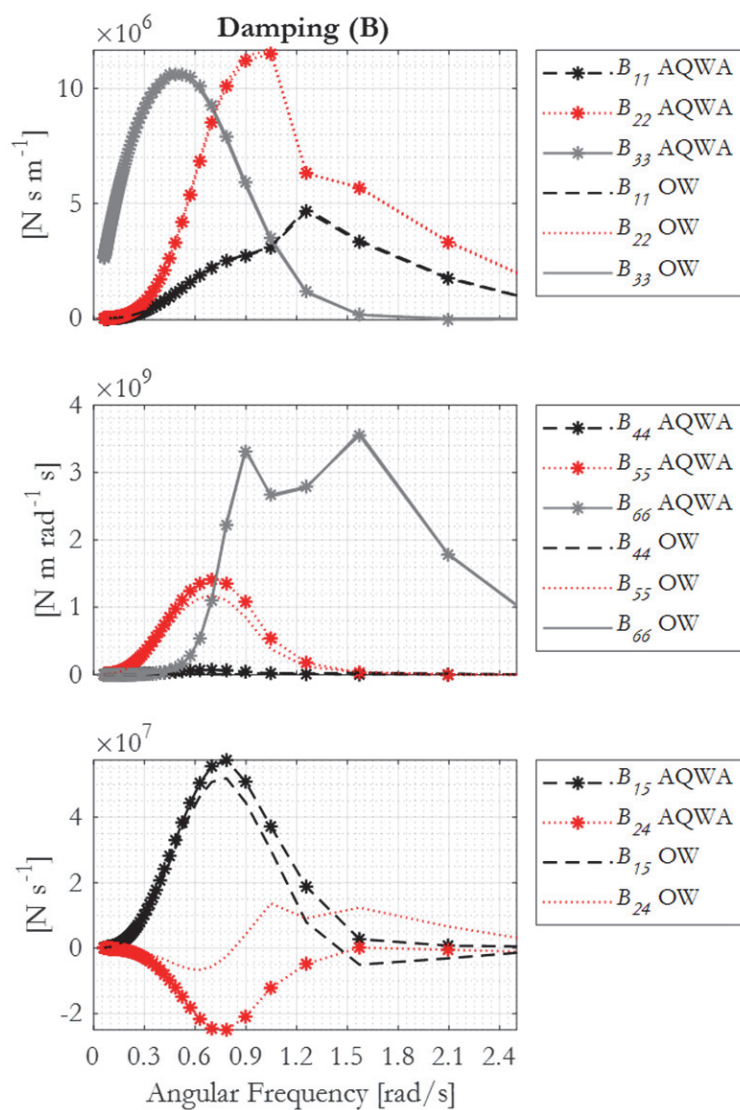


Fig. 6. Resultados de la matriz de amortiguamiento con Orcawave (OW) y AQWA. Fuente: Propia

5. Conclusiones

En este estudio se ha presentado el proyecto ALFOWT[®] y la patente C2C[®] como solución a la creciente demanda de espacios portuarios que se espera en los próximos años. Además, como fase inicial de diseño se ha realizado la caracterización de la respuesta de un módulo flotante de la plataforma al oleaje. Esto se ha llevado a cabo en Orcawave y Ansys AQWA.

Se compararon los resultados obtenidos con ambos códigos relativos a las matrices de masa añadida (**A**) y amortiguamiento (**B**). La correlación obtenida ha resultado muy alta, especialmente en los elementos de la diagonal principal, lo que confirma la consistencia en la modelización de los grados de libertad principales. Sin embargo, en los elementos fuera de la diagonal, como A_{24} y B_{24} , se observaron divergencias entre Orcawave y Aqwa atribuibles a la distinta interpretación de las mallas por cada uno. Además, los valores negativos en estos elementos resultan de la incapacidad de este tipo de software a modelar el arrastre en el dominio de la frecuencia, factor que debe tenerse en cuenta en los posteriores modelos.

En futuros análisis, estos modelos se estudiará el comportamiento de la unión rígida C2C[®] entre módulos flotantes, evaluando las fuerzas sobre los elementos auxiliares y determinando condiciones operativas. Además, se realizará un análisis hidrodinámico y estructural completo de la plataforma ALFOWT[®] para entender su comportamiento global.

Referencias

- ANSYS. (2021). *ANSYS AQWA Theory Manual* (2021 R1).
- Cebada-Relea, A. J., López, M., & Aenlle, M. (2022). Time-domain numerical modelling of the connector forces in a modular pontoon floating breakwater under regular and irregular oblique waves. *Ocean Engineering*, 243, 110263. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.110263>
- Chakrabarti, S. K. (1987). *Hydrodynamics of offshore structures*. WIT press.
- DNV. (2017). *DNVGL-RP-N103 Modelling and analysis of marine operations*. <http://www.dnvgl.com>,
- Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L., Adhikari, S., Parkes, D., Humphrey, V. W., Dangendorf, S., Hogarth, P., Zanna, L., Cheng, L., & Wu, Y. H. (2020). The causes of sea-level rise since 1900. *Nature*, 584(7821), 393-397. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>
- Hanson, S. E., & Nicholls, R. J. (2020). Demand for Ports to 2050: Climate Policy, Growing Trade and the Impacts of Sea-Level Rise. *Earth's Future*, 8(8). <https://doi.org/10.1029/2020EF001543>
- Hein, C. J., & Kirwan, M. L. (2024). Marine Transgression in Modern Times. *Annual Review of Marine Science*, 16(1), null. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022123-103802>
- Isiaka, I., Ndukwe, K., & Chibuike, U. (2023). Mean Sea Level: The Effect of the Rise in the Environment. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 4(02), 94-100. <https://doi.org/10.38094/jastt42178>
- MITECO. (2021). *Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ministerio/planes-estrategias/desarrollo-eolica-marina-energias/eshreolicamarina-pdfaccesiblev5_tcm30-534163.pdf

- OECD. (2012). Strategic transport infrastructure needs to 2030. *Strategic transport infrastructure needs to 2030*, 9789264114425, 1-246. <https://doi.org/10.1787/9789264114425-EN>
- Oppenheimer, M., Glavovic, B., Hinkel, J., De Wal, R., Magnan Alexandre K, Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., Deconto, R. M., Ghosh, T., & others. (2019). *Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities*. The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Orcina. (2024). *Orcawave User Manual* (11.3).
- Penning-Rowsell, E. (2020). Floating architecture in the landscape: climate change adaptation ideas, opportunities and challenges. *Landscape Research*, 45(4), 395-411. <https://doi.org/10.1080/01426397.2019.1694881>
- Ramachandran, R. C., Serraris, J. J., Montfort, J. H., De Ridder, E. J., Desmond, C., & Murphy, J. (2024). Towing Analysis and Validation of a Fully Assembled Floating Offshore Wind Turbine Based on an Experimental Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/jmse12040689>
- Verschuur, J., Koks, E. E., & Hall, J. W. (2022). Ports' criticality in international trade and global supply-chains. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32070-0>
- Wang, G., Drimer, N., & Goldfeld, Y. (2020). Modular floating structures (MFS) for offshore dwelling a hydrodynamic analysis in the frequency domain. *Ocean Engineering*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107996>
- Yang, Z., Ng, A. K. Y., Lee, P. T. W., Wang, T., Qu, Z., Sanchez Rodrigues, V., Pettit, S., Harris, I., Zhang, D., & Lau, Y. yip. (2018). Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 444-458. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.004>

Evaluación del desplazamiento costero y la salud ecosistémica en la Bahía de Tumaco mediante Delft3D, CoastSat y aprendizaje automático

Assessment of Shoreline Displacement and Ecosystem Health in Tumaco Bay Using Delft3D, CoastSat, and Machine Learning

Andrés M. Enríquez-Hidalgo^{a,b,d}, Andrés Vargas-Luna^{a,d}, Marc Mestres^{b,c}, Jorge Escobar-Vargas^{a,d}, Manuel Espino Infantes^{b,c}, Andrés Torres^{a,d,e}

^aDepartamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, ^bLaboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya (LIM/UPC)–Barcelona Tech, ^cCentro Internacional de Investigación de los Recursos Costeros (CIIRC), ^dGrupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del agua y el Ambiente, Pontificia Universidad Javeriana, ^eInstituto Javeriano del Agua, Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7ª No. 40-62, Bogotá, Colombia.

 enriquez_andres@javeriana.edu.co;  avargasl@javeriana.edu.co;  marc.mestres@upc.edu;
 jorge-escobar@javeriana.edu.co;  manuel.espino@upc.edu;  andres.torres@javeriana.edu.co

How to cite: Enríquez-Hidalgo, A. M.; Vargas-Luna, A.; Mestres, M.; Escobar-Vargas, J.; Espino Infantes, M. & Torres, A. (2024). Evaluación del desplazamiento costero y la salud ecosistémica en la Bahía de Tumaco mediante Delft3D, CoastSat y aprendizaje automático. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

This study investigates coastal dynamics and water health in Tumaco Bay, Colombia, through the integration of numerical models and machine learning techniques in a data-limited environment. To analyze shoreline displacement (SLD), the SWAN and FLOW models coupled in Delft3D were used, complemented by remote sensing data from CoastSat. Using a structured computational grid of 100 m, tidal ranges and wave patterns were identified along the beaches of El Morro and El Bajito. Additionally, the Random Forest model determined that tidal range and wave direction are the key factors influencing SLD variability. Simultaneously, the D-Quality module assessed parameters such as pH, dissolved oxygen, and nutrients, uncovering the impacts of human activities on mangrove ecosystems. The results highlight that, although the beaches experience favorable hydrodynamic and wave conditions, they face significant challenges in ecological sustainability due to environmental degradation in physicochemical and biological aspects. This integrated approach, linking wave dynamics, water quality, and ecosystem health, provides an innovative methodology for advancing sustainable coastal management.

Keywords: Delft3D, Waves, Sea Level, Shoreline Displacement, Coastsat, Machine Learning, Random Forest, Tropical Pacific Coast.

Resumen

Este trabajo investiga las dinámicas costeras y la salud del agua en la Bahía de Tumaco, Colombia, mediante la integración de modelos numéricos y técnicas de aprendizaje automático en un contexto de datos limitados. Para analizar el desplazamiento de la línea costera (SLD), se utilizaron los modelos SWAN y FLOW acoplados en Delft3D, complementados con datos de teledetección obtenidos a través de CoastSat. Usando una malla computacional estructurada de 100 m, se identificaron patrones de mareas y oleaje en las playas de El Morro y El Bajito. Además, el modelo Random Forest permitió determinar que el rango mareal y la dirección del oleaje son los principales factores que influyen en la variabilidad del SLD. Simultáneamente, el módulo D-Quality analizó indicadores como el pH, oxígeno disuelto y nutrientes, revelando los efectos de las actividades humanas en los ecosistemas de manglares. Los resultados muestran que, a pesar de que las playas están sometidas a condiciones hidrodinámicas y de oleaje favorables, enfrentan retos importantes en términos de sostenibilidad ecológica debido a la degradación ambiental en los aspectos físicoquímicos y biológicos. Este enfoque integral, que relaciona la dinámica del oleaje, la calidad del agua y la salud ecosistémica, constituye una metodología innovadora para avanzar hacia una gestión costera más sostenible.

Palabras clave: Delft3D, Oleaje, Nivel del Mar, Desplazamiento de la Línea de Costa, Coastsat, Aprendizaje Automático, Bosque Aleatorio, Costa del Pacífico Tropical.

1. Introducción

Las zonas costeras tropicales enfrentan desafíos continuos derivados del rápido aumento de la población, lo que tiene consecuencias adversas como la degradación de sus costas (Luan et al., 2021). En el contexto de Latinoamérica, las costas son afectadas por importantes factores socioambientales, impulsados por actividades como la extracción de madera y la acuicultura. Según Ruan et al. (2022) estos factores han provocado pérdidas que oscilan entre el 20% y 70% de manglares en todo el continente.

A pesar de los avances significativos en la comprensión del oleaje, la calidad del agua y la desplazamiento de la línea costera, persiste una brecha notable en la integración de estos elementos para evaluar el estado ecosistémico de las costas. Las herramientas de predicción de olas suelen centrarse exclusivamente en la atenuación del oleaje y circulación costera, mientras que los estudios de calidad del agua en las costas a menudo no integran adecuadamente la hidrodinámica (Ammar & Bhaskaran, 2020). Esta falta de enfoque integrado limita nuestra comprensión de cómo el oleaje, la hidrodinámica y la calidad del agua afectan a la estabilidad y salud de los ecosistemas costeros y el desplazamiento de la línea de costa.

Respecto, a el desplazamiento de la línea costera influenciado por las dinámicas de marea y oleaje, es un aspecto clave de las interacciones dentro de las regiones costeras que requiere monitoreo continuo (Idier et al., 2019; Son et al., 2020). Comprender las características de las olas es esencial para evaluar la erosión y acreción, que informan las configuraciones y cambios en la línea costera (Bryant et al., 2022). La aplicación de modelos numéricos, como destacan Martins et al. (2017), es imprescindible para mejorar la precisión en la evaluación de los riesgos costeros. Herramientas como CoastSat, que permiten monitorear los cambios en la línea costera a partir de imágenes satelitales, son fundamentales para capturar la variabilidad espaciotemporal del SLD en regiones donde los datos in situ son limitados. Dicho esto, las regiones en desarrollo, donde la instrumentación marina

es escasa y los registros de oleaje disponibles suelen ser insuficientes para evaluaciones a largo plazo, la creación de registros artificiales de oleaje mediante modelos numéricos es un recurso valioso (Niño P. & Oviedo B., 2018; Mury et al., 2020). Estos registros, generados a partir de modelos de propagación de oleaje y análisis de bases de datos locales de viento, pueden proporcionar información crucial para la gestión del riesgo costero, especialmente en áreas vulnerables a la erosión y las inundaciones (Ortega et al., 2013; Rivas et al., 2019; Cano Calvo, 2021).

Para abordar este problema, el acoplamiento de los módulos FLOW y WAVE de Delft3D con el análisis de calidad del agua (WAQ) proporciona un enfoque novedoso. Además, la integración de herramientas de teledetección como CoastSat, que permite evaluar el desplazamiento de la línea, junto con técnicas de aprendizaje automático como el Random Forest; aporta una perspectiva más robusta de identificación de los factores incidentes en procesos de erosión y la obtención de datos espaciotemporales de los contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos, permitiendo una mejor comprensión de la vulnerabilidad de las playas de El Morro y Tumaco.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar la relación entre el desplazamiento de la línea costera, la calidad del agua la hidrodinámica y oleaje en la Bahía de Tumaco, Colombia.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar y depurar la información de entrada para los modelos hidrodinámicos (FLOW), de oleaje (WAVE) y de calidad del agua (WAQ) en Delft3D, así como las imágenes Landsat utilizadas para la aplicación de CoastSat.
- Calibrar y validar resultados para las variables hidrodinámicas, de oleaje, calidad del agua.
- Analizar la relación entre las condiciones hidrodinámicas, el oleaje, la calidad del agua y el desplazamiento de la línea costera, evaluando su impacto en la estabilidad y sostenibilidad de los ecosistemas costeros.

3. Desarrollo de la innovación

3.1. Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la costa de la Bahía de Tumaco, ubicada en el departamento de Nariño, Colombia. La zona urbana de Tumaco se divide en tres áreas principales: Isla del Morro, Isla de Tumaco y la ciudad de San Andrés de Tumaco, las cuales están conectadas por los puentes Pindo y Morro. En la región desembocan numerosos ríos que drenan el territorio, destacándose dos grandes cuencas: al norte, la del brazo sur del río Patía, y al sur, la desembocadura del río Mira. En la zona central, también existen varios tributarios de microcuencas, como los ríos Tablones, Rosario, Caunapí, Mejicano, Chagüi, Colorado y Curay (Tejada, 2003).

Las características geográficas de esta área han permitido el desarrollo de formaciones críticas como playas, bancos, barras, marismas de alta salinidad y suelos ricos en depósitos orgánicos, con vegetación de manglar, guandal y ribereña. Estas formaciones están expuestas a olas con alturas promedio de entre 0.5 m y 1.5 m, y periodos de 8 a 10 segundos, provenientes del noroeste del océano Pacífico, especialmente durante los meses de invierno boreal. Registros observacionales y estudios previos han evidenciado cambios morfodinámicos significativos en la zona intermareal de la Bahía de Tumaco, con procesos de erosión y acreción en sectores como El Pindo entre 1921 y

1948, la erosión del lado sur de la isla en 1969, y los procesos erosivos generados por el tsunami de 1979 y la marejada de 1982-1983 (Tejada, 2003). La Fig. 1 indica la localización de Tumaco.

3.2. Datos Recolectados

La recolección de datos batimétricos de la Bahía de Tumaco fue realizada por el Servicio Hidrográfico Nacional de la Dirección General Marítima (DIMAR) del Ministerio de Defensa de Colombia. La información se refiere al Nivel Medio de Baja Marea y está proyectada en EPSG:32617 – WGS 84 / UTM zona 17N. Dado que estas mediciones no cubren toda el área de Tumaco, se combinaron con datos satelitales de reflectancia del programa SENTINEL II, procesados mediante Google Earth Engine, para calcular la profundidad en aguas poco profundas (<15 m) (Li et al., 2021).

La recopilación de datos meteorológicos marinos fue realizada por la Red de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (RedMpomm-DIMAR). Se obtuvieron 31,301 observaciones del nivel del mar (2011-2021), 12,833 observaciones de velocidad y dirección del viento (cada seis horas). Además, se descargaron datos globales sobre la altura significativa de las olas (SWH), periodo y dirección de las mismas desde el Servicio Marino de Copernicus, utilizando el producto WAVERYS, basado en el modelo de olas de tercera generación MFWAM. Finalmente, la tabla 1 presenta los parámetros y constantes utilizados para modelar la calidad del agua en Tumaco. Las concentraciones iniciales fueron derivadas de las estaciones de monitoreo de DIMAR y otras fuentes, distinguiendo entre áreas de intervención alta, moderada y baja, correspondientes a diferentes zonas de manglares alrededor de la bahía (estrellas rojas figura 1).

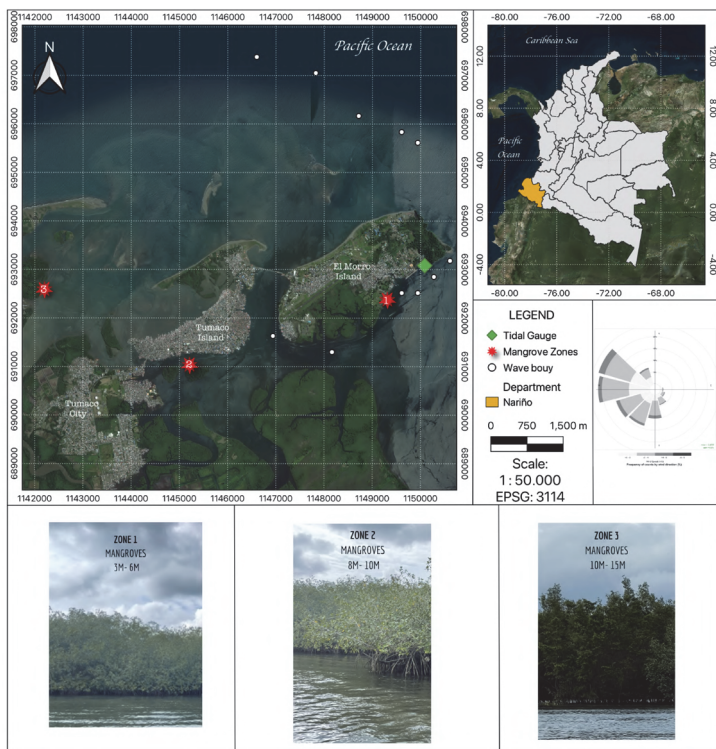


Fig 1. Ubicación del área de estudio y áreas de manglar (estrellas rojas), rosa de los vientos, y ubicación de estación meteorológica y de mareas en Tumaco-Nariño (polígono verde).

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y biológicos Bahía de Tumaco y constantes de reacción para WAQ quality.

VARIABLE	Condiciones iniciales	Contorno sur (zona 1)	Contorno oeste (zona 2)	Contorno Norte (zona 3)	Constante	Uni- dades	Valor
Temperatura (°C)	27.900	29.200	26.500	27.000	Resultados modelo hidrodinám ico	°C	NA
Salinidad (ups)	26.800	29.000	18.000	31.100	Resultados modelo hidrodinám ico	ppt	NA
Amonio nh4 (mg/L)	0.012	0.034	0.024	0.016	Tasa de nitrificació n a 20°C	gN/m ³ / d	0.100
Nitratos no3(mg/L)	0.018	0.016	0.025	0.006	Tasa de nitrificació n a 20°C	gN/m ³ / d	0.100
Ortofosfatos PO4 (mg/L)	0.003	0.004	0.002	0.003	Tasa de adsorción	1/d	0.050
Sílice disuelta (mg/L)	0.651	0.189	0.892	0.082	NA	NA	NA
Oxígeno disuelto (mg/L)	6.069	4.485	6.393	6.666	Tasa de reaireación	m/d	1.000
DQO (mg/L)	2.700	2.800	2.900	2.700	Tasa de decaimient o a 20°C	1/d	0.050
DBO (mg/L)	1.100	1.500	2.000	1.100	Tasa de decaimient o	1/d	0.300
Coliformes totales (NMP/100mL)	4.500	4.3.000	4.500	4.6000	Tasa de mortalidad de primer orden	1/d	0.800
E-coli (NMP/100mL)	68.500	20.000	170.000	170.000	Tasa de mortalidad de primer orden	1/d	0.800
Coliformes fecales (NMP/100mL)	6.360	887.000	645.000	1.354	Tasa de mortalidad de primer orden	1/d	0.800
Solidos Suspendidos Disueltos (mg/L)	32	15	27	25	NA		
pH	8.05	8.13	8.01	8.2			
Nitritos NO2(mg/L)	0.006	0.001	0.001	0.001			
Clorofila (mg/m ³)	4.871	4.043	3.31	0.529			
Materia orgánica total (mg/L)	3.154	1.987	2.436	NA			
Materia orgánica disuelta (mg/L)	1.354	1.674	1.385	NA			
Estaciones Redcam	Mediana estaciones	Sociedad Portuaria	Isla vaquera, P.bocagrande. El pajal	Arco del Morro			

3.3. Modelado numerico FLOW, SWAN Y WAQ en Delft3D

La modelación de áreas costeras implica simulaciones hidrodinámicas y de olas multidimensionales, utilizando formulaciones de flujo y transporte no permanentes basadas en datos meteorológicos y de mareas (Marsooli et al., 2017). Estas simulaciones requieren el acoplamiento de modelos hidrodinámicos y de olas para comprender de manera integral las dinámicas costeras y sus interacciones bidireccionales (Martos & Isabel, 2022). En este contexto, se empleó el acoplamiento entre el modelo de olas SWAN y el módulo FLOW de Delft3D y la integración de los resultados de FLOW con WAQ para la simulación de la calidad del agua, lo que permite representar fenómenos como la refracción de corrientes, fricción de fondo mejorada y la influencia de las olas sobre las corrientes, mediante la generación de turbulencias y esfuerzos cortantes en el lecho (Paulus et al., 2013). Este acoplamiento e integración ha demostrado ser eficaz para analizar la interacción entre olas y corrientes en ambientes costeros complejos (Deltares, 2014, 2022a, 2022b; Kadigi et al., 2022; Sun et al., 2022). Delft3D, desarrollado por Deltares, es un software de código abierto que permite modelar procesos hidrodinámicos, de olas y de calidad de agua en ambientes costeros y estuarios. El modelo SWAN, utilizado para la simulación de olas, es completamente espectral y puede acomodar la propagación simultánea de oleajes desde diferentes direcciones, mientras que Delft3D-FLOW resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, lo que incluye la ecuación de continuidad y dos ecuaciones de momento horizontal (Deltares, 2022a). Estos modelos permiten estudiar de manera precisa la evolución de las olas y las interacciones hidrodinámicas en la Bahía de Tumaco.

3.4. Algoritmo Coastsat y Bosque Aleatorio

Para el análisis del desplazamiento de la línea costera (SLD) en las playas de El Bajito y El Morro, se utilizó CoastSat, una herramienta de código abierto disponible en GitHub que permite monitorear las líneas costeras mediante imágenes satelitales (Tamiminia et al., 2020). CoastSat proporciona una resolución temporal aproximada de dos semanas y una precisión horizontal de entre 10 m y 30 m. Dado que la marea puede introducir sesgos en los datos de línea costera, se aplicó una corrección de marea lineal basada en los niveles de agua medidos y la pendiente característica de la playa, ajustando cada línea costera a una elevación de referencia estándar.

Se llevó a cabo un análisis de correlación entre las variables de Waverys y los datos de SLD obtenidos con CoastSat, empleando un modelo de aprendizaje automático Random Forest. Este modelo permite identificar las variables más influyentes sobre el desplazamiento de la línea costera, analizando alturas significativas de olas (SWH), periodos pico de olas (PWP), dirección de olas (WDI), velocidades de deriva de Stokes (SDX y SDY), periodos medios de olas (MWP) y nivel del agua (WL). Los resultados mostraron que las configuraciones óptimas del modelo lograron un equilibrio entre la eficiencia computacional y la precisión predictiva para ambas áreas de estudio, El Bajito y El Morro.

Para la calibración y validación del bosque aleatorio, se utilizaron 1500 árboles de regresión inicialmente, reduciéndose a 1344 árboles para El Bajito y 1291 para El Morro, alcanzando valores de RMSE de 10.94 m y 9.21 m respectivamente, lo que es consistente con los errores encontrados en Billett et al., (2024). Estos resultados reflejan las limitaciones inherentes a la resolución espacial de las imágenes satelitales de Landsat, pero aun así proporcionan una herramienta útil para el monitoreo y predicción del desplazamiento de la línea costera.

4. Resultados

4.1. Resultados Modelo FLOW, SWAN y WAQ

En la Fig. 2, se presenta una serie temporal de un acercamiento específico al mes de octubre, destacando una ligera subestimación del modelo además del grafico de dispersión que ilustra la correlación entre los niveles de agua observados y simulados. Este gráfico está respaldado por un coeficiente de correlación de 0.98, un Error Cuadrático Medio (RMSE) de 4 cm y un sesgo de -0.5 cm, lo que indica que el modelo tiende a subestimar levemente los valores observados.

En cuanto a la calibración y validación de los resultados de los módulos FLOW y SWAN, estudios previos como los de Martos e Isabel (2022) reportan un RMSE de entre 6 y 8 cm y coeficientes de correlación de 0.7 a 0.8 al comparar niveles de agua medidos y simulados, utilizando el modelo de marea global TPXO8 como condición de contorno en su estudio alrededor del Golfo de Cádiz. Aunque existe una versión más reciente, el modelo TPXO9, los autores destacan que este no siempre ofrece mejores resultados al utilizarse en FLOW. En nuestro estudio, se alcanzó un RMSE de 12.8 cm y un coeficiente de correlación de 0.9. Esta mejora en la correlación se atribuye al acoplamiento de los módulos FLOW y SWAN, así como a la inclusión de vientos en las simulaciones, lo que, según los autores, contribuye significativamente a mejorar la precisión del modelo en Delft3D, como se ha demostrado en esta investigación

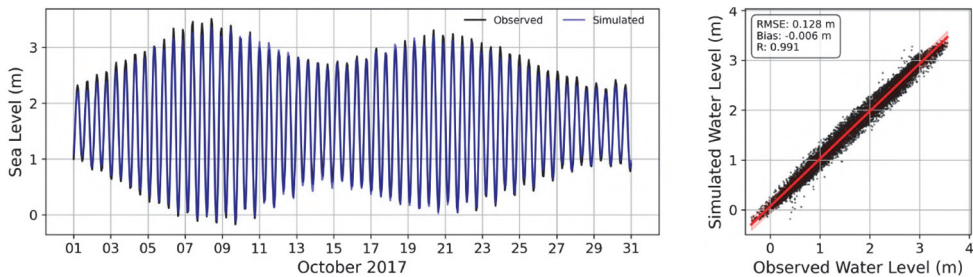


Fig 2. Nivel del mar octubre 2017 y grafico de dispersión de observados vs simulados.

Los resultados de la altura significativa del oleaje (SWH), periodo pico del oleaje (PWP) y dirección del oleaje (WDI) se comparan con los datos de reanálisis del Servicio Marino de Copernicus utilizando el producto WAVERYS para la validación. Para SWH, el modelo muestra un error cuadrático medio (RMSE) de 0.055 m, un sesgo de -0.045 m, y un coeficiente de correlación (R) de 0.970, lo que indica una subestimación leve en los valores simulados. En cuanto al PWP, el RMSE es de 1.642 s, con un sesgo de -0.786 s, y un coeficiente de correlación de 0.963, reflejando una subestimación del modelo en los valores simulados de PWP. Y para la WDI, el RMSE es de 6.722°, con un sesgo de 5.085°, y un coeficiente de correlación de 0.989, mostrando una ligera sobreestimación en la dirección del oleaje simulada. Respecto a los resultados espacializados de FLOW, SWAN y WAQ la Fig. 3 presenta los mapas que incluyen diversos parámetros.

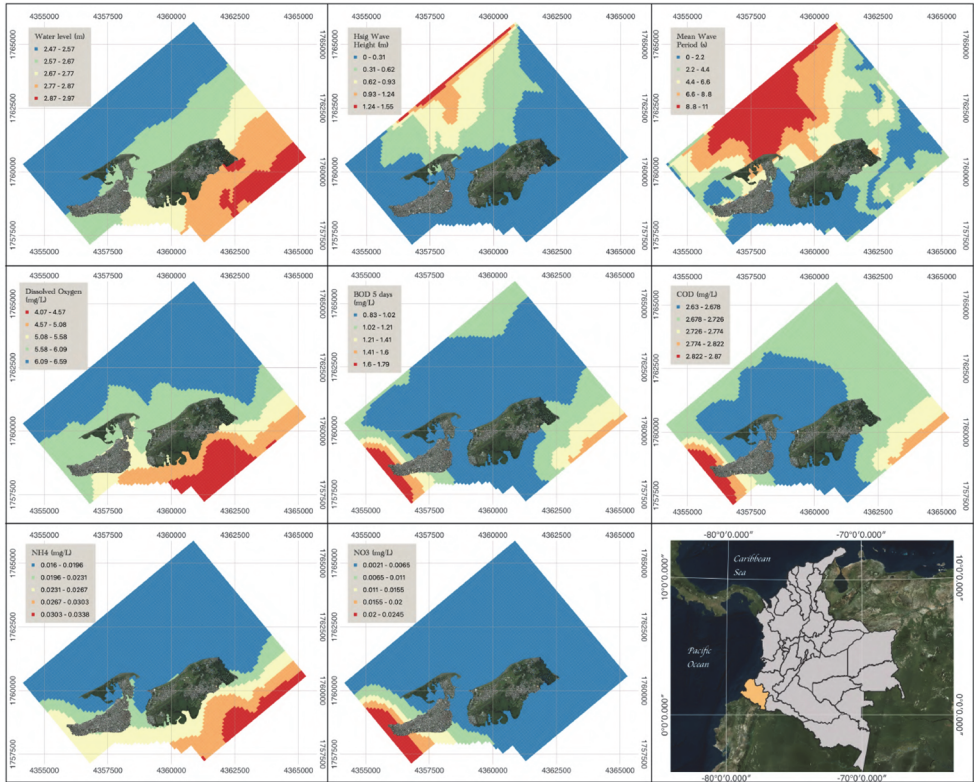


Fig 3. Resultados FLOW, SWAN Y WAQ en dominio computacional en 01 julio del 2018 23:00 horas.

4.2. Desplazamiento de la línea de costa (SLD) en las playas del Bajito y el Morro

Los periodos: 1993-2005 y 2014-2024. Durante el primer periodo, el transecto 4 muestra una acreción de 34.32 m/año, mientras que el transecto 9 presenta erosión a una tasa de -7.84 m/año. En el segundo periodo, la variabilidad entre los transectos disminuye, aunque persisten patrones de acreción y erosión. Se destacan tres transectos clave: el transecto 3, que pasa de erosión en el primer periodo a acreción en el segundo; el transecto 5, que presenta acreción en ambos periodos; y el transecto 9, que experimenta erosión constante en los dos periodos de análisis.

El comportamiento del transecto 3 cambia significativamente entre ambos periodos, pasando de una tendencia erosiva a una de acreción. Este cambio podría estar asociado a la recuperación de la playa debido a las condiciones hidrodinámicas y el aporte de sedimentos del río Mira, junto con la acción de las olas desde el oeste de la Isla de Tumaco, que impacta más fuertemente en la parte suroeste de la isla, donde los transectos 8 a 11 muestran una erosión constante. Por otro lado, los transectos 1 a 7, ubicados más al noreste, tienden a mostrar acreción, especialmente en el periodo más reciente, lo que podría atribuirse a la formación de una barra de sedimentos en el noreste de la Isla de Tumaco. En la playa de El Morro, que tiene una longitud de 3.5 km, se analizaron dos periodos: 1993 - 2000 y 2001 - 2024. En el primer periodo, se observa una mayor variabilidad entre los transectos, siendo el transecto 14 el que muestra la mayor tasa de acreción (30.67 m/año) y el transecto 10 el que presenta la mayor erosión (-13.52 m/año).

En el segundo periodo, las tendencias se estabilizan, destacando que los transectos 1 a 11 muestran una tendencia general hacia la acreción, posiblemente debido a la protección natural proporcionada por la Isla de Tumaco y una barra de arena que se extiende hasta la latitud 1.83° y longitud -78.74° . El transecto 5 mantiene una tendencia constante de acreción en ambos periodos, mientras que el transecto 11, que experimentó una erosión significativa en el primer periodo, se estabiliza en el segundo, probablemente debido a un aumento en la acumulación de sedimentos en los últimos años.

En los transectos 12 a 15, se observa un cambio en la orientación de la playa y una mayor exposición al agua abierta, lo que favorece la erosión, especialmente en el transecto 13, donde la tendencia cambia de acreción a erosión ligera en el segundo periodo. Esto podría deberse a que el aporte de sedimentos de los ríos Mira y Rosario ya no es suficiente para contrarrestar las fuerzas costeras que afectan esta parte de la playa. Los transectos 16 a 18, ubicados en la esquina noreste de la Isla El Morro, muestran un patrón de acreción, aunque de menor magnitud que los transectos más expuestos al agua abierta. El análisis del desplazamiento de la línea costera (SLD) en las playas de El Morro y El Bajito refleja las características únicas de un entorno estuarino con mareas semidiurnas y un rango mesomareal, lo que contrasta con los resultados observados en estudios previos realizados en playas abiertas como las de Mar del Plata, Argentina. En contraste con Mar del Plata, donde las playas abiertas muestran tendencias lineales de SLD de -0.6 a 0.7 m/año (Billet et al., 2024), en Tumaco, la influencia de los ríos y la geomorfología estuarina, junto con la mayor exposición de algunos transectos al agua abierta, generan dinámicas más complejas que varían considerablemente entre los diferentes sectores de las playas. De manera similar, los resultados obtenidos en la costa del Pacífico de México, en Mazatlán, muestran un rango de SLD entre 0 m y 100 m en un entorno de mareas semidiurnas con una amplitud máxima de 1.8 metros (Valderrama-Landeros et al., 2022). Si bien las condiciones de olas y mareas en Mazatlán son comparables a las de Tumaco, los desplazamientos máximos de la línea costera en Mazatlán son menores, lo que se puede atribuir a las características estuarinas de Tumaco, donde la interacción entre las corrientes fluviales, el aporte de sedimentos de los ríos Mira y Rosario, y la dinámica de las olas contribuyen a una mayor variabilidad en los patrones de acreción y erosión.

4.3. Importancia del forcing costero en el desplazamiento de la línea de costa con bosques aleatorios

Los resultados del modelo FLOW & SWAN, que incluyen diversos parámetros oceanográficos, proporcionan información valiosa sobre el SLD. Uno de los factores más importantes es la altura significativa de las olas (SWH). Valores superiores a 1.1 m indican un alto potencial para afectar la costa, mientras que valores por debajo de 0.2 m sugieren un impacto mínimo (Mullick et al., 2019). En este estudio, los valores de SWH se mantuvieron principalmente por debajo de 1 m, lo que sugiere condiciones de oleaje moderadas o bajas, lo que podría explicar la falta de erosión significativa observada en los análisis de CoastSat. El rango de mareas también influye en las dinámicas de SLD, y en este caso, el rango mesomareal de 2 a 4 m indica una influencia moderada en la erosión y sedimentación costera (Pramanik et al., 2019).

Si bien los datos sobre el periodo pico de las olas (PWP) requieren más validación para confirmar su efecto en el SLD, algunos estudios preliminares sugieren que los periodos más largos podrían llevar las olas más tierra adentro durante eventos de tormenta, mientras que los periodos más cortos,

con mayor frecuencia de olas, podrían contribuir a la erosión crónica y alterar la dinámica del transporte de sedimentos (Pollard et al., 2019).

En este estudio, los valores de PWP se mantuvieron dentro de rangos moderados, lo que indica una influencia limitada en la erosión costera. En el modelo de bosque aleatorio aplicado a las playas El Bajito y El Morro, las variables más importantes están relacionadas con las condiciones hidrodinámicas y de oleaje de la zona. La altura significativa de las olas (SWH) oscila entre 0.4 m y 1.1 m, lo que sugiere una acción de oleaje relativamente baja. La variable más importante en el modelo es el nivel del mar (SL), lo cual está en línea con el rango mesomareal de Tumaco, que presenta variaciones de hasta 1.6 m. Las fluctuaciones en el nivel del mar impactan directamente en las dinámicas costeras, especialmente en un entorno estuarino como el de El Bajito y El Morro, donde las variaciones de marea influyen significativamente en la erosión y acreción de la costa.

La dirección de las olas (WDI) y la dirección del viento (WWD) también tienen una alta importancia en el modelo. La dirección predominante de las olas es hacia el oeste, con una recurrencia del 61%, lo que es crucial dado que la orientación de la playa y su exposición a las olas provenientes de esa dirección afectan los procesos de transporte de sedimentos y, por lo tanto, la configuración del desplazamiento de la línea costera (SLD). Aunque las olas no son muy altas, su dirección y la energía acumulada tienen un impacto significativo en la evolución de la costa.

El periodo pico de las olas (PWP) también muestra una importancia considerable, ya que los periodos más largos indican una mayor energía de las olas, lo que afecta su capacidad para transportar sedimentos y modificar la línea costera. Sin embargo, las variables relacionadas con la deriva de Stokes (SDX y SDY) tienen menor importancia en el modelo, lo que sugiere que en El Bajito y El Morro, su impacto directo en el SLD es limitado en comparación con el efecto combinado de las olas y el nivel del mar.

El orden de importancia de las variables es similar para ambas playas, aunque con mayores magnitudes en El Morro. Esto puede deberse a la exposición geográfica diferente de las dos playas: El Morro está más expuesta al mar abierto, lo que amplifica los efectos de las olas y el nivel del mar en el SLD. En contraste, El Bajito está protegido por la Isla Bocagrande, lo que modera el impacto de las olas y mareas en esa área. Esta diferencia en la exposición podría explicar por qué las mismas variables tienen mayor influencia en El Morro, donde las condiciones hidrodinámicas y de oleaje actúan de manera más intensa sobre la línea costera.

5. Conclusiones

En la Bahía de Tumaco, se observa un incremento en la concentración de compuestos (DBO, DQO, nutrientes) en la parte suroriental. Los resultados sugieren que esta contaminación proviene de fuentes terrestres, tanto difusas como puntuales. La detección de contaminación fecal en áreas específicas resalta la necesidad de intervenciones enfocadas para preservar la calidad del agua en estas zonas. Aunque el aumento en los compuestos fisicoquímicos no compromete el estado ecosistémico de la bahía, la presencia de contaminación microbiológica subraya la urgencia de acciones específicas.

El proceso de calibración y validación de los modelos 2D FLOW & SWAN en Delft3D, utilizando datos de reanálisis de WAVERYS como alternativa a mediciones in situ, mostró que, a pesar de la información limitada, es posible aplicar con éxito un modelo acoplado para simular las condiciones hidrodinámicas y de oleaje en la región de Tumaco. Si bien se

obtuvieron correlaciones altas y errores bajos (RMSE) al comparar los niveles de agua observados y simulados, los resultados de SWH, PWP y WDI mostraron mayores valores de RMSE y sesgo, sugiriendo la necesidad de ajustes adicionales en futuras simulaciones.

Los resultados obtenidos a través de CoastSat indican una tendencia predominante hacia la acreción en las playas de El Morro y El Bajito, lo que podría interpretarse inicialmente como un signo positivo para la estabilidad costera. Sin embargo, el hecho de que algunos transectos aún experimenten erosión resalta la necesidad de medidas de mitigación a largo plazo. En El Bajito, el 36% de los transectos sigue mostrando erosión, mientras que en El Morro, la erosión afecta principalmente a la zona turística, lo que podría tener implicaciones socioeconómicas significativas.

Por último, los resultados del bosque aleatorio sugieren que el nivel del mar (SL) y la dirección de las olas (WDI) son las variables más influyentes en el desplazamiento de la línea costera (SLD) en ambas playas. Esto indica que, en el contexto de Tumaco, las fluctuaciones del nivel del mar y la dirección de las olas tienen un papel más decisivo en la erosión y acreción que otras variables como el periodo pico de las olas (PWP) o la altura significativa de las olas (SWH). La mayor importancia de estas variables en El Morro puede explicarse por su mayor exposición al mar abierto, en contraste con la protección natural que ofrece la Isla Bocagrande en El Bajito.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) de la Dirección General Marítima (DIMAR) de Colombia, por proporcionar los datos recolectados durante sus campañas de medición, los cuales fueron esenciales para la configuración del modelo aplicado en este estudio.

Asimismo, agradecen al Fondo Fundación WWB Colombia por su apoyo financiero en las actividades de trabajo de campo en el marco de la tesis doctoral "Sistema de apoyo a la toma de decisiones para la gestión costera en respuesta a inundaciones y erosión costera: Estudio de caso en Tumaco-Nariño", de la cual forma parte este artículo.

Finalmente, agradecen al Instituto Javeriano del Agua y al Programa de la Maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana, por su valioso aporte en términos de recursos materiales, incluyendo equipos, personal y apoyo económico, que hicieron posible el levantamiento de información primaria para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Amma, P. K. G., & Bhaskaran, P. K. (2020). Role of mangroves in wind-wave climate modeling – A review. *Journal of Coastal Conservation*, 24(2), 21. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00740-0>
- Billet, C., Alonso, G., Danieli, G., & Dragani, W. (2024). Evaluation of beach nourishment in Mar del plata, Argentina: An application of the CoastSat toolkit. *Coastal Engineering*, 193, 104593. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104593>

- Bryant, M. A., Bryant, D., Provost, L., Hurst, N., McHugh, M., Wargula, A., & Tomiczek, T. (2022). *Wave Attenuation of Coastal Mangroves at a Near-Prototype Scale* (ERDC TR-22-17). US Army Corps of Engineers. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1181016>
- Cano Calvo, C. (2021). *Gestión del riesgo en desastres en los procesos de planificación del desarrollo territorial en comunidades del pacifico colombiano. Estudio de Caso Zona urbana, Municipio de Tumaco, Departamento de Nariño*. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/4883>
- Deltares. (2014). *Water quality and aquatic ecology modelling suite D-Water Quality*.
- Deltares. (2022a). *Delft3D-Hydro-Morphodynamics* (Version 4.05).
- Deltares. (2022b). *Delft3D-WAVE User Manual* (Version 4.05).
- Idier, D., Bertin, X., Thompson, P., & Pickering, M. D. (2019). Interactions Between Mean Sea Level, Tide, Surge, Waves and Flooding: Mechanisms and Contributions to Sea Level Variations at the Coast. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1603–1630. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09549-5>
- Kadigi, R. M. J., Robinson, E., Szabo, S., Kangile, J., Mgeni, C. P., De Maria, M., Tsusaka, T., & Nhau, B. (2022). Revisiting the Solow-Swan model of income convergence in the context of coffee producing and re-exporting countries in the world. *Sustainable Futures*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2022.100082>
- Luan, H. L., Ding, P. X., Yang, S. L., & Wang, Z. B. (2021). Accretion-erosion conversion in the subaqueous Yangtze Delta in response to fluvial sediment decline. *Geomorphology*, 382, 107680. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107680>
- Marsooli, R., Orton, P. M., Mellor, G., Georgas, N., & Blumberg, A. F. (2017). A Coupled Circulation–Wave Model for Numerical Simulation of Storm Tides and Waves. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(7), 1449–1467. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0005.1>
- Martins, K. A., Souza Pereira, P. de, Silva-Casarín, R., & Nogueira Neto, A. V. (2017). The Influence of Climate Change on Coastal Erosion Vulnerability in Northeast Brazil. *Coastal Engineering Journal*, 59(02), 1740007. <https://doi.org/10.1142/S0578563417400071>
- Martos, A., & Isabel, A. (2022). *The gulf of cadiz as a natural laboratory for the validation and exploitation of coastal altimetry and model data* [Doctoral thesis]. <https://rodin.uca.es/handle/10498/28930>
- Mullick, Md. R. A., Tanim, A. H., & Islam, S. M. S. (2019). Coastal vulnerability analysis of Bangladesh coast using fuzzy logic based geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 174, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.03.010>
- Mury, A., Collin, A., Houet, T., Alvarez-Vanhard, E., & James, D. (2020). Using Multispectral Drone Imagery for Spatially Explicit Modeling of Wave Attenuation through a Salt Marsh Meadow. *Drones*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/drones4020025>
- Niño P., D. C., & Oviedo B., F. (2018). *Determinación de la variación morfológica costera de la Bahía de Tumaco, a partir de análisis multitemporal con sensores remotos*. <https://aquadocs.org/handle/1834/15220>

- Enriquez-Hidalgo, A. M.; Vargas-Luna, A.; Mestres, M.; Escobar-Vargas, J.; Espino Infantes, M.; Torres, A. Ortega, S., Osorio, A. F., & Agudelo, P. (2013). Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation. Case study: Isla Fuerte, Colombia. *Renewable Energy*, 57, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.038>
- Paulus, R., Dewals, B. J., Erpicum, S., Piroton, M., & Archambeau, P. (2013). Innovative modelling of 3D unsaturated flow in porous media by coupling independent models for vertical and lateral flows. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 246, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2012.07.032>
- Pollard, J., Spencer, T., & Brooks, S. (2019). The interactive relationship between coastal erosion and flood risk. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(4), 574–585. <https://doi.org/10.1177/0309133318794498>
- Pramanik, S., Mandal, S., Shee, A., Halder, S., & Sil, S. (2019). Tidal Circulation Studies Using Regional Model in the Bay of Bengal. In K. Murali, V. Sriram, A. Samad, & N. Saha (Eds.), *Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018)* (pp. 829–836). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3119-0_55
- Rivas, M., Luna, P., & Lizarazo, J. (2019). Analytical fragility assessment of structures subjected to earthquake and tsunami loads: A case study on the colombian pacific coast. *Tecnia*, 29(2), 169–173. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v29i2.699>
- Ruan, L., Yan, M., Zhang, L., Fan, X., & Yang, H. (2022). Spatial-temporal NDVI pattern of global mangroves: A growing trend during 2000–2018. *Science of The Total Environment*, 844, 157075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157075>
- Son, S., Lynett, P., & Ayca, A. (2020). Modelling scour and deposition in harbours due to complex tsunami-induced currents. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(4), 978–998. <https://doi.org/10.1002/esp.4791>
- Sun, W., Liang, B., Shao, Z., & Wang, Z. (2022). Analysis of Komen scheme in the SWAN model for the whitcapping dissipation during the tropical cyclone. *Ocean Engineering*, 266, 113060. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113060>
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Tejada, C. (2003). *Clima marítimo y dinámica litoral de la bahía de Tumaco, datos básicos para la evaluación de riesgos ambientales marinos*. 10(Boletín Científico CCCP), 83–96.
- Valderrama-Landeros, L., Flores-Verdugo, F., & Flores-de-Santiago, F. (2022). Assessing the Coastal Vulnerability by Combining Field Surveys and the Analytical Potential of CoastSat in a Highly Impacted Tourist Destination. *Geographies*, 2(4), 642–656. <https://doi.org/10.3390/geographies2040039>

Seguimiento de la calidad de las aguas y los sedimentos en una zona afectada por extracciones de arena para rellenos portuarios (Puerto de Bilbao)

Raúl Castro^a, María Jesús Belzunce-Segarra^a, Javier Franco^a, Manuel González^a, Joana Larreta^a, Iratxe Menchaca^a, José Germán Rodríguez^a y Oihana Solaun^a

^aAZTI-Investigación Marina, Herrera Kaia, Portualdea s/n, 20110-Pasaia (Gipuzkoa) (, rcastro@azti.es; , jbelzunce@azti.es; , jafranco@azti.es; , mgonzalez@azti.es; , jlaretta@azti.es; , imentxaka@azti.es; , grodriguez@azti.es; , osolaun@azti.es)

How to cite: Castro, R.; Belzunce-Segarra, M. J.; Franco, J.; González, M.; Larreta, J.; Menchaca, I.; Rodríguez, J. G. & Solaun, O. (2024). Seguimiento de la calidad de las aguas y los sedimentos en una zona afectada por extracciones de arena para rellenos portuarios (Puerto de Bilbao). Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

1. Introducción

El Puerto de Bilbao comenzó en el año 1992 la ampliación y mejora de sus instalaciones, desplazando el grueso de su actividad a la zona exterior del estuario del Nervión, donde, desde 2016, se construye el espigón central. Entre 2022 y 2023 se realizó también la prolongación del dique AZ y el relleno de una celda anterior. Estas obras requieren la extracción de una elevada cantidad de material de relleno procedente de la Zona II del puerto. Las extracciones llevan asociado un Programa de Vigilancia Ambiental (PVA), que incluye el análisis del impacto de las extracciones sobre la calidad de las aguas y los sedimentos a diferentes escalas temporales. En esta comunicación se presenta el estudio de ambas matrices en el marco del PVA de las diferentes extracciones realizadas entre 2016 y 2023.

2. Materiales y métodos

El estudio se lleva a cabo mediante campañas de campo tanto en las situaciones previas a las extracciones como durante las mismas y en las situaciones posteriores. En la Tabla 1 se presenta información de las campañas de muestreo, así como de las diferentes extracciones realizadas. La Figura 1 presenta la localización de las estaciones de muestreo. En los años sin extracciones se realiza al menos una campaña.

En las campañas de aguas se toman datos *in situ* de las variables oceanográficas generales, así como muestras de agua en cinco estaciones y tres niveles de profundidad, para el análisis de las características fisicoquímicas, estado trófico y presencia de contaminantes.

En cuanto a los sedimentos, las muestras se toman, en 18 estaciones, con una draga oceanográfica tipo van Veen. En el laboratorio se determina la composición granulométrica del sedimento, el carbono orgánico total y las concentraciones de diversos contaminantes.

Tabla 1. Extracciones realizadas en la Zona II del puerto de Bilbao y campañas de muestreo de aguas y sedimentos Pre: pre-extracción; dur: durante la extracción; post: post-extracción

Extracciones			Aguas	Sedimentos		
Número	Volumen	Fechas	Nº campañas	Campañas	Fecha	Nº
	(m³)		pre-durante-post			estaciones
Primera	5 10 ⁵	Abril-mayo 2016	1-1-1	Preoperacional	Marzo 2016	12
				Post 1ª extracción	Octubre 2016	12
				Pre 2ª extracción	Mayo 2017	12
Segunda	1 10 ⁵	Junio 2017	1-1-1	Post 2ª extracción	Octubre 2017	18
Tercera	3 10 ⁵	Nov-dic. 2017	1-2-1	Post 3ª extracción	Mayo 2018	18
				Post 4ª extracción	Agosto 2019	18
Cuarta	7 10 ⁶	Oct. 2018-mar. 2019	1-7-1	Campaña 2020	Julio 2020	18
				1 (Nov-2020)		
				1 (Ago-2021)	Campaña 2021	Julio 2021
Quinta	8 10 ⁴	Mayo-junio 2022	1-1-1	Post 5ª extracción	Julio 2022	18
Sexta	8 10 ⁵	Oct-nov. 2022	1-1-1			
Séptima	6 10 ⁵	Abril 2023	1-1-1	Post 7ª extracción	Julio 2023	18

3. Resultados y conclusiones

Todas las variables analizadas relativas a las condiciones y características oceanográficas generales presentaron valores normales para la época y zona de estudio. Lo mismo puede decirse de las concentraciones de nutrientes. En bastantes ocasiones las concentraciones de amonio se incrementaron en las campañas durante las extracciones, aunque no se apreció un efecto en la biomasa de fitoplancton. Turbidez y sólidos en suspensión fueron las variables que en mayor medida mostraron el efecto de las extracciones, sin duda por efecto de la re-suspensión de los sedimentos. En todo caso, sus niveles volvieron a la normalidad tras las actividades. Respecto a los contaminantes en aguas, predominan las concentraciones inferiores a los correspondientes límites de cuantificación. En muy pocos casos, para algunos metales se superaron las normas de calidad ambiental aplicables a la zona de estudio. Los sedimentos de la zona de estudio se componen en su mayoría de arenas finas, con presencia significativa de limos en algunas estaciones y zonas muy concretas con presencia de gravas. Se han observado ciertos cambios en el contenido de sedimentos finos tras las extracciones. Las concentraciones de metales pesados y contaminantes orgánicos indican bajos niveles de contaminación.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a la Autoridad Portuaria de Bilbao, al personal de muestreo y de laboratorio de AZTI-Investigación Marina, así como a Ekocean e Iproma.

Aplicación de la visión por ordenador para un sistema de gestión de vertidos en puertos. El proyecto SPILLCONTROL

Application of computer vision for a port spill management system. The SPILLCONTROL project

Mariano Morell^{a,b}, Pedro Portau^b, Manuel Espino^a, Manel Grifoll^a y Carlos Garau^b

^aLIM Laboratori d'Enginyeria Marítima, UPC-BarcelonaTech, 08034 Barcelona; ^bGarau Ingenieros, SLU, 07012 Palma de Mallorca

How to cite: Morell, M.; Portau, P.; Espino, M.; Grifoll, M.. & Garau, C. (2024). Aplicación de la vision por ordenador para un Sistema de gestión de vertidos en puertos. El Proyecto SPILLCONTROL. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Ibiza, mayo 2024

Abstract

The SPILLCONTROL project introduces an innovative solution for the detection and management of spills in ports using computer vision technology and artificial intelligence. This system combines high-resolution cameras with advanced algorithms to classify floating waste in real time, facilitating efficient environmental management. The research focuses on analyzing the operational conditions of the system, such as camera placement, distance from waste, and image resolution, to optimize performance in real-world scenarios.

The Port of Es Portitxol, in Palma de Mallorca, was selected as a pilot study area where controlled experiments with synthetic waste were conducted. Results demonstrated high detection accuracy, a significant reduction in false positives, and rapid response times. Key parameters such as sensitivity, operational efficiency, and consistency under various conditions were evaluated.

SPILLCONTROL proves to be effective not only as a technological tool but also as a contributor to sustainability by integrating preventive solutions and environmental mitigation strategies. Future research includes integrating complementary technologies and validating the system in other ports. This advancement represents a significant step toward protecting marine ecosystems and enhancing port environmental management practices.

Keywords: *environmental management; spill detection; computer vision; ports and harbors sustainability; marine pollution*

Resumen

El proyecto SPILLCONTROL propone una solución innovadora para la detección y gestión de vertidos en puertos mediante tecnología de visión por ordenador e inteligencia artificial. Este sistema combina cámaras de alta resolución y algoritmos avanzados para

clasificar residuos en tiempo real, facilitando una gestión ambiental eficiente. La investigación se centra en evaluar las condiciones operativas del sistema, como la ubicación de cámaras, la distancia a los residuos y la resolución de las imágenes, para optimizar su desempeño en entornos reales.

El puerto de Es Portitxol, en Palma de Mallorca, fue seleccionado como área de estudio piloto, donde se realizaron experimentos controlados utilizando residuos sintéticos. Los resultados mostraron una alta precisión en la detección, reducción significativa de falsos positivos y tiempos de respuesta rápidos. Se analizaron parámetros clave como sensibilidad, eficiencia y consistencia en diversas condiciones operativas.

SPILLCONTROL no solo demuestra ser eficaz como herramienta tecnológica, sino que también contribuye a la sostenibilidad al integrar soluciones preventivas y estrategias de mitigación ambiental. Futuras investigaciones incluyen la integración con tecnologías complementarias y la validación en otros puertos. Este avance representa un paso significativo hacia la protección de los ecosistemas marinos y la mejora de la gestión ambiental portuaria.

Palabras clave: *gestión ambiental; detección de vertidos; visión por ordenador; sostenibilidad de puertos y bahías; contaminación marina*

1. Introducción

Los vertidos contaminantes en puertos constituyen un problema ambiental significativo que afecta la biodiversidad marina, la calidad del agua y la salud humana. Estas emisiones de residuos, provenientes de actividades industriales, urbanas y recreativas, generan un impacto negativo acumulativo en los ecosistemas acuáticos. Además de las consecuencias visibles, como la acumulación de desechos flotantes, los vertidos también ocasionan problemas invisibles, como la contaminación química, que afecta a los organismos marinos y a las comunidades costeras.

El proyecto SPILLCONTROL surge como una respuesta innovadora a esta problemática. Este sistema combina tecnologías avanzadas de visión por ordenador y algoritmos de inteligencia artificial para detectar y clasificar vertidos en tiempo real, permitiendo una gestión ambiental portuaria más eficiente y sostenible. SPILLCONTROL no solo representa un avance tecnológico, sino también un ejemplo de colaboración interdisciplinaria entre la investigación académica y el sector portuario, logrando un impacto significativo en las estrategias de mitigación de contaminantes. La implementación del sistema ofrece beneficios clave, como la capacidad de identificar patrones de vertidos recurrentes, generar alertas automáticas y facilitar el análisis de datos a largo plazo.

La presente investigación se centra en el análisis de las condiciones operativas del sistema SPILLCONTROL, evaluando cómo factores como la ubicación de las cámaras, la distancia a los residuos y la resolución de las imágenes afectan su rendimiento. Estos aspectos son fundamentales para optimizar la aplicación del sistema en entornos reales y maximizar su eficiencia. Este artículo describe en detalle el desarrollo de esta tecnología, los resultados obtenidos y las posibilidades de expansión futura, subrayando su contribución al progreso tecnológico y ambiental.

2. Objetivos

2.1. Objetivos del proyecto SPILLCONTROL

El proyecto SPILLCONTROL tiene como objetivos principales:

- Diseñar un sistema automatizado que permita la detección y clasificación de vertidos en aguas portuarias utilizando algoritmos avanzados de visión por ordenador.
- Optimizar la capacidad de respuesta ante incidentes ambientales, minimizando los tiempos de reacción y facilitando la toma de decisiones en tiempo real.
- Proporcionar herramientas de análisis que permitan identificar patrones de contaminación y evaluar la eficacia de las estrategias de mitigación implementadas.
- Validar la aplicabilidad del sistema en condiciones operativas reales y explorar su adaptabilidad a diversos escenarios portuarios.
- Promover la sostenibilidad y la conciencia ambiental en los entornos portuarios, fomentando la colaboración entre entidades gubernamentales, académicas y privadas.

Estos objetivos reflejan un enfoque holístico hacia la gestión ambiental, integrando tecnología, investigación y compromiso social para abordar un problema global.

2.2. Objetivos de esta investigación

Esta investigación tiene como objetivo validar la aplicabilidad y eficacia del sistema SPILLCONTROL en un entorno real. Específicamente, se busca:

- Evaluar el rendimiento de los algoritmos de detección y clasificación en condiciones operativas variables.
- Determinar los factores que afectan la precisión y la sensibilidad del sistema, como la resolución de las imágenes y la distancia operativa.
- Generar recomendaciones para optimizar el sistema y adaptar su uso a diferentes configuraciones portuarias.
- Proporcionar datos empíricos que respalden la implementación a gran escala del sistema en puertos comerciales y recreativos.

3. Desarrollo de la innovación

3.1. Funcionamiento del sistema

El sistema SPILLCONTROL opera cámaras de vigilancia que captan imágenes de la lámina de agua en puntos estratégicos del puerto. Las imágenes son enviadas a un servidor donde un algoritmo de inteligencia artificial las analiza para detectar la presencia de vertidos u objetos flotantes.



Fig. 1. Esquema de funcionamiento del sistema. Fuente: Elaboración propia

Si se detecta contaminación, el sistema emite una alarma vía correo electrónico dirigido a los gestores del puerto. Paralelamente, el sistema mantiene un registro de incidentes de vertido para la emisión de informes periódicos al gestor. Con ello se facilita una respuesta rápida y eficaz a los incidentes de vertido en las aguas portuarias.

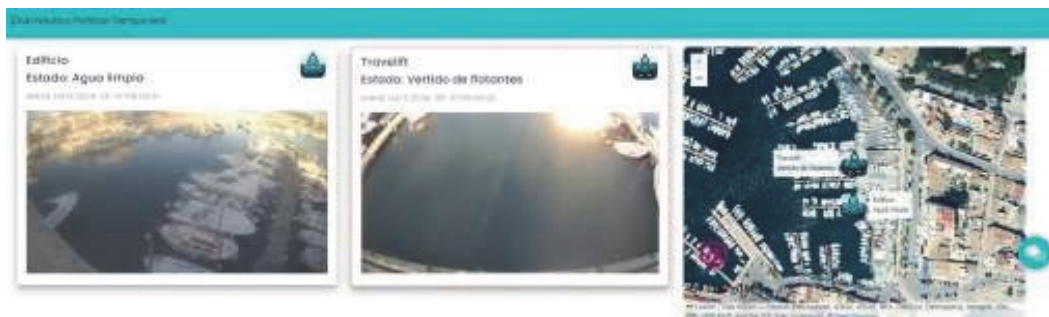


Fig. 2. Visualización de la plataforma del sistema. Fuente: Elaboración propia

El sistema SPILLCONTROL combina hardware y software de última generación para monitorear y analizar áreas portuarias en tiempo real. Su funcionamiento se basa en un ecosistema tecnológico compuesto por:

- Cámaras estratégicamente ubicadas: Estas cámaras de alta resolución monitorean continuamente las aguas portuarias, adaptándose a condiciones de luz variables y capturando imágenes con gran nivel de detalle.
- Procesadores de inteligencia artificial: Las imágenes capturadas son enviadas a servidores que utilizan algoritmos de redes neuronales convolucionales (CNN) para analizar y clasificar la presencia de vertidos.

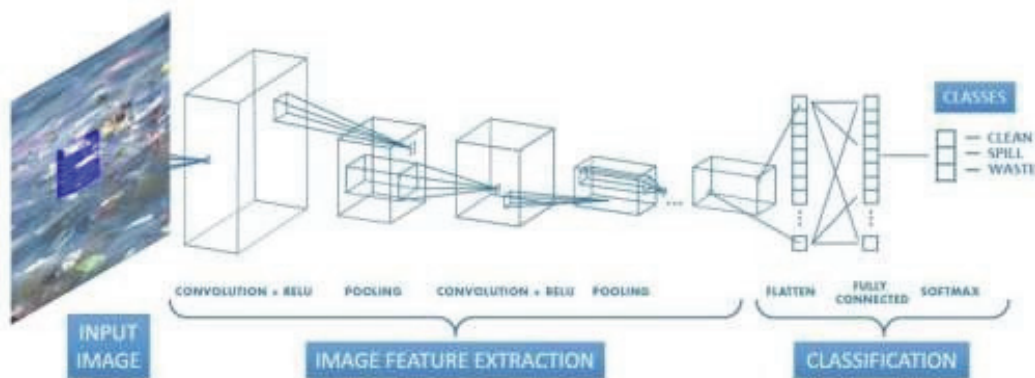


Fig. 3. Arquitectura de la red neuronal convolucional utilizada en el desarrollo de los algoritmos de clasificación de imágenes. Fuente: Elaboración propia

- Sistema de alerta automática: Ante la detección de residuos, el sistema genera notificaciones automáticas dirigidas a los gestores portuarios, quienes reciben detalles precisos del incidente.

- Bases de datos centralizadas: Los registros de incidentes se almacenan para análisis posteriores, permitiendo evaluar patrones de contaminación y planificar intervenciones.

Este enfoque integral permite no solo detectar vertidos en tiempo real, sino también generar una base de conocimiento para la prevención y mitigación de futuros incidentes.

El sistema SPILLCONTROL utiliza algoritmos de visión por ordenador que consideran tres clases principales en la clasificación de imágenes:

- 0 Agua limpia
- 1 Vertido
- 2 Flotantes

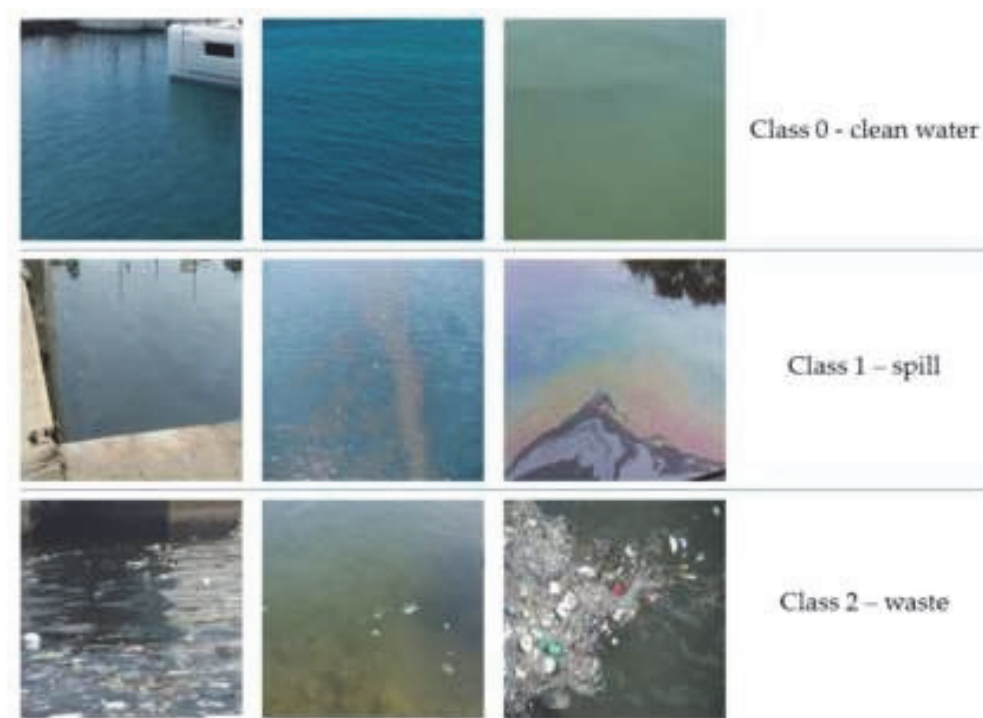


Fig. 4. Clases consideradas por los algoritmos de visión por ordenador utilizados en SPILLCONTROL.

Fuente: Elaboración propia

En el contexto del experimento realizado, se optó por no incluir imágenes reales de la clase 1 (Vertido) con el fin de evitar cualquier impacto ambiental negativo al provocar artificialmente vertidos de sustancias que no pudieran ser recogidas al finalizar el experimento.

Para las clases 0 y 2 se utilizaron imágenes generadas de manera controlada y residuos sintéticos para garantizar la validez de los resultados y la protección del entorno.

3.2. Área de estudio

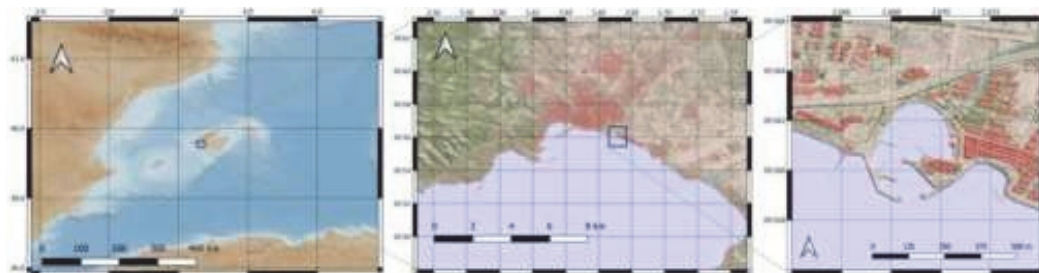


Fig. 5. *Emplazamiento del experimento.* Fuente: Elaboración propia

El puerto de Es Portitxol, ubicado en la Bahía de Palma, Mallorca, fue seleccionado como área de estudio piloto debido a sus características particulares:

- Exposición a residuos: La cercanía a zona urbana aumenta el riesgo de vertido.
- Uso recreativo predominante: La alta afluencia de usuarios sensibilizados con el medio ambiente ofrece un contexto ideal para evaluar el impacto social del sistema.
- Condiciones operativas controladas: Para esta zona se dispone de un modelo operativo de corrientes, condiciones climáticas y dinámica portuaria generado en el marco del proyecto SAMOA 2 de Puertos del Estado.

En este entorno, se implementaron y probaron estrategias de monitoreo que permitieron recopilar datos representativos para la validación del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

3.3. Metodología del experimento

Para evaluar el rendimiento de SPILLCONTROL, se diseñaron experimentos controlados que simulaban escenarios reales de contaminación en el puerto. La metodología incluyó:

- **Uso de residuos sintéticos:** Materiales flotantes no contaminantes fueron introducidos en áreas monitoreadas para evaluar la capacidad del sistema de detectarlos y clasificarlos.



Fig. 6. *Residuo sintético (izquierda) y embarcación utilizada para lanzar y recoger el residuo (derecha).*

Fuente: Elaboración propia

- **Análisis de variables operativas:** Se evaluó el impacto de factores como la resolución de imágenes, la distancia entre las cámaras y los residuos, y las condiciones de agitación.

3.4. Parámetros indicadores

Se definieron indicadores clave para medir el rendimiento del sistema:

- **Precisión y sensibilidad:** Capacidad del sistema para identificar correctamente la presencia de residuos.
- **Tasa de falsos positivos:** Incidencia de alertas incorrectas emitidas.
- **Eficiencia operativa:** Tiempo promedio necesario para procesar y analizar imágenes.
- **Consistencia en diversas condiciones:** Evaluación del sistema bajo diferentes escenarios ambientales y operativos.

Estos indicadores permitieron identificar fortalezas y oportunidades de mejora, consolidando la fiabilidad del sistema.

Además, para poder analizar adecuadamente la fiabilidad de la detección fue necesario definir un índice ad hoc que compara los errores de detección con los avisos emitidos, el Índice de Error. Este índice es igual al cociente la suma de falsos positivos de todas las clases y la suma de positivos (verdaderos o falsos) de las clases que generan alertas (1 y 2).

$$Error\ Index = \frac{FP0+FP1+FP2}{TP1+FP1+TP2+FP2} \quad (1)$$

4. Resultados

En ambos algoritmos se produce un máximo de Precisión cuando el tamaño genera unas dimensiones del residuo similares al promedio en el set de entrenamiento.

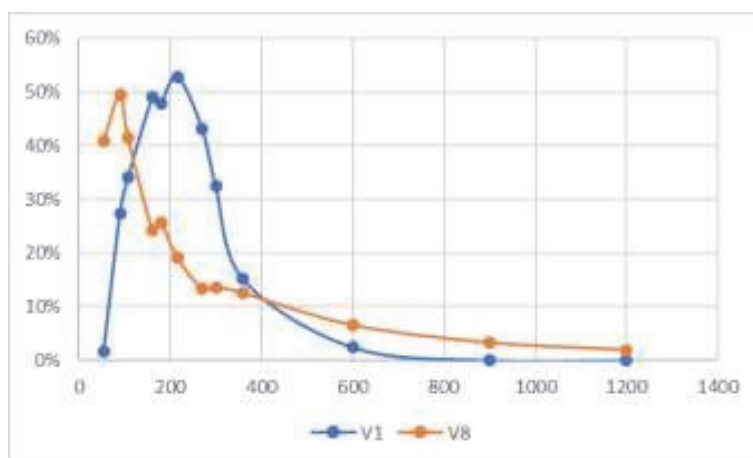


Fig. 7. Precisión para la clase Waste para tamaños crecientes de imágenes (altura en píxeles) considerando los algoritmos V1 y V8. Fuente: Elaboración propia

La distancia incide fuertemente en la Precisión (que es mayor a menor distancia) pero no altera significativamente el Índice de Falso Positivo.

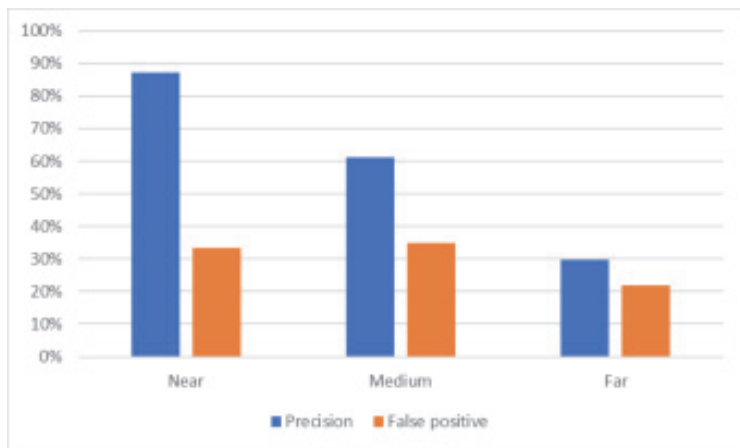


Fig. 8. Precisión e Índice de Falso Positivo para la clase Waste para distancias crecientes (Near 0-30 m, Medium 30-60 m y Far >60m). Fuente: Elaboración propia.

Utilizando imágenes recortadas se reduce muy significativamente el Índice de Error y se reduce ligeramente el coste de entrenamiento.

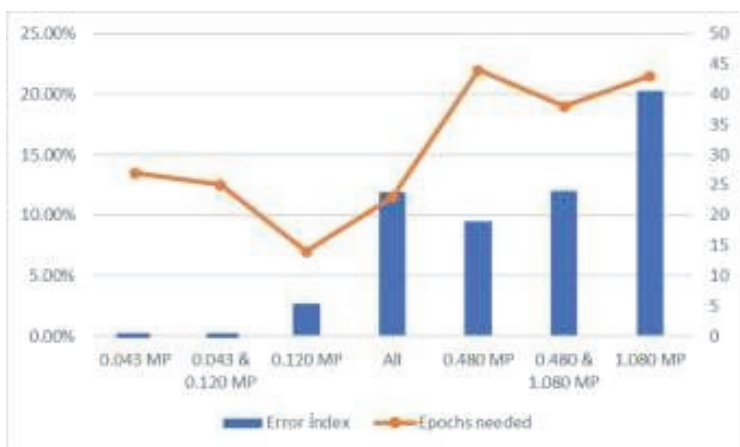


Fig. 9. Índice de Error (azul / izq.) y Epochs de entrenamiento (naranja / dch.) para diferentes tamaños (megapixels) del set de imágenes. Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones

SPILLCONTROL ha demostrado ser una herramienta innovadora y eficaz para la gestión ambiental portuaria. Su capacidad de detectar y clasificar vertidos en tiempo real representa un avance significativo en la protección de los ecosistemas marinos.

El análisis de los experimentos realizados arrojó resultados prometedores:

- **Reducción de falsos positivos:** Las mejoras implementadas en los algoritmos disminuyeron significativamente las alertas incorrectas.
- **Eficiencia en tiempo real:** El sistema procesó imágenes en un promedio de 2 segundos, facilitando respuestas rápidas.
- **Impacto positivo en la gestión ambiental:** Los datos recopilados permitieron desarrollar estrategias preventivas efectivas y mejorar la sensibilización ambiental entre los usuarios del puerto.

Las futuras líneas de investigación incluyen:

- Integración con sistemas complementarios de monitorización y operacionales.
- Extensión del sistema a otros puertos con diferentes características y casuísticas de vertidos.
- Desarrollo de algoritmos avanzados para reconocimiento de más clases de vertidos y operación en condiciones extremas.

Referencias bibliográficas

- Burgos Simón, M. Á., Garro Crevillen, E., Llacer Sanfernando, M., Blanquer, F., Leino, T., & Konstantinidis, F. (2023). A vision-based application for container detection in Ports 4.0. En *Proceedings of the 16th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*.
- Couper, A. (1992). Environmental port management. *Maritime Policy & Management*, 19(2), 165-170.
- Ferrario, F., Araujo, C., Bélanger, S., et al. (2022). Holistic environmental monitoring in ports as an opportunity to advance sustainable development, marine science, and social inclusiveness. *Elementa: Science of the Anthropocene*.
- García-Onetti, J., Scherer, M., & Barragán, J. (2018). Integrated and ecosystemic approaches for bridging the gap between environmental management and port management. *Journal of Environmental Management*, 206, 615-624.
- Gupta, A., Gupta, S. K., & Patil, R. S. (2005). Environmental management plan for port and harbour projects. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7(2), 133- 141.
- Morell Villalonga, M. (2021). “Marine litter and contaminant spills monitoring with computer vision techniques”. En *VI Expanding Ocean Frontiers*. Barcelona
- Morell Villalonga, M. (2022). “Vigilancia de basura marina y vertidos contaminantes con técnicas de COMPUTER VISION”. En *XVI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Vigo
- Morell, M., Portau, P., Perelló, A., Espino, M., Grifoll, M., & Garau, C. (2023). Use of neural networks and computer vision for spill and waste detection in port waters: an application in the Port of Palma (Majorca, Spain). *Applied Sciences*, 13(1), 80.

- Morell Villalonga, M. (2023). *Novel tools for port environmental management systems*. Tesis doctoral. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya,
- Wooldridge, C., McMullen, C., & Howe, V. (1999). Environmental management of ports and harbours: Implementation of policy through scientific monitoring. *Marine Policy*, 23(5), 413-425.

Estimación del campo de velocidades generadas por tsunamis con el software PIVlab

Tsunami velocity field estimation using PIVlab software

Paula Dasí^a, Enrique Ripoll^a, Jorge Molines^a, Josep R. Medina^a y Colin Whittaker^b

^aInstituto de Transporte y Territorio, Universitat Politècnica de València, paudaro@cam.upv.es, enrido@upv.es, jormollo@upv.es, jrmedina@upv.es; ^b Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland, c.whittaker@auckland.ac.nz

How to cite: Dasí, P.; Ripoll, E., Molines, J; Medina, J.R. y Whittaker, C. (2025). Estimación del campo de velocidades generadas por tsunamis con el software PIVlab. En libro de actas: *XVII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Ibiza, 8 y 9 de mayo de 2024.

Abstract

“Particle Image Velocimetry” has been used to characterize maximum horizontal velocities for different tsunami tests. It is a non-intrusive methodology and could be used in zones with and without structures. Tsunamis have been generated using a tsunami gate. This work proposes a methodology to obtain velocities in a defined profile, tracking particle movement using PIVlab software. Maximum horizontal velocities are obtained deleting anomalous points. Obtained velocities range from 0.5 to 3.5 m/s approximately. These values, without any experimental validation, seem to be reasonable for the tested tsunamis.

Keywords: tsunami; Particle Image Velocimetry; tsunami gate; dam break

Resumen

Para la caracterización de los tsunamis a partir de su velocidad máxima se propone una metodología no intrusiva basada en la técnica “Particle Image Velocimetry”. La metodología se basa en la obtención de las velocidades en una sección dada a partir del desplazamiento de cada una de las partículas. La onda larga que simula un tsunami se ha generado con una compuerta de tsunamis. En este artículo se expone la metodología propuesta donde se obtienen las velocidades horizontales máximas a partir del software PIVlab y el procesamiento posterior para eliminar puntos anómalos. Se obtienen velocidades entre 0.5 y 3.5 m/s aproximadamente, que, a falta de ser comprobadas con otro tipo de instrumentación, parecen resultados razonables.

Palabras clave: tsunami; Particle Image Velocimetry; compuerta de tsunamis; dam break.

1. Introducción

Los tsunamis son fenómenos que generan mecanismos de fallo muy distintos a los producidos por el oleaje, ya que producen sobreelevaciones persistentes sobre las estructuras marítimas y fuertes corrientes. Las estructuras costeras construidas actualmente no están diseñadas para resistir los esfuerzos generados por tsunamis, los cuales comprometerán en las próximas décadas la estabilidad de la coronación, aumentando las cargas generadas también por el aumento de nivel de mar debido al cambio climático.

En España, existen riesgos de inundación costera debida a tsunamis en todo el litoral, con alturas de ola en el mar Mediterráneo entre 1 y 3 m y en el océano Atlántico hasta 13 m (IGN, 2021). Por ello, es de especial importancia profundizar en el análisis de la interacción tsunami- estructura, ya que las consecuencias debidas a inundaciones por tsunamis son catastróficas tanto en daños económicos como en pérdida de vidas humanas.

El tsunami producido en 2011 en Tohoku tuvo alrededor de 20.000 víctimas (Suppasri y otros, 2012) y la información científica que se tiene acerca de este fenómeno es muy reducida en comparación con la información que se tiene de otros fenómenos extremos (Sato, 2015). En los análisis posteriores de las estructuras costeras, se observaron diferentes modos de fallo que dependían de la batimetría, la geometría de la estructura y las características locales del tsunami (Jayaratne y otros, 2016). El modo de fallo más común fue la socavación tanto en el lado mar como en el lado tierra. También se observaron daños producidos por el flujo sobre la coronación (Jayaratne y otros, 2013).

Los tsunamis se caracterizan por ser ondas largas, generadas por el rápido desplazamiento de una gran masa de agua (Rossetto y otros, 2011). Para simular este fenómeno en laboratorio, existen diferentes técnicas como la metodología dam break (Wuthrich y otros, 2018), ondas solitarias (Synolakis, 1987) o N-waves (Goseberg y otros, 2013). El laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València (LPC-UPV, <https://lpc.webs.upv.es/>) ha dotado el canal con una compuerta de tsunamis tipo dam-break para generar pseudo-tsunamis.

Las características hidrodinámicas del tsunami son principalmente la altura y la celeridad de la onda. El registro de la elevación de la lámina de agua puede obtenerse en laboratorio a partir de sensores capacitivos. Sin embargo, la velocidad instantánea no es sencilla de registrar. La velocidad de la onda puede caracterizarse con ADCP en una localización determinada (Stephens y otros, 2023) o mediante correntímetros, siempre y cuando no se generen burbujas de aire debido a la formación del bore, ya que introduce errores en la medición (Esteban y otros, 2020). Estos sensores permiten registrar un valor puntual de la velocidad, pero no permiten obtener la distribución de velocidades en una sección determinada.

La técnica “Particle Image Velocimetry” permite obtener el campo de velocidades de un fluido a partir del desplazamiento de cada una de las partículas de forma no intrusiva en un área

determinada. La técnica PIV ha sido utilizada por diferentes autores para diferentes fines como el estudio de la variación del campo de velocidades en un canal rectangular ante la existencia de estructuras que lo alteran (Yuan et al., 2021) o para determinar la influencia de la variación del campo de velocidades sobre el campo de temperaturas en fluidos combustibles debido a la existencia de zonas de bloqueo (Yuan et al., 2022).

El objetivo del presente estudio es aplicar la metodología PIV para obtener el campo de velocidades en una sección y la velocidad máxima que permita caracterizar la acción hidrodinámica de un tsunami. Los pseudo-tsunamis se van a generar utilizando la compuerta de tsunamis del LPC-UPV, variando los niveles aguas arriba y aguas abajo de la compuerta así como la apertura de la misma. El campo de velocidades se va a obtener a partir de las grabaciones en diferentes puntos de control.

2. Ensayos experimentales

2.1. Set up experimental

Los ensayos analizados se han llevado a cabo en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València (LPC-UPV) (30 x 1.2 x 1.2m) a escala 1:50. El canal del LPC-UPV es capaz de generar oleaje regular e irregular con sistema de absorción activa AWACS, viento por aspiración y pseudo-tsunamis mediante una compuerta de tsunamis tipo dam-break. El canal dispone de un sistema de absorción pasiva formado por parrillas de diferentes porosidades y una estructura en talud. La compuerta de tsunamis funciona con pistones neumáticos y se eleva gracias a un calderín cuya presión máxima son 12 bar.

El canal tiene pendiente variable en toda su longitud, con pendiente nula los primeros 8.75m, una pendiente del 4% los siguientes 6.25m y una pendiente final del 2% los siguientes 11m. La longitud del tanque de almacenamiento es de 8.5m. (Ver figura 1).

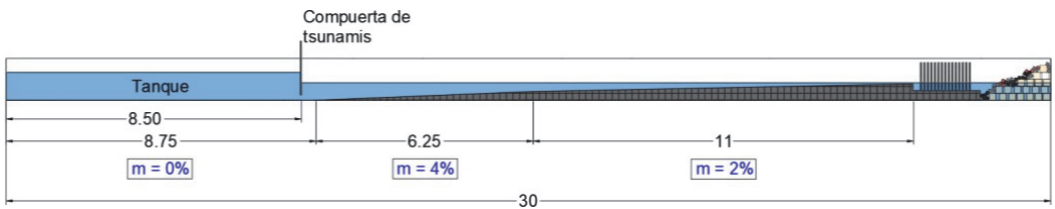


Fig. 1. Configuración del canal.

Las variables utilizadas para generar los tsunamis fueron el nivel aguas arriba de la compuerta (h_1), el nivel aguas abajo de la compuerta (h_2) y la apertura de la compuerta (a). Se instrumentó el canal con 9 sensores de nivel, uno aguas arriba de la compuerta y el resto aguas abajo de la compuerta. Se dispusieron tres cámaras GOPRO para grabar los fenómenos, todas ellas aguas abajo de la compuerta. Una de las cámaras se colocó con un enfoque cenital en la zona inmediatamente posterior a la compuerta (GOPRO-3) y las otras dos, con un enfoque lateral, en el tramo final del canal (GOPRO-1 y GOPRO-2) (ver Figura 2).

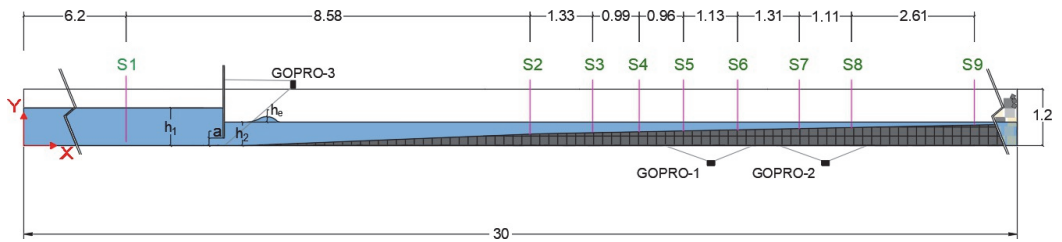


Fig. 2. Disposición de la instrumentación del canal.

2.2. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo definida para poder caracterizar las velocidades máximas es:

- (1) Generación de la onda. La compuerta de tsunamis permitió generar ondas que simulan pseudo-tsunamis, con duraciones y alturas variables en función del nivel aguas arriba (h_1) y aguas abajo (h_2) y la apertura de la compuerta (a).
- (2) Registro del fenómeno y preproceso de las imágenes. Las cámaras utilizadas para grabar los tsunamis (GOPRO-1 y GOPRO-2) fueron dos GoPro Hero 12, capturando a 240 fps. La cámara

situada inmediatamente abajo de la compuerta (GOPRO-3) fue una GoPro Hero 11 grabando a 240 fps. Las imágenes de la GOPRO-1 y GOPRO-2 se convirtieron de RGB a escala de grises para poder eliminar los efectos derivados de la combinación de colores y obtener únicamente las mediciones en las zonas en las que había cambios de intensidad. Según Cabezas y Cisneros (2012), es necesario corregir tanto la distorsión geométrica de la lente como la distorsión de la perspectiva. La distorsión geométrica de la lente se corrigió con los parámetros intrínsecos de la cámara, obtenidos con anterioridad a la realización de los ensayos. Según UNAM (2020) son necesarias, al menos, entre 10 y 20 imágenes de un mismo tablero de ajedrez para obtener los parámetros intrínsecos de una cámara. Se utilizaron 15 imágenes desde diferentes perspectivas para obtener los parámetros intrínsecos utilizando la herramienta Camera Calibrator de Matlab (2023). La corrección de la perspectiva se realizó al final de cada tanda de ensayos diaria a partir del tablero de ajedrez utilizado para corregir la distorsión geométrica. La figura 3a muestra un frame de uno de los ensayos transformado a escala de grises y la figura 3b muestra dicho frame corregido, tanto la distorsión geométrica como la distorsión de la perspectiva.

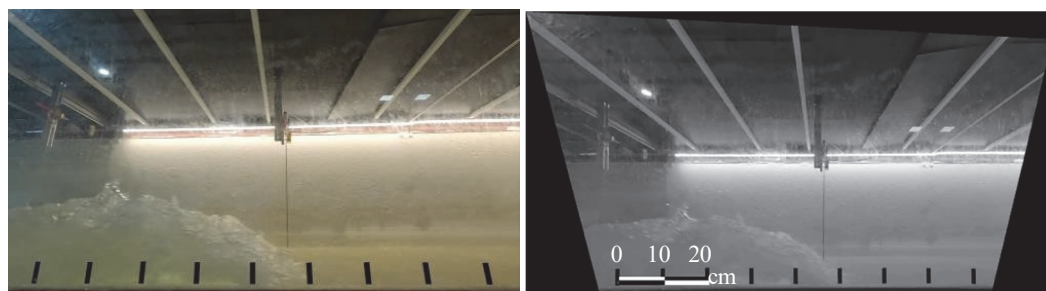


Fig. 3. Imagen tomada por la GOPRO-1 del ensayo con $h_1=1$ m, $h_2=0.4$ m y $a=0.25$ m en $t=0.913$ s
(a) Original (b) en escala de grises y con corrección por distorsión y escala

- (3) Obtención del campo de velocidades y el perfil de velocidades de una sección definida para cada instante de tiempo. A partir del desplazamiento de las partículas visibles en el agua o las propias burbujas generadas en el bore, se obtuvo el campo de velocidades en toda la región de interés (ROI) y el perfil de velocidades para una sección definida con la herramienta PIVlab (Matlab, 2023). El perfil de velocidades se obtuvo para la sección correspondiente al punto medio entre los sensores S5 y S6, coincidente con la sección menos distorsionada registrada por la cámara GOPRO-1. Para las imágenes tomadas con la GOPRO-2, el perfil de velocidades se tomó en el punto medio de los sensores S7 y S8 (Figura 2). La figura 4a muestra la representación proporcionada por PIVlab (Matlab, 2023) del desplazamiento de las partículas en la ROI, excluyendo la zona de no interés (zona roja) y la posición en la que se miden los perfiles de velocidad (línea morada). La figura 4b representa el perfil de velocidades de la componente horizontal (obtenida cada 16mm) en coordenadas locales (esquina inferior izquierda del canal) para la sección definida (línea marrón) y la posición del nivel de agua (altura inicial h_2 y sobreelevación de la lámina de agua) en el instante $t=0.913$ s (línea azul).

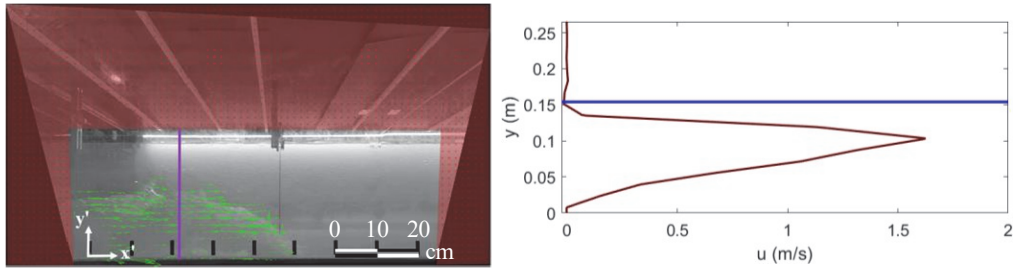


Fig. 4. Perfil de velocidades para el ensayo con $h_1=1$ m, $h_2=0.4$ m y $a=0.25$ m en $t=0.913$ s. (a) Campo de velocidades y posición de la sección de cálculo (b) perfil de velocidades en la sección de cálculo

(4) Obtención del campo de velocidades máximas. El campo de velocidades máximas para la componente horizontal de la velocidad se obtuvo a partir de la componente horizontal máxima de la velocidad para cada instante de tiempo. Las velocidades máximas obtenidas a partir del perfil de velocidades presentaban algunos datos anómalos debido a la imposibilidad de eliminar completamente las sombras en la sección objeto de estudio. También existían instantes de tiempo en los que, debido a las ligeras oscilaciones de la lámina de agua antes de empezar el ensayo, la velocidad no era 0. Tras el estudio de las velocidades para diferentes ensayos, se consideró que aquellos instantes de tiempo en los que la velocidad fuera menor a 0.05 m/s no se considerarían para obtener los puntos anómalos ya que añadía errores en el estudio. Tras el estudio de las velocidades de diferentes ensayos, se consideraron velocidades anómalas aquellas que superaran el percentil 99%. El percentil se obtuvo para cada uno de los ensayos considerando las velocidades comprendidas entre el rango 0.05- velocidad máxima obtenida (m/s). Para obtener el perfil de velocidades definitivo, se eliminaron los puntos anómalos y se aplicó una media móvil triangular sobre el registro sin datos anómalos. En la figura 5 se muestra el perfil de velocidades máximas original con puntos anómalos (puntos rojos) y el perfil de velocidades máximas suavizado (línea azul).

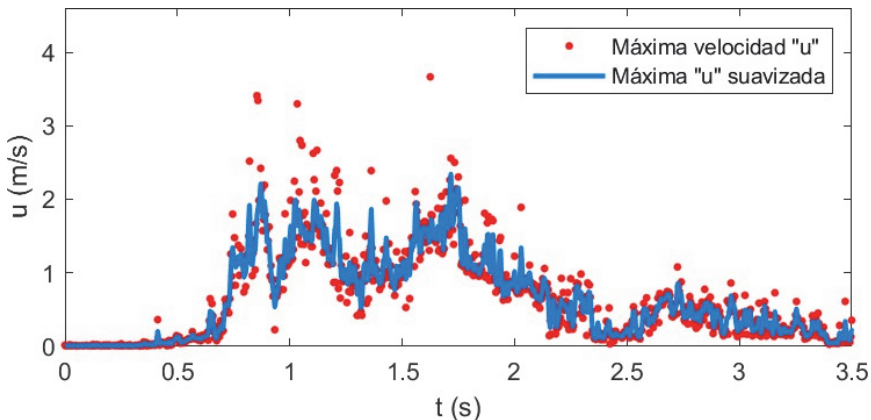


Fig. 5. Perfil de velocidades máximas para el ensayo con $h_1=1$ m, $h_2=0.4$ m y $a=0.25$ m

3. Resultados

Para los 78 ensayos realizados se obtuvieron datos en 2 puntos diferentes, en las posiciones de las GOPRO-1 y GOPRO-2 respectivamente. Los ensayos se realizaron con valores de a entre 0.05 y 0.3 m, niveles aguas arriba ($h1$) entre 0.3 y 1 m y niveles aguas abajo ($h2$) entre 0.2 y 0.5 m. Existen ciertas combinaciones de a , $h1$ y $h2$ para las que no se pudo obtener la medición de la velocidad máxima porque el tsunami no llega a la zona objeto de estudio o porque no se puede obtener una correlación entre dos imágenes consecutivas por la falta de partículas suspendidas/burbujas generadas.

La tabla 1 muestra las velocidades de aquellas combinaciones de parámetros para las cuales se ha obtenido una medición de la velocidad con PIVlab para las posiciones de las cámaras GOPRO-1 y GOPRO-2.

Tabla 1. Velocidades obtenidas a partir de PIVlab

a (cm)	$h1$ (cm)	$h2$ (cm)	u GOPRO-1 (m/s)	u GOPRO-2 (m/s)
0.05	0.71	0.43	1.11	0.98
	0.91	0.53	0.74	0.79
	1.01	0.43-0.53	1.54-1.64	1.42-1.56
0.1	0.71	0.43-0.53	1.68-1.13	0.86-0.14
	0.91	0.43-0.53	1.10-0.79	1.02-1.13
	1.01	0.53	1.60	1.77
0.15	0.51	0.43	0.88	0.50
	0.71	0.43-0.53	1.07-0.68	0.91-0.89
	0.91	0.43-0.53	1.67-1.45	1.10-2.16
0.2	0.51	0.43	1.30	0.46
	0.71	0.43-0.53	1.29-0.55	1.05-1.21
	0.91	0.43-0.53	1.22-1.71	1.13-1.68
	1.01	0.53	2.03	1.71
0.25	0.51	0.43	1.29	0.63
	0.71	0.33-0.43-0.53	1.02-1.44-1.24	0.74-0.83-0.87
	0.91	0.43-0.53	1.43-2.96	1.55-2.04
	1.01	0.43-0.53	2.34-3.22	1.87-1.69
0.3	0.51	0.43	1.16	0.54
	0.71	0.43	1.78	0.84
	0.91	0.43-0.53	2.00-2.93	1.74-1.90
	1.01	0.43-0.53	2.66-3.22	2.01-0.50

4. Conclusiones

El estudio de tsunamis en laboratorio requiere de una instrumentación específica para obtener una caracterización adecuada. El objetivo de este trabajo es definir una metodología para la obtención de las velocidades máximas de los fenómenos ensayados. Analizando las velocidades máximas con PIV, la compuerta de tsunamis del LPC-UPV ha permitido lanzar tsunamis con velocidades máximas comprendidas entre 0.5-3.5 m/s. Se trata de una metodología de trabajo no intrusiva que permite obtener el campo de velocidades en zonas con y sin modelo 2D para ensayos a pequeña escala. Las limitaciones que se han encontrado a la hora de aplicar la metodología son:

- Necesidad de aplicar partículas trazadoras para poder obtener valores de velocidad adecuados. Se ha observado que aquellos ensayos en los que existe bore, las velocidades obtenidas se obtienen a partir del movimiento de las burbujas. En aquellos casos en los que el tsunami no rompe, no existen partículas suspendidas y, por tanto, la metodología PIV no es fiable.
- La aplicación de la técnica PIV se debe realizar en un plano único. El plano paralelo a la cámara en el que se están obteniendo las velocidades tiene que ser único para no tener errores debido a la perspectiva y conocer la posición de la partícula trazada en el eje y.

Con las limitaciones definidas, los trabajos futuros que se plantean son:

- Rediseñar el *set up* del canal de ensayos, disminuyendo la profundidad de obtención de datos y añadiendo partículas trazadoras para obtener la componente horizontal de la velocidad en ensayos que no generen burbujas (pseudo-tsunamis similares a ondas solitarias).
- Calibrar los datos obtenidos a partir de PIVlab con las medidas de los sensores de nivel.

5. Agradecimientos

Este artículo es parte de los proyectos de I+D+i PID2021-128035OA-I00 y PID2021- 126475OB-I00 financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER “Una manera de hacer Europa”. La primera autora tiene una ayuda PRE2022- 101813 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por “FSE invierte en tu futuro”.

Referencias

- ESTEBAN, M., ROUBOS, J. J., IIMURA, K., SALET, J. T., HOF LAND, B., BRICKER, J., ISHII, H., HAMANO, G., TAKABATAKE, T. y SHIBAYAMA, T. (2020). Effect of bed roughness on tsunami bore propagation and overtopping. *Coastal Engineering*, 157, 103539.
- GOSEBERG, N., WURPTS, A. y SCHLURMANN, T. (2013) Laboratory-scale generation of tsunami and long waves. *Coastal Eng.* 79: 57-74.
- IGN (2021). Plan Estatal de protección civil ante el riesgo de maremotos. Ministerio del Interior, 112 pp
- JAYARATNE, R., MIKAMI, T., ESTEBAN, M. y SHIBAYAMA, T. (2013). Investigation of coastal structure failure due to the 2011 Great Eastern Japan Earthquake Tsunami,” in *Proc. Marine Structures, Coasts and Breakwaters Conf.*, ICE, Edinburgh, pp. 1241–1250.
- JAYARATNE, M. P. R., PREMARATNE, B., ADEWALE, A., MIKAMI, T., MATSUBA, S., SHIBAYAMA, T., ESTEBAN, M. y NISTOR, I. (2016). Failure mechanisms and local scour at coastal structures induced by tsunami. *Coastal Engineering Journal*, 58(04), 1640017.
- MATLAB (2023). MATLAB 2023b. The MathWorks Inc., Natick, MA.
- ROSSETTO, T., ALLSOP, W., CHARVET, I., y ROBINSON, D. I. (2011). Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator *Coastal Engineering*, 58(6), 517-527.
- SATO, S. (2015). Characteristics of the 2011 Tohoku Tsunami and introduction of two level tsunamis for tsunami disaster mitigation. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 91(6), 262-272.

- SUPPASRI, A., MUHARI, A., RANASINGHE, P., MAS, E., SHUTO, N., IMAMURA, F. y KOSHIMURA, S. (2012). Damage and reconstruction after the 2004 Indian Ocean tsunami and the 2011 great east Japan tsunami. *J.I Nat. Disaster Sc.* 34 (1), 19–39.
- STEPHENS, M.T., XU, Z., WHITTAKER, C. y WOTHERSPOON, L. (2023). “Vulnerability of power distribution utility poles to tsunami bore impacts” en *Journal of Coastal and Hydraulic Structures*, 3, p. 22.
- SYNOLAKIS, C.E. (1987) The runup of solitary waves. *J. Fluid Mech.* 185: 523-545.
- WUTHRICH, D., PFISTER, M, NISTOR, I. y SCHLEISS, A.J. (2018) Experimental study of tsunami-like waves generated with a vertical release technique on dry and wet beds. *J Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.* 144(4): 04018006.
- YUAN, D., DENG, J., HAN, R., LI, D. y TAN, S. (2021). Experimental study on flow structures of central blockage accidents in a rectangular channel using PIV and POD, *Ann. Nucl. Energy* 153, 108037.
- YUAN, D., DENG, J., ZHU, J., TAN, S., y LI, D. (2022). Simultaneous temperature field investigations of blockage accidents in a narrow rectangular channel by experiments and simulations. *Annals of Nuclear Energy*, 171, 109007.

Estudio del parámetro alternativo de similaridad modificado en fórmulas de remonte

Study of the modified alternative similarity parameter in Run-up formulas

Miguel Santamaría^a, Fanny Baena-Ramírez^b, Ángel Molina-Salas^c, María Clavero^d, Antonio Moñino^e

^aGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales. IISTA, Universidad de Granada, , miguelsancer@ugr.es;

^bGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales. IISTA, Universidad de Granada, , fanny.baena@ugr.es; ^cGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales. IISTA, Universidad de Granada, , amsalas@ugr.es; ^dGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales. IISTA, Universidad de Granada, , mclavero@ugr.es; ^eGrupo de Dinámica de Flujos Ambientales. IISTA, Universidad de Granada, , amonino@ugr.es.

How to cite: Santamaría, M.; Baena-Ramírez, F.; Molina-Salas, A.; Clavero, M. y Moñino, A. (2024). Estudio del parámetro alternativo de similaridad modificado en fórmulas de remonte. Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Ibiza, mayo 2024

Abstract

In Santamaría 2023, the modified alternative similarity parameter $\chi^* = \log\left(\left(\frac{h}{L}\right) \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right); \right) - 13.58 \cdot \tan(\alpha)$, was proposed as a similarity parameter in impermeable and steep slopes for the calculation of the energy balance coefficients. Following this hypothesis, in this work we analyze the operation of this parameter in run-up formulas. Additionally, we include relative wave height as a parameter to improve the fit of the formulas. For this purpose, the study is based on an experimental campaign for 3 impermeable slopes carried out in the CIAO wave flume of the GDFA laboratories of the University of Granada. The results show how the Run-up, Reflection and Dissipation coefficients depend on the modified alternative similarity parameter and how they are grouped by relative wave height.

Keywords: Breakwaters, Slope, Run-up, Dissipation, Reflection

Resumen

En Santamaría 2023, se propuso el parámetro alternativo de similaridad modificado $\chi^* = \log\left(\left(\frac{h}{L}\right) \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right); \right) - 13.58 \cdot \tan(\alpha)$, como parámetro de similitud en taludes impermeables para el cálculo de los coeficientes del balance de energía. Siguiendo esta hipótesis, en este trabajo analizamos el funcionamiento de este parámetro en fórmulas de remonte. Además, incluimos la altura de ola relativa como parámetro para mejorar el ajuste de las fórmulas. Para ello el estudio se apoya en una campaña experimental para 3 taludes impermeables realizada en el canal de oleaje CIAO de los laboratorios del GDFA de Universidad de Granada. Los resultados muestran como el remonte y los coeficientes de reflexión y disipación dependen del parámetro alternativo de similaridad modificado y cómo se agrupan por altura de ola relativa.

Palabras clave: Diques, Talud, Remonte, Disipación, Reflexión

1. Introducción

La creciente vulnerabilidad de las zonas costeras frente a riesgos asociados al cambio climático plantea desafíos significativos para la ingeniería y la gestión costera. Se requieren estrategias efectivas de protección, adaptación y mitigación que consideren la resiliencia de las estructuras costeras y aborden las incertidumbres tanto intrínsecas como epistémicas asociadas a su diseño y funcionamiento.

Entre las posibles soluciones, los diques en talud destacan por su versatilidad y eficacia. Estas estructuras se caracterizan por su capacidad para disipar la energía del oleaje y por la flexibilidad que ofrecen en cuanto a materiales y dimensiones de sus componentes. El comportamiento hidrodinámico de los diques en talud es complejo y depende de múltiples factores, incluyendo los regímenes cinemático y dinámico, así como la transformación del oleaje incidente al interactuar con la estructura.

El diseño de diques en talud para proteger puertos y costas incluye el cálculo de las cotas de coronación y descenso en el manto más externo y del espaldón. Su determinación depende, entre otros, del tipo de rotura del tren de oleaje, del remonte R_u y descenso R_d de la lámina de agua por el talud. Actualmente, sus valores de diseño se calculan aplicando fórmulas empíricas que se basan en el trabajo seminal de Battjes (Battjes, 1974), tienen el formato propuesto por Van der Meer (Van der Meer, 1987) y se ajustan mediante ensayos de laboratorio. Su formato es una función potencial del número de Iribarren, I_r , que actúa como parámetro de similitud de la interacción del tren de oleaje en el talud y el peralte de la ola. Sin embargo, estudios recientes (Díaz-Carrasco, 2019, Moragues, 2021 y Santamaría, 2023) han analizado la importancia de la profundidad relativa en el comportamiento hidráulico del dique. En estos estudios el parámetro alternativo de similitud $\chi = (h/L) \cdot (H_i/L)$ (Díaz-Carrasco, 2019, 2020) se utiliza para caracterizar la transformación de la energía del oleaje, Moragues et al. (2020) para los tipos de rotura, Moragues (2021) para el runup (remonte) y rundown (descenso), y Losada (2021) para la progresión del daño.

En Santamaría (2023) se propone modificar el parámetro alternativo de similitud para encapsular el efecto del ángulo del talud ($\chi^* = \log\left(\left(\frac{h}{L}\right) \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right)\right) - 13.58 \cdot \tan(\alpha)$) para taludes impermeables. Esto permite ajustar los valores de los coeficientes de reflexión y disipación de las tres rampas a una única función sigmoide (Figura 9, (Santamaría, 2023)). Sin embargo, el comportamiento del resto de variables frente a este parámetro está por estudiar.

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es analizar si el remonte de la lámina de agua sobre taludes impermeables depende del parámetro alternativo de similitud modificado, encapsulando los efectos del peralte (H_i/L), profundidad relativa (h/L) y ángulo del talud (α) en un solo parámetro. Además, el estudio también analiza la dependencia de los resultados con la altura de ola relativa $\gamma = H_i/h$ para un ajuste más preciso de las fórmulas.

3. Desarrollo de la innovación

El estudio se apoya en una campaña experimental realizada en el canal de oleaje CIAO (Figura 1) de la UGR. Los ensayos analizados constan de tests de oleaje regular a una profundidad constante $h = 0.5$ m para tres rampas impermeables de ángulos $\tan(\alpha) = 1/3, 1/5, 1/10$. El rango de ensayos de la altura de ola son $H = 0.005 - 0.15$ m y de periodo $T = 0.8 - 5$ s. Los datos de runup se

midieron para 100 olas en cada estado de mar con ayuda de una cámara y una cinta métrica colocada sobre la rampa. Las medidas de los resultados de reflexión (K_r) y disipación (D^*) se obtuvieron mediante una serie de sensores de nivel colocados a lo largo del canal y siguiendo el método Baquerizo (Baquerizo,1995) .

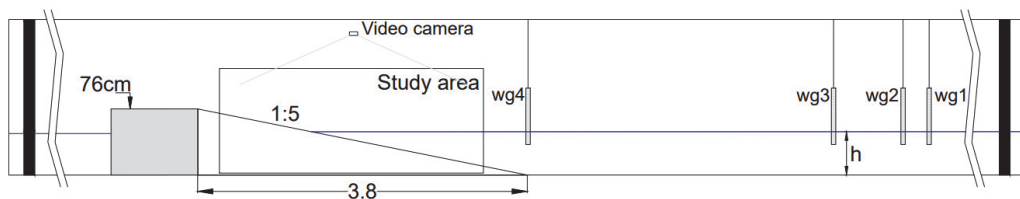


Fig. 1. Montaje experimental.

La figura 2 muestra el espacio experimental de los resultados para las 3 rampas. Las línea discontinua verde indica los límites de generación del sistema y la línea discontinua con puntos indica el criterio de rotura de Miche. Los ensayos están diseñados para cubrir el espacio experimental de la manera más completa posible.

Las líneas verticales indican peralte constante, las líneas horizontales muestran profundidad relativa constante y las líneas inclinadas de colores indican gamma constante para 4 alturas de ola seleccionadas. De esta forma se puede ver de un vistazo la diferente combinación de ensayos según los distintos parámetros. Los 4 grupos de gamma cte han sido seleccionados para estudiar la dependencia de las variables con este parámetro.

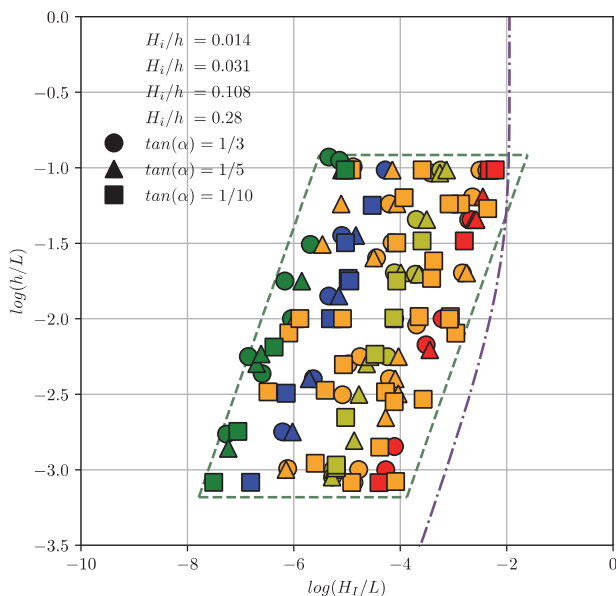


Fig. 2. Espacio experimental.

4. Resultados

En este apartado se explican los resultados más relevantes de la investigación.

4.1. Coeficiente de reflexión

En la Figura 3 a) se muestran los resultados obtenidos para el coeficiente de reflexión K_r frente al parámetro alternativo de similaridad modificado. Los resultados muestran que los valores de la reflexión decrecen en función del parámetro de similaridad modificado, y lo hacen de manera más rápida en función de gamma. Los datos están agrupados por altura de ola relativa (gamma) y las líneas indican el mejor ajuste a la función sigmoide:

$$K_r^2 = \left[1 + \left(\frac{\log(\chi) - 13.58 \cdot \tan \alpha}{a_\chi} \right)^{\gamma_\chi} \right]^{-1} \quad (1)$$

La Figura 3 a) muestra los resultados de los coeficientes del ajuste frente a la altura de ola relativa gamma. El coeficiente a_χ disminuye linealmente con γ . El coeficiente γ_χ decrece con $\gamma = H_i/h$ de manera logarítmica. La dependencia de los coeficientes se ha ajustado a una función lineal y otra logarítmica obteniéndose el mejor ajuste de tal manera que:

$$a_\chi = -2.56 * \gamma + 10.16 \quad (2)$$

$$\gamma_\chi = 5.63 * \ln(365.05 * \gamma) \quad (3)$$

La figura 3 c) representa los resultados obtenidos calculados con el nuevo ajuste frente a los resultados experimentales. Se observa que con este nuevo ajuste que incluye la altura de ola relativa se reduce la incertidumbre de la fórmula, obteniéndose un coeficiente de ajuste $R^2 = 0.97$. Sustituyendo las fórmulas 2 y 3 en la ecuación 1 se obtiene:

$$K_r^2 = \left[1 + \left(\frac{\log(\chi) - 13.58 \cdot \tan \alpha}{-2.56 * \gamma + 10.16} \right)^{5.63 * \ln(365.05 * \gamma)} \right]^{-1} \quad (4)$$

Que solo depende de χ, γ y α mejorando el ajuste propuesto en (Santamaría, 2023).

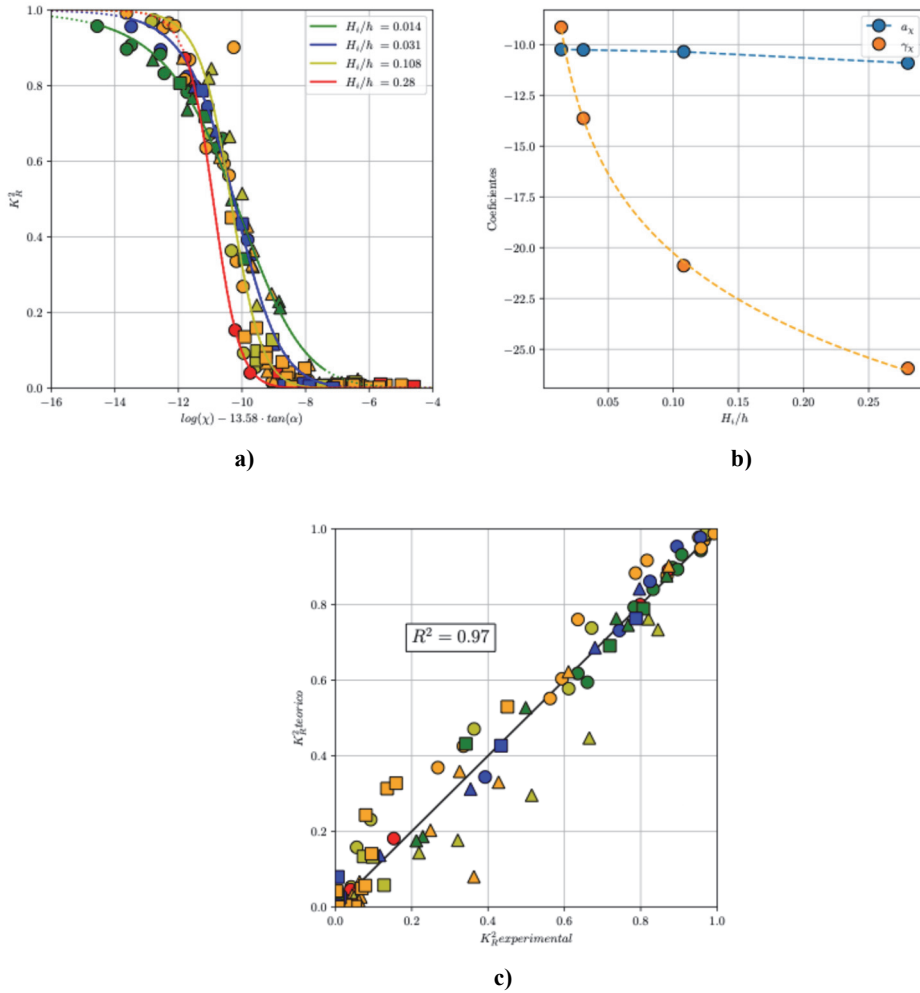


Fig. 3. a) Coeficiente de reflexión frente al parámetro alternativo de similaridad modificado. Las líneas indicant el mayor ajuste a la función sigmoide para cada altura de ola. b) Coeficientes de la función sigmoide frente a la altura de ola relativa. c) $K_R^2_{teorico}$ calculado con la fórmula (4) vs $K_R^2_{experimental}$ medido de manera experimental.

4.2. Run-up

La Figura 4 a) muestra los resultados obtenidos para el runup adimensional frente al parámetro alternativo de similaridad modificado. Solo se muestran los resultados que no se vieron afectados por ondas de borde u otro tipo de efectos de reflexión dentro del canal. Se observa que los datos se agrupan según valor de altura de ola relativa decreciendo a partir de un valor de $\chi = (h/L) \cdot \left(\frac{H_i}{L}\right) - 13.58 \cdot \tan(\alpha) = -11$. Los datos están agrupados por altura de ola y las líneas indican el mejor ajuste a la función tipo Rayleigh propuesta en (Santamaría 2023):

$$\frac{Ru}{H_i} = \left(\frac{|\log(\chi) - 13.58 \cdot \tan \alpha|}{A_1} \right)^{A_2} \cdot e^{-\left(\frac{|\log(\chi) - 13.58 \cdot \tan \alpha|}{B_1} \right)^{B_2}} \quad (5)$$

La Figura 4 b) muestra los resultados de los coeficientes del mejor ajuste frente a la altura de ola relativa. La figura 4 c) representa los resultados obtenidos calculados con el nuevo ajuste frente a los resultados experimentales. Se observa que con este nuevo ajuste que incluye la altura de ola relativa se reduce la incertidumbre de la fórmula, obteniéndose un coeficiente de ajuste $R^2 = 0.90$.

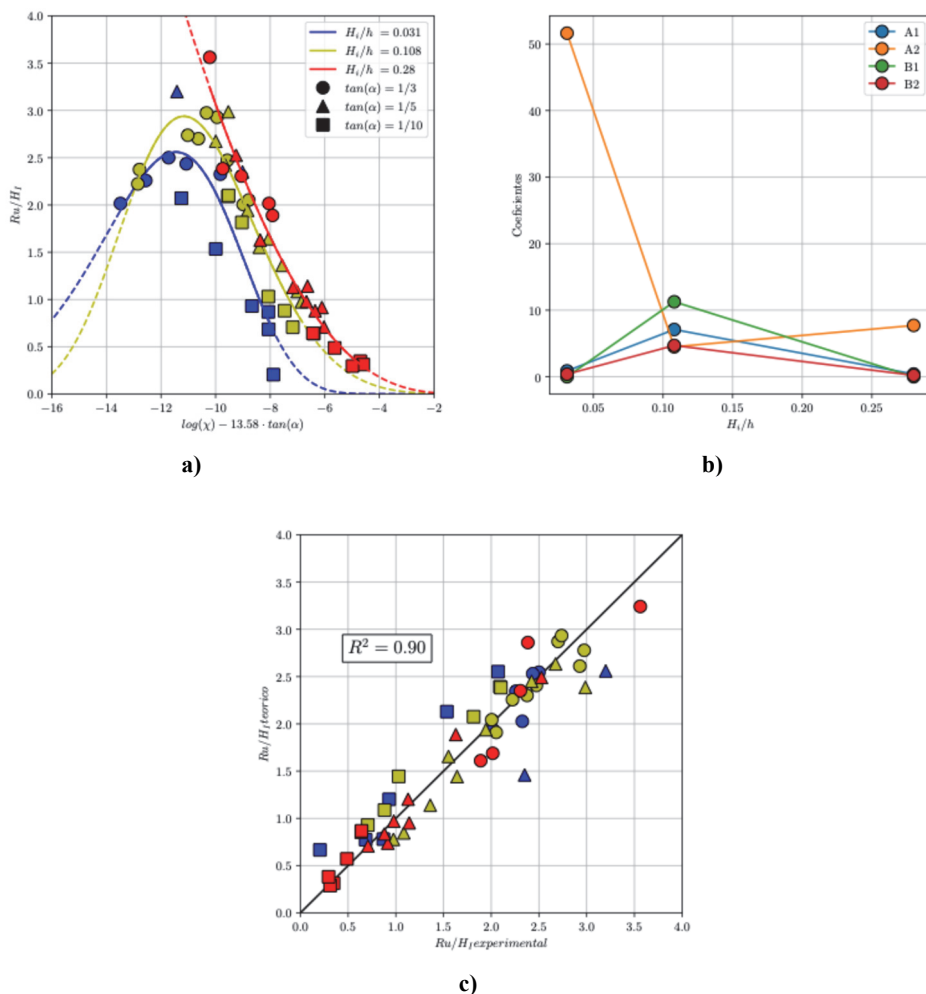


Fig. 4. a) Run-up adimensional frente al parámetro alternativo de similitud modificado. Las líneas indican el mejor ajuste a una función tipo Rayleigh. b) Coeficientes de la función tipo Rayleigh frente a la altura de ola relativa. c) Ru/H_i calculado con la fórmula vs Ru/H_i medido experimentalmente.

5. Conclusiones

El objetivo principal de este estudio era analizar el funcionamiento del parámetro alternativo de similaridad modificado en la caracterización del funcionamiento hidráulico de taludes impermeables. Las principales conclusiones de la investigación son:

1. El parámetro alternativo de similaridad modificado demuestra ser efectivo para caracterizar el funcionamiento hidráulico de taludes impermeables.
2. Los datos de coeficiente de reflexión y runup se organizan según este parámetro y se agrupan por altura de ola relativa $\gamma = H_i/h$
3. Los nuevos ajustes propuestos, que incluyen la dependencia de la altura de ola relativa, permiten reducir la incertidumbre en las fórmulas de diseño.
4. La consideración del ángulo del talud en estos ajustes mejora la precisión de las predicciones para el diseño de diques en talud.
5. Se recomienda ampliar el estudio para verificar la aplicabilidad de las fórmulas propuestas a un rango más amplio de ángulos de talud y condiciones de oleaje.

Este estudio representa un avance significativo en la comprensión de la interacción de las distintas variables implicadas entre el oleaje y las estructuras costeras, proporcionando ajustes más precisas para el diseño de diques en talud.

Referencias

- Baquerizo, A. (1995). *Reflexión del oleaje en playas: Métodos de evaluación y de predicción* [Http://purl.org/dc/dmitype/Text, Universidad de Cantabria].
- Battjes, J. A. (1974). SURF SIMILARITY. *Coastal Engineering Proceedings*, 14, Art. 14.
- Díaz-Carrasco, P., Eldrup, M. R., & Lykke Andersen, T. (2019). Advance in wave reflection estimation for rubble mound breakwaters: The importance of the relative water depth. *Coastal Engineering*, 168(103921).
- Díaz-Carrasco, P., Moragues, M. V., Clavero, M., & Losada, M. Á. (2020). 2D water-wave interaction with permeable and impermeable slopes: Dimensional analysis and experimental overview. *Coastal Engineering*, 158, 103682.
- Losada, M. Á. (2021). Method to assess the interplay of slope, relative water depth, wave steepness, and sea state persistence in the progression of damage to the rock layer over impermeable dikes. *Ocean Engineering*, 239, 109904.
- Moragues, M. V. (2021). Analysis of the behavior of impermeable and permeable breakwaters. Universidad de Granada.
- Santamaría, M., Clavero, M., & Losada, M. Á. (2023). Run-up and run-down regimes on impermeable and steep slopes. *Ocean engineering*, vol 290.
- Van der Meer, J. W. (1987). Stability of breakwater armour layers—Design formulae. *Coastal Engineering*, 11(3), 219-239.

Fracaso de una regeneración costera: caso del Portet de Moraira

Failure of coastal nourishment: the case of Portet de Moraira

Ignacio Toledo Sepulcre^a, Luis Aragonés Pomares^a y Antonio José Tenza Abril^a

^aDpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, , nacho.toledo@ua.es, laragones@ua.es, ajt.abril@ua.es

How to cite: Toledo Sepulcre, I.; Aragonés Pomares, L. y Tenza Abril, A.J. (2024). Fracaso de una regeneración costera: caso del Portet de Moraira. *Libro de Actas de las Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Ibiza, mayo de 2024

Abstract

This research seeks to understand the reasons why the effects of the nourishment carried out in 2017 on Portet Beach in Moraira (Alicante) have disappeared. The analysis of the evolution of the shoreline carried out shows that the erosion rates increased from 2017 onwards (-0.8 m/year), reducing the beach width almost to pre-feeding values. On the other hand, the sedimentological study carried out shows a different behaviour when comparing the material before and after feeding. These differences are also reflected in the accelerated particle wear test, where the post-restoration particles lost 81% after the third cycle, while the pre-restoration particles lost half their weight after the ninth cycle. In addition, some grains dumped on the beach have fractures, which has favoured their rapid erosion and suspension in the water after coming into contact with the waves. These particles have disappeared from the dry beach to be deposited in the submerged area of the beach, even outside the depth of closure. These findings will be useful to coastal engineers to consider all these factors when designing coastal regeneration.

Keywords: shoreline evolution; sand beaches; mineralogy; morphology; beach nourishment; cross-shore profiles

Resumen

Esta investigación busca conocer las causas por las que han desaparecido los efectos de la regeneración ejecutada en 2017 en la Playa del Portet de Moraira (Alicante). El análisis de evolución de la línea de costa realizado muestra que las tasas erosivas se incrementaron a partir de 2017 (-0.8 m/año), reduciendo el ancho de playa casi a valores previos a la nutrición. Por otro lado, el estudio sedimentológico llevado a cabo muestra un comportamiento totalmente diferente cuando se comparan el material anterior y posterior a la alimentación. Estas diferencias se reflejan también en el ensayo de desgaste acelerado de partículas, donde las partículas post-nutrición perdieron un 81% tras el tercer ciclo, mientras que las partículas pre-nutrición perdieron la mitad de su peso tras el noveno ciclo. Además, algunos granos vertidos en la playa presentan fracturas, lo que ha favorecido su rápida erosión y su suspensión en el agua tras entrar en contacto con el oleaje. Estas partículas han desaparecido de la playa seca para depositarse en la zona sumergida de la playa, incluso fuera de la profundidad de cierre. Estos hallazgos serán de utilidad al ingeniero costero para que tenga en cuenta todos estos factores al diseñar una regeneración costera.

Palabras clave: *evolución costera; playas de arena; mineralogía; morfología; regeneración de playas; perfiles transversales.*

1. Introducción

La erosión costera es un fenómeno natural que se está convirtiendo en un problema creciente a lo largo de las costas de todo el mundo. Esta problemática es resultado de múltiples factores (aumento del nivel del mar, frecuencia de grandes temporales, falta de aporte de arena de ríos y barrancos, etc.), muchos de ellos consecuencia del cambio climático global (Mee, 2012). Además, dada la importancia de las regiones costeras para los seres humanos, las actividades antropogénicas aumentan y, como resultado, aumenta la erosión costera (Steffen, 2007).

En las últimas décadas se ha producido un cambio gradual en las técnicas de defensa costera, tendiendo en los últimos años a acciones suaves como la regeneración de playas arenosas como mecanismo de mitigación de la erosión (Dean, 2003). Para lograr una evaluación exitosa en este tipo de proyectos se requiere de monitorización de los cambios a lo largo del tiempo. La falta de un protocolo regular para seguir los cambios post-emplazamiento de arena (Leonard, 1990), así como el comportamiento del sedimento frente a la erosión y al oleaje (Aragónés, 2016), destaca la necesidad de monitoreo en este tipo de actuaciones. Mediante el estudio de evolución de la línea de costa o el análisis de la batimetría costera antes y después de la intervención, es posible conocer si ha habido una pérdida significativa de sedimentos (Van Koningsveld, 2004). Se considera que los factores determinantes, que influyen en la vida de las nutriciones costeras, están relacionados con el (i) clima marítimo, (ii) las propiedades del sedimento y (iii) las propiedades de la regeneración (profundidad del agua, tamaño y ubicación). Por tanto, son muchos los factores que influyen en la erosión costera y es por ello que los ingenieros costeros deben tener en cuenta a la hora de planificar una obra de estas características.

En esta investigación, se va a estudiar el caso particular de la Playa del Portet de Moraira (provincia de Alicante), donde en el año 2017 se llevó a cabo una regeneración en la que se vertieron 8.000 t de arena, lo que supuso la ganancia de 8 m de ancho de playa (Chiva, 2018). Sin embargo, en la actualidad prácticamente han desaparecido los efectos de la regeneración. El objetivo es conocer cuáles son los factores que han llevado a esta playa a estar en una situación similar a la del año 2017. Para ello, se analizarán los cambios en el fondo marino a partir de perfiles batimétricos y las características del sedimento utilizado en la regeneración.

2. Área de estudio

El área de estudio se centra en la playa de El Portet de Moraira, ubicado en el norte de la provincia de Alicante (Fig. 1b), al sureste de la Península Ibérica (Fig. 1a). Se trata de un territorio montañoso en el que los valles fluviales y las playas de grava son predominantes. Esta playa, situada en el término municipal de Teulada (38°41'14" N y 0°8'47" E), tiene una longitud total de unos 330 m y está compuesta por arenas finas-medias. La playa está delimitada por el cabo d'Or al este y por un acantilado de baja altura que llega hasta el puerto de Moraira al oeste. El 90% del entorno de la Playa del Portet de Moraira está urbanizada (Fig. 1c). En el fondo marino predomina la *Posidonia oceanica*.

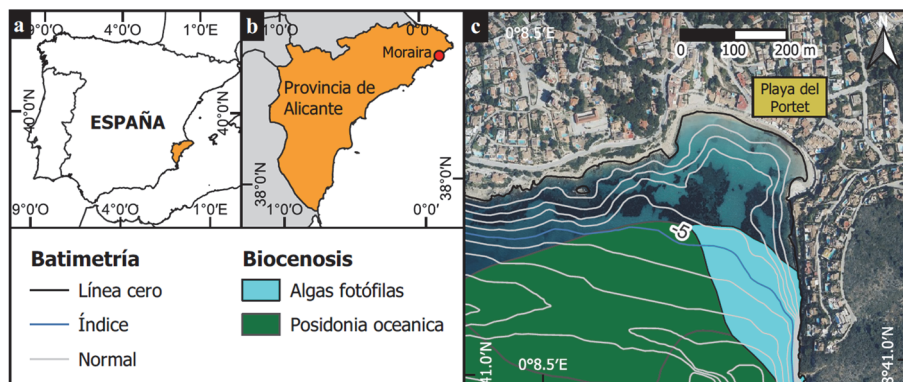


Fig. 1. a) Localización del área de estudio en la Península Ibérica; y b) en la provincia de Alicante; c) detalle del área de estudio con el terreno urbanizado y las especies marinas presentes. Fuente: Propia

Debido a la falta de aportes debido a la urbanización de la cuenca, la playa ha sufrido un proceso de erosión continuado a lo largo del tiempo. La playa ha sido alimentada en dos ocasiones con arena para controlar los problemas debidos a la erosión de la línea de costa en dos periodos diferentes. La primera, en 1985, con 40.000 t de arena procedente del dragado. La segunda, en marzo de 2017, con 8.000 t de arena procedente del cribado de áridos naturales se utilizaron para alimentar la playa. La última alimentación generó una gran turbidez, transoformando el color del agua de la playa, antes turquesa y cristalina, a marrón y turbia.

3. Metodología

Para determinar las causas de la desaparición de la arena vertida durante la última nutrición de la playa se siguió el siguiente procedimiento:

3.1. Evolución de la línea de costa

Para estudiar la evolución de la línea de costa mediante software QGIS se vectorizó la línea de costa para los años con imágenes aéreas disponibles. Se crearon una serie de transectos perpendiculares a la línea de costa. La separación de los transectos se estableció en tramos de 50 m y su longitud es desde la pared o límite de la playa extendiéndose 60 m mar adentro. La metodología permite medir la anchura de la playa seca cada año en cada transecto. Posteriormente se obtuvo la superficie de playa y se compararon las áreas para cada año con el fin de analizar la evolución (acreción o regresión de la línea de costa).

3.2. Estudio de perfiles batimétricos

Para el estudio de perfiles batimétricos se utilizaron las batimetrías disponibles de 2006 (antes de la regeneración) y la de 2022 (después de la regeneración). Se estimó un perfil transversal en el centro de la playa hasta una profundidad superior a la profundidad de cierre (alrededor de la cota -3) para la comparación de ambas batimetrías.

3.3. Análisis de los sedimentos

Para caracterizar el sedimento de la Playa del Portet de Moraira se recogieron muestras en el año 2004 antes de la regeneración de la playa y después de la regeneración de la playa en el año 2017. Las muestras fueron tomadas en las mismas ubicaciones en ambos casos.

Para simular la erosión que sufren las partículas de arena en la zona de rompiente de la playa se utilizó el ensayo de partículas de desgaste acelerado (López, 2016). El ensayo permite analizar la disminución del D_{50} de la muestra. En este ensayo, 75 g de muestra de arena de playa y 500 ml de agua de mar de la playa estudiada se vertieron en un agitador magnético a 1600 rpm en ciclos de 24 horas. El número de ciclos aplicados a cada muestra de sedimento para reducir el tamaño de las partículas por debajo de 0,063 mm se utilizó como referencia para el análisis de la resistencia al desgaste de cada sedimento.

La Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) permite obtener imágenes de la muestra, así como observar la microestructura y la morfología de los granos de arena e identificar partículas rotas, fracturas y heterogeneidades en los sedimentos. Para examinar la morfología se utilizó un SEM Hitachi S3000N, con un detector de rayos X para determinar las fases mineralógicas). Las muestras de arena secas y limpias se colocaron en un portamuestras SEM utilizando cinta de carbono para adherirlas. Esta técnica se llevó a cabo antes de que las muestras fueran sometidas al ensayo de partículas de desgaste acelerado.

4. Resultados

4.1. Evolución de la línea de costa

La evolución de la línea de costa en el área de estudio (Fig. 2) mostró una pérdida generalizada de anchura en toda su longitud en el periodo 1977-1984, con un valor medio de $-0,56$ m/año. Tras la regeneración de 1985 (40.000 t), se observó un incremento medio de 8 m respecto a la línea de costa anterior al vertido. Sin embargo, dicho incremento desapareció en el periodo entre regeneraciones, con tasas de $-0,26$ m/año. La regeneración de 2017 (8.000 t) volvió a incrementar la anchura media de la playa en 8 m (misma anchura que en 1989), consiguiendo una anchura de unos 15 m. Sin embargo, el ancho de playa se redujo de forma paulatina desde 2017 hasta alcanzar valores similares a la época anterior a la regeneración: 7 m en 2014 vs 10 m en 2023.

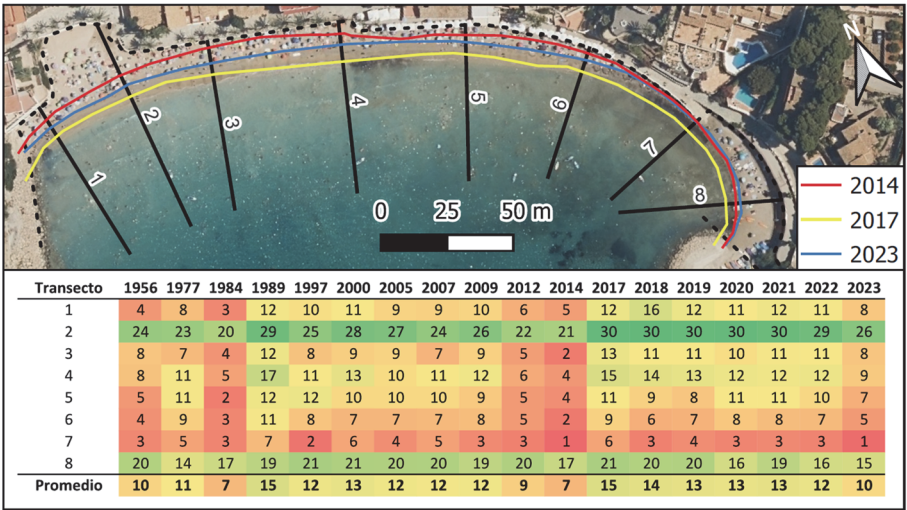


Fig. 2. Evolución del ancho de playa para los transectos analizados. Fuente: Propia

La superficie de playa se ha reducido un 33% en los últimos 6 años. Se observa claramente que los efectos de la última nutrición han durado mucho menos que la de 1985.

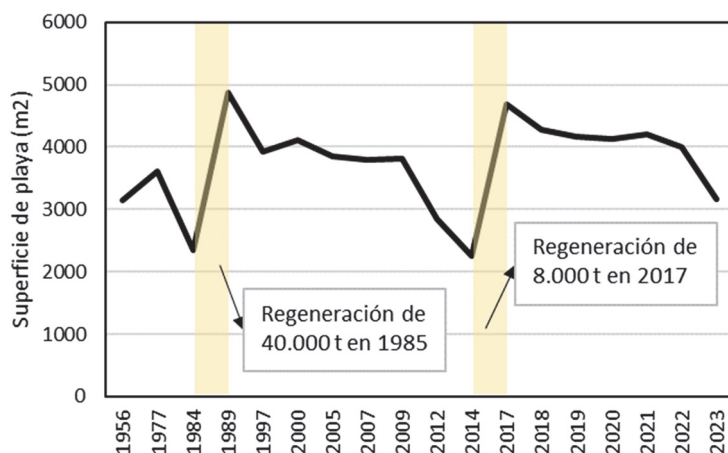


Fig. 3. Superficie de playa del Portet de Moraira. Fuente: Propia

4.2. Estudio de perfiles batimétricos

La arena vertida en la berma de la playa durante la nutrición de 2017 ha ido desapareciendo de la zona seca para depositarse en la zona sumergida del perfil, provocando un incremento de hasta 1 m de altura. Se aprecia que este incremento de altura se ha producido incluso fuera de la zona activa de la playa, es decir, más allá de la profundidad de cierre, que en esta playa se ubica en la cota -3 m.

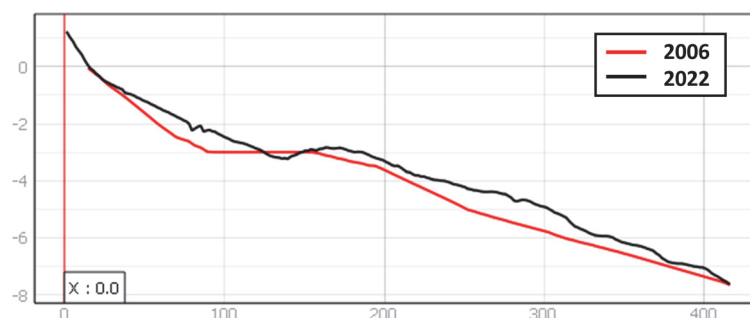


Fig. 4. Perfiles transversales antes (2006) y después (2022) de la recuperación de 2017. Fuente: Propia

4.3. Análisis de los sedimentos

En primer lugar, se realizó la granulometría inicial del material recogido directamente de la playa para determinar el D_{50} y el contenido en finos ($<0,063$ mm). El D_{50} del material previo a la última alimentación fue de 0,313 mm y el posterior a la alimentación de 0,378 mm (Fig. 5a), mientras que el contenido en finos en ambas muestras fue prácticamente nulo. Posteriormente, se analizó el comportamiento frente al ensayo de desgaste acelerado (Fig. 5a). Las particulares anteriores a la regeneración, a pesar de poseer un tamaño medio más pequeño, presentaron una mayor resistencia a la erosión. El material prealimentado experimentó un desgaste progresivo, donde se perdió la mitad de su peso tras 9 ciclos de desgaste. Sin embargo, el material vertido en la playa sufrió una pérdida del 14% en el primer ciclo, y desapareció casi por completo tras el tercer ciclo, reduciendo su tamaño medio un 81%.

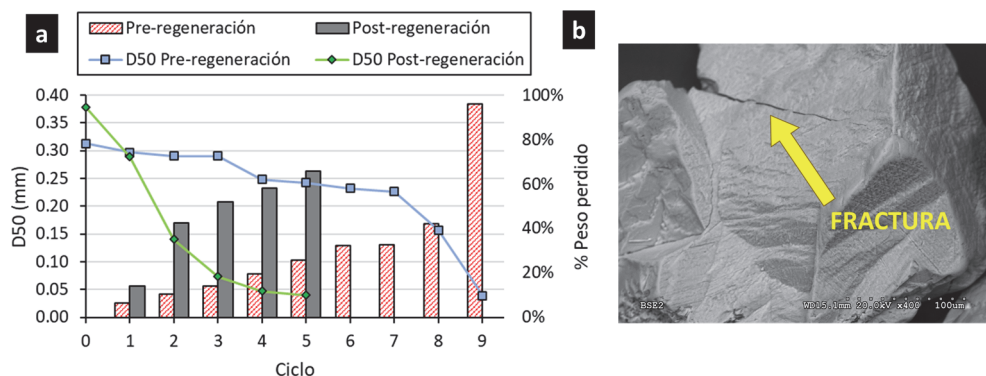


Fig. 5. a) D_{50} y evolución de peso durante la prueba de desgaste acelerado; b) Sedimento post-nutrición donde se aprecia la fractura en una de sus caras. Fuente: Chiva, L. (2018)

Además, se estudió la morfología de las partículas post-regeneración a partir de imágenes tomadas con el microscopio electrónico. Se encontró que los granos presentaban una morfología de aristas angulosas, debido a que la erosión no había tenido tiempo suficiente para redondear las partículas, y en algunos de ellos aparecieron fracturas concoideas e incluso grietas iniciales de rotura de grano (Fig. 5b). Estas fracturas ayudaron a acelerar la erosión del grano.

5. Discusión

Los ecosistemas costeros son zonas de gran riesgo ambiental debido a las actividades humanas tanto en el mar como en tierra. Las actividades humanas pueden afectar directa o indirectamente a las especies y comunidades que habitan en las playas (Halpern et al., 2009). Es por ello que una regeneración puede causar alarma, entre otras cosas, por la pérdida inicial de anchura en los primeros años, o por el posible daño ambiental que la turbidez del agua puede causar debido al nuevo material utilizado para la regeneración de la playa (Chiva, 2018).

Desde 1977 la playa ha sufrido un proceso erosivo continuo que ha llevado en algunas zonas a la desaparición completa de la berma (Fig. 2 y Fig. 3). Sin embargo, el proceso erosivo ha sido diferente en los periodos analizados. Entre 1977 y 1981, la tasa de erosión fue de -0,56 m/año. Tras la regeneración de la playa en el año 1985 esta tasa descendió a -0,26 m/año, pero volvió a dispararse a partir de 2017 (-0.8 m/año). La composición mineralógica de la arena tiene una importante influencia en la evolución de la línea de costa (Lopez, 2016). Estos trabajos demostraron que el mineral que la arena puede erosionarse.

Son numerosos los trabajos donde se describen los aspectos esenciales para el diseño de alimentaciones de playas (Bruun, 1988; Dean, 1998; Houston, 1995). Sin embargo, un factor muy importante, como es el sedimento utilizado en la alimentación de playas ha sido menos estudiado, aunque existen estudios sobre regeneraciones que indican que, por ejemplo, la densidad del sedimento influye en la longevidad de una alimentación de playa más que el tamaño del sedimento (Eitner, 1996; Roberts et al., 1998). El precedente a través del cual, a priori, se estudiaron estas alimentaciones de playas, no hace referencia a ninguna duda sobre el material a utilizar (Chiva, 2018). El ensayo de desgaste acelerado nos hace pensar en dos tipologías diferentes en la arena de la playa actual. El resultado del post-nutrición del material muestra que después de sólo 2 ciclos del ensayo de desecho acelerado el 42,52% de las partículas tienen un diámetro $<0,063$ mm, y lo que es peor, el D_{50} ha disminuido en un 62,96%. Si comparamos estos resultados con el material utilizado

en 1985, el 10,4% de las partículas tenían un diámetro $<0,063$ mm y el D_{50} disminuyó en un 7,34% (Fig. 5a). Este resultado indica que el comportamiento de cada tipo de arena frente al oleaje será diferente.

El análisis SEM también es necesario para comprender el diferente comportamiento de los dos tipos de arena (nutriciones de 1985 y 2017). Las placas fracturadas se pueden encontrar en algunos granos (Fig. 5b). Esto puede significar que la arena fue tamizada y triturada antes de su uso. Bajo la energía de un oleaje, este tipo de partículas se rompen en pequeñas partículas que forman un coloide, y quedan suspendidas en el agua (Chiva, 2018). Los datos con el tiempo confirman que estas partículas se separaran al entrar en contacto con el oleaje, dado su carácter heterogéneo y la unión entre los diferentes minerales, lo que hace que queden en suspensión en el agua y, dado su pequeño tamaño posteriormente, queden depositados en la zona sumergida de la playa, incluso fuera de la profundidad de cierre (Fig. 4). La regresión de la línea de costa será mayor con la arena utilizada en 2017 y seguirá manteniéndose hasta que desaparezca la arena vertida en la última regeneración.

Los resultados de este trabajo ponen de relieve la importancia de que los ingenieros costeros hayan estudiado la mineralogía y la morfología del sedimento antes de tomar cualquier decisión relacionada con la regeneración de playas. Se necesitan estudios más detallados sobre la evolución del desgaste de las partículas del sedimento, que está relacionado con el tamaño, la mineralogía y la morfología de las partículas. Esto es clave para asegurar la selección del material más adecuado para la playa que se está regenerando.

6. Conclusiones

Con estos resultados, se puede afirmar lo siguiente:

- (i) Ha habido una aceleración de la regresión de la playa seca a partir del año 2017 (0,8 m/año). Esta arena se ha ido depositando en la zona sumergida del perfil, generando incrementos de 1 m de altura.
- (ii) La durabilidad de la arena regenerada es inferior a la anterior. Estas partículas se separan al entrar en contacto con el oleaje, lo que hace que queden en suspensión en el agua y, dado su pequeño tamaño, quedan depositados en la zona sumergida de la playa o incluso fuera de la profundidad de cierre.
- (iii) Será necesario el aporte de arenas adecuadas para el mantenimiento de la berma de la playa, teniendo en cuenta no solo la granulometría, sino también su comportamiento frente al desgaste.

Los resultados aquí obtenidos son de utilidad al ingeniero costero para seleccionar la fuente de suministro más adecuada para una mejor duración en la berma de la playa.

Referencias bibliográficas

- ARAGONES, L., PAGAN, J. I., LOPEZ, M. P., y GARCIA-BARBA, J. (2016). "The impacts of Segura River (Spain) channelization on the coastal seabed" en *Sci. Total Environ.*, 543, 493-504.
- BRUUN, P., (1988). "Profile nourishment: its background and economic advantages" en *J. Coast. Res.*, 4, 219-228.
- CHIVA, L., PAGAN, J. I., LOPEZ, I., TENZA-ABRIL, A. J., ARAGONES, L., y SANCHEZ, I. (2018). "The effects of sediment used in beach nourishment: Study case El Portet de Moraira beach" en *Sci. Total Environ.*, 628, 64-73.

- DEAN, R.G. (1998). "Beach Nourishment: A Limited Review and some Recent Results" en *Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering*, Copenhagen, Denmark, 45–69.
- DEAN, R.G. (2003). "Beach nourishment: theory and practice" en *Advanced Series on Ocean Engineering*, 18, 21–70.
- EITNER, V. (1996). "The effect of sedimentary texture on beach fill longevity" en *J. Coast. Res.*, 12, 447–461.
- HALPERN, B.S., KAPPEL, C.V., SELKOE, K.A., MICHELI, F., EBERT, C.M., KONTGIS, C., CRAIN, C.M., MARTONE, R.G., SHEARER, C., TECK, S.J. (2009). "Mapping cumulative human impacts to California Current marine ecosystems" en *Conserv. Lett.*, 2, 138–148.
- HOUSTON, J.R. (1995). "Beach replenishment" en *Shore Beach*, 63, 21–24.
- LEONARD, L., CLAYTON, T., y PILKEY, O. (1990). "An analysis of replenished beach design parameters on US east coast barrier islands" en *Journal of Coastal Research*, 15-36.
- LOPEZ, I., LOPEZ, M., ARAGONES, L., GARCIA-BARBA, J., LOPEZ, M.P., SANCHEZ, I. (2016). "The erosion of the beaches on the coast of Alicante: study of the mechanisms of weathering by accelerated laboratory tests" en *Sci. Total Environ.*, 566-567, 191–204.
- MEE, L. (2012). "Between the devil and the deep blue sea: the coastal zone in an Era of globalisation" en *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 96, 1–8.
- ROBERTS, J., JEPSEN, R., GOTTHARD, D., LICK, W. (1998). "Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles" en *J. Hydraul. Eng.*, 124, 1261–1267.
- STEFFEN, W., CRUTZEN, P.J., MCNEILL, J.R. (2007). "The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature" en *AMBIO J. Hum. Environ.*, 36, 614–621.
- VAN KONINGSVELD, M. y MULDER, J. P. M. (2004). "Sustainable coastal policy developments in the Netherlands. A systematic approach revealed" en *Journal of Coastal Research*, 20(2), 375-385.