



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LAS PLAYAS DE LOREDO, SOMO Y EL PUNTAL

Trabajo realizado por:

María del Carmen Millán Roldán

Dirigido:

Raúl Medina Santamaría

Erica Pellón De Pablo

Titulación:

**Máster Universitario
en Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2024

TRABAJO FIN DE MASTER





Índice

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 7 |
| Abstract..... | 8 |
| Antecedentes | 9 |
| 1. Introducción..... | 10 |
| 1.1. Planteamiento del problema..... | 10 |
| 1.2. Objetivos | 11 |
| 1.3. Información utilizada..... | 12 |
| 1.4. Contenido..... | 12 |
| 2. Descripción de la zona de estudio..... | 15 |
| 2.1. Localización y características..... | 15 |
| 2.2. Morfología..... | 18 |
| 2.3. Dinámica marina..... | 20 |
| 2.3.1. Clima oceánico..... | 20 |
| 2.3.2. Aportaciones fluviales..... | 24 |
| 2.3.3. Interacción con la bahía..... | 25 |
| 2.4. Canal de navegación | 26 |
| 2.5. Modelo morfodinámico de funcionamiento previo a este estudio..... | 27 |
| 3. Evolución histórica mediante ortofotos..... | 29 |
| 3.1. Metodología | 29 |
| 3.2. Validación | 34 |
| 3.3. Tasas de evolución de la línea de costa..... | 36 |
| 3.3.1. Loredo y Somo..... | 36 |
| 3.3.2. Punta Rabiosa..... | 37 |
| 3.4. Conclusiones..... | 39 |
| 4. Evolución histórica mediante topo-batimetrías..... | 41 |
| 4.1. Metodología | 41 |
| 4.2. Incertidumbres..... | 44 |
| 4.2.1. DATUM vertical..... | 44 |
| 4.2.2. Resolución de los datos..... | 45 |
| 4.2.3. Otros | 46 |
| 4.3. Análisis por áreas | 47 |
| 4.3.1. Zonas generales | 47 |
| 4.3.2. El Puntal..... | 50 |



| | | |
|--------|--|----|
| 4.3.3. | Páramos de la ría de Cubas..... | 52 |
| 4.3.4. | Curvas de nivel..... | 53 |
| 4.4. | Conclusiones..... | 53 |
| 5. | Evolución histórica mediante imágenes de satélite..... | 55 |
| 5.1. | Introducción | 55 |
| 5.2. | Metodología desarrollada para obtener las SDS en playas macromareales | 56 |
| 5.2.1. | Pendiente de la playa..... | 57 |
| 5.2.2. | Nivel del mar total o en calma (TWL o SWL)..... | 58 |
| 5.3. | Tasas de evolución y validación..... | 59 |
| 5.4. | Consideraciones | 64 |
| 5.5. | Líneas de costa en pleamar..... | 65 |
| 5.6. | Conclusiones..... | 67 |
| 6. | Comparación conjunta de resultados de diferentes fuentes de datos..... | 68 |
| 7. | Modelo morfodinámico de funcionamiento actual | 70 |
| 8. | Conclusiones | 72 |
| 9. | Bibliografía..... | 75 |



Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Comparación dunas de Somo de 1986 y 1988 con 2023. (Fuente: El Diario Montañés y Rutas por Cantabria) | 11 |
| Figura 2. Localización de la zona de estudio. (Fuente: Google Earth)..... | 15 |
| Figura 3. Destrucción vs. restauración histórica de la bahía de Santander. (Fuente: Asociación Ría)..... | 16 |
| Figura 4. Detalle de la zona de estudio..... | 17 |
| Figura 5. Espesor de sedimento no consolidado..... | 18 |
| Figura 6. Puntos de muestras de sedimentos y D ₅₀ (mm). | 19 |
| Figura 7. Entrada al Puerto de Santander en 1730, 1875, 1960 y 1985. (Fuente: Losada et al., 1991)..... | 20 |
| Figura 8. Localización de los puntos GOW, GOS y GOT. | 21 |
| Figura 9. Boxplot de altura de ola significativa (Hs) y periodo de pico (Tp) en el punto GOW..... | 22 |
| Figura 10. Régimen medio (izquierda) y extremal (derecha) de la altura de ola significativa (Hs)..... | 22 |
| Figura 11. Rosa direccional de altura de ola (Hs). | 23 |
| Figura 12. Régimen medio del nivel del mar..... | 23 |
| Figura 13. Serie anual de la marea astronómica (MA) (izquierda) y de la marea meteorológica (MM) (derecha). | 24 |
| Figura 14. Histograma (izquierda) y serie anual (derecha) del caudal del río Miera. | 24 |
| Figura 15. Procesos durante cada ciclo de marea..... | 25 |
| Figura 16. Volumen anual de dragado en la canal de navegación. | 26 |
| Figura 17. Zonas de dragado y vertido..... | 27 |
| Figura 18. Modelo morfodinámico de funcionamiento previo a 1990. | 28 |
| Figura 19. Ortofoto y línea de costa de 1989..... | 30 |
| Figura 20. Ortofoto y línea de costa de 2001..... | 30 |
| Figura 21. Ortofoto y línea de costa de 2005..... | 30 |
| Figura 22. Ortofoto y línea de costa de 2007..... | 31 |
| Figura 23. Ortofoto y línea de costa de 2010..... | 31 |
| Figura 24. Ortofoto y línea de costa de 2014..... | 31 |
| Figura 25. Ortofoto y línea de costa de 2017..... | 32 |
| Figura 26. Ortofoto y línea de costa de 2018..... | 32 |
| Figura 27. Ortofoto y línea de costa de 2020..... | 32 |
| Figura 28. Ortofoto y línea de costa de 2023..... | 33 |
| Figura 29. Líneas de costa digitalizadas (morado) y transectos en los tramos de Loredo (azul) y Somo (rojo)..... | 33 |
| Figura 30. Líneas de costa digitalizadas (morado) y transectos en Punta Rabiosa..... | 34 |
| Figura 31. Comparación de las líneas obtenidas para Loredo y Somo con las del TFM de González (2018). | 35 |
| Figura 32. Comparación de las líneas obtenidas para Punta Rabiosa con las del TFM de González (2018). | 35 |
| Figura 33. Evolución de las líneas de costa de Loredo y Somo considerando 2018 (izquierda) y sin considerar 2018 (derecha)..... | 36 |
| Figura 34. Evolución de las líneas de costa de Loredo y Somo de 2001 a 2023..... | 37 |



| | |
|---|----|
| Figura 35. Evolución de Punta Rabiosa..... | 38 |
| Figura 36. Evolución de Punta Rabiosa..... | 38 |
| Figura 37. Ajuste exponencial de la evolución de Punta Rabiosa..... | 39 |
| Figura 38. Plano General de la Bahía de Santander de 1975 (izquierda) y su digitalización (derecha)..... | 41 |
| Figura 39. MDT de la topo-batimetría de MUSCLE 2016. | 42 |
| Figura 40. Topo-batimetría del proyecto MARION 2018..... | 43 |
| Figura 41. MDT de la topo-batimetría de 2024..... | 44 |
| Figura 42. Esquema Datum del Mareógrafo Santander2. | 45 |
| Figura 43. Serie de altura de ola de dos meses previos a la realización de las topo-batimetrías de 2016 (izquierda) y 2024 (derecha)..... | 47 |
| Figura 44. Diferencia de topo-batimetrías de 2018 y 1975 en los páramos. | 48 |
| Figura 45. Diferencia de topo-batimetrías de 2018 y 1975 en la canal de navegación. | 49 |
| Figura 46. Diferencia de topo-batimetrías de 2018 y 1975 en el exterior de la bahía. | 50 |
| Figura 47. Comparación de volumen de sedimento de 2016 y 2024 respecto a 1975 en El Puntal..... | 51 |
| Figura 48. Diferencia de topo-batimetrías de 2016-1975 y 2024-2016 en las playas de estudio..... | 51 |
| Figura 49. Comparación de volumen de sedimento de 2018 y 2024 respecto a 1975 en los páramos. | 52 |
| Figura 50. Diferencia de topo-batimetrías de 2018-1975 y 2024-2018 en los páramos. | 52 |
| Figura 51. Comparación de la curva de nivel de 5.3 m de las topo-batimetrías de 2016 y 2024..... | 53 |
| Figura 52. Líneas de costa obtenidas mediante imágenes de satélite y SHOREX. | 56 |
| Figura 53. Esquema de corrección de las SDW. | 57 |
| Figura 54. Ejemplos de obtención de los percentiles 25, 75 y la media de la pendiente de dos transectos..... | 58 |
| Figura 55. Pendientes a lo largo de los transectos de las playas de El Puntal según los datos de 2016 y 2024. | 58 |
| Figura 56. Tasas de evolución de Loredo (rojo) y Somo (azul). | 60 |
| Figura 57. Evaluación del offset de las SDS respecto a la topo-batimetría de 2016. | 61 |
| Figura 58. SDW de las dos imágenes de satélite cercanas a la fecha de la topo-batimetría..... | 62 |
| Figura 59. Comparación de las correcciones en función de la pendiente (arriba) y en función del nivel del mar (abajo)..... | 63 |
| Figura 60. Tasas de evolución de Punta Rabiosa..... | 64 |
| Figura 61. Posición de las SDW para diferentes niveles de mar..... | 65 |
| Figura 62. Tasas de evolución de Loredo (rojo) y Somo (azul) con las SDW en pleamar. | 66 |
| Figura 63. Modelo morfodinámico de funcionamiento actual. | 71 |
| Figura 64. Serie temporal de nivel del mar total. | 71 |



Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Tasas de avance (m/año) de las playas de estudio medidas mediante diferentes fuentes de datos..... | 68 |
|---|----|



Resumen

Título: *Análisis de la evolución de las playas de Loredo, Somo y El Puntal*

Autora: *María del Carmen Millán Roldán*

Dirigido por: *Raúl Medina Santamaría y Erica Pellón de Pablo*

Palabras clave: *monitoreo costero, cambio de línea de costa, recesión, avance, análisis a largo plazo, imagen satelital*

Este trabajo presenta un análisis exhaustivo de la evolución histórica y actual de las playas de Loredo, Somo y El Puntal, situadas en el municipio de Ribamontán al Mar, Cantabria. Estas playas, ubicadas en la bocana de la bahía de Santander, forman una flecha arenosa que juega un papel crucial en la dinámica del estuario, interactuando constantemente con las fuerzas marinas y estuarinas. En las últimas décadas, se ha observado un significativo proceso de erosión en las playas de Loredo y Somo, mientras que la flecha de arena en Punta Rabiosa ha avanzado hacia el suroeste. Estos cambios morfológicos han sido fuertemente influenciados por las intervenciones humanas, particularmente las ocupaciones del interior de la bahía para ampliar la ciudad y el aeropuerto entre otros.

El estudio ha empleado diversas fuentes de datos para evaluar y comparar la evolución de estas playas en las últimas décadas. Entre los métodos utilizados, se incluyen la comparación de ortofotos aéreas digitalizadas para determinar las tasas de avance y retroceso de la línea de costa, análisis topo-batimétricos para evaluar los cambios en la morfología submarina y el perfil de la playa, y el desarrollo de una metodología para analizar líneas de costa digitalizadas a partir de imágenes de satélite.

Los resultados obtenidos muestran que hasta aproximadamente 2014, las playas de Loredo y Somo experimentaron una marcada erosión, con una pérdida de más de un metro por año en algunas zonas. Sin embargo, en la última década, esta tendencia se ha reducido considerablemente. Por otro lado, Punta Rabiosa, que había mostrado un rápido avance durante el siglo XX, ha comenzado a estabilizarse, reduciendo sus tasas de crecimiento.

La comparación de los resultados obtenidos a partir de las tres metodologías empleadas revela una estabilización en la última década de las playas de Loredo y Somo, con reducciones de su erosión hasta alrededor de 0.5 m/año y 0.2 m/año respectivamente, mientras que Punta Rabiosa muestra una disminución en su tasa de avance a aproximadamente 0.35 m/año.

El estudio establece el sistema morfodinámico de funcionamiento actual de las playas y subraya la importancia de continuar investigando en esta área para abordar las incertidumbres asociadas a cada una de las metodologías empleadas, mejorando las técnicas y procedimientos utilizados para obtener resultados más precisos y confiables. Este trabajo contribuye a un mejor entendimiento de la evolución morfodinámica de estas playas, proporcionando información valiosa para la gestión y conservación de este entorno costero tan importante.



Abstract

Title: *Analysis of the evolution of the beaches of Loredó, Somo and El Puntal*

Author: *María del Carmen Millán Roldán*

Directed by: *Raúl Medina Santamaría and Erica Pellón de Pablo*

Key words: *coastal monitoring, shoreline change, recession, advance, long-term analysis, satellite imagery*

This work presents an exhaustive analysis of the historical and current evolution of the beaches of Loredó, Somo, and El Puntal, located in the municipality of Ribamontán al Mar, Cantabria. These beaches, situated at the mouth of the Santander Bay, form a sandy spit that plays a crucial role in the dynamics of the estuary, constantly interacting with marine and estuarine forces. In recent decades, significant erosion has been observed on the beaches of Loredó and Somo, while the sandy spit at Punta Rabiosa has advanced southwestward. These morphological changes have been strongly influenced by human interventions, particularly land reclamation activities within the bay aimed at expanding the city, the airport, and other developments.

The study employed various data sources to evaluate and compare the evolution of these beaches over the past decades. The methods used include the comparison of digitized aerial orthophotos to determine rates of coastline advance and retreat, topographic and bathymetric analyses to assess changes in the underwater morphology and beach profile, and the development of a methodology to analyze digitized coastlines from satellite images.

The results show that until approximately 2014, the beaches of Loredó and Somo experienced significant erosion, with a loss of more than one meter per year in some areas. However, over the last decade, this trend has been considerably reduced. On the other hand, Punta Rabiosa, which had shown rapid advancement during the 20th century, has begun to stabilize, reducing its growth rates.

The comparison of results obtained from the three applied methodologies reveals a stabilization over the last decade of the beaches of Somo and Loredó, with reductions in their erosion rates to around 0.5 m/year and 0.2 m/year respectively, while Punta Rabiosa shows a decrease in its advancement rate to approximately 0.35 m/year.

The study establishes the current morphodynamic functioning system of the study site and underscores the importance of continuing research in this area to address the uncertainties associated with each of the methodologies employed, improving the techniques and procedures used to obtain more precise and reliable results. This work contributes to a better understanding of the morphodynamic evolution of these beaches, providing valuable information for the management and conservation of this important coastal environment.



Antecedentes

El presente estudio forma parte del Trabajo de Fin de Máster del Máster Universitario en Costas y Puertos de la Universidad de Cantabria. Este trabajo ha sido realizado por María del Carmen Millán Roldán bajo la supervisión de Raúl Medina Santamaría y Erica Pellón de Pablo.

Este documento constituye la presentación escrita del “ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LAS PLAYAS DE LOREDO, SOMO Y EL PUNTAL”, en el que se describen la problemática abordada, los objetivos establecidos, las metodologías aplicadas para obtener los resultados, y las conclusiones derivadas.



1. Introducción

En este primer capítulo introductorio se plantea la problemática y la motivación de la redacción de este estudio. Después se definen los objetivos generales y específicos y se describe la información empleada para finalizar con un breve resumen de lo que se va a comentar en cada capítulo.

1.1. Planteamiento del problema

En las últimas décadas, la configuración y estabilidad de las playas de Loredo, Somo y El Puntal, ubicadas en el municipio de Ribamontán al Mar, han experimentado significativos cambios morfológicos. Estas playas, situadas en la bocana de la bahía de Santander, forman una flecha arenosa que semicierra el estuario y juega un papel crucial en la interacción de las dinámicas marinas y estuarinas de la región.

El Puntal es de gran importancia para numerosos sectores, tanto el ecológico, como el socioeconómico y turístico. Constituye un componente fundamental del ecosistema costero, donde las dunas y la ría adyacente, áreas protegidas, son especialmente vulnerables a las alteraciones derivadas de la actividad humana, debido a su proximidad a núcleos urbanos. Son importantes servicios ecosistémicos que aportan protección costera al dotar a la bahía de abrigo ante el oleaje, permitiendo la navegación en su interior. Además, el turismo, impulsado en gran medida por la práctica del surf, es uno de los principales motores económicos del municipio, generando numerosos puestos de trabajo y dinamizando la economía local, especialmente durante los meses estivales.

La preocupación por la erosión progresiva de las playas de Loredo y Somo ha aumentado en los últimos años. No solo se ha evidenciado una reducción del ancho de la playa, sino que también se ha perdido vegetación dunar y se ha desprendido mucha arena consolidada de las dunas, principalmente tras fuertes temporales y épocas de gran presión turística, en las que el tránsito a través de las mismas se intensifica. Al mismo tiempo, se ha observado un avance hacia el Suroeste de Punta Rabiosa, el extremo Oeste de la flecha arenosa de El Puntal.

En la Figura 1 se muestra una comparación de dos imágenes de los años 80 con una actual de las playas de Somo y Loredo. A pesar de mostrar perspectivas diferentes, la posición de las dunas respecto a la misma roca evidencia el grave retroceso que ha sufrido el frente dunar en menos de medio siglo.



Figura 1. Comparación dunas de Somo de 1986 y 1988 con 2023. (Fuente: El Diario Montañés y Rutas por Cantabria)

Las alteraciones observadas en la morfología de estas playas no son fenómenos aislados; están íntimamente ligadas a las intervenciones humanas llevadas a cabo en la Bahía de Santander. A lo largo del tiempo, la bahía ha sido objeto de numerosos proyectos de desarrollo que han reducido su área original. Las extensas obras de relleno, destinadas a expandir la ciudad, el puerto y el aeropuerto, han alterado significativamente las dinámicas naturales de la bahía, provocando un desequilibrio que tiende a reducir el área de su bocana.

Además, las intervenciones en la bahía no se limitan a los rellenos. Desde 1993, se llevan a cabo dragados anuales con el objetivo de mantener la canal de navegación a profundidades mínimas de 11.5 metros, permitiendo así el tráfico de embarcaciones comerciales. Este proceso impide el avance natural de la flecha arenosa de El Puntal hacia la bocana, interrumpiendo el ciclo sedimentario natural. Como resultado, las grandes cantidades de arena que deberían cerrar el ciclo y retornar a las playas de Somo y Loredo se acumulan en la canal de navegación y en Punta Rabiosa.

En un intento por mitigar estos efectos y restaurar el equilibrio natural, desde la década de los 90 se han estado llevando a cabo vertidos de la arena dragada frente a la playa de Loredo, con el objetivo de que retorne a las playas de El Puntal. Para comprobar la eficacia de dicha medida, se debe evaluar la evolución de las playas de estudio, comprendiendo las alteraciones históricas y determinando su estado actual.

1.2. Objetivos

Tras comprender el problema expuesto en el apartado anterior, se procede a establecer un objetivo general junto a varios objetivos específicos.

En este informe se pretende determinar la situación actual de las diferentes playas de El Puntal analizando la evolución de las tasas de erosión y acumulación en el último medio siglo.



Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Comprender la problemática en la zona y conocer las causas.
- Entender las dinámicas actuantes en la zona de estudio junto a su modelo morfodinámico de funcionamiento previo a este estudio.
- Analizar la evolución de la línea de costa mediante imágenes aéreas.
- Describir las zonas de acumulación y pérdida de volumen de sedimentos mediante la comparación de topo-batimetrías.
- Desarrollar una metodología para la obtención de líneas de costa a partir de imágenes de satélite y obtener las tasas de evolución derivadas.
- Llevar a cabo una comparación conjunta de los resultados obtenidos mediante las metodologías mencionadas.
- Establecer conclusiones de la situación histórica y actual de las playas de estudio junto a su nuevo modelo morfodinámico de funcionamiento.

1.3. Información utilizada

Este informe se ha elaborado empleando los siguientes datos:

- Datos geofísicos y topo-batimétricos de la zona de estudio medidos en abril de 2024 proporcionados por TopCad Ingeniería SL.
- Datos de dinámica marina desde 1979 proporcionados por IHCantabria.
- Datos del caudal del río Miera desde 2009 proporcionados por IHCantabria.
- Serie anual de dragados de 1993 a 2022 proporcionada por la Autoridad Portuaria del Puerto de Santander.
- Ortofotos obtenidas por imágenes aéreas de los años 1989, 2001, 2005, 2007, 2010, 2014, 2017, 2018, 2020 y 2023 proporcionadas por el PNOA.
- Memoria del informe final “Diseño óptimo de la Canal de navegación de acceso al Puerto de Santander”, por la fundación Leonardo Torres Quevedo.
- Informe “Seguimiento y análisis de la evolución del sistema de playas Loredo-el Puntal y de la Canal de Navegación del Puerto de Santander, 1990-1992”, por la Fundación Leonardo Torres Quevedo.
- Trabajo de Fin de Máster “Análisis de la evolución de las playas de Somo y del Puntal de Santander” de Laura González de 2018.
- Plano General de la Bahía de Santander de 1975 de la Junta del Puerto de Santander.
- Levantamiento topo-batimétrico de 2016 del proyecto MUSCLE-Beach proporcionado por la Universidad de Cantabria.
- Topo-batimetría del proyecto MARION 2018 del IHCantabria.
- Líneas de costa extraídas de imágenes de satélite proporcionadas por la Universitat Politècnica de València.

1.4. Contenido

Con el fin de facilitar la lectura y comprensión de este estudio, se ha estructurado el mismo en varios capítulos, distribuidos de la siguiente forma:



Capítulo 1: Introducción

Este capítulo aborda el contexto y la relevancia del estudio, detallando los motivos que llevaron a su realización. Además, se definen los objetivos generales y específicos, y se ofrece una descripción de la información utilizada junto a una visión general de la estructura del documento.

Capítulo 2: Descripción de la zona de estudio

En este capítulo se proporciona una visión detallada de la zona de estudio, abarcando su ubicación, características físicas y dinámicas marinas. También se describen las particularidades de la canal de navegación y el modelo morfodinámico de funcionamiento del sistema previo a los análisis de este estudio.

Capítulo 3: Evolución histórica mediante ortofotos

En este capítulo se expone la metodología utilizada para el análisis de la evolución histórica de las playas mediante ortofotos, se presenta la validación realizada y se analiza la evolución de la línea de costa, así como las tasas de evolución en diferentes áreas de estudio: Loredo, Somo y Punta Rabiosa.

Capítulo 4: Evolución histórica mediante topo-batimetrías

Este capítulo describe la metodología empleada en el análisis histórico de las playas utilizando topo-batimetrías y abordando las incertidumbres asociadas. Se realizan análisis por áreas y se presentan las conclusiones obtenidas.

Capítulo 5: Evolución histórica mediante imágenes de satélite

En este capítulo se desarrolla una nueva metodología para analizar la evolución histórica de las playas obteniendo líneas de costa a partir de imágenes de satélite. Se detallan las correcciones necesarias debidas a la pendiente de la playa y el nivel del mar y la validación de la metodología. Se analizan las tasas de evolución para las áreas de Loredo, Somo y Punta Rabiosa. Se comentan aspectos relevantes de la metodología y se describe un método que reduce significativamente las incertidumbres, para finalizar con las conclusiones extraídas.

Capítulo 6: Comparación conjunta de metodologías

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos con las diferentes fuentes de datos: ortofotos, topo-batimetrías e imágenes de satélite. Se realiza una comparación de las tasas de evolución obtenidas con cada método.

Capítulo 7: Modelo morfodinámico de funcionamiento actual

En este capítulo se presenta el modelo morfodinámico de funcionamiento actual de las playas de estudio resultante del análisis llevado a cabo en los anteriores apartados.

Capítulo 8: Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas con base en los resultados mostrados en los capítulos anteriores, incluyendo una discusión detallada de éstos.



Capítulo 9: Bibliografía

Este capítulo recoge todas las fuentes de información y estudios consultados para la elaboración de este trabajo, detallando las referencias citadas a lo largo del documento.

2. Descripción de la zona de estudio

En este capítulo se caracteriza la zona de estudio, introduciendo primero la localización y características generales. Se describe la morfología, la canal de navegación, la dinámica marina actuante y finalmente el modelo morfodinámico de funcionamiento.

2.1. Localización y características

Las playas objeto de este estudio se ubican en el litoral cantábrico de España, en el municipio cántabro de Ribamontán al Mar. Se encuentran en el extremo Norte de la bahía de Santander, frente a la ciudad de mismo nombre (ver Figura 2).

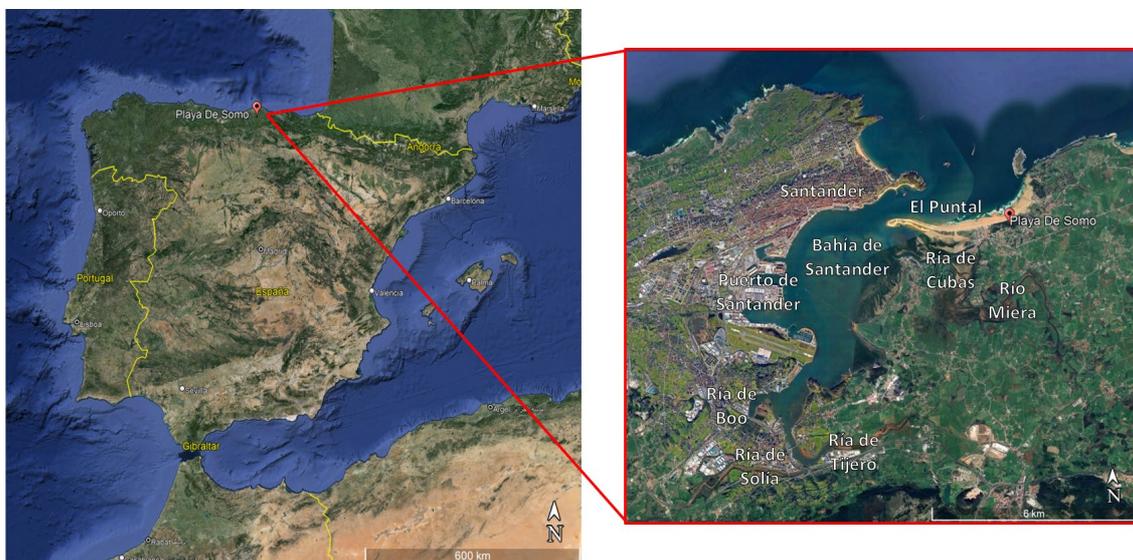


Figura 2. Localización de la zona de estudio. (Fuente: Google Earth)

La bahía de Santander es un estuario de 2346 ha con una longitud de alrededor de 9 km. Consta de un espacio intermareal de 1573 ha (67% del total) principalmente localizado en los páramos ubicados en el lado Este. Numerosos ríos desembocan en ella, siendo el más relevante el río Miera, que desemboca directamente al Sur de El Puntal en la ría de Cubas. Los otros ríos de menor caudal desembocan a través de las rías de Boo, Solía y Tijero en la bahía.

En la bahía de Santander se encuentra también el Puerto de Santander, una infraestructura gestionada por la Autoridad Portuaria de Santander dependiente de la entidad pública Puertos del Estado. Su primera referencia histórica data del año 26 a.C., aunque a lo largo del tiempo ha sufrido numerosas ampliaciones para alcanzar su configuración actual.

Según la Autoridad Portuaria de Santander, el puerto abarca actualmente 283 ha de superficie terrestre y 3700 ha de lámina de agua. Estas expansiones han requerido diversos rellenos en la bahía para aumentar su superficie y capacidad operativa. El puerto es un componente crucial de la economía regional, facilitando el comercio marítimo y contribuyendo al desarrollo industrial de la zona. Además, la ubicación



del puerto en la bahía le proporciona una protección natural contra los temporales, favoreciendo su operatividad durante todo el año.

Como ya se ha comentado, la bahía ha sufrido numerosas reducciones de área desde mediados del siglo XIX como consecuencia del considerable crecimiento del desarrollo de la ciudad, que se reflejó en una gran expansión hacia el mar, ganándole terreno a la bahía. No únicamente por ampliaciones del puerto, sino que también por la creación de áreas industriales y el aeropuerto de Santander entre otros. Se estima que alrededor del 50% de su área original ha sido rellenada (ver Figura 3).

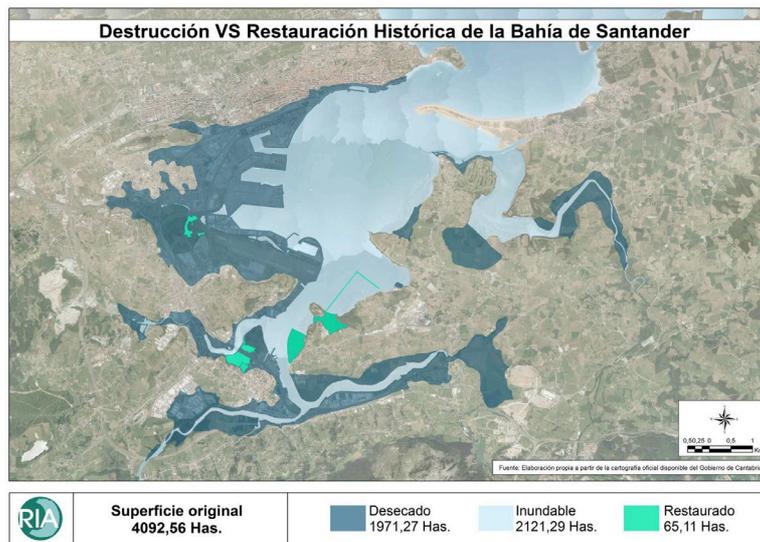


Figura 3. Destrucción vs. restauración histórica de la bahía de Santander. (Fuente: Asociación Ría)

Entrando en mayor detalle en las playas de El Puntal, se pueden identificar elementos relevantes para el sistema de funcionamiento de las playas (ver Figura 4). Se trata de una barra de arena conformada por dunas que no llega a cerrar la bahía de Santander por menos de un km de distancia en su extremo final, Punta Rabiosa. En el centro se encuentra la playa de Somo, y al Este se encuentra finalmente la playa de Loredo. En su conjunto, las playas se extienden a lo largo de 4.5 km y la arena es dorada y fina con salientes rocosos en la playa seca y en las dunas entre las playas de Somo y Loredo.

En el costado levante de Loredo desemboca el río Castanedo, que cada año varía el curso de su desembocadura en varios metros, alterando la configuración de la playa. Para controlarlo, principalmente en los meses previos al inicio del verano, el Ayuntamiento de Ribamontán al Mar lleva a cabo actuaciones para sanearlo, encauzarlo y redirigirlo en su salida al mar.

Frente a las playas se encuentran varias islas. La isla de Santa Marina al Nordeste de la zona de estudio tiene una superficie de 18.5 ha y se encuentra delante del Mirador de los Tranquilos a apenas 150 m de distancia. La isla de Mouro, de 1.7 ha, es una isla rocosa ubicada a 1.8 km de la playa de Somo en la entrada a la bahía de Santander. Alberga el faro de mismo nombre, que fue construido en 1860.



La Magdalena es una península anexionada a la ciudad de Santander. Ocupa 24.5 ha y actualmente es un parque público. Se trata de uno de los principales atractivos turístico de la ciudad, conteniendo monumentos como el Palacio de la Magdalena, playas turísticas, un club de tenis e incluso un parque marino. Se encuentra en el extremo Oeste de la entrada de la bahía, a menos de un km de El Puntal.



Figura 4. Detalle de la zona de estudio.

La zona de estudio es de gran interés tanto para el sector turístico y económico como para el cultural y medioambiental. Se trata de una zona considerada Reserva Natural de Surf, siendo una de las mayores referencias en el país para practicar dicho deporte. El surf atrae al 30% de los 58.000 turistas anuales de Ribamontán al Mar, originando 191 puestos de trabajo directos según datos de 2023 del Ayuntamiento de Ribamontán al Mar. Tan solo el surf genera más de 4.6 millones de euros en la región, cifra que aumenta considerablemente año tras año.

A nivel medioambiental, toda el área de estudio se encuentra en zona de protección, ya que es un Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) y una Zona de Especial Conservación (ZEC) (Dunas del Puntal y Estuario del Miera, ES1300005) de la Red Ecológica Europea Natura 2000. Las dunas del puntal están compuestas por dunas primarias móviles, dunas secundarias con vegetación y dunas terciarias fijas cubiertas de arbustos y bosque. Al encontrarse muy cerca de núcleos urbanos, están altamente expuestas a las pisadas y erosión provocadas por los usuarios de las playas.

La ría de Cubas también forma parte del LIC con un alto valor ecológico. En las zonas intermareales se generan fangos y bancos de arena en las que se desarrollan praderas de zosteria marina, con elevados niveles de biodiversidad.

2.2. Morfología

El litoral cantábrico se caracteriza por sus costas rectilíneas con presencia de numerosas rías y altos acantilados. La formación de puntales y barreras arenosas en las bocanas de estuarios es muy frecuente debido a las diferentes dinámicas que interactúan (dinámicas marinas, estuarinas y fluviales), como es el caso de El Puntal.

Otro elemento característico es la presencia de afloramientos rocosos, debido a la proximidad de la región a las montañas de la Cordillera Cantábrica. En la Figura 5 se observa la profundidad de arena por encima de las rocas en la zona de estudio según campañas geofísicas de 2024. En rojo se destacan los afloramientos rocosos, es decir, donde la profundidad de arena es de 0 metros.



Figura 5. Espesor de sedimento no consolidado.

Se destacan varias zonas rocosas de interés en el área. Por una parte, se aprecian las formaciones cercanas a península de la Magdalena, que conectan con la isla de Mouro al Nordeste. Al Suroeste, el afloramiento abarca una amplia zona que se introduce en el canal de navegación hasta apenas 200 m frente a Punta Rabiosa.

Por otra parte, a unos 500 m de distancia al Norte de Loredo, se localiza otra zona rocosa de unas 24 ha de superficie. Esta área coincide parcialmente con el área de vertido del material dragado anualmente en el canal, como se comentará más adelante. Alrededor de la isla de Santa Marina también se distinguen zonas rocosas que generan olas de gran calidad para la práctica de surf, siendo populares entre los deportistas más experimentados.

Para caracterizar el tamaño del sedimento en las playas, se toman los datos de una campaña llevada a cabo el 23 de abril de 2024. Los puntos medidos se distribuyen a lo largo de las playas de El Puntal y a diferentes distancias de la costa, como se distingue en la Figura 6. Se puede leer también el tamaño medio del sedimento (D_{50}), que es de 0.21 mm de media en toda la zona, considerándose arenas. Como es de

esperar, en los diferentes perfiles el D_{50} es ligeramente mayor a más distancia de la costa.

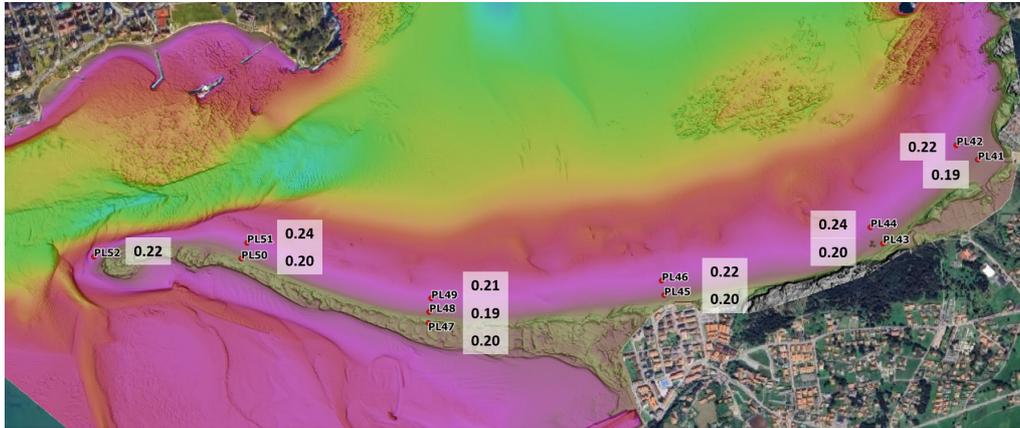


Figura 6. Puntos de muestras de sedimentos y D_{50} (mm).

El sistema dunar de El Puntal-Somo-Loredo es un ecosistema de alto valor ecológico y geomorfológico. Este sistema, que se extiende por más de 4 km, está compuesto por una flecha arenosa que semi-confina el estuario y una franja adosada al continente, con anchuras entre los 50 y 100 m y alturas de hasta 10 m.

Las dunas han experimentado significativos cambios morfológicos debido a la erosión, sedimentación y actividades humanas, como el uso recreativo intensivo. Se ha dado un estrechamiento significativo desde los años 60, con una pérdida neta de sedimento y un retroceso del frente dunar de aproximadamente 54 metros entre 1957 y 2007 según el libro guía del taller de campo en las dunas de Cantabria (EUCC-Atlantique, ARCOSLIFE, & Ecología Litoral, 2017). La erosión se ha acelerado en las últimas décadas, especialmente debido a los temporales del invierno de 2013-2014, que causaron la rotura del primer cordón dunar y la inundación de la depresión trasdunar. Se provocaron graves daños en Somo que acarrearían altos costes de reparación, como fue el caso de la urbanización en primera línea de costa.

Proyectos como LIFE ARCOS (2015-2018) han implementado medidas de restauración para mitigar la erosión y proteger este valioso hábitat, destacando acciones de realimentación, revegetación, estabilización de sedimentos y adecuación de acceso controlados a la playa. A pesar de su antropización, el sistema dunar sigue albergando importantes hábitats y especies, siendo cruciales las medidas de conservación para su recuperación y mantenimiento.

Frente a las playas de El Puntal se acumulaban históricamente grandes cantidades de arena que conformaban el bajo de las Quebrantas. Dicho bajo es uno de los elementos característicos de estuarios dominados por las mareas y el oleaje, como se comenta más adelante en el apartado 2.3.3. *Interacción con la bahía*. En planos de la bahía previos a las actuales ampliaciones del puerto (Figura 7) se puede apreciar dicha barra, que suponía un peligro para las embarcaciones que pretendían entrar al puerto, ya que confinaba mucho la canal obligando a los barcos a realizar maniobras de giro en un espacio muy limitado. Estas circunstancias se veían agravadas en bajamar, cuando la lámina de agua por encima del bajo era menor

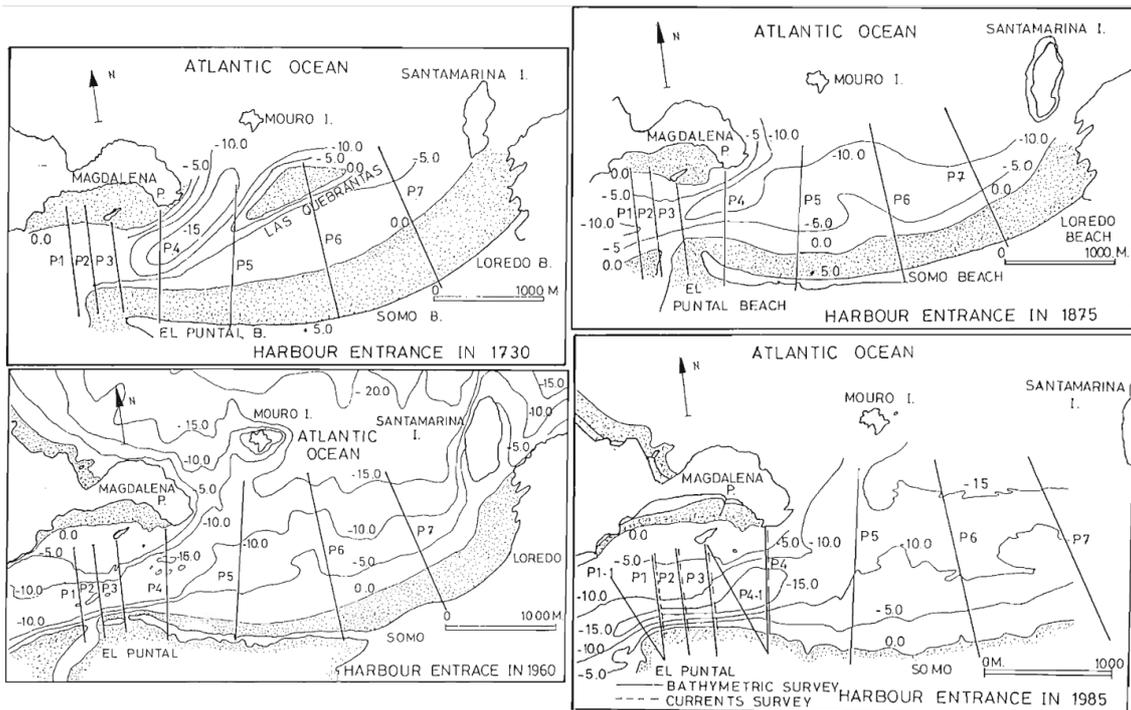


Figura 7. Entrada al Puerto de Santander en 1730, 1875, 1960 y 1985. (Fuente: Losada et al., 1991)

Para garantizar la operatividad del puerto y reducir el número de naufragios, ya a mediados del siglo XX se llevaron a cabo operaciones de dragado de la canal de entrada y el bajo de las Quebrantas (Fundación Leonardo Torres Quevedo, 1990), reduciendo considerablemente su envergadura. La interrupción del ciclo natural de equilibrio de la bocana provocó la desaparición gradual del bajo durante las siguientes décadas, ya que su arena continuó siendo transportada hacia las playas sin ser recompuesta por los aportes naturales de la bocana, que seguía siendo dragada por la canal de navegación. De esta manera, se modificaron las dinámicas actuantes en la zona drásticamente, alterando el transporte de sedimentos en El Puntal y exponiendo la playa a oleajes que anteriormente no la alcanzaban.

2.3. Dinámica marina

Para comprender los procesos que tienen lugar en la zona de estudio, es necesario comprender las dinámicas actuantes. En las playas de El Puntal, los principales factores influyentes son el clima oceánico, las aportaciones fluviales y las interacciones con la bahía.

2.3.1. Clima oceánico

Con el fin de analizar el primero, se toma un punto GOW con datos horarios desde 1979 de oleaje (altura de ola significativa H_s , periodo pico T_p y dirección de procedencia θ). También se emplean puntos GOS y GOT para caracterizar el nivel del mar, con datos horarios desde 1995 y 1979 respectivamente, de marea meteorológica y marea astronómica. Se ubican en las cercanías de la zona de estudio, ambos a menos de 20 km de las playas (ver Figura 8).

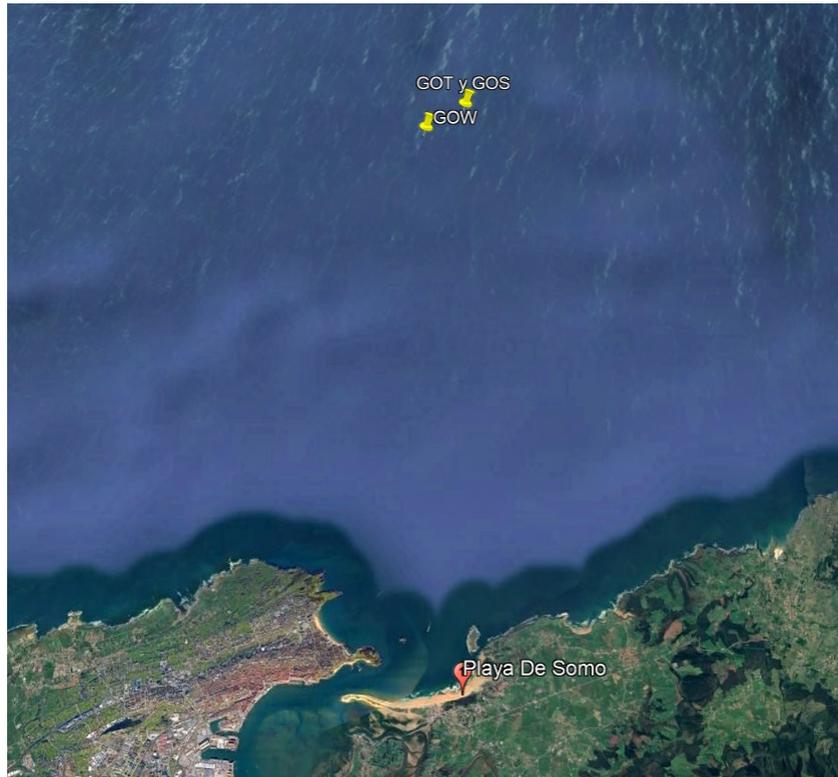


Figura 8. Localización de los puntos GOW, GOS y GOT.

Dichos puntos forman parte de la base de datos met-oceánicos desarrollada por el IHCantabria con el objetivo fundamental de caracterizar el clima marítimo mediante modelos numéricos y reanálisis. Son datos validados comparables con mediciones reales (Acevedo et al, 2019).

Mediante el boxplot mensual mostrado en la Figura 9, se puede comprender la variación estacional tanto de altura de ola como de periodo. Se aprecian temporales significativamente más energéticos en los meses de invierno, con alturas de ola medias de 2.3 m y máximas de hasta 10 m, y periodos de 13 s de media, pero con máximos de 23 s. En verano, sin embargo, el oleaje se reduce hasta medias de 1 m y máximos de 4.5 m, y periodos de alrededor de 9 s, con máximos de 18 s.

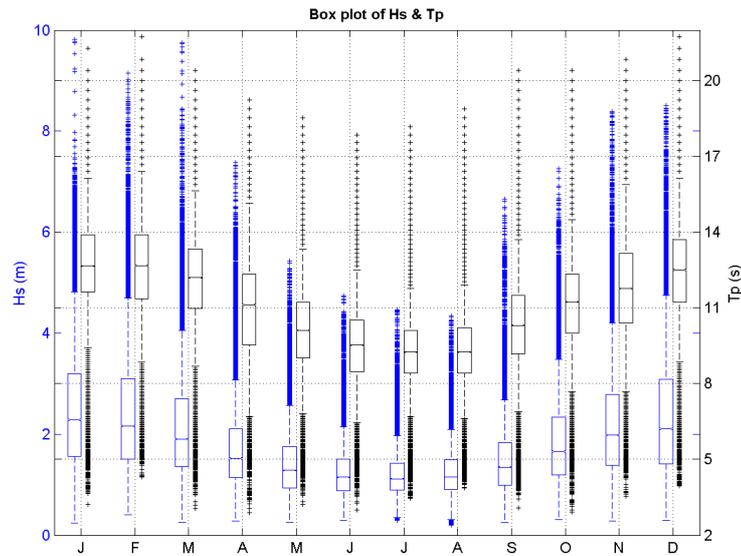


Figura 9. Boxplot de altura de ola significativa (H_s) y periodo de pico (T_p) en el punto GOW.

El régimen medio viene caracterizado por una altura de ola significativa media de 1.53 m, superando el 5% del tiempo los 3.94 m, como se aprecia en la Figura 10. Observando la caracterización del régimen extremal (establecido en este caso como las alturas superadas 12 horas al año), se determina que para un periodo de retorno de 5 años se esperan alturas de ola de alrededor de 8.4 m, mientras que para 50 años de periodo de retorno la cifra aumenta a 9.5 m.

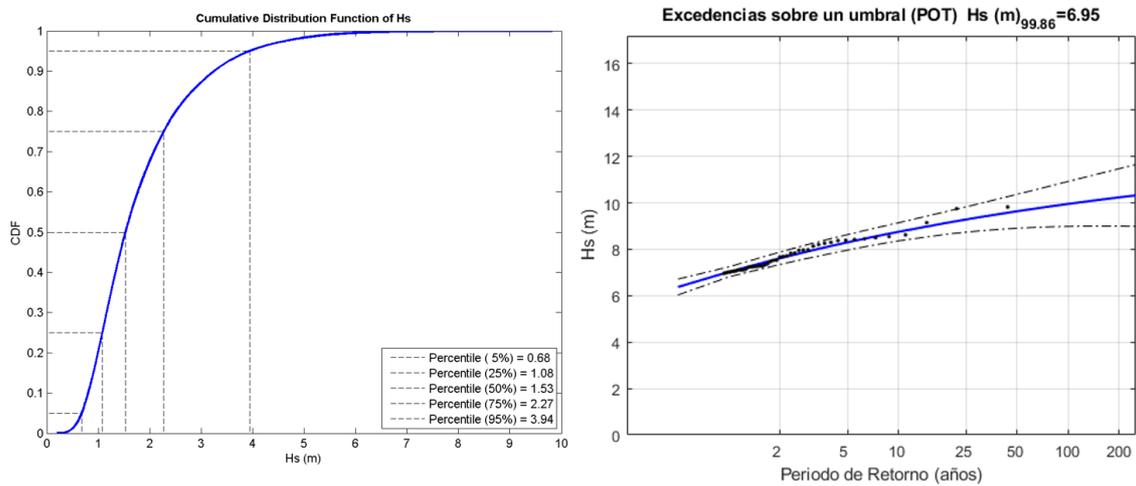


Figura 10. Régimen medio (izquierda) y extremal (derecha) de la altura de ola significativa (H_s).

En la Figura 11 se aprecia que el rango de procedencia de los oleajes es principalmente desde el Oeste-Noroeste hasta el Nord-Nordeste. Sin embargo, los mayores temporales provienen exclusivamente de Oeste-Noroeste y del Noroeste, como es de esperar por la configuración del Golfo de Bizkaia, siendo a la vez las direcciones más frecuentes.

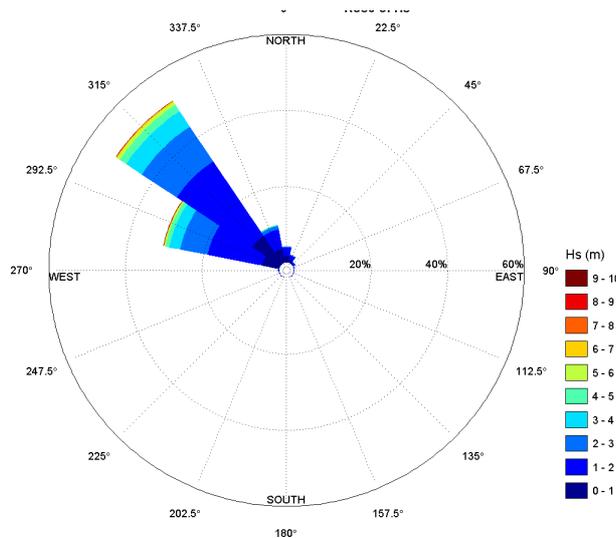


Figura 11. Rosa direccional de altura de ola (Hs).

El nivel del mar viene referido al nivel medio del mar local, estando compuesto por dos componentes: la marea astronómica (MA) y la marea meteorológica (MM). La marea astronómica es la variación regular y predecible del nivel del mar debido principalmente a las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol, mientras que la marea meteorológica es la fluctuación adicional del nivel del mar causada por condiciones meteorológicas variables, como la presión atmosférica y el viento.

En Santander, la variación del nivel del mar es muy grande, con niveles mínimos de -2.51 m y máximos de 2.56 m, siendo el nivel medio de 0.03 m (ver Figura 12).

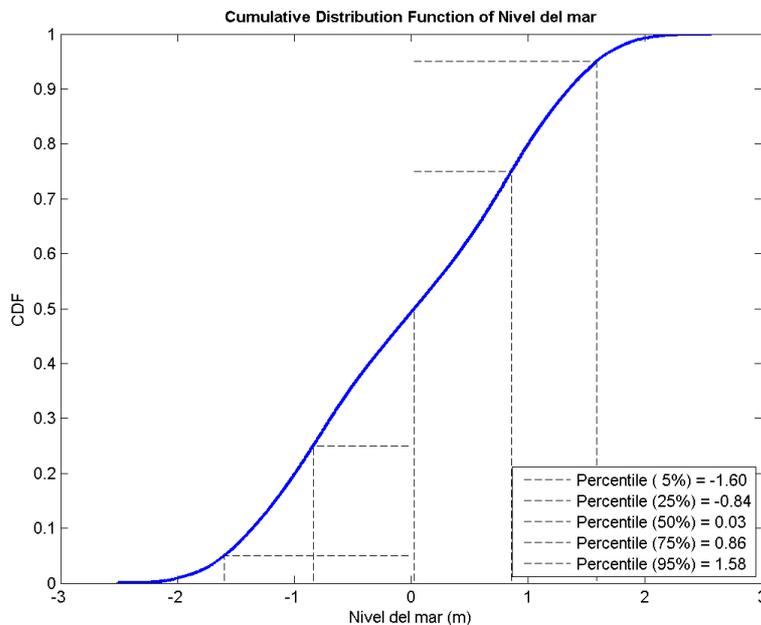


Figura 12. Régimen medio del nivel del mar.

En el Cantábrico, el principal causante de fluctuaciones tan elevadas es la marea astronómica, que tiene un rango medio de 2.7 m y de 4 m en mareas vivas, de tipo semidiurno y meso-macromareal. También varía a lo largo del año, siendo los



rangos de marea mayores en marzo y septiembre, debido a la intensificación que se da durante los equinoccios de primavera y de otoño (ver Figura 13).

La marea meteorológica sigue menos patrones que la marea astronómica, debido a su carácter aleatorio. Sin embargo, sí que se aprecia estacionalidad, provocando ascensos del nivel medio del mar superiores en los meses de invierno, ya que es cuando más borrascas alcanzan la zona de estudio, generando zonas de baja presión atmosférica y fuertes vientos. Como ya se ha comentado, las variaciones producidas por la marea meteorológica son considerablemente menores, de hasta 45 cm.

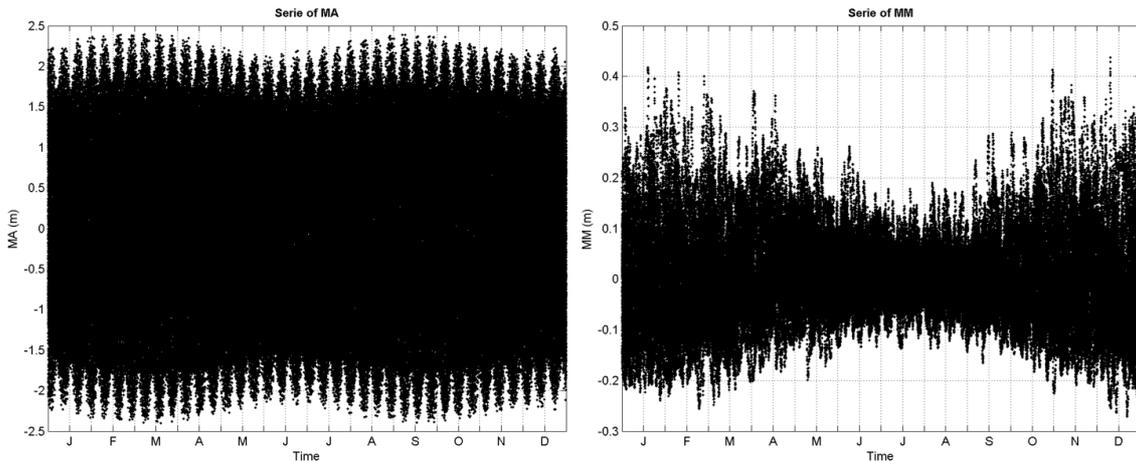


Figura 13. Serie anual de la marea astronómica (MA) (izquierda) y de la marea meteorológica (MM) (derecha).

2.3.2. Aportaciones fluviales

Las aportaciones fluviales principales en la bahía de Santander son las del río Miera. Son de 6.42 m³/s de media alcanzando máximos de casi 170 m³/s durante las mayores avenidas. Los mayores caudales se dan en los meses de invierno, reduciéndose en verano hasta alcanzar mínimos en agosto (ver Figura 14).

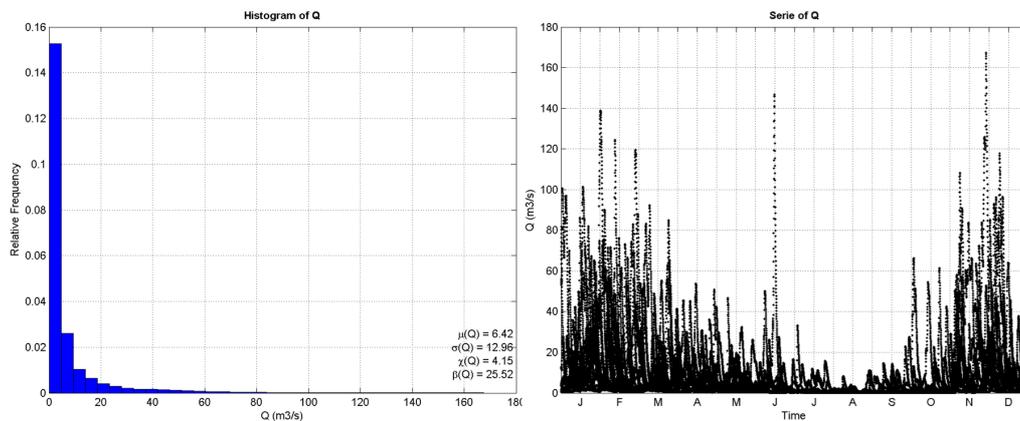


Figura 14. Histograma (izquierda) y serie anual (derecha) del caudal del río Miera.

2.3.3. Interacción con la bahía

Para comprender la interacción de la zona de estudio con las dinámicas de la bahía, es esencial entender el modelo morfodinámico de funcionamiento. Los estuarios dominados por las mareas y el oleaje se caracterizan por varios elementos comunes. Se componen de una zona estrecha, profunda y asimétrica (la bocana), varios bajos exteriores (uno central y dos laterales) que, en caso de haber un contorno de abrigo como la Magdalena, se reducen a un único bajo lateral (las Quebrantas) y un bajo interior (los páramos).

Estos elementos se forman en respuesta a los volúmenes de agua que entran y salen en el estuario con cada ciclo de marea. A esta cantidad se le denomina prisma de marea y está directamente relacionado con el área del estuario y la carrera de marea. Tres procesos principales ocurren en cada ciclo de marea que conforman la morfología de los estuarios (ver Figura 15):

- 1.- Durante la pleamar, las corrientes inducidas por la marea son nulas, por lo que la acción del oleaje predomina, generando corrientes en la playa que tienden a llevar los sedimentos a la bocana con el fin de cerrar la discontinuidad que esta supone.
- 2.- Cuando comienza a bajar la marea, las corrientes vaciantes (con máximas velocidades a media marea y de 1 m/s) transportan la arena acumulada en la bocana hacia los bajos exteriores debido al efecto chorro (agua que pasa de una zona estrecha a una de mayor extensión, reduciendo su velocidad).
- 3.- Finalmente, durante la bajamar, el oleaje vuelve a predominar, transportando los bajos exteriores de vuelta a la playa, cerrando el ciclo conformado por la playa, la bocana y los bajos.



Figura 15. Procesos durante cada ciclo de marea.

En el caso de El Puntal, la reducción del área original de la bahía ha provocado una serie de desequilibrios en la dinámica descrita. La sección de la bocana está



directamente relacionada con el prisma de marea, ya que existe un equilibrio entre la velocidad del agua y el tamaño del sedimento. Reduciendo el prisma de marea, el área de la sección va a tender a reducirse para mantener las velocidades de equilibrio. Sin embargo, como se comenta en el siguiente apartado, en la bahía de Santander se llevan a cabo dragados anuales con el fin de mantener condiciones óptimas para la circulación de embarcaciones.

Al pretender mantener la canal más ancha de lo que correspondería en su equilibrio natural, los sedimentos transportados de la playa a la bocana se depositan en el fondo sin luego ser transportados de vuelta a los bajos exteriores. Adicionalmente, dichos bajos exteriores, las Quebrantas, también fueron reducidos para facilitar la navegación. Por lo tanto, la dinámica establecida entre la playa, la bocana y los bajos se ve interrumpida, provocando una erosión generalizada en El Puntal debido al transporte de sedimentos de la playa a la canal sin restitución

2.4. Canal de navegación

La canal de navegación de acceso al Puerto de Santander ha originado numerosas actuaciones con el fin de asegurar su mantenimiento. Debido a las dinámicas descritas anteriormente, la bocana de la bahía tiende a acumular sedimentos, por lo que la Autoridad Portuaria encarga trabajos de dragado con periodicidad anual desde 1993.

Generalmente, se contrata un máximo de 4 años, estableciendo dragados inferiores a 15 días y llevándose a cabo en condiciones similares cada año, previo a la temporada de verano y tras la época de temporales de otoño-invierno. El calado nominal a mantener bajo el cero del puerto es de 12 m desde Punta Rabiosa al exterior y de 11.5 m hacia el interior. Se extrae el material mediante una draga de succión en marcha midiendo desde 2001 los volúmenes obtenidos en la zona activa de Punta Rabiosa y en la zona activa del exterior frente a la Magdalena, que son los dos principales focos de acumulación de sedimentos.

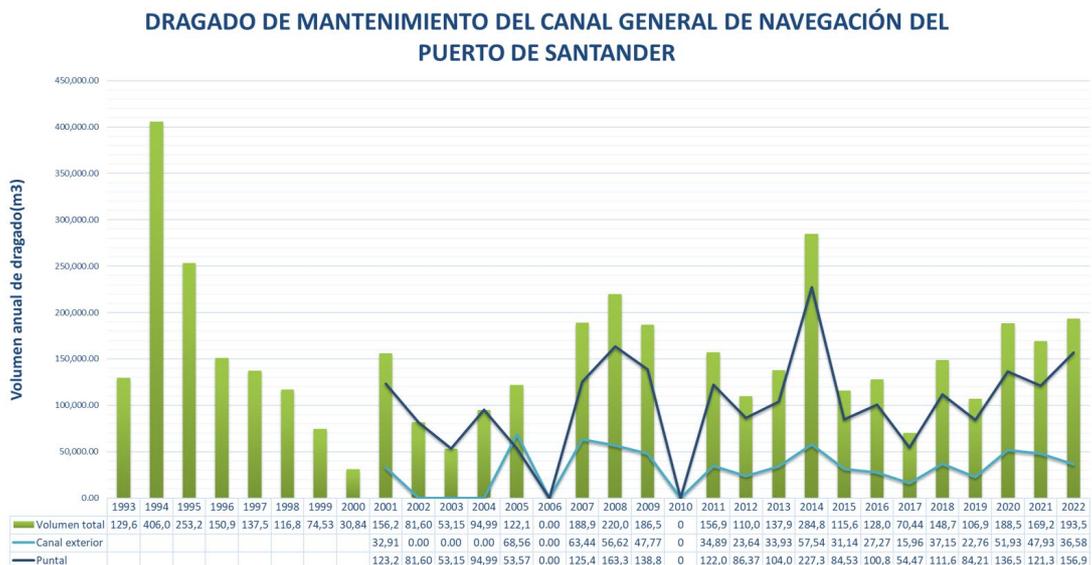


Figura 16. Volumen anual de dragado en la canal de navegación.

Observando los volúmenes de dragado registrados (ver Figura 16), se distingue que hay una gran variación interanual debida a las diferencias de frecuencia e intensidad de los temporales de cada año. Años como 2014 con temporales más energéticos que la media llevan a realizar dragados de mayor magnitud, ya que se arrastra más sedimentos a la canal. De media, se dragan 145.315 m³ al año, de los cuales el 78% se extraen de Punta Rabiosa.

La arena dragada es vertida al abrigo de la isla Santa Marina y lo más cerca posible de la playa de Loredo a menor profundidad de entre 4 y 8 m en BMVE (bajamar máxima viva equinoccial) como muestra la Figura 17, con el fin de que la dinámica del oleaje devuelva los sedimentos a las playas, pretendiendo de esta manera cerrar el ciclo en desequilibrio descrito en el apartado anterior y reducir la erosión de las playas. La zona de vertido tiene un área de 150,000m².



Figura 17. Zonas de dragado y vertido.

2.5. Modelo morfodinámico de funcionamiento previo a este estudio

Resumiendo las interacciones entre los diferentes elementos presentes en la zona de estudio, se establece el sistema morfodinámico de funcionamiento de El Puntal previo a los análisis de las últimas décadas llevados a cabo en este estudio. Las playas de estudio conforman una flecha arenosa que delimita la bahía de Santander. Encontrándonos en una zona con un régimen de marea meso-macromareal, la dinámica de la bahía juega un papel fundamental en la morfodinámica de las playas.

La reducción del área original de la bahía ha tendido a provocar un alargamiento de la flecha arenosa, que busca la reducción de área de la desembocadura del estuario para establecer un nuevo equilibrio morfodinámico. Al impedirse dicho avance mediante dragados anuales, se establece un desequilibrio en las dinámicas actuantes. La arena de las playas sigue llegando al extremo de Punta Rabiosa, pretendiendo disminuir la sección y siguiendo el recorrido característico de cada ciclo de marea. Sin embargo, dicho ciclo se ve interrumpido al impedirse que la arena retorne a las playas durante la bajamar.



Adicionalmente, la reducción del bajo exterior de las Quebrantas para permitir la navegación también ha aumentado la exposición de la parte occidental de la playa a la acción directa de los oleajes. Esta pérdida de protección natural ha acelerado la erosión en ciertas áreas, alterando el perfil de la costa y modificando los patrones de transporte sedimentario.

En la Figura 18 se muestra el esquema del modelo morfodinámico de funcionamiento descrito, mostrando con flechas amarillas el transporte de arena (recalcando con flechas negras los transportes que ya no se dan) y en rojo los cambios de la línea de costa resultantes del movimiento sedimentario y los dragados llevados a cabo principalmente alrededor de la bocana.



Figura 18. Modelo morfodinámico de funcionamiento previo a 1990.

Desde los años 90, en un esfuerzo por mitigar los efectos adversos de estas intervenciones humanas, se ha implementado un programa de vertido de arena dragada frente al extremo oriental de las playas. Esta acción busca devolver parte de la arena perdida a las playas erosionadas y estabilizar el sistema costero, tratando de restaurar, aunque sea de manera artificial, un equilibrio dinámico que se vio interrumpido por las actividades antrópicas. No obstante, la efectividad de estas intervenciones y la capacidad del sistema para alcanzar un equilibrio sostenible a largo plazo siguen siendo objeto de estudio y análisis. En este Trabajo de Fin de Máster se evalúa la evolución de las playas de El Puntal y la eficacia de las medidas planteadas en los años 90, para finalmente proponer el modelo morfodinámico de funcionamiento actual.



3. Evolución histórica mediante ortofotos

En este capítulo se emplean imágenes aéreas de vuelos fotogramétricos del PNOA para analizar la evolución de las playas de Loredo, Somo y Punta Rabiosa. Se detalla la metodología utilizada, la validación realizada y, finalmente, se presentan los resultados obtenidos. La zona de estudio se ha dividido en tres tramos para evaluar la variabilidad espacial a lo largo de toda la zona de estudio.

3.1. Metodología

Para realizar los análisis descritos anteriormente, se compara la posición de la línea de costa en diferentes momentos a lo largo del tiempo con imágenes aéreas. Se toman las ortofotos obtenidas por los vuelos fotogramétricos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) de los años 1989, 2001, 2005, 2007, 2010, 2014, 2017, 2018, 2020 y 2023. Se pueden encontrar en la Fototeca Digital del Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Para comprender la extracción de las ortofotos, es importante conocer el proceso de los vuelos fotogramétricos. Durante estos vuelos, una cámara toma imágenes lo más horizontales posibles, llamadas fotogramas, que contienen información específica sobre la fecha; antes de 2005, solo el mes y el año, y desde 2005, también el día. Las ortofotos son las correcciones de estos fotogramas considerando tanto la posible inclinación de la cámara al tomar la foto como el relieve del terreno. Por lo tanto, las ortofotos muestran las imágenes con la posición exacta de cada elemento en el mapa y con las distancias reales reflejadas. Al ser una composición de varios fotogramas, no se considera un único instante en el tiempo para cada ortofoto, por lo que la información temporal se limita al día.

Utilizando el programa ArcGIS Pro se han visualizado las imágenes de cada año para digitalizar manualmente las líneas de costa. Dado el amplio rango de mareas en la zona de estudio y el efecto del run-up, no sería correcto comparar directamente la posición de la transición agua-tierra de cada ortofoto, ya que varía considerablemente. Para mostrar una evolución histórica real, se debe considerar un mismo nivel de referencia.

Al no conocerse datos exactos de día y hora de las imágenes que permitan realizar correcciones precisas basadas en el nivel del mar instantáneo en el momento de captura de las imágenes, se ha optado por identificar la línea que diferencia arena seca de mojada. De esta manera se obtiene en todos los casos el nivel de la pleamar anterior a cada imagen. Se debe tener en cuenta que se asume un error tomando dicho nivel de referencia, ya que la máxima pleamar de cada día se puede encontrar a una cota diferente. Sin embargo, la mayoría de los fotogramas han sido capturados en meses de verano, lo cual disminuye mínimamente la incertidumbre asociada al estado morfodinámico asociado a cada imagen. Aunque no se puede confirmar que sea el mismo, es posible que las condiciones de oleaje en fechas cercanas fuesen similares, al haber una clara estacionalidad a lo largo del año, con un menor rango de alturas de ola posibles en verano (ver Figura 9).

Las líneas digitalizadas junto a las ortofotos se muestran en las Figuras Figura 19 a
Figura 28:



Figura 19. Ortofoto y línea de costa de 1989.



Figura 20. Ortofoto y línea de costa de 2001.



Figura 21. Ortofoto y línea de costa de 2005.



Figura 22. Ortofotografía y línea de costa de 2007.



Figura 23. Ortofotografía y línea de costa de 2010.



Figura 24. Ortofotografía y línea de costa de 2014.



Figura 25. Ortofotografía y línea de costa de 2017.



Figura 26. Ortofotografía y línea de costa de 2018.

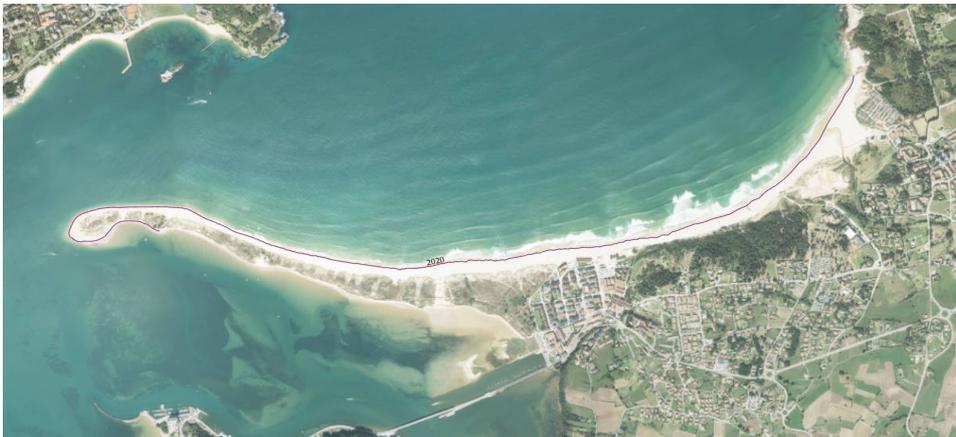


Figura 27. Ortofotografía y línea de costa de 2020.

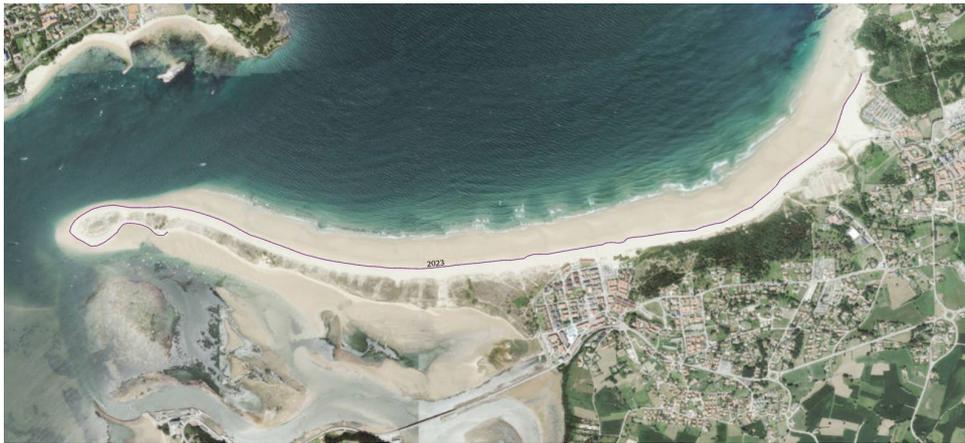


Figura 28. Ortofoto y línea de costa de 2023.

A continuación, se miden los avances y retrocesos de cada tramo de estudio: Loredo, Somo y Punta Rabiosa. En los dos primeros casos, se divide toda la playa en transectos equidistantes cada 100 m (ver Figura 29). Se miden las distancias de las intersecciones de las líneas de costa con los transectos siempre respecto al mismo punto de referencia. Para cada tramo y año, se calcula la media de distancia obtenida en todos los transectos.



Figura 29. Líneas de costa digitalizadas (morado) y transectos en los tramos de Loredo (azul) y Somo (rojo).

En el caso de Punta rabiosa, el avance de la línea de costa no se ha dado en una única dimensión, sino que se ha observado un alargamiento y curvatura hacia el interior de la bahía de Santander. Por lo tanto, en este caso los transectos se han posicionado cada 10 m a lo largo de una curva con el fin de medir los avances en todas las posibles direcciones (ver Figura 30). Para cuantificar las variaciones, se ha tomado para cada año únicamente el valor del mayor avance.



Figura 30. Líneas de costa digitalizadas (morado) y transectos en Punta Rabiosa.

3.2. Validación

Como se aprecia en las ortofotos y líneas de costa mostradas en el apartado anterior, la calidad y resolución de las imágenes y el estado de mar de cada año es muy variado. Adicionalmente, como ya se ha comentado, la máxima pleamar también se ubica a una cota diferente cada día. Estos aspectos pueden llevar a generar resultados erróneos, por lo que esta metodología debe ser validada con otros datos.

Con este fin, se ha tomado el Trabajo de Fin de Máster *Análisis de la evolución de las playas de Lored, Somo y El Puntal* (González, 2018), al que se le da continuidad en este documento. En dicho trabajo, se lleva a cabo el mismo análisis que el descrito anteriormente para el rango de años de 1985 a 2014. Los avances y retrocesos obtenidos entre 1985 y 1989 se compararon con los calculados en campañas de medida en el estudio *Diseño óptimo de la Canal de navegación de acceso al Puerto de Santander* (IH-90).

El IH-90 evaluó los avances y retrocesos históricos que se dieron en Lored, Somo y El Puntal hasta la fecha de redacción del informe. Establecieron la morfodinámica del sistema y un plan de actuación, que 2 años más tarde fue corroborado mediante el informe llamado *Seguimiento y análisis de la evolución del sistema de playas Lored-El Puntal y de la canal de navegación del Puerto de Santander, 1990-1992* (IH-92). Las conclusiones se basaron en datos topo-batimétricos tomados en el rango de tiempo transcurrido entre los dos informes.

Tanto el trabajo de González (2018) como el IH-90 establecían tasas de evolución muy similares en los tres tramos. De 1985 a 1989 la erosión en Lored se estimó en 1.1 m/año y en Somo de 1.7 m/año, mientras que el avance de El Puntal hacia el Oeste fue de 15 m/año.

Como base de comparación para validar los resultados del actual informe, se toma la evolución de las playas en el rango de tiempo común con el trabajo de González (2018), es decir, de 1989 a 2014. A continuación, se muestran los retrocesos



medidos en ambos trabajos en Loredo y Somo respecto a la posición de la pleamar en 1989 (ver Figura 31). En ambos casos, los retrocesos se miden en positivo y los avances en negativo.

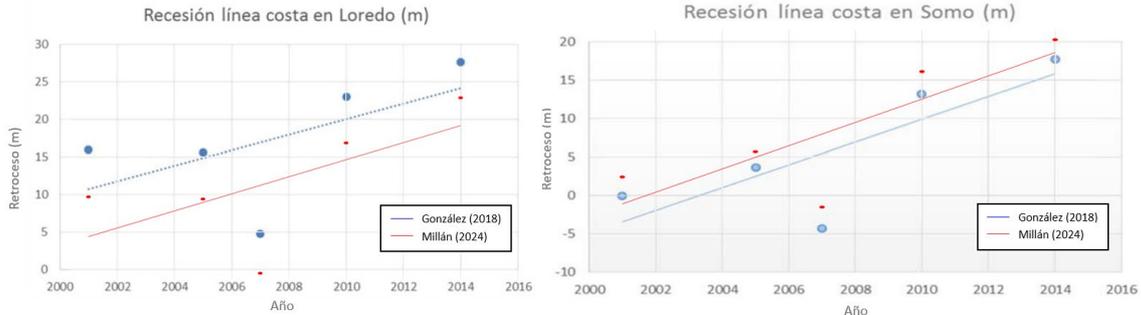


Figura 31. Comparación de las líneas obtenidas para Loredo y Somo con las del TFM de González (2018).

Como se puede apreciar, a pesar de un ligero desfase de los datos (de 5 m en Loredo y 2.5 m en Somo), las tendencias son prácticamente idénticas en ambos trabajos. Este desfase se debe probablemente a la falta de resolución de la imagen de 1989 tomada como referencia. Las tendencias obtenidas en el trabajo de 2016 eran de retrocesos de 1 m/año en Loredo y 1.5 m/año en Somo, mientras que, en el actual documento, las tendencias son de 1.1 m/año y 1.5 m/año respectivamente.

En el caso de Punta Rabiosa la Figura 32 muestra la comparación considerando los avances como valores positivos y los retrocesos negativos.

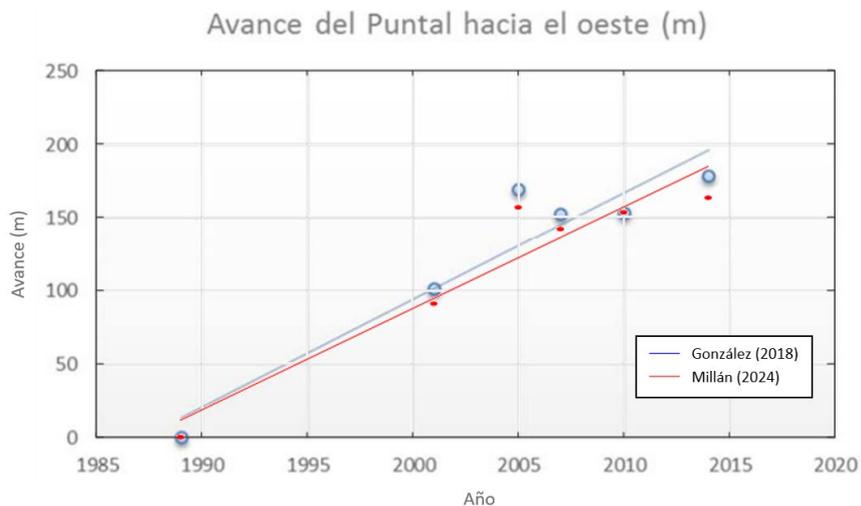


Figura 32. Comparación de las líneas obtenidas para Punta Rabiosa con las del TFM de González (2018).

Los resultados del avance de El Puntal hacia el Oeste son una vez más prácticamente idénticos, con tendencias de avance de 7 m/año y de 6.9 m/año para el trabajo de 2018 y el actual respectivamente.

Por lo mostrado en este apartado, se concluye que la metodología aplicada es válida y obtiene resultados muy cercanos a los datos obtenidos en estudios anteriores.



3.3. Tasas de evolución de la línea de costa

Tras lo expuesto en apartados anteriores, se procede a analizar los resultados obtenidos con datos más recientes, incorporando las ortofotos de 2017, 2018, 2020 y 2023.

Es importante destacar que, visualmente, la ortofoto de 2018 es la única que muestra un estado de mar altamente energético o de temporal (ver Figura 26). Como se verá más adelante, este hecho provoca que los datos obtenidos para 2018 se consideren anómalos, ya que muestran retrocesos de la línea de costa muy superiores a los observados en otras fechas.

Se debe tener en cuenta que el nivel del mar debido a la marea meteorológica está estrechamente relacionado con el estado del mar por los fenómenos que los provocan. Las borrascas (zonas de baja presión) y los fuertes vientos no solo generan oleajes mayores, sino que también provocan subidas del nivel del mar. Como consecuencia, se producen mayores retrocesos de la línea de costa.

Dado que estos fenómenos no son independientes entre sí, es necesario analizar si es adecuado considerar dichos eventos al determinar la evolución a largo plazo de las playas de estudio.

3.3.1. Loredo y Somo

A continuación, se muestran los ajustes tanto para Loredo (en rojo) como para Somo (en azul). Una vez más, se representan los retrocesos en positivo y se toma la posición de la línea de pleamar en 1989 como nivel de referencia. Se consideran las tasas obtenidas incluyendo los datos de 2018 y sin incluirlos.

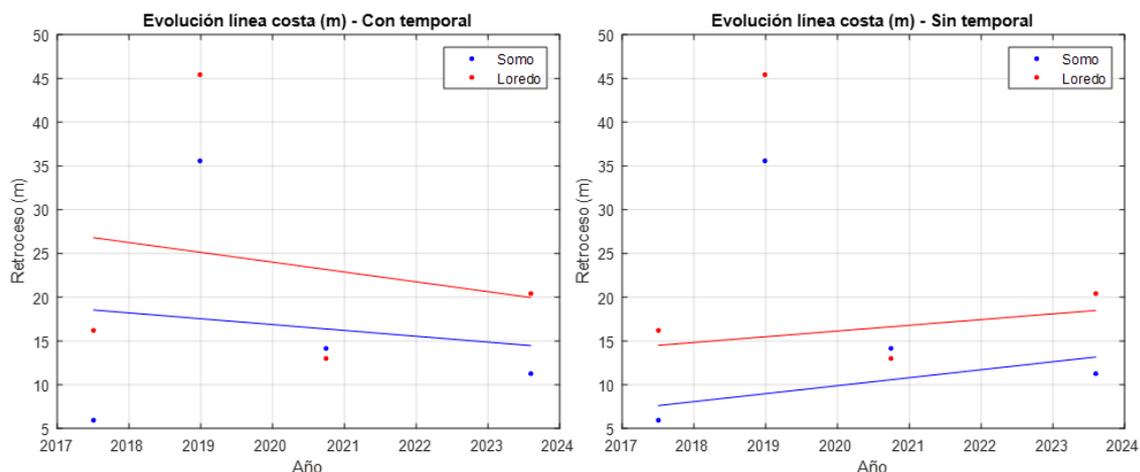


Figura 33. Evolución de las líneas de costa de Loredo y Somo considerando 2018 (izquierda) y sin considerar 2018 (derecha).

En la Figura 33 se muestra que la evolución de Loredo y Somo se comporta de una manera bastante similar. Sin embargo, la inclusión de los datos de 2018 modifica drásticamente los resultados. Teniéndolos en cuenta, para el rango de tiempo de



2017 a 2023 se hablaría de avances (retroceso negativo) de 1.12 m/año en Loredo y de 0.66 m/año en Somo. Sin embargo, sin contar el temporal se pasa a tener retrocesos de 0.65 m/año en Loreo y de 0.91 m/año en Somo.

Observando los datos previos y posteriores a 2018, se aprecia que la posición de la línea de costa no sufrió retrocesos significativos debidos al temporal, por lo que se considera un evento puntual. La ubicación anómala de la línea de costa en ese año es principalmente debida a la marea meteorológica y el run-up asociados al temporal, sin indicar realmente una erosión en la playa, por lo que no se incluye dicho dato en el conjunto de mediciones.

En la Figura 34 se muestran conjuntamente los dos periodos de tiempo evaluados. La tasa de erosión experimenta una reducción moderada (de 1.1 m/año a 0.65 m/año en Loredo y de 1.5 m/año a 0.91 m/año en Somo). Los dos periodos seleccionados se consideran apropiados debido al claro avance de la línea de costa tras 2014. No se trata de un avance natural de las playas, sino de una regeneración artificial.

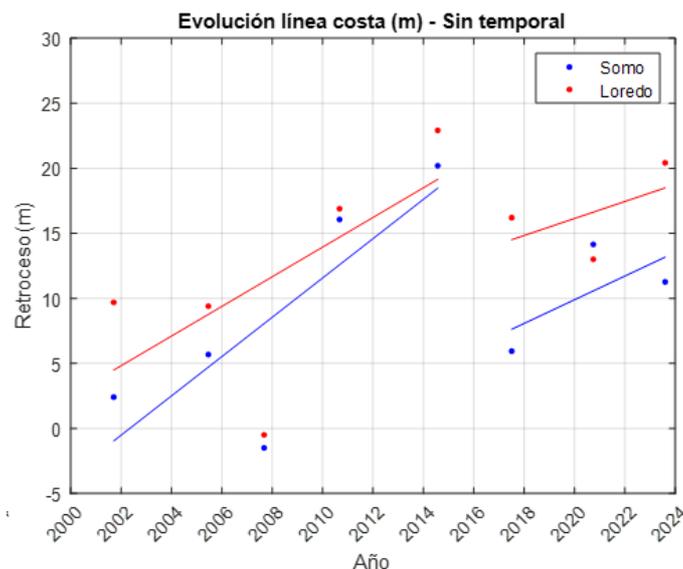


Figura 34. Evolución de las líneas de costa de Loredo y Somo de 2001 a 2023.

Como se muestra en el apartado 2.4. *Canal de navegación*, los volúmenes de los dragados llevados a cabo en el año 2014 fueron muy superiores a la media, debido a los fuertes temporales de dicho año, que transportaron grandes cantidades de arena a la canal de navegación. En respuesta a los graves daños y retrocesos provocados en las playas, se llevó a cabo una alimentación de arena en las zonas de Loredo (de 37,664.67 m³) y Somo (de 30,746.68 m³). El material se extrajo de la zona de vertido y, por lo tanto, de características análogas a las de la playa.

3.3.2. Punta Rabiosa

La evolución de Punta Rabiosa ha consistido en un avance y giro hacia el Suroeste, hacia el interior de la bahía de Santander siguiendo el margen oriental de la canal de



navegación. A continuación, se muestran las tendencias obtenidas para los rangos de tiempo de 1989 a 2014 y de 2017 a 2023. En este caso se representan los avances en positivo y, una vez más, se toma 1989 como año de referencia.

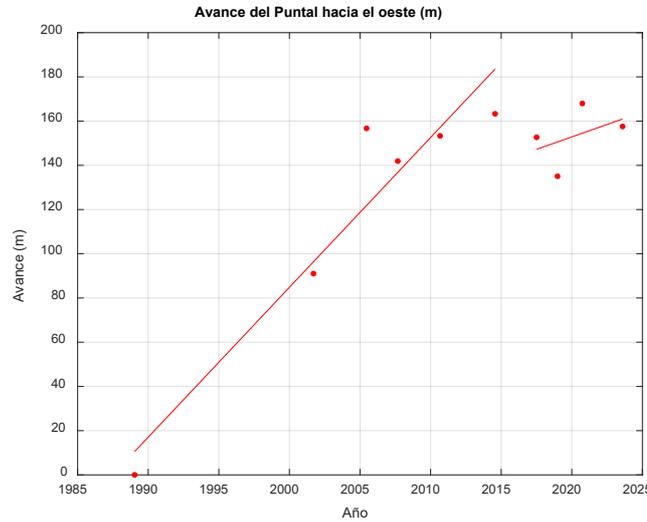


Figura 35. Evolución de Punta Rabiosa.

En la Figura 35 se distingue una reducción en la velocidad de avance de El Punta, pasando la tasa de 6.9 m/año a 2.4 m/año tras 2017. Sin embargo, en este caso se aprecian otros rangos de tiempo que podrían describir mejor la evolución de Punta Rabiosa. Se toma el año 2005 como punto de cambio de tendencia.

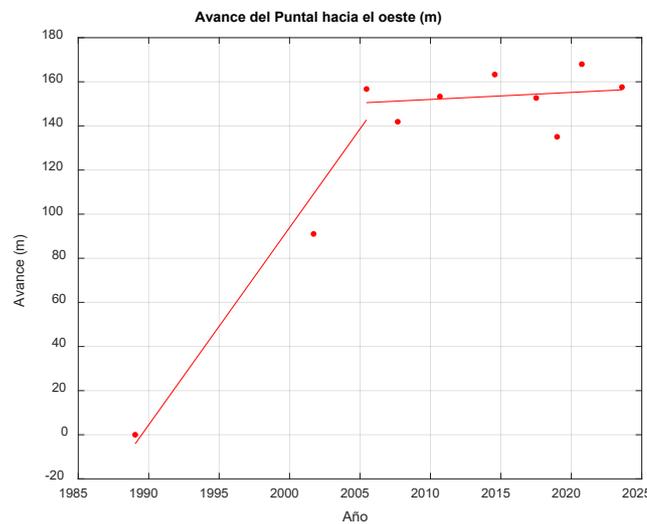


Figura 36. Evolución de Punta Rabiosa.

La Figura 36 muestra que, con los nuevos rangos de tiempo, se pasa de una tasa de avance de 8.94 m/año a una de 0.32 m/año.

Por la distribución de los puntos y la aparente estabilización de las tasas, se ajustan los datos de Punta Rabiosa a una función exponencial de crecimiento asintótico con la siguiente fórmula:



$$R(t) = R_{\infty}(1 - e^{-k*t})$$

Donde:

- $R(t)$: Ajuste del avance para el paso de tiempo t (m)
- R_{∞} : Forma de equilibrio final (asíntota) (m)
- t : Paso de tiempo (años)
- k : Parámetro de curvatura (años^{-1})

La Figura 37 muestra que los datos de Punta Rabiosa parecen seguir un crecimiento exponencial asintótico con una forma de equilibrio final de 166.95 m (distancia desde la línea de costa de 1989). Según el ajuste, el 95% del crecimiento total se alcanzó en 2020.

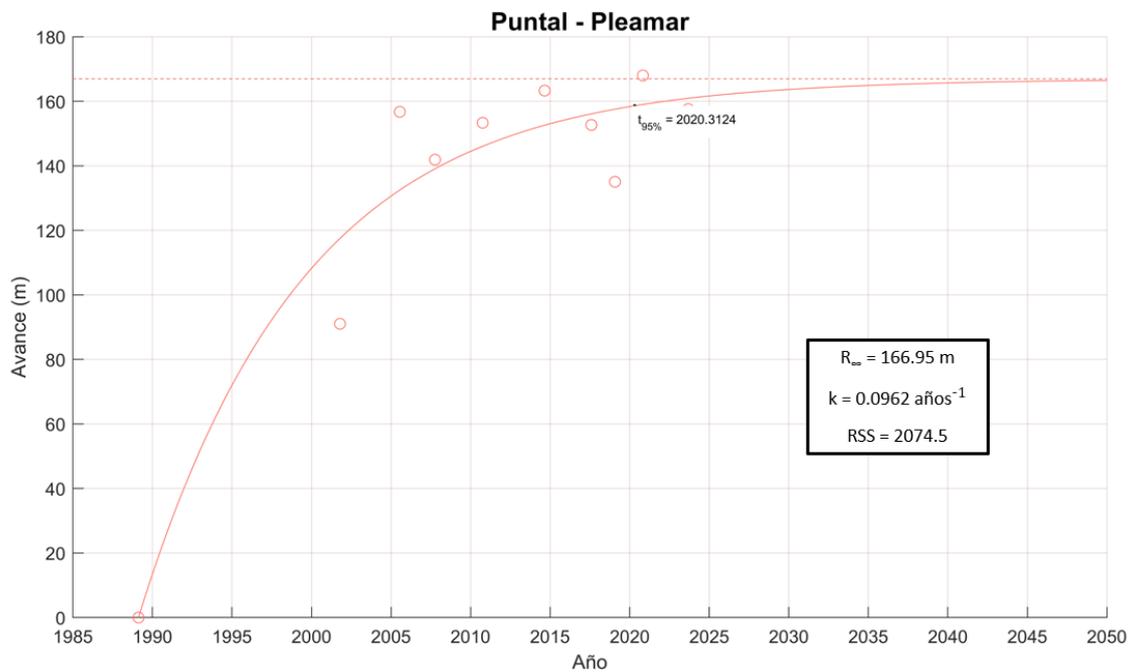


Figura 37. Ajuste exponencial de la evolución de Punta Rabiosa.

Este modelo muestra la evolución de Punta Rabiosa con unas tasas de crecimiento variables en el tiempo, no con tasas constantes en tramos temporales definidos. Este comportamiento se corresponde mejor con los cambios que ocurren en la naturaleza, los cuales suelen seguir un patrón de crecimiento exponencial hasta alcanzar un estado de equilibrio. La velocidad de variación tiende a ser mayor, cuanto más lejos se encuentre un sistema de su estado de equilibrio.

3.4. Conclusiones

Tras analizar mediante ortofotos las evoluciones de las diferentes playas que componen El Punta, se puede concluir que en todos los casos se están reduciendo los cambios y estabilizando las playas. Tanto en Somo como en Loredo las tasas de los últimos años muestran que las playas todavía se están erosionando, pero a ritmos más reducidos en comparación con periodos anteriores (de 1.1 m/año a 0.65



m/año en Loredo y de 1.5 m/año a 0.91 m/año en Somo). Al tratarse de un espacio de tiempo con pocos datos (3 desde 2014), estas conclusiones deben ser respaldadas con diferentes fuentes de datos.

En el caso de Punta Rabiosa, a pesar de haber el mismo volumen de datos, se aprecian tendencias similares desde 2005, por lo que los últimos años quedan representados por 8 ortofotos, mostrando avances de 0.32 m/año. Los datos muestran que el extremo de El Puntal está estabilizándose, habiendo reducido muy considerablemente sus avances hacia el Suroeste hasta prácticamente dejar de avanzar.



4. Evolución histórica mediante topo-batimetrías

En este capítulo se emplean topo-batimetrías para analizar la evolución de las playas de la zona de estudio. Se detalla la metodología utilizada, las incertidumbres asociadas a ella y, finalmente, se presenta el análisis de los resultados obtenidos junto a las conclusiones.

4.1. Metodología

Para obtener las variaciones de la batimetría del área de la bahía de Santander y El Puntal se han tomado topo-batimetrías de la zona correspondientes a los años 1975, 2016, 2018 y 2024.

Los datos de 1975 han sido extraídos de un Plano General de la Bahía de Santander de la Junta del Puerto de Santander, el cual incluye isobatas en el interior de la bahía y frente a las playas de El Puntal, extendiéndose hasta las islas de Mouro y de Santa Marina. Este plano ha sido digitalizado y georreferenciado por expertos en SIG mediante el programa ArcGIS Pro tomando referencias de localizaciones fijas y reconocibles, como el Puerto de Santander y las islas anteriormente mencionadas entre otras (ver Figura 38).

Se ha de tener en cuenta que la antigüedad del plano y la precisión de las técnicas de la época en combinación con el procedimiento de digitalización y georreferenciación manual hacen que la precisión alcanzada no pueda igualar las técnicas actuales, como se comenta más adelante.

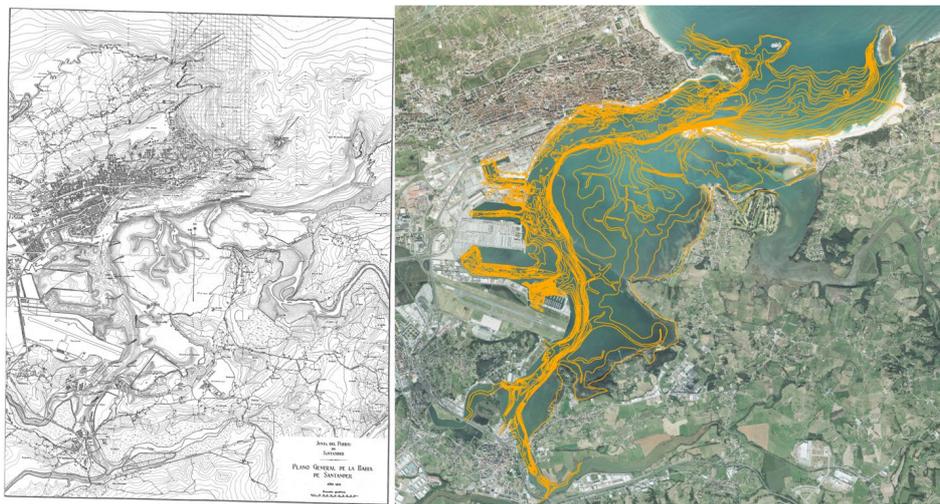


Figura 38. Plano General de la Bahía de Santander de 1975 (izquierda) y su digitalización (derecha).

El levantamiento topo-batimétrico de 2016 recorre desde la cara exterior de la barra arenosa de El Puntal y la duna de Somo hasta aproximadamente la cota -20 m al Norte. Fue encargado por la Universidad de Cantabria como parte del proyecto MUSCLE-Beach: Análisis climático multiescala de inundación y erosión (Ref. BIA2014-59643), del Programa Nacional de Proyectos de Investigación del

Ministerio de Economía y Competitividad, Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Las campañas fueron llevadas a cabo entre abril y mayo de 2016, separando la parte emergida de la sumergida y mediante GPS RTK con precisión centimétrica y ecosonda multihaz respectivamente. El resultado de la integración de los datos, mostrado en la Figura 39, se presentó en formato vectorial shp con puntos y cotas y en formato ráster GeoTIFF (Modelo Digital del Terreno o MDT).

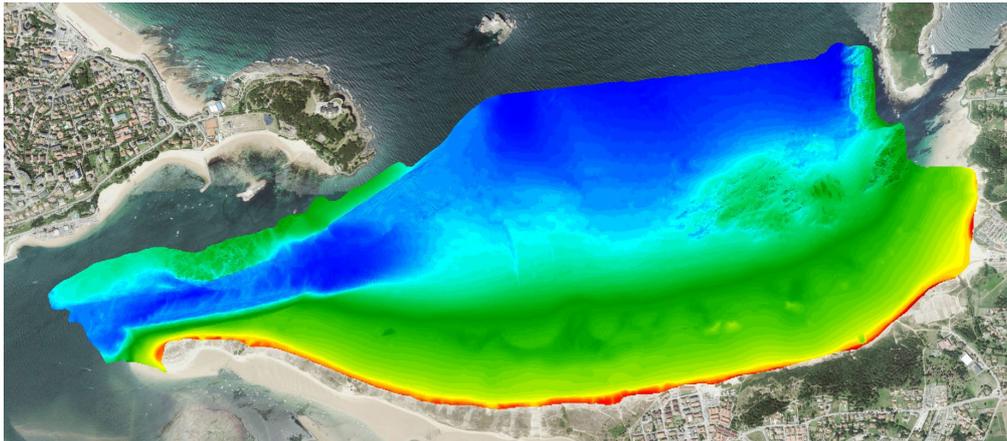


Figura 39. MDT de la topo-batimetría de MUSCLE 2016.

Los datos de 2018 (ver Figura 40) para la batimetría del modelo del proyecto MARION ('Sistema operacional para la predicción de variables oceanográficas y la prevención y gestión de la contaminación marina en entornos costeros'; en inglés System for MARine PollutIOn Prevention) se obtuvieron combinando varias fuentes. La información proviene de cartas náuticas del litoral español disponibles en la base de datos BACO (IHCantabria) y de datos de nube de puntos XYZ capturados mediante LiDAR aerotransportado por el Instituto Geográfico Nacional, con una resolución espacial de 5 metros para la parte interior de la bahía. Además, se utilizó información batimétrica de EMODnet (European Marine Observation and Data Network) para la zona costera exterior.

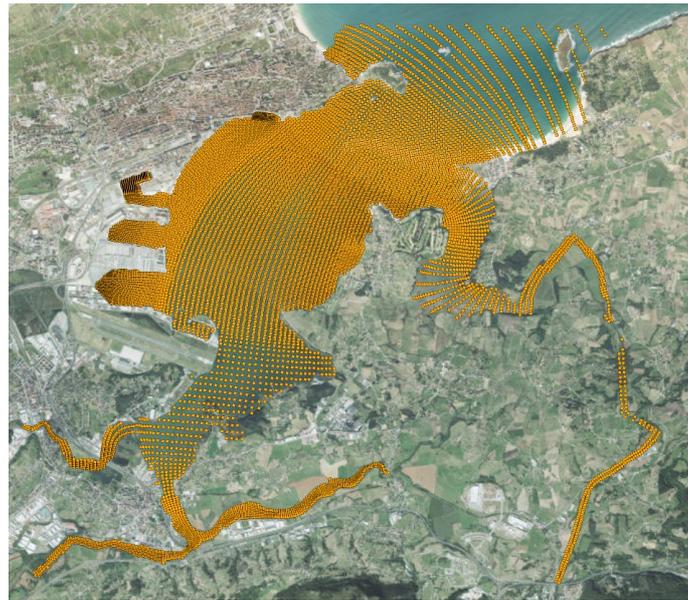


Figura 40. Topo-batimetría del proyecto MARION 2018.

En cuanto a la topo-batimetría de 2024, en base a la licitación “LEVANTAMIENTO TOPO-BATIMÉTRICO Y GEOFÍSICO DE EL PUNTAL-SOMO-LOREDO EN LA BAHÍA DE SANTANDER”, fue llevada a cabo entre el 1 y el 12 de abril de 2024. Cubre desde los primeros metros del interior de la bahía hasta ligeramente más al Norte que las islas de Mouro y Santa Marina (ver Figura 41).

Una vez más, las mediciones de las partes sumergidas y emergidas fueron llevadas a cabo por separado, mediante un levantamiento batimétrico multihaz por una parte, y LiDAR y perfiles GNSS por otra parte respectivamente. Las zonas intermareales fueron medidas durante los días de mareas vivas (10 y 11 de abril), realizando las batimetrías en la máxima pleamar y los vuelos durante la máxima bajamar. De esta manera, se obtuvo el mayor área de solape posible en la zona intermareal para integrar los datos.

El resultado de la integración de los datos se presentó en formato vectorial shp con puntos y cotas y en formato ráster GeoTIFF (Modelo Digital del Terreno o MDT).

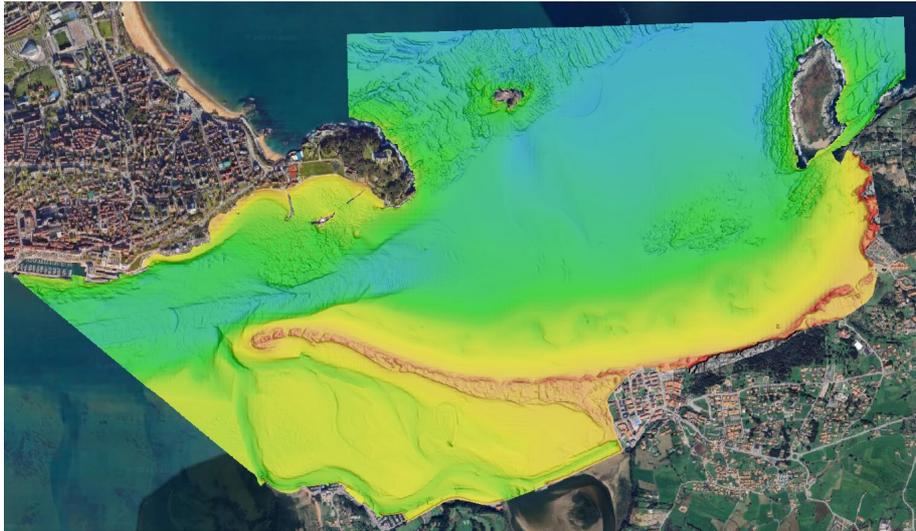


Figura 41. MDT de la topo-batimetría de 2024.

Todas las topo-batimetrías han sido interpoladas en el área de estudio mediante el método IDW (Inverse Distance Weighted) con una resolución de 5 m para poder manejar la cantidad de datos empleada.

Para obtener las tasas de acumulación en las diferentes zonas, se interpolan los datos a coordenadas comunes entre las dos topo-batimetrías a comparar cada 5 m. Se obtiene la diferencia de cota en cada punto y se multiplica por el área de influencia de cada punto (25 m²).

4.2. Incertidumbres

Este método acarrea una serie de incertidumbres que deben ser abordadas para obtener los resultados más fiables posibles.

4.2.1. DATUM vertical

Un aspecto fundamental para comparar topo-batimetrías es la referencia vertical de las mismas. Hay varios niveles de referencia empleados habitualmente para llevar a cabo trabajos como los descritos en esta metodología, como el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA), el Nivel Medio del Mar Local (NMML) y el Cero del Puerto (0 REDMAR) principalmente. Se deben referir todos los datos al mismo nivel para obtener cotas comparables.

Las topo-batimetrías más actuales constan de dicho dato, empleándose en MUSCLE 2016 el NMMA, en MARION 2018 el NMML y en 2024 el 0 REDMAR. Eligiendo el cero del puerto como referencia común, se aplican las correcciones de +2.455 m a MUSCLE 2016 y de +2.846 a MARION 2018, siguiendo el esquema proporcionado por Puertos del Estado (ver Figura 42).

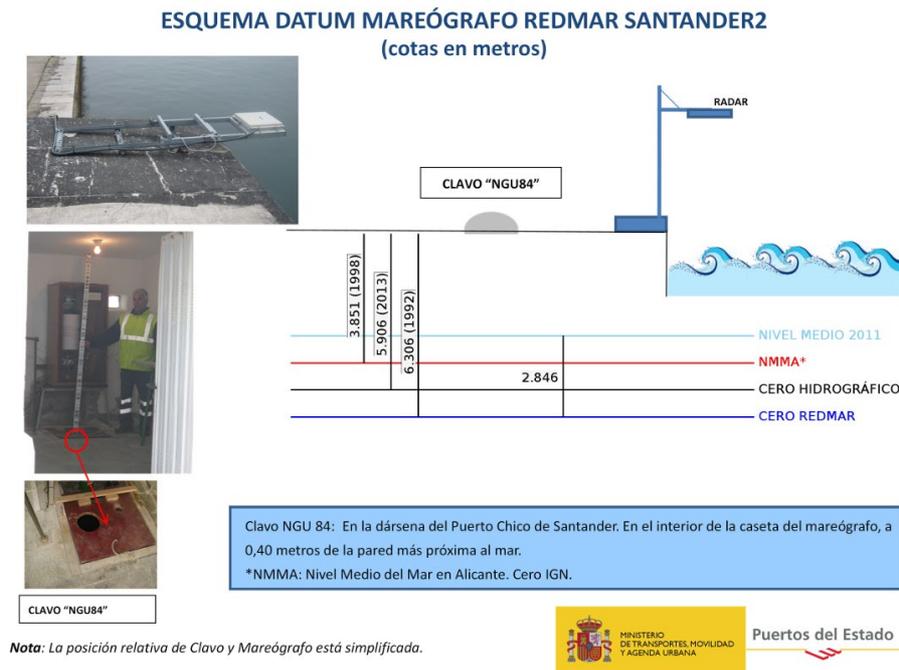


Figura 42. Esquema Datum del Mareógrafo Santander2.

Los datos de la carta náutica de 1975, sin embargo, no constan de información sobre referencias verticales. No obstante, se considera que las batimetrías realizadas por autoridades portuarias son generalmente referidas al cero del puerto, que suele ubicarse a menor cota que la mínima bajamar, con el objetivo de obtener siempre estructuras portuarias en cotas positivas. Esta asunción se respalda con el hecho de que las isobatas de 0 y 5 m están resaltadas, pudiendo indicar los niveles de bajamar y pleamar.

Adicionalmente, se ha comparado la cota del afloramiento rocoso descrito en el apartado 2.2. *Morfología* frente a Loredo con la de otras topo-batimetrías, con la consideración de que debería ser prácticamente igual, concluyendo que la carta náutica de 1975 se refirió al 0 REDMAR.

4.2.2. Resolución de los datos

Otra incertidumbre a considerar es la resolución de los datos. Esta no solo varía significativamente entre los años, sino también entre las diferentes subáreas en un mismo año. Los datos de 2016 y 2024 no presentan problemas, ya que tienen una gran resolución. Sin embargo, 1975 y 2018 muestran resoluciones muy dispares, lo cual afecta considerablemente a los cálculos, dado que son las únicas fechas con datos completos del interior de la bahía.

En el caso de 1975 (ver Figura 38), se aprecia una gran cantidad de isobatas en toda la canal de navegación. Esto se debe a que se toman las cotas de números enteros y los contornos de la canal presentan pendientes muy pronunciadas, unido al mayor interés en la definición de las zonas navegables en una carta náutica. Frente a las playas de El Puntal las pendientes son más tendidas, por lo que la resolución de los datos es menor, llegando a ser nula en la playa seca de Loredo y parte de Somo. La



zona intermareal del interior de la bahía, los páramos, cuenta también con muy poca densidad de isobatas, ya que se trata de un área relativamente plana.

La topo-batimetría de MARION 2018 está formada por puntos en vez de isobatas. La resolución en las infraestructuras portuarias y en las rías es muy alta, reduciéndose ligeramente en el resto de la bahía y el exterior de la canal. Sin embargo, las playas de Somo y Loredo muestran una densidad de puntos muy baja desde la playa seca hasta la altura de las islas de Mouro y Santa Marina. Fue obtenida para el modelado hidrodinámico del interior de la bahía, por lo que la resolución exterior no era una prioridad.

Deben tenerse en cuenta las zonas descritas al analizar los resultados obtenidos, por los posibles errores asociados a las interpolaciones cada 5 m en zonas de baja resolución.

4.2.3. Otros

Finalmente, se comentan otras incertidumbres asociadas a los datos. Por una parte, se desconoce la metodología aplicada para obtener las isobatas de 1975. En esa época todavía no existían las técnicas modernas que se emplean actualmente. Ya entonces se utilizaba la ecosonda, pero en zonas someras es probable que todavía se midiese con escandallo, corrigiendo la marea apuntando la hora y leyendo el nivel del mar de los datos del mareógrafo. Sin embargo, sin conocer con certeza las herramientas empleadas, no se puede determinar el nivel de fiabilidad.

Por último, cabe destacar la gran variabilidad de los estados morfodinámicos de las playas de estudio. Se trata de un área muy condicionada por las dinámicas marinas actuantes, ya que está altamente expuesta a condiciones de oleaje variables a lo largo del año, con oleajes muy energéticos frecuentemente (ver 2.3. *Dinámica marina*). Como consecuencia, las playas varían anualmente desde estados disipativos tras épocas prolongadas de oleajes altamente energéticos, hasta formar terrazas de bajamar en condiciones de buen tiempo y calma (Vidal et al., 1995).

Estas variaciones modifican la configuración del perfil activo de la playa, presentando un perfil más tendido y con varias barras de arena a lo largo de su recorrido tras temporales, y con mayores pendientes y la barra de arena cerca de la playa seca en condiciones de calma. Por lo tanto, se considera de gran importancia conocer las fechas de realización de las topo-batimetrías para detectar variaciones anómalas a los ciclos anuales debidas a tendencias erosivas o acumulativas a largo plazo.

Tanto los datos de 2016 como los de 2024 fueron tomados en los meses de abril y mayo, lo que sugiere que los estados morfodinámicos podrían ser similares. Sin embargo, analizando la serie de oleaje, junto a su altura de olas media y la superada 12 h al año, de los dos meses previos a la toma de datos, se observa que las condiciones previas a la batimetría de 2024 fueron más energéticas que en 2016 (ver Figura 43), pudiendo llevar a mostrar un perfil más disipativo en la fecha más reciente. Por otro lado, las topo-batimetrías de 1975 y 2018 no especifican la fecha



de realización, lo que impide conocer el estado morfodinámico durante las mediciones.

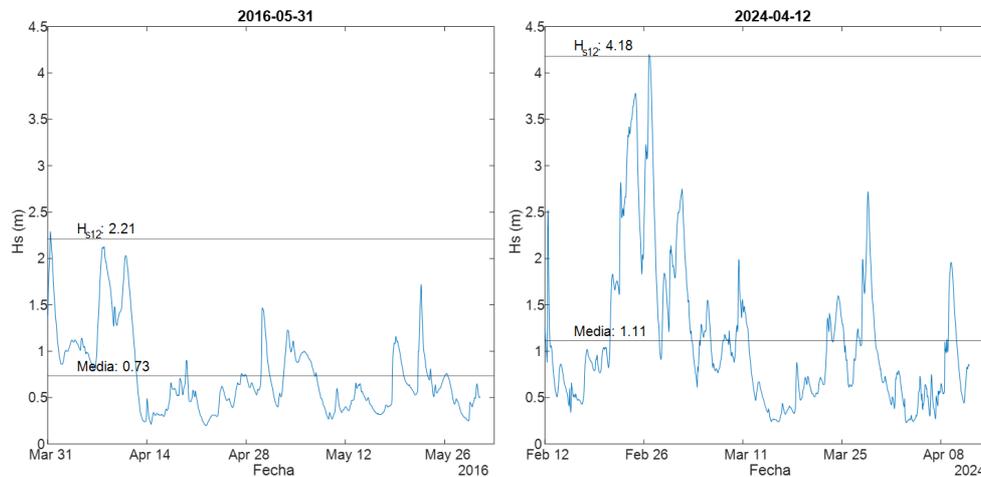


Figura 43. Serie de altura de ola de dos meses previos a la realización de las topo-batimetrías de 2016 (izquierda) y 2024 (derecha).

Al comparar datos de diferentes años, no se puede tener certeza de si las variaciones más cercanas a la costa son debidas a variaciones cíclicas o tendencias a largo plazo. Este hecho es menos relevante para la carta náutica de 1975, dado el largo intervalo temporal con respecto a las otras mediciones, lo que hace que las tendencias a largo plazo sean más evidentes que las cíclicas. En cambio, los datos de 2018, al estar más próximos en el tiempo a los de 2016 y 2024, podrían reflejar la influencia de variaciones estacionales.

4.3. Análisis por áreas

Considerando el área de cobertura de las diferentes topo-batimetrías descrito anteriormente, primero se lleva a cabo una comparación de las zonas generales comunes entre los datos de 1975 y 2018. Se contempla el interior de la bahía, diferenciando la canal de navegación y los páramos, y la zona exterior, a modo de primera comprensión de las variaciones actuantes. Más adelante se analizan con mayor detalle las playas de El Puntal y de la zona de los páramos cercanas a la ría de Cubas, para finalizar con un detalle de la evolución de las curvas de nivel en la playa seca.

4.3.1. Zonas generales

Comenzando por la zona de los páramos, se observa en la Figura 44 que se ha dado una acumulación neta de 8 millones m³. Analizando en detalle las diferencias mostradas, se aprecian varios aspectos relevantes. Por una parte, se distingue la canal de navegación en la ría de Cubas, que se ha dragado en numerosas ocasiones principalmente para permitir la circulación de embarcaciones como Los Reginas, el servicio de lanchas que conecta Santander con Pedreña, Somo y El Puntal. Las cotas se han reducido entre 1 y 5 m en los 43 años transcurridos de por medio.

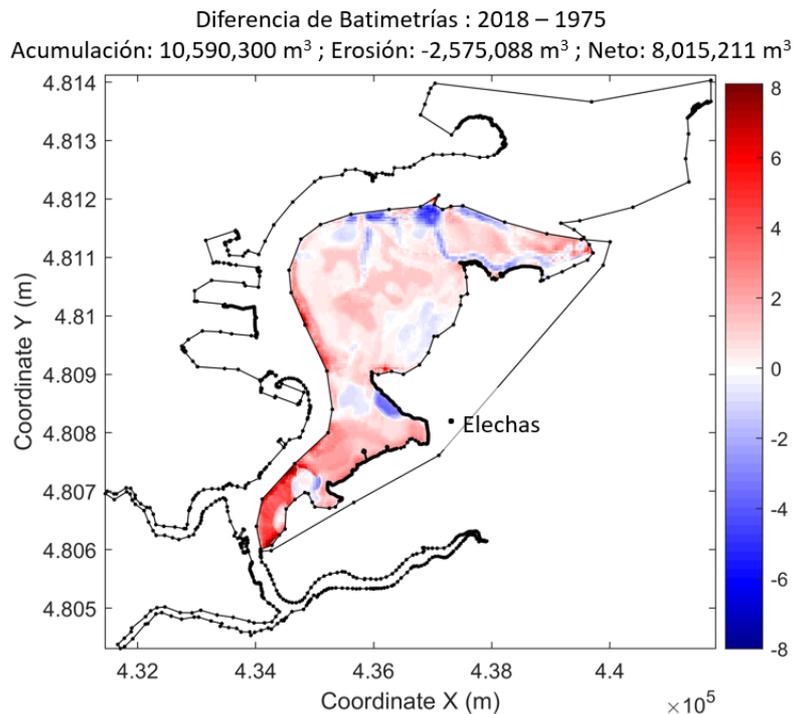


Figura 44. Diferencia de topo-batimetrías de 2018 y 1975 en los páramos.

En la zona más ancha del recorte, el páramo central, no ha habido cambios muy drásticos de la profundidad. Sin embargo, se puede hablar de una acumulación generalizada de alrededor de un metro. En el costado Oeste del tramo se ve una acumulación ligeramente superior, que coincide con el pronunciado talud de la canal de navegación de 1975, que probablemente funcionase como trampa de sedimentos.

Cabe destacar que tanto la acumulación del extremo Sur como la erosión cercana a Elechas coinciden con zonas de la carta náutica con muy poca densidad de isobatas. Por lo tanto, la interpolación puede haber sido la causante de estas variaciones de más de 3 m poco creíbles.

El siguiente tramo corresponde con la canal de navegación (ver Figura 45), donde se ha dado una erosión neta de 2 millones m³. Esta zona consta de una alta resolución de datos en ambas topo-batimetrías en toda su extensión, lo que permite considerar válidos los resultados obtenidos.

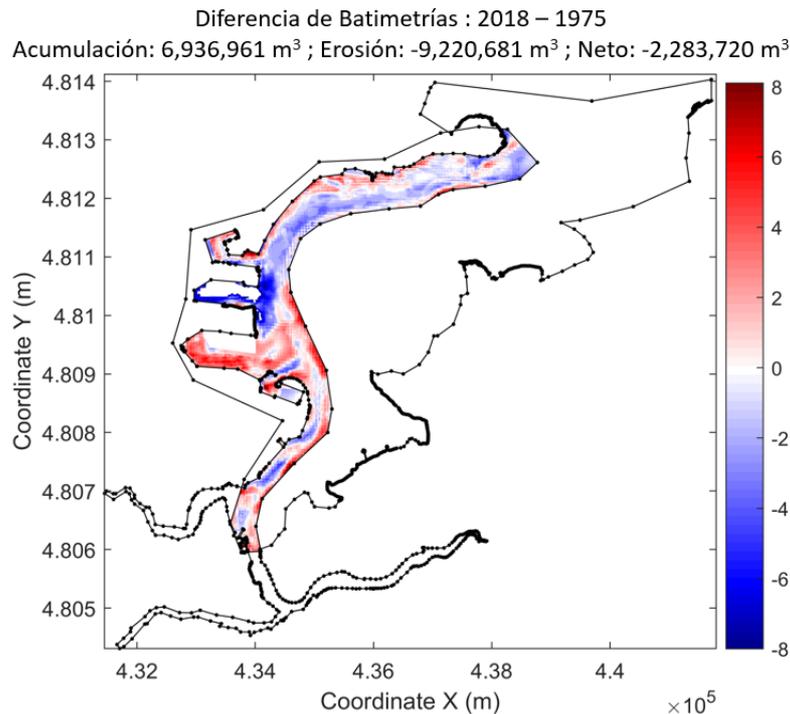


Figura 45. Diferencia de topo-batimetrías de 2018 y 1975 en la canal de navegación.

El interior de las dársenas del Puerto de Santander ha sufrido alteraciones debido a sus usos. Por otro lado, la canal de navegación ha incrementado su profundidad, ya que desde 1993 se llevan a cabo dragados anuales para mantener calados mínimos de 11.5 m en todo su recorrido (ver 2.4. *Canal de navegación*). Se han dragado alrededor de 2 m de profundidad en la zona de intervención. En el extremo Sur y el contorno derecho del recorte se aprecia el fin de la zona de dragado, donde, como se mencionó anteriormente, los grandes taludes de la canal de 1975 funcionan como trampa de sedimentos.

En el contorno Noroeste se observan ligeras acumulaciones, correspondientes con los Muelles de Maliaño, el paseo Pereda, Puertochico y las playas de Los Peligros y La Magdalena, áreas por las que tampoco pasa la draga. En este caso, sin embargo, no actúan como trampas de sedimentos, sino que frenan los sedimentos por su interacción con las dinámicas actuantes dentro de la bahía.

Se finaliza la comparación de tramos generales con la zona exterior a la bahía (ver Figura 46). El balance neto de volúmenes es de una erosión de 1.5 millones de m³. Sin embargo, esta es la zona con mayores problemas de resolución de datos. Por las imprecisiones de la interpolación de los datos, se generan núcleos de erosión y de acumulación como los observables en Loredo. Sin embargo, se consigue una visión general de los procesos ocurridos en la zona.

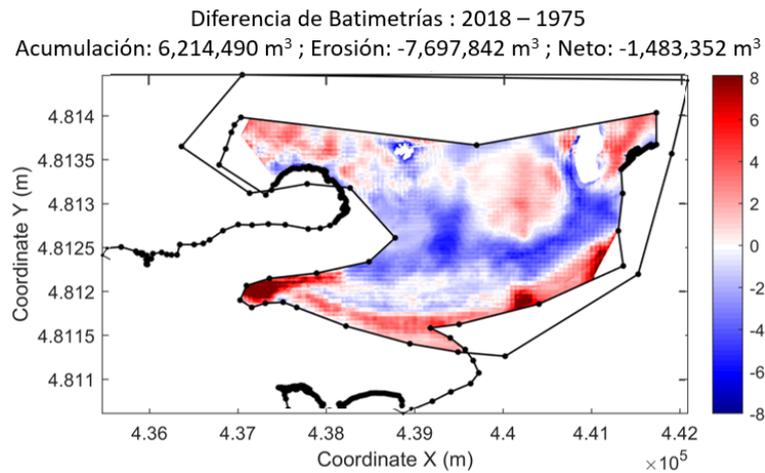


Figura 46. Diferencia de topo-batimetrías de 2018 y 1975 en el exterior de la bahía.

Se aprecia una acumulación en toda la parte emergida de El Puntal, principalmente en las dunas de la flecha arenosa, donde las diferencias de cota son de más de 10 m. Dicha acumulación se corresponde con los avances de Punta Rabiosa comentados en apartados anteriores. Sin embargo, no únicamente avanza hacia el Suroeste, sino que también se acumula arena frente al último tramo de la playa, creando un bajo que no llega a eliminar la draga, por no impedir la circulación de embarcaciones.

También se aprecia una acumulación en la zona rocosa localizada frente a Loredo, coincidiendo parcialmente con el área de vertido de los dragados anuales. El resto de la zona sumergida contenida en el perfil activo de las playas ha sufrido una erosión generalizada. En la zona cercana a la costa es menos acusada, con cambios casi nulos, mientras que en el área del antiguo bajo de las Quebrantas se aprecia una erosión más pronunciada, de alrededor de 5 m, correspondiente con las progresivas reducciones del bajo debidas a la falta de aportaciones de arena de la bocana.

4.3.2. El Puntal

Para conocer las variaciones de volumen con más detalle, se toman contornos comunes a todas las topo-batimetrías. Para analizar El Puntal se considera el contorno de MUSCLE 2016 por ser el más limitante (ver Figura 39) y abarcar desde las playas hasta pasado la isla de Santa Marina. Se obtienen las diferencias de volumen respecto a 1975, mostradas en la Figura 47.



Figura 47. Comparación de volumen de sedimento de 2016 y 2024 respecto a 1975 en El Puntal.

Observando el volumen neto, se aprecia que desde 1975 al 2016 hubo una gran erosión de casi 5 millones de m³, mientras que, desde entonces hasta la actualidad, la tasa se ha reducido hasta acumular alrededor de 1 millón de m³. Los datos de 2018 no se tienen en cuenta en este apartado debido a la baja resolución de datos en esta zona.

A continuación, se muestran las diferencias espaciales entre las batimetrías de 1975 a 2016 y de 2016 a 2024 (ver Figura 48). Con estas comparaciones de datos de mayor resolución, se siguen observando los patrones descritos en el apartado anterior. Las dunas de la playa seca y Punta Rabiosa acumulan arena, mientras que se crea un bajo frente al último tramo de El Puntal. Los afloramientos rocosos también tienden a acumular arena, mientras que el resto del área sumergida sufre una erosión general de 2 m aproximadamente, con focos de mayor reducción en el bajo de las Quebrantas.

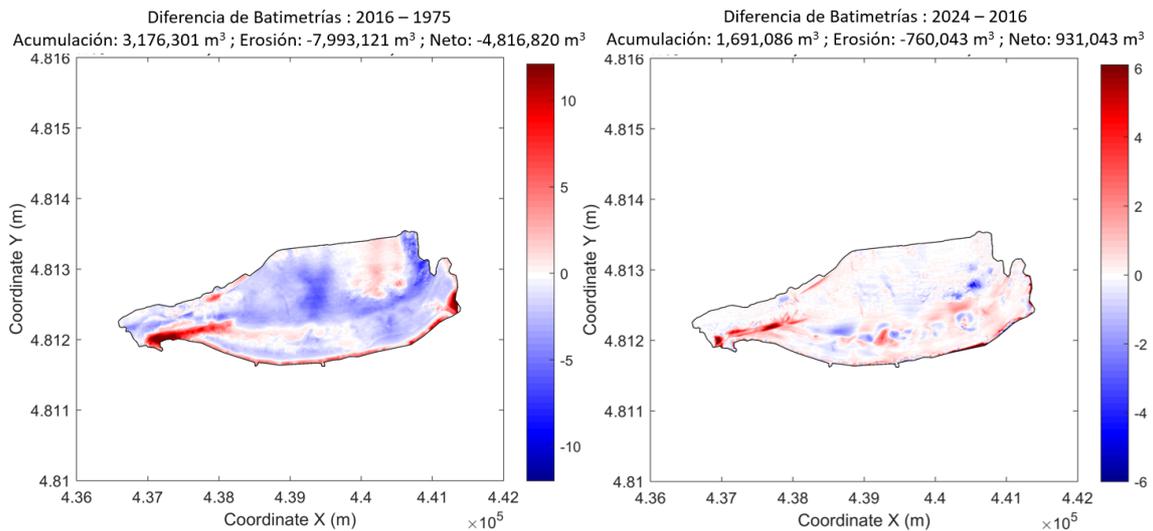


Figura 48. Diferencia de topo-batimetrías de 2016-1975 y 2024-2016 en las playas de estudio.

De 2016 a 2024 se aprecia menos variación. El patrón que se mantiene es el de acumulaciones ligeras en las dunas y mayores en el extremo de Punta Rabiosa. En este caso, la acumulación (color rojo) no está conectada con la playa emergida, por lo que se intuye que la arena acumulada (diferencia de casi 7 m) está cayendo a la



trampa de sedimentos que supone la canal de navegación, sin alargar El Puntal en este espacio temporal.

La playa sumergida ya no presenta patrones claros de erosión, se podría hablar de una zona estable o incluso mostrando una ligera acreción en el tramo más cercano a la playa seca. Las pequeñas diferencias que se ven a lo largo del perfil activo de las playas podrían deberse a los diferentes estados morfodinámicos que pueden mostrar las dos fechas, como se comentó en el apartado 4.2.3. *Otros*.

4.3.3. Páramos de la ría de Cubas

La siguiente zona a analizar en detalle es los páramos en el interior de la bahía cerca de la ría de Cubas. Se ha tomado el contorno descrito en 4.3.1. *Zonas generales* delimitándolo por los datos disponibles de la topo-batimetría de 2024. El año 2016 no ha sido incluido, ya que no tiene datos en el área descrita.

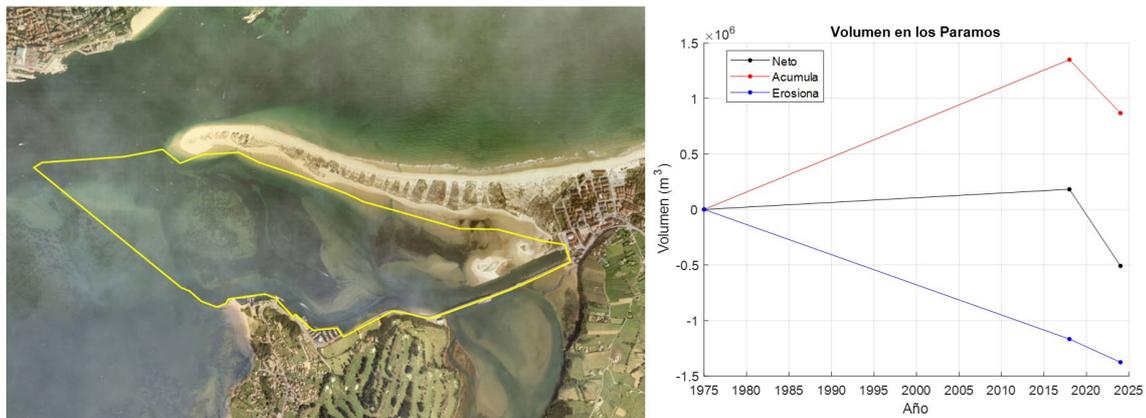


Figura 49. Comparación de volumen de sedimento de 2018 y 2024 respecto a 1975 en los páramos.

En la Figura 49 se aprecia que la variación neta hasta 2018 fue muy baja, una acumulación de casi 200 mil m³. Sin embargo, analizando los valores de erosión y acumulación por separado, se observa que se debe a la compensación de los mismos. El millón de metros cúbicos erosionado, se focaliza en la canal de navegación dragada muy cercana a Punta Rabiosa y frente a Pedreña para permitir la circulación de los Reginas hasta los diferentes embarcaderos (ver Figura 50).

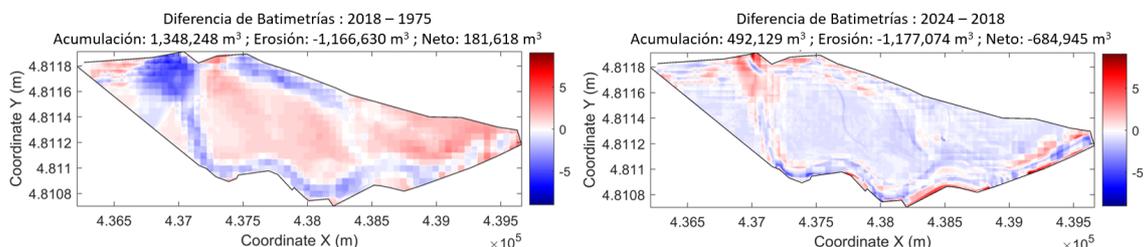


Figura 50. Diferencia de topo-batimetrías de 2018-1975 y 2024-2018 en los páramos.

La acumulación se dio de una manera más distribuida en el resto de la zona intermareal, con diferencias de cota de hasta 2.5 m. A partir de 2018, las variaciones son menos pronunciadas, con una erosión generalizada de menos de un metro. Las



erosiones son mayores a lo largo de la canal, con erosiones de alrededor de 2 m, mientras que las acumulaciones, en este caso de 3 m aproximadamente, se concentran cerca de Punta Rabiosa. Podría explicarse por las fechas de obtención de las topo-batimetrías. La de 2024 fue previa a los dragados cercanos a Punta Rabiosa de ese año, mientras que se desconoce la fecha de 2018 y podría ser posterior a los dragados, mostrando los volúmenes que se acumulan en la trampa de sedimentos generada a partir de los dragados.

4.3.4. Curvas de nivel

Finalmente, se analizan en este apartado las curvas de nivel en las playas de estudio tomando las topo-batimetrías de mayor resolución, 2016 y 2024. Se define la cota de 5.3 m (por encima de la máxima pleamar) para comparar su posición relativa (ver Figura 51). Se considera más representativa de las variaciones interanuales que otras cotas inferiores, por ubicarse en la zona no afectada por las dinámicas marinas. Toda variación se atribuye plenamente a crecimientos y erosiones de la playa, y no a cambios estacionales.



Figura 51. Comparación de la curva de nivel de 5.3 m de las topo-batimetrías de 2016 y 2024.

Ya visualmente se aprecia que en los 8 años de diferencia entre las topo-batimetrías no ha habido cambios significativos de la posición de la línea de costa. Tomando transectos y tramos como los descritos en la Figura 29, se perciben retrocesos medios en Loredo de 3.84 m y en Somo de 1.57 m. Las tasas de evolución, por lo tanto, serían erosiones de 0.48 y 0.19 m/año respectivamente, correspondiéndose con una aparente estabilización de las variaciones.

4.4. Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos en los apartados anteriores, se concluye que desde 1975 hasta 2016 la zona de estudio sufrió muchos cambios en su configuración, mientras que, en la última década, las variaciones han sido más moderadas, pudiendo considerar una estabilización de la morfología.

En el primer periodo de 41 años se definieron los canales de navegación mediante dragados de grandes volúmenes. Como consecuencia, los avances de Punta Rabiosa se redireccionaron hacia el Suroeste, acumulando arena a lo largo de toda la flecha dunar y formando bajos frente a El Puntal. La zona intermareal del interior de la bahía aumentó su cota de una manera generalizada, mientras que en el perfil activo



de las playas ocurría lo contrario. También se dio una gran reducción de cota frente a las playas al continuar reduciéndose el bajo de las Quebrantas.

Se puede intuir que la modificación de las dinámicas actuantes en las playas y el desequilibrio establecido en la bahía de Santander (ver 2.3.3. *Interacción con la bahía*) llevó a que parte de la arena de las playas se introdujese en la bahía, acumulándose en los páramos.

Los datos de 2016 en adelante sugieren una estabilización de las variaciones de volúmenes. Los páramos cercanos a la ría de Cubas muestran reducciones moderadas de su cota mientras que las playas muestran cambios poco marcados con erosiones de menos de medio metro al año en Loredo y Somo. El extremo de la flecha arenosa parece haber cesado sus avances hacia el Suroeste, dejando pasar puntualmente volúmenes de arena al interior de la bahía antes de ser dragados para mantener la canal.



5. Evolución histórica mediante imágenes de satélite

En este capítulo se desarrolla una metodología para analizar la evolución de las playas de Loredo, Somo y Punta Rabiosa a partir de imágenes de satélite. Se explica la metodología propuesta en este estudio, las correcciones aplicadas, su validación y resultados, junto a las consideraciones establecidas. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos con otra técnica más comparable con las otras fuentes de datos y las conclusiones finales.

5.1. Introducción

La metodología desarrollada en este TFM consiste en la obtención de datos de líneas de costa de una fuente significativamente más abundante que las empleadas tradicionalmente, se utilizan imágenes de satélite. No únicamente tienen una gran cobertura temporal, sino que también recorren todo el planeta, pudiendo obtener datos históricos y constantes de las costas de cualquier parte del mundo.

En el caso de El Puntal, se consta de 333 imágenes de entre el 23 de marzo de 2013 y el 13 de febrero de 2024. El 48% proviene de Landsat 8, un satélite perteneciente al programa Landsat, gestionado conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Lanzado el 11 de febrero de 2013, Landsat 8 captura imágenes detalladas de la superficie terrestre con un período de revisita de 16 días y una resolución espacial de 30 metros para las bandas espectrales y de 15 metros para la banda pancromática (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>).

El 10% de las imágenes se extraen de Landsat 9, lanzado el 27 de septiembre de 2021. Sus características son muy similares a las de Landsat 8, pero toma imágenes con 8 días de desfase respecto al anterior, resultando en el doble de cobertura temporal (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>).

El 42% restante de las imágenes procede de Sentinel 2, una flota de satélites del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea. El primero, Sentinel-2A, fue lanzado el 23 de junio de 2015, mientras que el segundo, Sentinel-2B, fue lanzado el 7 de marzo de 2017 con características y órbita idénticas. Ofrecen una visión detallada de la tierra y la vegetación mediante 13 bandas espectrales desde el visible hasta el infrarrojo cercano con una resolución de 10 m y un periodo de 5 días de revisita funcionando conjuntamente (https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-2_operations).

Las líneas de costa se extraen directamente de las imágenes mediante la herramienta SHOREX (SHOREline EXtraction software) de la Universitat Politècnica de València (UPV). SHOREX es un software avanzado para la vigilancia costera que utiliza las imágenes satelitales descritas para extraer líneas de costa con precisión subpíxel. El proceso incluye la georreferenciación precisa de ortofotografías y la diferenciación de la interfaz agua-no agua, generando datos vectoriales utilizables en sistemas de información geográfica (SIG) para monitorear la evolución costera a lo largo del tiempo (Palomar et al., 2018).



Figura 52. Líneas de costa obtenidas mediante imágenes de satélite y SHOREX.

Se obtienen las líneas de costa (Satellite-Derived Waterlines, SDW) mostradas en la Figura 52. Sin embargo, al tratarse de un nivel del mar momentáneo, todavía no se pueden comparar unas líneas con otras para obtener las tasas de evolución de las playas. Se deben llevar a cabo correcciones para referirlas todas al mismo nivel de referencia, especialmente considerando la gran variabilidad espacial de la línea de costa en playas meso-macromareales expuestas a condiciones de oleajes altamente energéticos.

En este estudio se abordan las diferentes componentes del nivel del mar que condicionan la elección de los parámetros a aplicar para realizar correcciones de nivel del mar. Se consideran el efecto de la marea (meteorológica y astronómica) y también los procesos que se producen cerca de la costa debidos a la sobre elevación del mar (run-up), teniendo en cuenta que pueden encontrarse en su máximo valor o en uno intermedio. También se estudia la influencia de la elección de la pendiente de la playa, valorando su gran variabilidad en playas como El Puntal, con grandes cambios morfodinámicos a escala espacial y temporal.

A continuación, se desarrolla una metodología para evaluar la evolución de playas meso-macromareales a partir de líneas de costa extraídas de imágenes de satélite y se aplica en las playas de El Puntal para validar y analizar las tasas de evolución obtenidas.

5.2. Metodología desarrollada para obtener las SDS en playas macromareales

En esta metodología se ha de tener en cuenta que la línea detectada por el software SHOREX es la interfaz agua-no agua y no arena seca-arena mojada, es decir, no se está tomando la pleamar como se hizo con las ortofotos. En este caso, sin embargo, se conoce la fecha y hora de captura de cada imagen, por lo que, para obtener líneas de costa comparables, se llevan a cabo una serie de correcciones que posicionan todas las líneas en el mismo nivel de referencia.

Se toma el nivel medio del mar (Mean Sea Level, MSL) como nivel de referencia, de 2.846 m sobre el cero del Puerto. Las nuevas líneas corregidas (Satellite-Derived Shorelines, SDS) se obtienen mediante un simple cálculo trigonométrico conociendo la pendiente de la playa y la diferencia del nivel del mar momentáneo respecto al de referencia (ver Figura 53).

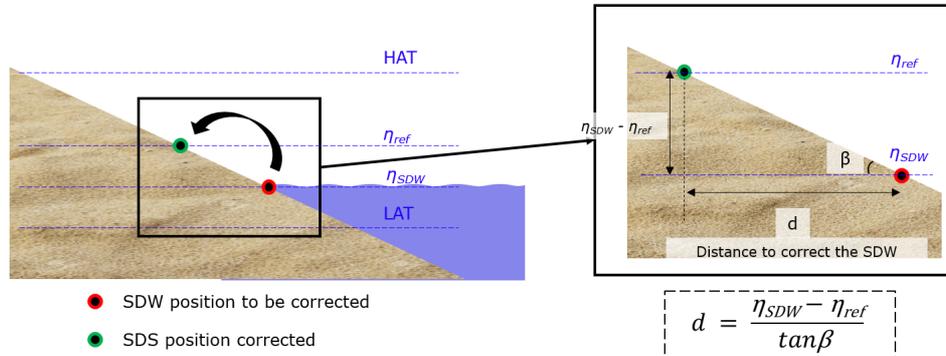


Figura 53. Esquema de corrección de las SDW.

Para determinar la distancia con la que modificar los resultados obtenidos con los transectos, es necesario abordar las incertidumbres asociadas a cada variable. Se obtendrá cada parámetro de diferentes maneras (3 pendientes por transecto y 2 niveles de mar) para generar una serie de combinaciones con resultados a comparar y comentar.

5.2.1. Pendiente de la playa

La pendiente de la playa varía tanto a lo largo de la misma, como transversalmente, en el perfil. Esta variabilidad se ve acentuada en playas con cambios constantes en su estado morfodinámico, generando también una variación temporal. Para abordar esta incertidumbre, se propone analizar la pendiente de la playa por transectos y considerando más de una fecha de datos topo-batimétricos.

Para determinar la pendiente más adecuada, se analizan diferentes formas de extracción. Se emplean los DEMs (Digital Elevation Model) derivados de las topobatimetrías de 2016 y 2024 descritas en 4.1. Metodología por ser las de mayor definición en la zona de estudio. Se mide en los DEMs la pendiente de tramos de 2 m a lo largo de los transectos en la zona intermareal (entre 0.371 y 5.298 m sobre el cero REDMAR). Con todos los datos de pendientes, se extraen los percentiles 25, 75 y la media de la zona intermareal de cada transecto.

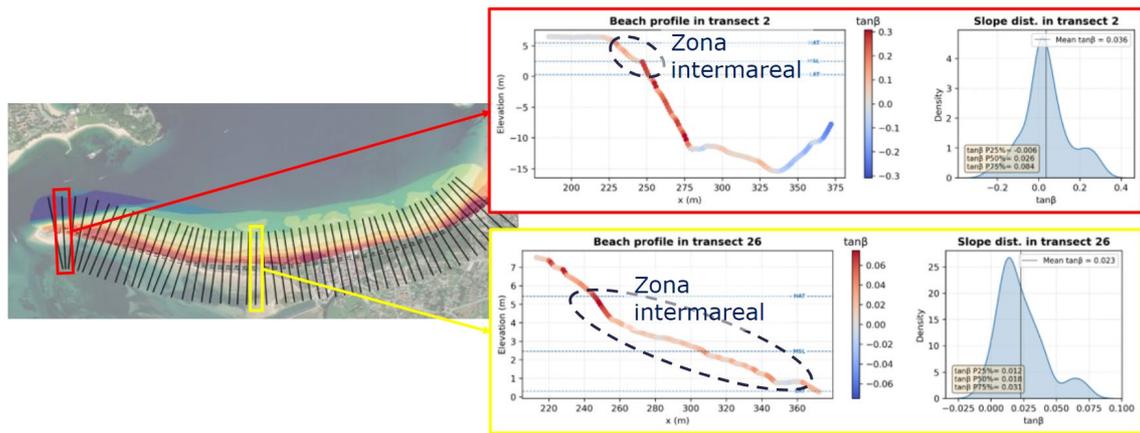


Figura 54. Ejemplos de obtención de los percentiles 25, 75 y la media de la pendiente de dos transectos.

En la Figura 54 se muestran 2 ejemplos de las pendientes a lo largo de los transectos, junto a su densidad de probabilidad en la zona intermareal, de la que se extraen las tres pendientes que se van a emplear para evaluar las diferentes combinaciones de parámetros en El Puntal. A continuación, se muestran las pendientes correspondientes a los percentiles 25, 75 y la media de cada transecto para los dos DEMs en las playas de El Puntal. En los primeros 7 transectos hay pendientes superiores a la media, debido a que son los más cercanos a la zona de la canal de navegación, en la que se llevan a cabo los dragados anuales para mantener calados óptimos para la navegación.

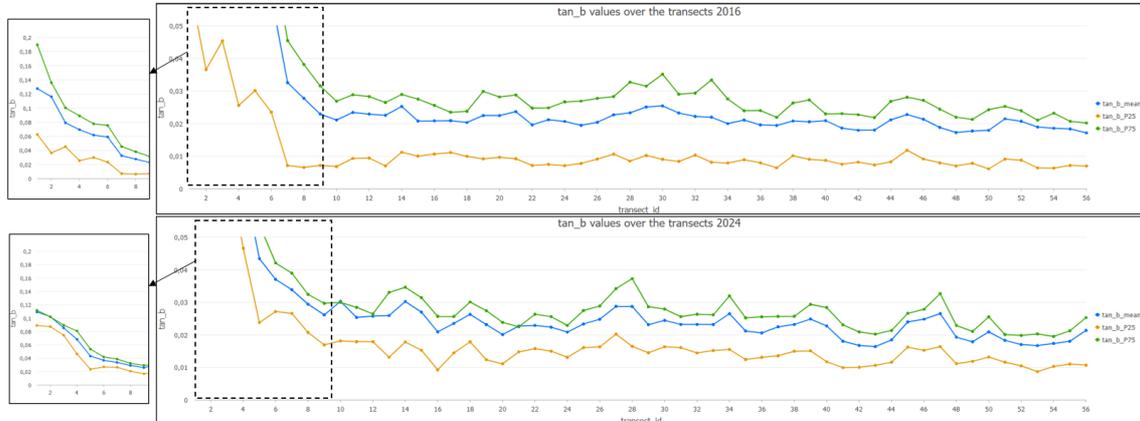


Figura 55. Pendientes a lo largo de los transectos de las playas de El Puntal según los datos de 2016 y 2024.

Al corregir las SDW, se considera la pendiente correspondiente al DEM más cercano a la fecha de cada línea. En Punta Rabiosa se procede de la misma manera con la diferencia de que solo se toman las pendientes de 2024, ya que el DEM de 2016 no cubre esa zona.

5.2.2. Nivel del mar total o en calma (TWL o SWL)

El objetivo de la corrección del nivel del mar es obtener todas las SDS con la cota del nivel medio del mar (MSL), de 2.846 m desde el cero REDMAR. Esta diferencia vertical se obtiene como la resta del nivel del mar en el momento de toma de la imagen y el nivel de referencia.



El nivel del mar momentáneo se obtiene como una suma de componentes. Se tienen en cuenta dos posibles niveles, el nivel del mar en calma (Still Water Level, SWL) y el nivel del mar total (Total Water Level, TWL). Ambos consideran la marea meteorológica y la marea astronómica, pero el TWL añade el run-up. Se trata de la sobre elevación del nivel del mar en la costa debida a la energía del oleaje que no ha sido disipada antes de alcanzar la orilla y está compuesta por el set-up y el swash.

El set-up se refiere a la elevación promedio del agua en la costa debido al gradiente del tensor de radiación provocado por la rotura de las olas, mientras que el swash describe el movimiento oscilante del agua sobre la playa, que incluye tanto el avance como el retroceso del agua debido al oleaje incidente y a las ondas infragravitatorias.

El run-up se calcula mediante la formulación de Stockdon et al. (2006), que obtiene la elevación de picos extremos de run-up correspondientes a una probabilidad de excedencia del 2%:

$$R_2 = 1.1 \left(0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Donde:

- H_0 : Altura de ola significativa en aguas profundas (m)
- L_0 : Longitud de onda en aguas profundas (m)
- T : Periodo pico (s)
- β_f : Pendiente de la playa en la zona intermareal

Se consideran los dos niveles comentados, ya que el run-up es una sobre elevación con variación a una escala temporal muy pequeña, dependiente de la ola incidente del momento de toma de la foto. Dicha corrección, por lo tanto, es más inexacta al no tener datos de una resolución temporal tan alta. Se opta por comparar el mínimo y máximo nivel de run-up, para establecer la metodología más adecuada y aplicable de una manera general.

Se calcula tanto el SWL como el TWL para cada transecto y cada fecha y se obtiene la resta entre el MSL y cada uno de los niveles momentáneos del mar.

5.3. Tasas de evolución y validación

Una vez obtenidas las SDS, se prosigue de una manera muy similar a la descrita en 3. *Evolución histórica mediante ortofotos* para obtener las tasas de evolución. Retomando las zonas definidas en la Figura 29, se obtienen las distancias respecto a una línea de referencia y se llevan a cabo las correcciones de dichas distancias para referirlas todas a un mismo nivel permitiendo su comparación.



En cada una de las playas de estudio se aplican las 6 correcciones resultantes de combinar los diferentes parámetros de nivel del mar (SWL y TWL) y de pendiente del transecto (percentil 25, 75 y media). Se muestran los ajustes lineales junto a las tasas de avance de la línea de costa y parámetros de evaluación del error del ajuste: el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la desviación típica (STD).

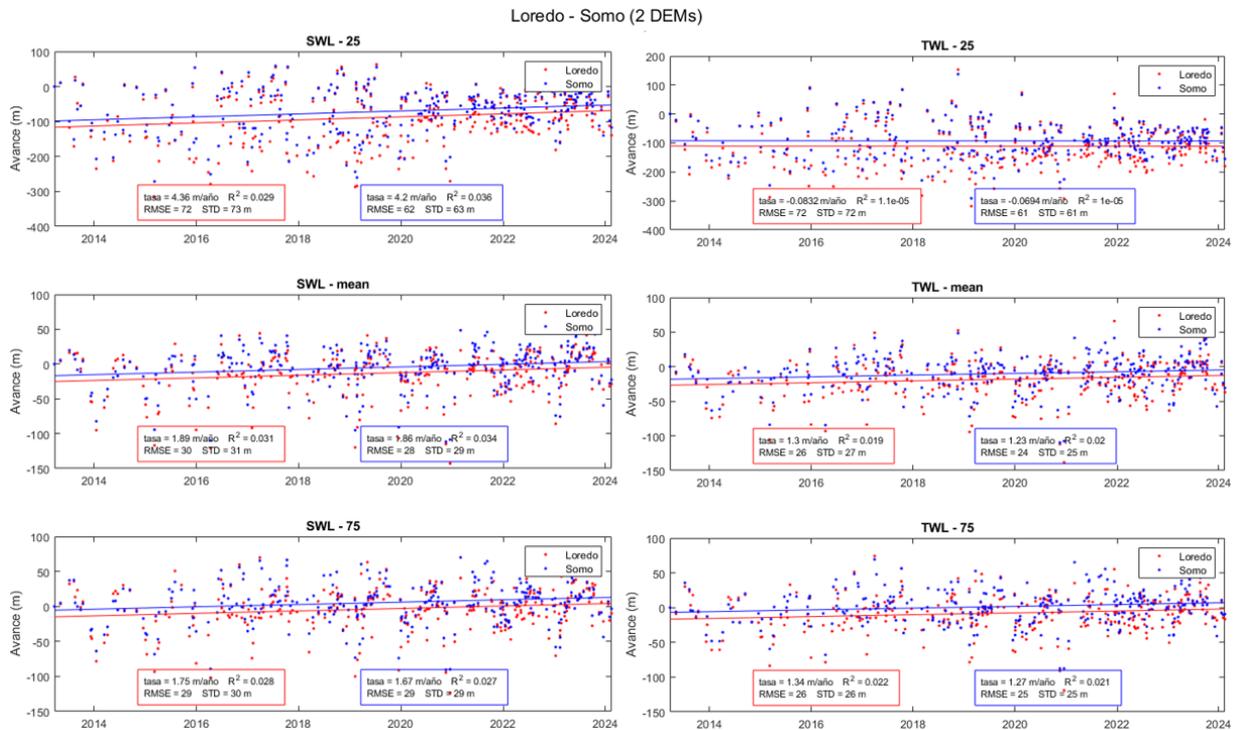


Figura 56. Tasas de evolución de Loredo (rojo) y Somo (azul).

En la Figura 56 se presentan las 6 correcciones de las líneas de costa, promediando los transectos correspondientes a Loredo y a Somo tomando valores de pendiente diferentes en función de la fecha de cada línea (se asigna la pendiente del DEM más cercano). Se ha realizado el mismo análisis tomando las pendientes únicamente de un DEM (de 2024) pudiendo observar resultados muy similares tanto en localización de las SDS como en tasas y parámetros del ajuste. Varios estudios observaron los mismos resultados evaluando pendientes estáticas y dinámicas en el tiempo: no se da una variación significativa aplicando una o varias pendientes para cada transecto (Castelle et al., 2021; Graffin, M. et al., 2023).

Las correcciones llevadas a cabo con la pendiente del percentil 25 muestran resultados muy dispersos en el espacio, como se aprecia con los parámetros del ajuste. Las tasas de avance son muy diferentes respecto al resto de ajustes y la desviación típica es excesivamente grande. Estos resultados eran de esperar ya que, con pendientes suaves, cualquier desnivel genera correcciones horizontales muy superiores a las obtenidas con pendientes más pronunciadas. Muchos de los puntos de las líneas corregidas alcanzan posiciones irreales, como zonas metidas tierra adentro donde es imposible que el mar llegue.



Las correcciones con las otras pendientes son más realistas, con variaciones menores de la posición de la línea de costa. Las correcciones llevadas a cabo desde el SWL muestran mayores avances que con el TWL (1.8 - 1.3 m/año en Loredo y 1.75 - 1.25 m/año en Somo). Adicionalmente, siendo muy similares las correcciones, las SDS desde SWL se ubican en todos los casos ligeramente más desplazadas hacia tierra que las corregidas desde TWL. Este resultado es lógico ya que, cerca de la pleamar, la corrección vertical desde TWL es mayor que desde el SWL, y cerca de la bajamar es menor, generando este desplazamiento de una respecto a la otra.

Debido al desplazamiento hacia tierra de las líneas corregidas desde SWL, algunos puntos se ubican en posiciones irreales tierra adentro. No es tan evidente como con las correcciones con pendiente del percentil 25, por lo que no se puede concluir directamente que sean menos precisas. Es necesario evaluar la precisión de los resultados con datos medidos para identificar la combinación de parámetros más adecuada. Para llevar a cabo tales análisis, es preciso tener una gran base de datos de mediciones con las que comparar las líneas de satélite corregidas. Actualmente, solo una serie de playas cuentan con monitorización a largo plazo: Duck, North Carolina, Torrey Pines, California, Narrabeen, Australia y Truc Vert, Francia entre otras (Vitousek et al., 2023).

La mayoría de estudios en el ámbito costero se llevan a cabo en dichas localizaciones por su gran disponibilidad de datos. En el caso de El Puntal, sin embargo, solo se cuenta con dos topo-batimetrías de alta definición (2016 y 2024). Para el análisis se toman las líneas de costa cercanas temporalmente (más-menos un mes), para considerar las variaciones estacionales y a largo plazo de las playas. En el caso de las cercanas a 2016 (2), al comparar la línea de costa de las SDS con la de la topo-batimetría (diferencia referida como offset), se observa que, en la mayoría de los transectos, la corrección es más precisa empleando TWL y la pendiente media o del percentil 75 (ver Figura 57).

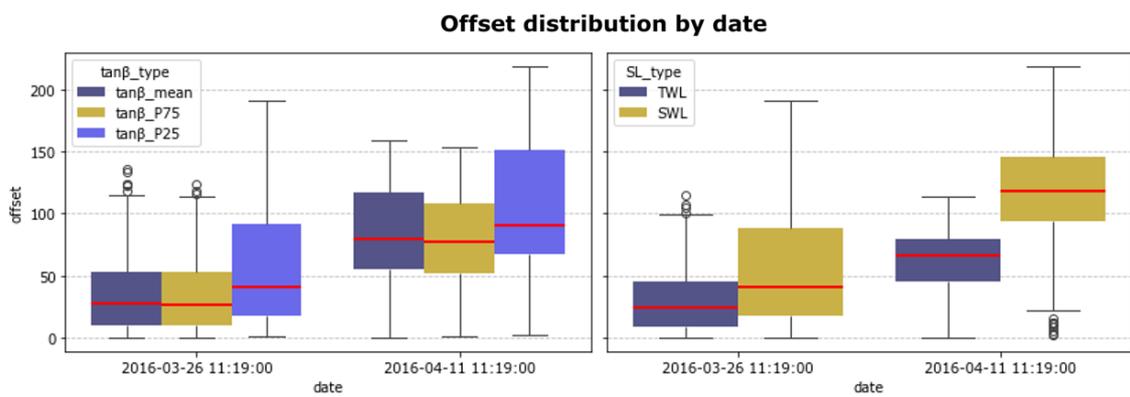


Figura 57. Evaluación del offset de las SDS respecto a la topo-batimetría de 2016.

Sin embargo, se deben tener en cuenta varias limitaciones. Comparando visualmente las SDW con las imágenes de satélite extraídas, ya se aprecia que en muchos transectos no se está detectando correctamente la interfaz agua-arena, sino que la línea se encuentra en la arena mojada de la zona intermareal (ver Figura 58), error común de la teledetección que se comenta más adelante.



Figura 58. SDW de las dos imágenes de satélite cercanas a la fecha de la topo-batimetría.

No obstante, los transectos con la detección más cercana a la línea de costa de la primera imagen de satélite (15-19 y 39-43 entre otros), permiten comprobar las observaciones realizadas anteriormente. En la Figura 59 se observa arriba que la corrección con el percentil 25 aleja las SDS excesivamente de la línea de costa real, mientras que los resultados con pendiente media y percentil 75 son muy similares, ubicándose el último ligeramente más hacia el mar. Abajo se compara ante una misma pendiente, las diferentes correcciones según el nivel del mar adoptado. Como era de esperar, las correcciones con SWL se encuentran más cercanas a tierra, sin embargo, no se aprecia claramente cuál de las dos muestra mejores resultados, ya que varía a lo largo de la playa. Este resultado concuerda con lo comentado sobre la variabilidad temporal del run-up.

Se distingue que las correcciones llevadas a cabo en los transectos bien detectados sitúan la SDS muy cerca de la línea de MSL real, demostrando la validez de la metodología. Sin embargo, también evidencia los errores asociados a la detección inexacta de la interfaz agua-arena.

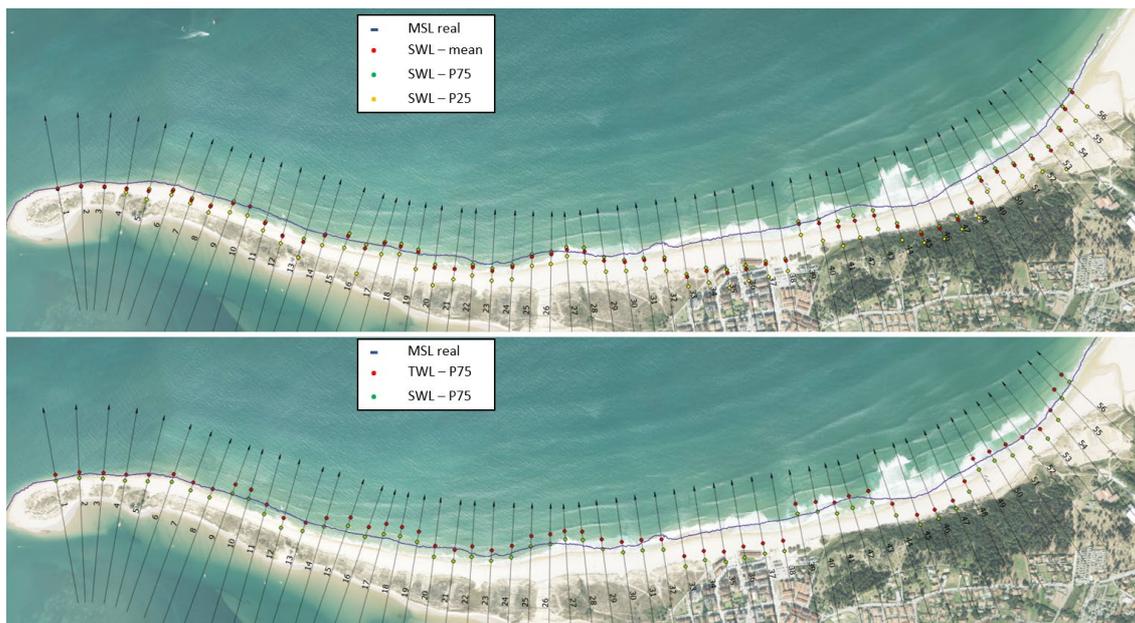


Figura 59. Comparación de las correcciones en función de la pendiente (arriba) y en función del nivel del mar (abajo).

Por otro lado, la línea de satélite más reciente no se encuentra en el rango establecido alrededor de la topo-batimetría de 2024, por lo que no se puede llevar a cabo el mismo análisis.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las combinaciones aplicada en Punta Rabiosa (ver Figura 60). Solo se toman las pendientes extraídas de la topo-batimetría de 2024 ya que, la de 2016 no cubre esta zona. Una vez más, las correcciones con la pendiente del percentil 25 muestran datos más dispares que el resto de pendientes, aunque en este caso no es tan exagerado, ya que las pendientes en Punta Rabiosa ya son de por sí considerablemente superiores a las de Somo y Loredo (de 0.05 de media).

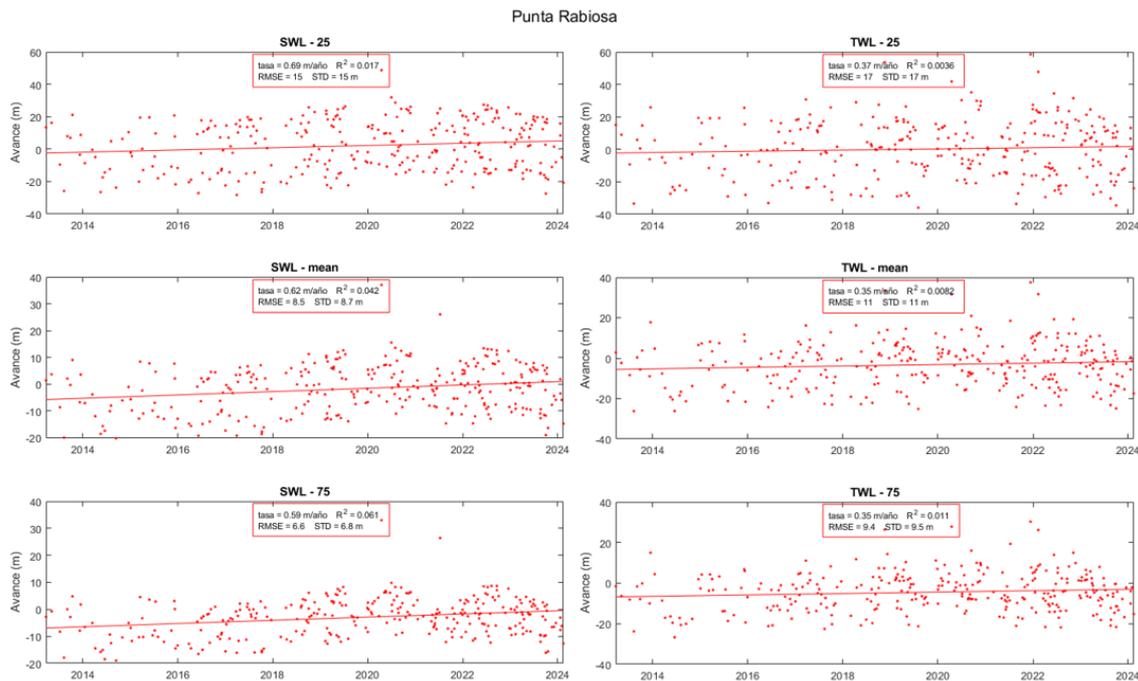


Figura 60. Tasas de evolución de Punta Rabiosa.

Las tasas obtenidas son, una vez más, superiores con SWL (avances de 0.6 m/año respecto a 0.35 m/año). Los parámetros del ajuste muestran que con SWL hay menos dispersión de los datos, sin embargo, no se conoce si se ajustan más a la realidad por la falta de datos topo-batimétricos en las fechas disponibles.

Tras analizar las tres playas, se concluye que, con la limitación de tener una única fecha con la que validar los resultados, todavía no se pueden precisar los parámetros idóneos con los que corregir las SDW en playas meso-macromareales. Sin embargo, se continúa con el análisis de El Puntal considerando la combinación de TWL y pendiente media o de percentil 75 por mostrar offsets menores en mayor número de transectos (Figura 57), asumiendo el error inherente en la extracción de las SDW de una manera automatizada.

5.4. Consideraciones

Es importante destacar que existe incertidumbre asociada al proceso de extracción de las líneas de costa. Ya en la Figura 52 se aprecian líneas que se introducen en la zona de bosque ubicada sobre las dunas de Somo, cuyas intersecciones con los transectos han sido eliminadas manualmente para no contaminar los resultados. Adicionalmente, se ha detectado que las líneas tomadas en bajamar muestran una dispersión en su ubicación bastante anómala (ver Figura 58), evidenciando la necesidad de mejorar las técnicas de teledetección de SDW, especialmente en playas con rangos de marea considerables (meso y macromareales).

Mientras que las líneas tomadas con altos niveles del mar se ubican en la zona más cercana a la tierra, no se observa la misma lógica con las capturadas en bajamar. Dichas SDW muestran una dispersión muy superior en todo el ancho de la zona intermareal (ver Figura 61).

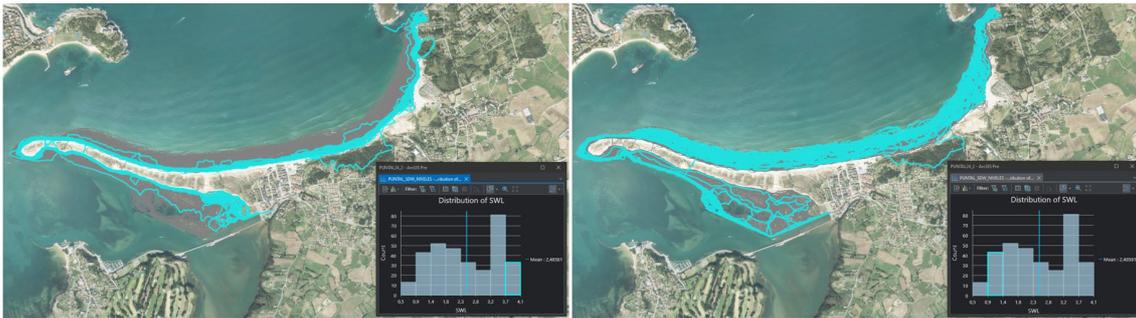


Figura 61. Posición de las SDW para diferentes niveles de mar.

Se considera la posibilidad de que, en esos casos posiblemente erróneos, se esté detectando la interfaz arena mojada- arena seca, ya que el ciclo de marea de 12 horas no permite que la arena de la zona intermareal se seque completamente. Se recomienda la corrección de las SDW al nivel medio del mar, ya que, al encontrarse en una localización intermedia de todos los niveles del mar posibles, la corrección arrastrará menos posibles errores al dividirse entre la pendiente.

Estos fallos a la hora de detectar la línea de costa ya se han observado en numerosos estudios (Graffin et al., 2023; Castelle et al., 2021). Debe ser estudiado con mayor detalle, analizando los posibles factores influyentes, como podrían ser estado de la marea (llenante o vaciante), si la dinámica marina tiene algún efecto o los índices y filtros aplicados. Sería de gran utilidad desarrollar una metodología para automatizar la detección de las líneas mal extraídas y eliminarlas o corregirlas.

Vitousek S. et al. (2023) enumeró algunos de los mayores retos asociados al estado actual de la teledetección, considerando que es un método de análisis de cambios de la costa relativamente nuevo. En cuanto a la credibilidad de las SDW, se tiene en cuenta la baja resolución de los satélites (de 10-15 m) en comparación con los anchos de muchas playas, que limita los datos a pocos píxeles por ancho de playa. Se están desarrollando técnicas de super-resolución para obtener imágenes de mejor calidad, pero todavía necesita ser investigado y llegado a un consenso.

Otros aspectos que requieren ser investigados a futuro son los parámetros a seleccionar en cada paso de la metodología, desde índices y filtros empleados durante la detección de las SDW hasta el nivel de referencia vertical al que corregir las líneas o si considerar la componente dinámica del run-up, el swash.

No obstante, la detección de líneas de costa mediante imágenes de satélite se considera una técnica con mucho futuro en el ámbito de la evolución costera, debido a la gran base de datos con alta frecuencia y cobertura espacial y temporal que proporciona. No solo aporta datos públicos de todo el planeta, sino que también permite por primera vez obtener datos históricos de hasta casi cuatro décadas atrás.

5.5. Líneas de costa en pleamar

En este apartado se plantea una forma alternativa de aprovechar la gran cantidad de datos extraídos de imágenes de satélite para obtener resultados más



comparables con los obtenidos mediante otras fuentes de datos. Se parte de la base de que la metodología anteriormente planteada está todavía en una fase muy preliminar como para poder concluir resultados fiables para analizar la evolución de El Puntal.

Se analiza la posición media de las SDW coincidentes con niveles de pleamar sin llevar a cabo correcciones de nivel. De esta manera, se obtienen resultados equiparables a los obtenidos con las ortofotos. Este nuevo enfoque reduce también significativamente los errores asociados a la teledetección, ya que, como se comentó en el apartado anterior, la mayor cantidad de detecciones erróneas se daban cuando las imágenes mostraban más zona intermareal (a mitad marea o en bajamar). También se evita la toma de decisiones de parámetros (pendiente y nivel del mar) con los que corregir las líneas.

Para contar con las variaciones estacionales, se toman posiciones medias anuales de las SDWs en cada transecto, para finalmente obtener para cada año valores medios para todo el tramo de Loredo y el de Somo. No se aplica esta metodología a Punta Rabiosa ya que los resultados anteriores ya se consideran suficientemente válidos al acarrear menos errores debido a las pendientes más pronunciadas de la zona intermareal y los menores oleajes incidentes.

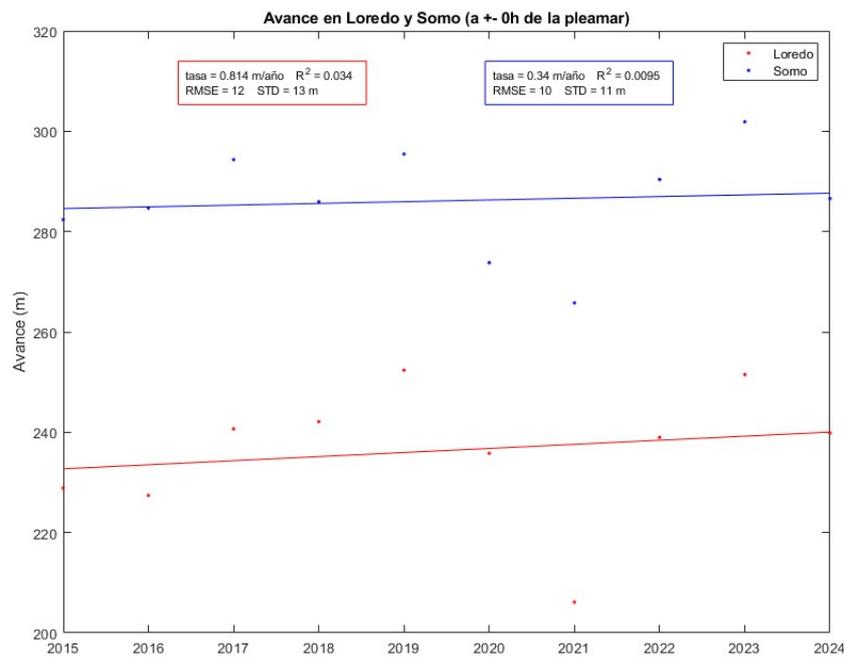


Figura 62. Tasas de evolución de Loredo (rojo) y Somo (azul) con las SDW en pleamar.

La Figura 62 muestra los resultados del análisis, con tasas de avance de 0.81 m/año en Loredo y de 0.34 m/año en Somo. En este caso, la desviación típica se reduce a 11-13 m, es decir, del orden de magnitud de la resolución de las imágenes de satélite.



5.6. Conclusiones

En este apartado se ha desarrollado una nueva metodología que permite obtener líneas de costa a partir de imágenes de satélite, pudiendo acceder a una base de datos significativamente mayor a las empleadas tradicionalmente. Consiste en la obtención de las líneas de costa visibles en las imágenes a través de un software desarrollado por la UPV. Posteriormente, se trasladan las líneas extraídas a un mismo nivel de referencia, con el fin de poder compararlas entre sí y obtener tasas de evolución.

Se describe un proceso principalmente relevante en playas meso-macromareales, donde el nivel del mar es altamente variable. Se aplica una corrección trigonométrica considerando la pendiente de la playa (extraída de mediciones reales por transectos) y el nivel del mar momentáneo (tomando datos horarios de condiciones de oleaje). En este estudio se ha concluido que la mejor combinación de parámetros en El Puntal es tomando la pendiente media o del percentil 75, junto a la corrección del nivel del mar considerando tanto marea meteorológica y astronómica, como el máximo nivel del run-up.

Sin embargo, la falta de más mediciones reales con las que validar los resultados, resalta la necesidad de seguir investigando para obtener conclusiones extrapolables a otras playas meso-macromareales. Se trata de una técnica tan novedosa, que todavía acarrea numerosas incertidumbres y a la vez supone un gran avance en la disponibilidad de datos en el ámbito de los estudios costeros. Se resaltan las principales fuentes de desconocimiento: la selección de parámetros para detectar las líneas de costa y para llevar a cabo correcciones de nivel del mar, la resolución de los datos y los motivos de las malas detecciones entre otras.

Se concluye que en Punta Rabiosa la línea de costa avanza actualmente unos 0.35 m/año. Para analizar Loredo y Somo se ha optado por tomar medias anuales de las líneas extraídas en pleamar, ya que la gran zona intermareal de estas playas acarrea un gran error en la obtención de SDS que todavía no se puede abordar apropiadamente. Se han medido avances de 0.81 m/año en Loredo y 0.34 m/año en Somo.



6. Comparación conjunta de resultados de diferentes fuentes de datos

En este apartado se evalúan conjuntamente los resultados obtenidos a partir de las diferentes fuentes de datos. Se comparan las tendencias obtenidas con las ortofotos, las curvas de nivel de las topo-batimetrías y las imágenes de satélite. Se retoman los resultados de los apartados 3. *Evolución histórica mediante ortofotos*, 4. *Evolución histórica mediante topo-batimetrías* y 5. *Evolución histórica mediante imágenes de satélite* para comparar las diferentes conclusiones.

Los resultados obtenidos mediante las ortofotos mostraban retrocesos tanto en Loredo como en Somo entre los años 2017 y 2024. Las tasas eran de 0.65 m/año y de 0.91 m/año respectivamente. En Punta Rabiosa, sin embargo, se daban avances de 0.32 m/año desde 2005 a 2024. En todos los casos se redujeron considerablemente las tasas en comparación con los periodos anteriores.

Las diferencias calculadas en Loredo y Somo mediante las topo-batimetrías resultaron de la comparación de curvas de nivel en la zona de playa seca (no afectada por dinámicas marinas). Se concluyeron erosiones de 0.48 m/año y 0.19 m/año respectivamente.

Con las imágenes de satélite se obtuvieron avances de 0.81 m/año en Loredo y de 0.34 m/año en Somo considerando las posiciones medias anuales de las líneas en pleamar. En Punta Rabiosa se tomaron las tasas deducidas de las SDS corregidas con pendientes medias y del percentil 75 considerando el máximo run-up al determinar el nivel del mar (TWL). Se mostraba un avance de 0.35 m/año.

Tabla 1. Tasas de avance (m/año) de las playas de estudio medidas mediante diferentes fuentes de datos.

| | Ortofotos | Topo-batimetrías | Imágenes de satélite |
|---------------|-----------|------------------|----------------------|
| Loredo | -0.65 | -0.48 | 0.81 |
| Somo | -0.91 | -0.19 | 0.34 |
| Punta Rabiosa | 0.32 | - | 0.35 |

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos. Se observa que las tasas de las imágenes de satélite son contrarias a las otras fuentes de datos en Loredo y Somo, a excepción de Punta Rabiosa, donde se establece un crecimiento de 0.33 m/año en los últimos 10 años.

Se considera que la diferencia de resultados entra dentro de un margen de error aceptable considerando el orden de magnitud de la diferencia y la resolución de los datos, junto a los errores asociados a cada fuente de datos, por lo que se debe considerar la validez de cada metodología. Por una parte, las ortofotos representan una cantidad muy reducida de datos con ciertos errores en su intercomparación por no poder corregir su nivel vertical principalmente variable por la estacionalidad. Sin embargo, la digitalización manual de la máxima pleamar reduce fallos debidos a malas detecciones de las interfaces, se considera un método confiable y preciso, principalmente en imágenes de alta resolución (Ford, 2013; Kelly & Gontz, 2019).



La teledetección con imágenes de satélite, al contrario, está automatizada asumiendo errores en la detección de la interfaz arena-agua. Siendo todavía una metodología relativamente novedosa, no se ha llegado a un consenso sobre maneras de eliminación o corrección de datos erróneos y selección de parámetros. Sin embargo, la gran nube de datos que genera aporta mucha información constante en el espacio y en el tiempo (produciendo a la vez ruido en los resultados).

Las topo-batimetrías comparadas, de 2016 y 2024, son la fuente de datos más fiable considerando las comprobaciones y validaciones aplicadas a los instrumentos de medida y la alta resolución de datos generada.

Teniendo en cuenta los pros y los contras de cada metodología, se puede concluir que, en la última década, las playas de El Puntal han reducido considerablemente sus tendencias erosivas en Loredo y Somo, y acumulativas en Punta Rabiosa, aproximándose lentamente a un equilibrio sedimentario.



7. Modelo morfodinámico de funcionamiento actual

Tras analizar la evolución reciente de El Puntal mediante diferentes fuentes de datos y obtener resultados concordantes, se puede concluir el sistema morfodinámico de funcionamiento actual de las playas que componen la zona de estudio.

Desde los dragados y vertidos llevados a cabo a partir de los años 90, las playas de Somo y Loredo han comenzado a reducir sus tasas de erosión significativamente hasta el punto de prácticamente estabilizarse desde aproximadamente 2014. El extremo Oeste de la flecha arenosa, Punta Rabiosa, ha experimentado una evolución similar, pero partiendo de avances hacia el Suroeste con tasas muy aceleradas. Dichas tasas se han reducido significativamente hasta alcanzar ya desde 2005 avances de 0.35 m/año.

Estos resultados demuestran que la situación de desequilibrio descrita en 2.5. *Modelo morfodinámico de funcionamiento previo a este estudio* ha sido contrarrestada mediante las medidas propuestas en los años 90. El ciclo conformado por las dinámicas del oleaje y del estuario se han restablecido de manera artificial.

Actualmente, la arena de las playas de Loredo y Somo sigue siendo transportada hacia la bocana de la bahía pretendiendo reducir su sección, sin embargo, al encontrarse con la canal de navegación de considerable profundidad, la arena se deposita en el fondo cayendo en una trampa de sedimentos. Ya no contribuye significativamente al avance de Punta Rabiosa, ya que la arena es dragada cada año antes de poder acumular cantidades considerables, obviando las ocasionales ondas de arena que pasan al interior de la bahía, pudiendo acumularse en los páramos.

Al encontrarse en desequilibrio la bocana, la arena no es llevada al bajo exterior durante los estados de marea vaciantes y, por lo tanto, la arena no retorna a la playa con la bajamar de cada ciclo de marea. Sin embargo, la arena se devuelve a las playas cada año artificialmente mediante los vertidos dentro de la zona del perfil activo de la playa delante de Loredo. Al comprobar que las playas han reducido considerablemente su erosión, se demuestra que finalmente se está alcanzado un equilibrio entre la arena que es transportada a la canal y la que es dragada y vertida cada año. Dicho estado de equilibrio no se estableció directamente el año que comenzaron a implantarse las medidas, ya que todo proceso natural tiene un tiempo de respuesta no inmediato, que podría considerarse exponencial, hasta alcanzar la situación de equilibrio.

En la Figura 63 se muestra el esquema del modelo morfodinámico de funcionamiento descrito en este apartado. Las flechas amarillas representan los transportes de sedimentos y en verde las zonas principales de dragado y vertido de arena.



Figura 63. Modelo morfodinámico de funcionamiento actual.

No obstante, es importante destacar la ausencia de grandes temporales coincidentes con altos niveles del mar en la última década. Como se demuestra en el estudio de Sanjosé et al. (2016), la playa de El Puntal responde con erosiones significativas en episodios de grandes alturas de olas (más de 5 m) coincidentes con altos coeficientes de pleamar (mayores a 80), provocando subidas del nivel del mar superiores a la media y alcanzando zonas de la playa vulnerables como las dunas. En periodos de mayor calma, sin embargo, apenas se aprecian variaciones en la línea de costa.

Observando la serie temporal del nivel del mar total desde el cero del Puerto (incluyendo marea astronómica, meteorológica y run-up), se aprecia que desde marzo de 2014 no se han vuelto a dar niveles de mar de semejante altura (ver Figura 64). Por lo tanto, a pesar de que se esté alcanzando un equilibrio en las playas de El Puntal, no se puede descartar que vuelvan a darse condiciones marinas que generen erosiones graves puntuales, e incluso continuas debidas a la persistencia de fuertes temporales a lo largo de un espacio de tiempo.

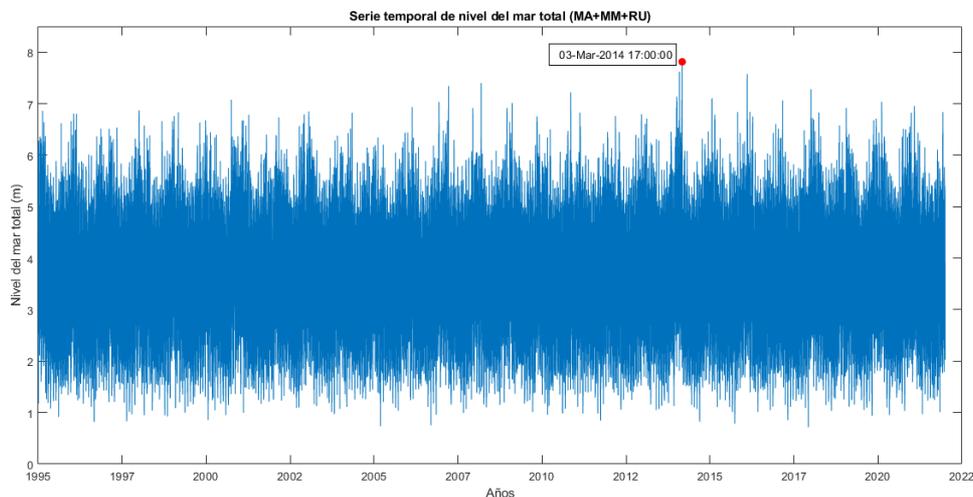


Figura 64. Serie temporal de nivel del mar total.



8. Conclusiones

En el presente estudio se ha llevado a cabo una evaluación de la situación histórica y actual de las playas de El Puntal, en el municipio cántabro de Ribamontán al Mar. Para ello se han analizado diferentes fuentes de datos (ortofotos, topo-batimetrías e imágenes de satélite) para, finalmente, compararlos entre sí y concluir la situación actual de las playas.

Las playas de El Puntal se encuentran en la bocana de la bahía de Santander, conformando una flecha arenosa que semicierra el estuario e interactuando con las dinámicas marinas y estuarinas presentes en la zona. Desde mediados del siglo XIX hasta el 2014 se ha percibido una notoria erosión de las playas de Loredo y Somo, a la vez que un avance hacia el Suroeste del extremo de la flecha, Punta Rabiosa. Dichas alteraciones se han visto motivadas por las actuaciones antrópicas llevadas a cabo en el entorno de las playas.

La bahía de Santander ha visto reducida su área a la mitad por los numerosos rellenos históricos que se han producido para ganar terreno y ampliar la ciudad, el puerto y el aeropuerto desde mediados del siglo XIX como consecuencia del desarrollo de la ciudad. Dichas modificaciones han provocado un desequilibrio en las dinámicas de la bahía que tienden a reducir el área de su bocana. Sin embargo, debido a los dragados llevados a cabo anualmente para mantener la canal de navegación, se restringe que se produzca ese avance de El Puntal de una manera natural.

Como consecuencia, las playas de Somo y Loredo han perdido cantidades de arena notorias (alrededor de 4 millones de m³) que se han acumulado en Punta Rabiosa, los páramos y en la canal, sin llegar a regresar a las playas cerrando el ciclo. Desde los años 90, las cantidades dragadas se vierten frente a la playa de Loredo, pretendiendo reestablecer el ciclo. En este estudio se evalúa la evolución de las últimas décadas por diferentes medios para establecer los resultados de dichas actuaciones.

Primero se han obtenido las tasas de avance y retroceso tomando ortofotos aéreas digitalizadas para comparar los niveles de máxima pleamar de las diferentes fechas. Se ha observado que hasta 2014, en Loredo y Somo se daba una marcada erosión de 1.1 y 1.5 m/año, para posteriormente reducirse hasta tasas de 0.65 y 0.91 m/año. En Punta Rabiosa la evolución ha sido la contraía, ha avanzado hasta inicios del nuevo siglo a ritmos muy elevados (casi 9 m/año) para posteriormente prácticamente estabilizarse y llegar a acreciones de 0.3 m/año.

A continuación, se han comparado las topo-batimetrías de los años 1975, 2016, 2018 y 2024. En ellas se comprueba que en los primeros años hubo cambios muy drásticos en la configuración de la zona de estudio, con marcados dragados en la canal, ligeras acumulaciones en los páramos e importantes avances en Punta Rabiosa. Frente a El Puntal, se aprecia una erosión generalizada, especialmente marcada en el bajo de las Quebrantas. Sin embargo, en la última década, dichas



erosiones se han ido reduciendo, llegando prácticamente a estabilizarse con tasas de erosión de 0.48 m/año en Loredo y de 0.19 m/año en Somo y reduciendo el crecimiento de Punta Rabiosa al caer la arena en la canal.

Finalmente, se ha desarrollado una nueva metodología para emplear las líneas de costa digitalizadas mediante el software SHOREX a partir de imágenes de satélite para analizar la evolución de las playas meso-macromareales. Se han propuesto unas correcciones con el objetivo de referir todas las líneas a un mismo nivel de referencia considerando la variabilidad espacial y temporal de la pendiente de la playa y el nivel del mar del momento de toma de la imagen. Se han analizado líneas de costa de El Puntal de los últimos 10 años concluyendo que la combinación de pendientes medias o del percentil 75 por transectos y nivel del mar total (incluyendo marea meteorológica, astronómica y máximo run-up) generaban los resultados más precisos. Se han establecido unas tasas de avance de la línea de costa de 0.35 m/año en Punta Rabiosa.

Se han comentado las limitaciones de esta nueva metodología, destacando la necesidad de desarrollar flujos de trabajo estandarizados para cada tipo de playa y mejorar la técnica de detección de la interfaz agua-arena, debido a los errores e incertidumbres detectados. Sin embargo, se recalca la gran ventaja del volumen de datos que aporta esta metodología, evidenciando su futura utilidad en el ámbito costero.

Como consecuencia de las incertidumbres todavía asociadas a zonas con grandes zonas intermareales, se ha optado por evaluar la evolución de Loredo y Somo únicamente con la posición media anual de las líneas de costa detectadas en pleamar, obteniendo avances de 0.81 m/año en Loredo y de 0.34 m/año en Somo.

Tras comparar los resultados obtenidos con las tres fuentes de datos, se ha comprobado que las playas de Somo y Loredo han reducido considerablemente sus tasas de retroceso aproximándose a su estabilización. Punta Rabiosa también ha reducido sus avances hasta mantenerse en una tasa de alrededor de 0.35 m/año en la última década.

Se ha establecido el modelo morfodinámico de funcionamiento actual de las playas de El Puntal, concluyendo que los dragados y vertidos llevados a cabo anualmente están cerca de conseguir restablecer el equilibrio conformado por la interacción de las dinámicas de la bahía y el oleaje. La arena sigue siendo transportada de las playas a la canal, pero cada año se devuelven al ciclo volúmenes suficientes para, cada vez, generar menor erosión en las playas. También se ha frenado el avance de Punta Rabiosa hacia el interior de la bahía y la acumulación de arena en los páramos.

Se resalta el hecho de que los mayores retrocesos de las playas van asociados a episodios de combinaciones poco frecuentes de grandes alturas de ola (más de 5 m) con niveles del mar muy elevados (coeficientes de pleamar superiores a 80). Desde los temporales de 2014, no se han vuelto a dar condiciones similares, pero no se descarta que se vuelvan a producir fuertes erosiones puntuales o incluso dentro de



un periodo prolongado de tiempo en las playas, a pesar de estar aproximándose a un equilibrio.

Se resaltan en este trabajo las incertidumbres asociadas a cada una de las fuentes de datos, enfatizando en la necesidad de continuar investigando para mejorar las técnicas empleadas y establecer metodologías precisas y validadas que mejoren la calidad y fiabilidad de los resultados.



9. Bibliografía

Acevedo, A., Menéndez, M., & del Prado, D. (2019). *IHDATA: Servicio de datos climáticos y mete-oceánicos*. XV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Torremolinos, Málaga. Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria.

Ayuntamiento de Ribamontán al Mar. (2023). *Plan de Competitividad Turística del Producto Surf: Ribamontán al Mar, Cantabria*. Recuperado de https://surfatoscosta.es/wp-content/uploads/sites/4/2017/05/2023_Dossier_Turismo-SURF-Ribamontan-al-Mar_Cantabria.pdf (visualizado el 18 de julio de 2024)

Birkemeier, W. A. (1985). Field Data on Seaward Limit of Profile Change. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111(3), 598-602. Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-950x\(1985\)111:3\(598\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950x(1985)111:3(598))

Bujan, N., Cox, R., & Masselink, G. (2019). From fine sand to boulders: Examining the relationship between beach-face slope and sediment size. *Marine Geology*, 417, 106012. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106012>

Castelle B., Masselink G., Scott T., Stokes C., Koustantinou A., Marieu V. & Bujan S. (2021). Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach. *Geomorphology* 383, 107707. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107707>

EUCC-Atlantique, ARCOSLIFE, & Ecología Litoral. (2017). *Dunas de Cantabria Liencres - Somo 25 - 26 de abril 2017*. [Libro-guía]. Centro Atlántico EUCC. <https://santandereuccatles.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/06/taller-santander-es.pdf>

Ford, M. (2013). Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing Of Environment*, 135, 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.027>

Fundación Leonardo Torres Quevedo (1990). *Diseño óptimo de la Canal de navegación de acceso al Puerto de Santander* (Informe IH-90). IHCantabria.

Fundación Leonardo Torres Quevedo (1992). *Seguimiento y análisis de la evolución del sistema de playas Loredo-El Puntal y de la canal de navegación del Puerto de Santander, 1990-1992* (Informe IH-92). IHCantabria.

González, L. (2018). *Análisis de la evolución de las playas de Loredo, Somo y El Puntal* [Trabajo de fin de máster, Universidad de Cantabria]. Repositorio UCreá. <http://hdl.handle.net/10902/24649>



Graffin M., Taherkhani M., Leung M., Vitousek S., Kaminsky G. & Ruggiero P. (2023). Monitoring interdecadal coastal change along dissipative beaches via satellite imagery at regional scale. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, e42, 1–14 <https://doi.org/10.1017/cft.2023.30>

Hallermeier, R. J. (1980). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, 253-277. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(80\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(80)90022-8)

Kelly, J. T., & Gontz, A. M. (2019). Rapid Assessment of Shoreline Changes Induced by Tropical Cyclone Oma Using CubeSat Imagery in Southeast Queensland, Australia. *Journal Of Coastal Research*, 36(1), 72. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-19-00055.1>

Losada, M.A., Medina, R., Vidal, C., & Roldán, A. (1991). Historical Evolution and Morphological Analysis of “El Puntal” Spit, Santander (Spain). *Journal of Coastal Research*, 7(3), 711–722. <http://www.jstor.org/stable/4297887>

Palomar-Vázquez, J. M., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E., & Sánchez-García, E. (2018). SHOREX: A new tool for automatic and massive extraction of shorelines from Landsat and Sentinel 2 imagery. In *Proceedings of the 7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab18)*, 22-26 May, Santander, Spain.

Ribamontán al Mar. (2023). Dossier Turismo Surf: Ribamontán al Mar, Cantabria. Recuperado de https://surfatoracosta.es/wp-content/uploads/sites/4/2017/05/2023_Dossier_Turismo-SURF-Ribamontan-al-Mar_Cantabria.pdf

Sanjosé, J. J. de, Serrano, E., Berenguer, F., González-Trueba, J. J., Gómez-Lende, M., González-García, M., & Guerrero-Castro, M. (2016). *Evolución histórica y actual de la línea de costa en la playa de Somo (Cantabria), mediante el empleo de la fotogrametría aérea y escáner láser terrestre*. Cuaternario y Geomorfología, 30(1-2), 119-130. <https://doi.org/10.17735/cyg.v30i1-2.41464>

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573-588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>

Vidal, C., Losada, M. Á., Medina, R., & Losada, I. J. (1995). Modelos de morfodinámica de playas. *Ingeniería del Agua*, 2(1), 55-74. <https://doi.org/10.4995/ia.1995.2665>

Vitousek S, Buscombe D, Vos K, Barnard PL, Ritchie AC and Warrick JA (2023). The future of coastal monitoring through satellite remote sensing. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, e10, 1–18 <https://doi.org/10.1017/cft.2022.4>