

Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio de eventos extremos de viento en  
la Bahía de Cádiz

Autor: Iván Megías Muñoz

Tutores: Carmen Zarzuelo Romero  
Alejandro López Ruiz

Dpto. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# **Estudio de eventos extremos de viento en la Bahía de Cádiz**

Autor:

Iván Megías Muñoz

Tutores:

Carmen Zarzuelo Romero

Profesor Titular

Alejandro López Ruiz

Profesor Titular

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Máster: Estudio de eventos extremos de viento en la Bahía de Cádiz

Autor: Iván Megías Muñoz

Tutores: Carmen Zarzuelo Romero  
Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal



# Resumen

---

La morfodinámica de los estuarios esta dominada por los efectos de las mareas, los vientos y el oleaje sobre el transporte de sedimentos. La combinación de estos motores de transporte y la geometría del estuario, así como la granulometría y los sacos de sedimentos disponibles en el fondo marino, condicionan el transporte del sedimento y el balance del volumen de transporte en los distintos escenarios.

Para el caso de la Bahía de Cádiz, el transporte del sedimento está fuertemente dominado por las mareas, en combinación con los efectos del viento, dependiendo de la frecuencia de sucesión de estos eventos de viento y su dirección predominante.

Para el presente estudio se ha empleado un modelo numérico de alta resolución tridimensional, DELFT3D, incluyendo los módulos hidrodinámico y morfodinámico previamente calibrado y validado (Zarzuelo, López-Ruiz, D'Alpaos, Carniello, & Ortega-Sánchez, 2018), mediante el cual se modeliza el comportamiento del transporte del sedimento en la Bahía de Cádiz en distintos escenarios extremales y medios creados de manera sintética.

El estudio con el modelo numérico de cálculo se centra en la simulación y análisis de diez escenarios sintéticos creados mediante la combinación de casos de vientos extremales y medios, con direcciones predominantes de levante y poniente, con casos de marea máxima viva y muerta.

Los casos más desfavorables de viento y marea se han seleccionado entre los registros disponibles para la boya representativa más cercana (Boya 2342 de Puertos del Estado), seleccionada para la ubicación de estudio. Del mismo modo, se han seleccionado los casos medios en estos registros, realizando un estudio del clima marítimo, para las mismas direcciones predominantes de viento que los eventos extremales seleccionados.

Cabe destacar que, de manera sintética, se han hecho coincidir los picos de viento en los eventos extremales con los instantes de mayor y menor carrera de marea en las combinaciones de escenarios de simulación. La duración establecida para estos escenarios es de cinco días, definiendo así los eventos de tormenta habituales en la bahía, con una duración de simulación de una semana, con un día de calentamiento antes de la aparición de la tormenta y, con un día final de estabilización del modelo hacia comportamiento medio. Además, para los modelos se han empleado resultados previos a modo de calentamiento, con un mes de resultados en la malla de cálculo, que hacen más estables y robustas las simulaciones.

De las simulaciones y, del estudio de sus variables, se ha obtenido un gran volumen de resultados en la combinación de los escenarios sintéticos definidos, pudiendo evaluar el comportamiento del sedimento en los sacos definidos en la Bahía de Cádiz ante eventos extremos de viento.

Puede destacarse que, para eventos extremos de viento predominante de poniente, el transporte de sedimento está dominado de manera generalizada por los efectos de la marea, siendo más acentuados en mareas vivas, transportándose el sedimento hacia el interior de la bahía, con tendencia de sedimentación en la ensenada interior.

Para eventos extremos de viento predominante de levante, el transporte de sedimento está dominado principalmente por el viento en los sacos exteriores, así como mantiene un equilibrio entre las aportaciones de marea y viento en el transporte en los sacos interiores a la bahía, con una tendencia sedimentación en estos sacos, a excepción de los caños de Sancti Petri, donde se produce la fuga de sedimento hacia la Bahía Interior a través del Caño de la Carraca y, hacia su propia desembocadura.

Asimismo, los objetos del presente estudio amplían el alcance de desarrollo de un modelo predictivo que pueda resultar útil para la evaluación de futuros escenarios relacionados con las variaciones morfodinámicas en la bahía y, los posibles escenarios relacionados con el cambio climático, siendo útil este trabajo sobre los modelos de combinación de escenarios registrados y sintéticos extremales en combinación con la sucesión de mareas máximas viva y muerta, es decir, con los casos de mayor y menor carrera de marea en la bahía.



# Abstract

---

The morphodynamic of estuaries is dominated by the effects of tides, winds and waves on sediment transport. The combination of these transport drivers and the geometry of the estuary, as well as the granulometry and the sediment bags available on the seabed, condition the sediment transport and the balance of the sediment volume mobilized in the different scenarios.

In the case of the Cádiz Bay, sediment transport is strongly dominated by tides, in combination with the effects of wind, depending on the recurrence interval of these wind events and their main direction.

In this study, a high-resolution three-dimensional numerical model, DELFT3D, has been used, including the hydrodynamic and morphodynamic modules previously calibrated and validated (Zarzuelo, López-Ruiz, D'Alpaos, Carniello, & Ortega-Sánchez, 2018), through which the behaviour of sediment transport in the Cádiz Bay in different extreme and recurrent scenarios, created synthetically, is modeled and simulated.

The study with the numerical model focuses on the simulation and analysis of ten synthetic scenarios created by combining cases of extreme and average winds, with East and West as main directions, with cases of maximum spring and neap tide.

The most unfavourable wind and tide cases have been selected from the available records of the nearest representative buoy (Boya 2342 from Puertos del Estado), selected for the study location. Likewise, the most recurrent cases in these records have been selected, for the same main wind directions as the extreme events selected.

It should be noted that, in a synthetically way, the wind peaks in the extreme events have been made to coincide with the maximum and minimum neap and spring tidal range, in the combinations of the simulation scenarios. The simulation interval established for these scenarios is five days, thus defining the usual storm events in the bay, with a simulation time of one week, with a spin-up day before the appearance of the storm and, with a final day of stabilization of the model towards recurrent behaviour. Furthermore, previous results have been used for the simulations as a warm-up, with one month of results in the calculation mesh, which make these simulations more stable and solid.

From the simulations and the study of its variables, a large volume of results has been obtained in the combination of the defined synthetic scenarios, being able to evaluate the behaviour of the sediment in the bags defined in the Cádiz Bay in the extreme wind events.

It can be highlighted that, for extreme West events, sediment transport is generally dominated by tidal effects, being more accentuated in spring tides, transporting the sediment towards the interior of the bay, with a sedimentation tendency in the inner cove.

For extreme East events, sediment transport is mainly dominated by the wind in the outer bags, as well as maintaining a balance between the tidal and wind contributions in the transport in the inner bags to the bay, with a sedimentation tendency in these bags, with the exception of Sancti Petri creeks, where sediment leaks towards the interior bay through Carracas creek and towards the Sancti Petri own outlet.

Likewise, the objects of the present study expand the scope of development of a predictive model that may be useful for the evaluation of future scenarios related to morphodynamic variations in the bay, and possible scenarios related to climate change, being useful on the models combining recorded and synthetic extreme scenarios in combination with cases of maximum spring and neap tides.



# Índice

<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	1
<b>2 Descripción de la zona de estudio</b>	<b>3</b>
2.1 La Bahía de Cádiz	3
2.2 Importancia del comportamiento del sedimento en la bahía	4
<b>3 Metodología</b>	<b>9</b>
3.1 Estudio del clima marítimo	9
3.1.1 Datos de partida	9
3.1.2 Descripción general del clima para la definición de los escenarios	9
3.1.2.1 Estudio de los datos de la Boya 2342	10
3.1.2.2 Estudio de los datos del punto SIMAR seleccionado	13
3.1.2.3 Comparación de resultados y selección de datos para la definición de escenarios	16
3.1.3 Definición de regímenes medio y extremal	16
3.1.3.1 Definición del evento medio y barrido de selección en el registro de datos de la boya	16
3.1.3.2 Definición del evento extremal y barrido de selección en el registro de datos de la boya	17
3.1.3.3 Análisis del clima marítimo particularizado para registros predominantes de levante	17
3.1.3.4 Análisis del clima marítimo particularizado para registros predominantes de poniente	19
3.1.3.5 Selección de eventos medios predominantes de levante y poniente	20
3.1.3.6 Selección de eventos extremales predominantes de levante y poniente	22
3.1.4 Definición de la variación del nivel del mar en los casos de estudio	25
3.1.4.1 Estudio del emplazamiento con herramienta TMD	25
3.1.4.2 Comparación de los resultados obtenidos con los del modelo original de partida	26
3.1.5 Mareas vivas y muertas más desfavorables	26
3.1.6 Esquema de escenarios y sus casos de estudio	26
3.2 Modelo numérico	27
3.2.1 Modelo original de estudio	28
3.2.1.1 Dominio y mallado	28
3.2.1.2 Procesos	30
3.2.1.3 Condiciones de contorno	30
3.2.1.4 Condiciones iniciales	30
3.2.1.5 Parámetros físicos	30
3.2.1.6 Secciones de control, descargas y aportaciones fluviales	31
3.2.2 Modelo de cálculo adaptado	32
3.2.3 Definición de escenarios y casos de estudio	33
3.2.3.1 Modelo de calentamiento (Restart file)	33
3.2.3.2 Definición de los escenarios extremales	33
3.2.3.3 Definición de los escenarios medios	33
3.2.4 Análisis de sensibilidad del modelo numérico	34
3.2.4.1 Influencia del paso de tiempo de cálculo y del tiempo de <i>spin-up</i> en morfología	34
3.2.4.2 Influencia en los escenarios de cálculo	34
3.3 Resultados obtenidos	35
3.3.1 Variables de estudio	35
3.3.2 Secciones de control	35

<b>4</b>	<b>Análisis de los resultados</b>	<b>37</b>
4.1	<i>Resultados a escala global</i>	37
4.1.1	Mapas de transporte de sedimentos	37
4.1.1.1	Casos de estudio con viento predominante poniente	37
4.1.1.2	Caso de estudio con viento predominante levante	38
4.1.2	Mapas de erosión y sedimentación	39
4.1.2.1	Casos de estudio con viento predominante poniente	39
4.1.2.2	Casos de estudio con viento predominante levante	40
4.1.3	Definición de las secciones de control	42
4.1.4	Transporte de sedimentos: análisis del balance instantáneo de sedimentos	43
4.1.4.1	Casos de estudio con viento predominante poniente	43
4.1.4.2	Casos de estudio con viento predominante levante	44
4.1.4.3	Resumen de los resultados del transporte instantáneo de sedimento en las secciones	45
4.1.5	Transporte de sedimentos: análisis del balance acumulado de sedimentos	47
4.1.5.1	Casos de estudio con viento predominante poniente	47
4.1.5.2	Casos de estudio con viento predominante levante	48
4.1.5.3	Resumen de los resultados del transporte acumulado de sedimento en las secciones	49
4.1.6	Análisis del volumen instantáneo de agua	50
4.1.6.1	Casos de estudio con viento predominante poniente	50
4.1.6.2	Casos de estudio con viento predominante levante	51
4.1.6.3	Resumen de los resultados del volumen instantáneo de agua en las secciones	52
4.1.7	Análisis del volumen acumulado de agua	52
4.1.7.1	Casos de estudio con viento predominante poniente	52
4.1.7.2	Casos de estudio con viento predominante levante	53
4.1.7.3	Resumen de los resultados del volumen acumulado de agua en las secciones	54
4.2	<i>Balance total acumulado del transporte de sedimentos entre secciones</i>	55
4.2.1	Casos de estudio con viento predominante poniente	55
4.2.2	Casos de estudio con viento predominante levante	57
4.3	<i>Estudio de la dominancia entre marea y viento sobre el transporte de sedimentos</i>	60
4.3.1	Definición del Índice de Dominancia "DI"	60
4.3.2	Análisis de la dominancia entre marea y viento en los escenarios de poniente	60
4.3.3	Análisis de la dominancia entre marea y viento en los escenarios de levante	61
4.4	<i>Mapa del balance total acumulado de sedimentos entre sacos</i>	63
4.4.1	Casos de estudio en escenarios de poniente	63
4.4.2	Casos de estudio en escenarios de levante	64
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>67</b>
5.1	<i>Sobre el estudio global de circulación de corrientes y sedimentos</i>	67
5.2	<i>Sobre el estudio de las secciones de control</i>	68
5.3	<i>Sobre el estudio longitudinal del transporte de sedimentos entre sacos</i>	68
5.4	<i>Sobre la dominancia de marea y viento en el transporte de sedimentos</i>	69
	<b>Referencias</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 4-1. Resumen de los resultados del transporte instantáneo del sedimento en las secciones	46
Tabla 4-2. Resumen de los resultados del transporte acumulado del sedimento en las secciones	49
Tabla 4-3. Resumen de los resultados del volumen instantáneo de agua en las secciones	52
Tabla 4-4. Resumen de los resultados del volumen acumulado de agua en las secciones	55
Tabla 4-5. Resumen de los resultados del balance de volumen de sedimento transportado en los sacos para los escenarios con viento predominante de poniente	57
Tabla 4-6. Resumen de los resultados del balance de volumen de sedimento transportado en los sacos para los escenarios con viento predominante de levante	59



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. (a) Ubicación de la zona de estudio de las líneas de investigación relacionadas con el presente trabajo. (c) Ubicación de la boya 2342 y contornos de la malla del modelo original (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021)	3
Figura 2-2. Esquema de los sacos de la Bahía de Cádiz. Las flechas indican la dirección de incidencia de la marea en el llenado de los sacos interiores a la bahía. La cruz negra indica la situación de convergencia de la marea en el llenado de la bahía (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021)	4
Figura 2-3. Aproximos históricos del acceso a Sancti Petri, 1973 (Instituto Hidrográfico de la Marina)	6
Figura 2-4. Batimetría de la canal de navegación de Sancti Petri (Agencia Pública de Puertos de Andalucía)	7
Figura 3-1. Registro de datos de viento disponibles en la Boya 2342.	10
Figura 3-2. Gráfico de dispersión de eventos de viento y rosa de viento resultante en la Boya 2342.	10
Figura 3-3. Histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento en la Boya 2342.	11
Figura 3-4. Ajuste de las funciones de distribución seleccionadas para los datos de viento de la Boya 2342.	11
Figura 3-5. Calidad del ajuste de las funciones de distribución para los datos de viento de la Boya 2342.	11
Figura 3-6. Ajuste de la Distribución Weibull para los datos de velocidad del viento de la Boya 2342.	12
Figura 3-7. Periodo de retorno según ajuste de la distribución Weibull para los datos de velocidad del viento de los registros de la Boya 2342.	12
Figura 3-8. Registro de datos de viento disponibles en el punto SIMAR 6000048.	13
Figura 3-9. Gráfico de dispersión de eventos de viento y rosa de viento resultante en el punto SIMAR.	13
Figura 3-10. Histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento en el punto SIMAR.	14
Figura 3-11. Ajuste de funciones de distribución seleccionadas para los datos de viento en el punto SIMAR.	14
Figura 3-12. Calidad del ajuste de las funciones de distribución para los datos de viento en el punto SIMAR.	14
Figura 3-13. Ajuste de la Distribución Weibull para los datos de velocidad del viento en el punto SIMAR.	15
Figura 3-14. Periodo de retorno según ajuste de la distribución Weibull para los datos de velocidad del viento proporcionados por el punto SIMAR.	15
Figura 3-15. Comparación del periodo de retorno de la velocidad del viento según los datos disponibles de estudio para la Boya 2342 y el punto SIMAR 6000048.	16

Figura 3-16. Histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento predominantes de levante.	17
Figura 3-17. Gráfico de dispersión y rosa de viento resultante en eventos predominantes de levante.	18
Figura 3-18. POT en los registros predominantes de levante de la serie completa de la Boya 2342.	18
Figura 3-19. Histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento predominantes de poniente.	19
Figura 3-20. Gráfico de dispersión y rosa de viento resultante en eventos predominantes de poniente.	19
Figura 3-21. POT en los registros predominantes de poniente de la serie completa de la Boya 2342.	20
Figura 3-22. Velocidad y dirección del viento del escenario medio predominante de poniente seleccionado.	21
Figura 3-23. Altura de ola, periodo y dirección del oleaje del escenario medio predominante de poniente.	21
Figura 3-24. Velocidad y dirección del viento del escenario medio predominante de levante seleccionado.	22
Figura 3-25. Altura de ola, periodo y dirección del oleaje del escenario medio predominante de levante.	22
Figura 3-26. Velocidad y dirección del viento del escenario extremal predominante de poniente seleccionado.	23
Figura 3-27. Altura de ola, periodo y dirección del oleaje del escenario extremal predominante de poniente.	23
Figura 3-28. Velocidad y dirección del viento del escenario extremal predominante de levante seleccionado.	24
Figura 3-29. Altura de ola, periodo y dirección del oleaje del escenario extremal predominante de levante.	24
Figura 3-30. Interfaz de la herramienta TMD y selección de parámetros para la predicción de los armónicos de marea en el intervalo de tiempo establecido para la comparación con el nivel del mar del modelo original.	25
Figura 3-31. Resultados de la predicción del nivel del mar con la herramienta TMD en el intervalo de tiempo establecido para la comparación con el nivel de mar del modelo original.	25
Figura 3-32. Comparación del nivel del mar entre los datos del modelo original (rojo) y las predicciones (azul) realizadas con la herramienta (TMD) en los meses de sucesión de las menores y mayores carreras de marea.	26
Figura 3-33. Dominio de cálculo del modelo original y contornos.	29
Figura 3-34. Definición del mallado del modelo original.	29
Figura 3-35. Mapa de los sacos de las dos fracciones principales de sedimentos modelizadas.	31
Figura 3-36. Ubicación de las secciones de control y los puntos de descarga fluvial sobre la batimetría.	32
Figura 4-1. Mapa de valores máximos del transporte total de sedimentos ( $m^3/s/m$ ) durante las simulaciones, para los casos con viento predominante de poniente. Las flechas indican la dirección y magnitud media máxima de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en las simulaciones.	37
Figura 4-2. Mapa de valores máximos del transporte total de sedimentos ( $m^3/s/m$ ) durante las simulaciones, para los casos con viento predominante de levante. Las flechas indican la dirección y magnitud media máxima de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en las simulaciones.	38
Figura 4-3. Mapa de valores máximos de erosión (negativos) y sedimentación (positivos) medidos en cm durante las simulaciones, para los casos con viento predominante de poniente. Las flechas indican la dirección y magnitud media máxima de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en las simulaciones.	39

Figura 4-4. Mapa de valores máximos de erosión (negativos) y sedimentación (positivos) medidos en cm durante las simulaciones, para los casos con viento predominante de levante. Las flechas indican la dirección y magnitud media máxima de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en las simulaciones.	41
Figura 4-5. Mapa de las secciones de control en planta sobre la batimetría (con gráfico tridimensional). Las flechas en rojo indican el sentido de la normal del plano de la sección.	42
Figura 4-6. Gráficos del transporte instantáneo de la fracción total de sedimentos ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de poniente.	43
Figura 4-7. Gráficos del transporte instantáneo de la fracción total de sedimentos ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de levante.	44
Figura 4-8. Gráficos del transporte acumulado de la fracción total de sedimentos ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de poniente.	47
Figura 4-9. Gráficos del transporte acumulado de la fracción total de sedimentos ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de levante.	48
Figura 4-10. Gráficos del transporte instantáneo del volumen de agua ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de poniente.	50
Figura 4-11. Gráficos del transporte instantáneo del volumen de agua ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de levante.	51
Figura 4-12. Gráficos del transporte acumulado del volumen de agua ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de poniente.	53
Figura 4-13. Gráficos del transporte acumulado del volumen de agua ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de levante.	54
Figura 4-14. Gráficos del balance del transporte total acumulado del sedimento ( $m^3/s$ ) entre secciones (balance del transporte de la fracción total del sedimento en los sacos) para los casos con viento predominante poniente.	55
Figura 4-15. Gráficos del balance del transporte total acumulado del sedimento ( $m^3/s$ ) entre secciones (balance del transporte de la fracción total del sedimento en los sacos) para los casos con viento predominante levante.	58
Figura 4-16. Mapas del Índice de Dominancia (DI) entre viento y marea en el transporte de la fracción total del sedimento para los escenarios con viento predominante de poniente. Las flechas azules muestran la dirección y magnitud de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en los casos medios y, las flechas rojas, la dirección y magnitud de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en los casos extremales.	60
Figura 4-17. Mapas del Índice de Dominancia (DI) entre viento y marea en el transporte de la fracción total del sedimento para los escenarios con viento predominante de levante. Las flechas azules muestran la dirección y magnitud de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en los casos medios y, las flechas rojas, la dirección y magnitud de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en los casos extremales.	61
Figura 4-18. Balance del volumen total acumulado del sedimento ( $hm^3$ ) entre sacos, evaluado entre los escenarios de poniente, mostrados sobre el mapa del Índice de Dominancia entre viento y marea. Las flechas rojas indican la dirección del balance del sedimento entre los sacos. Los números en negro indican la aportación de sedimento a través de las secciones en combinación de marea máxima y viento. Los números en verde indican la aportación de sedimento, únicamente debida al efecto de marea máxima.	63
Figura 4-19. Balance del volumen total acumulado del sedimento ( $hm^3$ ) entre sacos, evaluado entre los escenarios de levante, mostrados sobre el mapa del Índice de Dominancia entre viento y marea. Las flechas rojas indican la dirección del balance del sedimento entre los sacos. Los números en negro indican la aportación de sedimento a través de las secciones en combinación de marea máxima y viento. Los números en verde indican la aportación de sedimento, únicamente debida al efecto de marea máxima.	65



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Motivación

El presente trabajo académico tiene como motivaciones principales dos ramas de estudio y análisis basadas en las líneas de investigación seguidas por los tutores de este (Zarzuelo, Díez-Minguito, Ortega-Sánchez, López-Ruiz, & Losada, 2015), (Zarzuelo, López-Ruiz, Díez-Minguito, & Ortega-Sánchez, 2017) y (Zarzuelo, López-Ruiz, D'Alpaos, Carniello, & Ortega-Sánchez, 2018), continuando el estudio del comportamiento y de los fenómenos que controlan el sedimento en la Bahía de Cádiz.

La motivación principal del presente estudio reside en la importancia de conocer los agentes forzadores del transporte de sedimentos que determinan el esquema morfodinámico en la bahía.

El presente estudio se basa en la disposición de herramientas para analizar y valorar la tendencia evolutiva del sedimento en la zona de estudio, para la cual, en la actualidad se observan varios problemas relacionados con la sedimentación y aterramiento, así como se observa una tendencia generalizada de aterramiento en las márgenes de la ensenada de la Bahía Interior. Estos aspectos serán expuestos, para su conocimiento particular, en el siguiente capítulo.

Por ello, se realiza el estudio sobre la Bahía de Cádiz a través de un modelo de cálculo hidrodinámico y morfodinámico de alta resolución tridimensional, DELFT3D, definido en estudios previos (Zarzuelo, López-Ruiz, D'Alpaos, Carniello, & Ortega-Sánchez, 2018), para eventos extremos y medios de viento, en combinación de los efectos de la máximas mareas vivas y muertas.

Del mismo modo, con el presente estudio se consigue el enriquecimiento del modelo de análisis de partida empleado en investigaciones anteriores (Zarzuelo, López-Ruiz, D'Alpaos, Carniello, & Ortega-Sánchez, 2018), así como en consonancia con otras nuevas líneas de investigación abiertas en el estudio de los efectos del cambio climático sobre la Bahía de Cádiz.

Por ello, los resultados obtenidos en el presente estudio permitirán establecer nuevos datos y puntos de partida para nuevos estudios con horizontes de análisis a largo plazo. Por ejemplo, la evaluación de hipotéticos eventos sintéticos similares a los definidos para el presente estudio, pero extendidos a los escenarios horizonte RCP marcados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su informe más actual.

## 1.2 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es el estudio del transporte del sedimento en la Bahía de Cádiz mediante el análisis de su comportamiento ante eventos extremos de viento, para conocer la tendencia evolutiva del sedimento en la bahía ante la sucesión de eventos extremo.

Asimismo, se ha ampliado el objetivo de estudio a eventos medios de viento, en las direcciones predominantes de levante y poniente en la zona de estudio. Esto ha permitido comparar los resultados con distinta probabilidad de ocurrencia, pudiendo obtener un factor de escala entre resultados en algunos de los casos.

La metodología seguida para alcanzar los objetivos del presente estudio es la siguiente:

- Realización de un estudio del clima marítimo para la Boya 2342 de Puertos del Estado y, para el punto SIMAR 6000048, siendo estas fuentes las más representativas del estado de mar en el contorno abierto de la malla del modelo de cálculo empleado en el estudio.
- Selección de los eventos extremales y medios del estudio del clima marítimo realizado, con vientos predominantes de levante y poniente.
- Definición de los escenarios sintéticos de simulación, los cuales son:
  - Escenario extremal con viento predominante de levante:
    - Caso 1: Combinación del evento con el registro máximo de marea muerta.
    - Caso 2: Combinación del evento con el registro máximo de marea viva.
  - Escenario extremal con viento predominante de poniente:
    - Caso 3: Combinación del evento con el registro máximo de marea muerta.
    - Caso 4: Combinación del evento con el registro máximo de marea viva.
  - Escenario medio con viento predominante de levante:
    - Caso 5: Combinación del evento con el registro máximo de marea muerta.
    - Caso 6: Combinación del evento con el registro máximo de marea viva.
  - Escenario medio con viento predominante de poniente:
    - Caso 7: Combinación del evento con el registro máximo de marea muerta.
    - Caso 8: Combinación del evento con el registro máximo de marea viva.
  - Escenario único sin consideración del viento en la simulación:
    - Caso 9: Simulación con registro máximo de marea muerta.
    - Caso 10: Simulación con registro máximo de marea viva.
- Adaptación del modelo hidrodinámico y morfodinámico DELFT3D a los escenarios planteados. Análisis de sensibilidad del modelo y ejecución de modelos previos de calentamiento.
- Establecimiento de las variables objeto de estudio: transporte del sedimento (fracción total), volumen de agua, velocidad y dirección de las corrientes y, variación de la batimetría (erosión/sedimentación).
- Simulación de los escenarios definidos y tratamiento de los resultados mediante herramientas de programación, cálculo numérico y análisis de datos.
- Análisis de los resultados y conclusiones.

Con todo lo que antecede, se obtienen los resultados de transporte de la fracción total de sedimento (cohesiva y no cohesiva) en los escenarios establecidos, pudiendo alcanzar una serie de conclusiones en el comportamiento de la Bahía de Cádiz ante la sucesión de eventos extremos de viento, en combinación con casos de mareas máximas vivas y muertas.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 La Bahía de Cádiz

La Bahía de Cádiz es un estuario de llanura costera, con un área total de 70 km<sup>2</sup>. Las mareas son principalmente semidiurnas, con rangos entre los 2 y 4 metros, con corrientes superiores a los 1.50 m/s (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021).

A escala global, la bahía se compone por tres cuencas abiertas: cuenca exterior, constricción y cuenta interior (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021) (A, B y C, respectivamente, según se muestran en la siguiente figura). Además, la bahía cuenta con dos sistemas de arroyos: Río Guadalete y Río San Pedro.

La cuenca interior está caracterizada por contar con pendientes suaves, disponiendo de una profundidad media de 8 m. En los casos de mareas bajas, el 50% de su superficie aflora sobre el nivel del mar, descubriendo las marismas bajas que están cortadas por profundos canales de marea, siendo el central conocido como Caño de la Carraca (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021).

La constricción es el denominado como Canal de Puntales, que cuenta con 18 km de largo y 1.3 km de ancho, con profundidades máximas de 18 m. Este canal sirve de conexión entre ambas cuencas, conectando la cuenca exterior, con 15 m de profundidad media, de manera directa al mar abierto.

Asimismo, la cuenca interior dispone una doble conexión con dos sistemas de arroyos, con los caños de Carraca y Sancti Petri, con aguas intermareales y llanuras submareales de hasta 2 metros de profundidad, cortados por los canales principales de los caños mencionados, con hasta 8 metros de profundidad, que descargan en el Océano Atlántico.

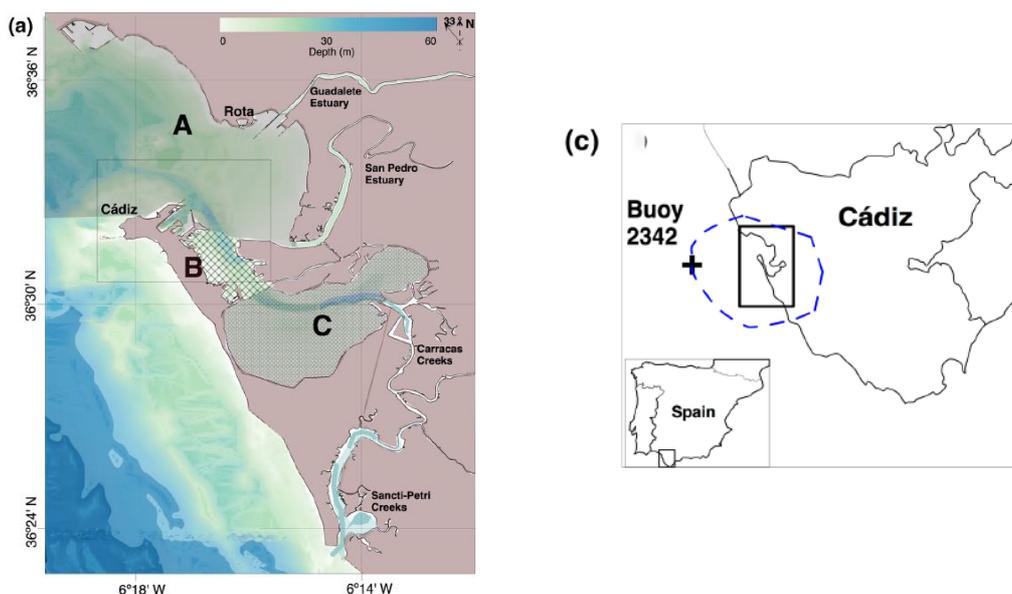


Figura 2-1. (a) Ubicación de la zona de estudio de las líneas de investigación relacionadas con el presente trabajo. (c) Ubicación de la boya 2342 y contornos de la malla del modelo original (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021)

## 2.2 Importancia del comportamiento del sedimento en la bahía

La Bahía de Cádiz supone un motor local a nivel ecológico, económico, turístico e histórico, siendo a la par un fuerte atractivo marítimo, con una fuerte dependencia del sector terciario y con gran influencia histórica y patrimonial, y siendo a su vez un pulmón biológico, con el Parque Natural Bahía de Cádiz y las marismas características del estuario, las cuales necesitan ser a su vez integradas y protegidas de las actuaciones y nuevos desarrollos de otros vectores influyentes en el comportamiento del conjunto del estuario.

Por este motivo es de vital importancia para la zona conocer el comportamiento del transporte del sedimento y, disponer de herramientas que permitan predecir de manera futura escenarios basados en las tendencias de cambio climático y otros vectores que puedan modificar estas mismas.

De acuerdo con lo comentado en el punto anterior, se establece como objetivo del presente estudio, mediante la creación de posibles eventos extremales sintéticos, el análisis de los efectos del transporte del sedimento en la bahía, tanto en las zonas exteriores como en las interiores.

De este modo, siguiendo las directrices de investigaciones previas sobre el modelo de estudio (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021), las zonas A-B-C de la Bahía de Cádiz mostradas en la figura del punto anterior, han sido ampliadas para incorporar al modelo de comportamiento la zona de los caños de la Carraca y Sancti Petri.

Se muestra en la siguiente figura la definición de los sacos principales de estudio del balance del volumen del sedimento en la Bahía de Cádiz.

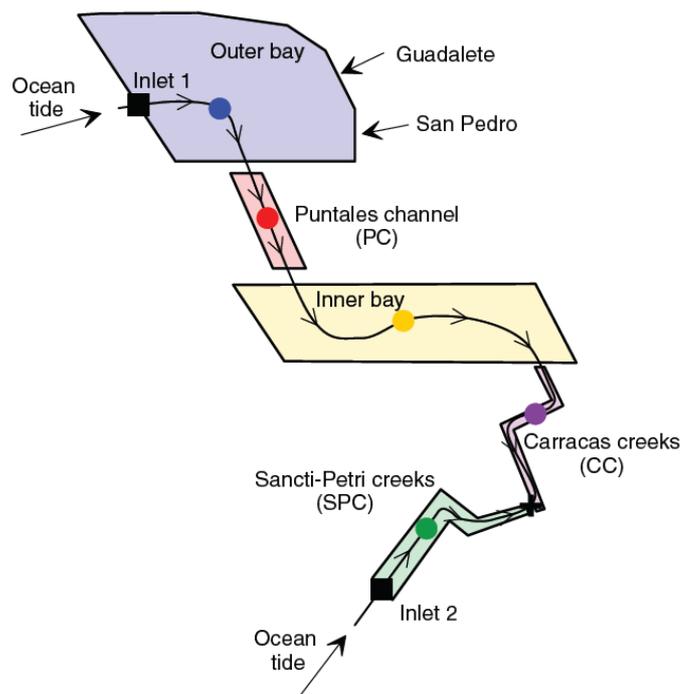


Figura 2-2. Esquema de los sacos de la Bahía de Cádiz. Las flechas indican la dirección de incidencia de la marea en el llenado de los sacos interiores a la bahía. La cruz negra indica la situación de convergencia de la marea en el llenado de la bahía (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021)

En relación a la relevancia del comportamiento del sedimento comentada anteriormente, cabe destacar que, en la actualidad, existe una problemática de sedimentación en el acceso a la canal de navegación de Sancti Petri a través de la zona entre la Punta de las Piedras y la Playa de Sancti Petri, que da acceso a los Puertos Deportivos de Sancti Petri (Chiclana) y Gallineras (San Fernando). Esta problemática radica en la intención de aumentar el calado disponible en el acceso a la canal de navegación a través de dragados de mantenimiento interanuales, en una zona con tendencia a la sedimentación debida a la influencia de la pluma de descarga en la desembocadura del caño de Sancti Petri, dominada de manera preferente por los efectos de marea.

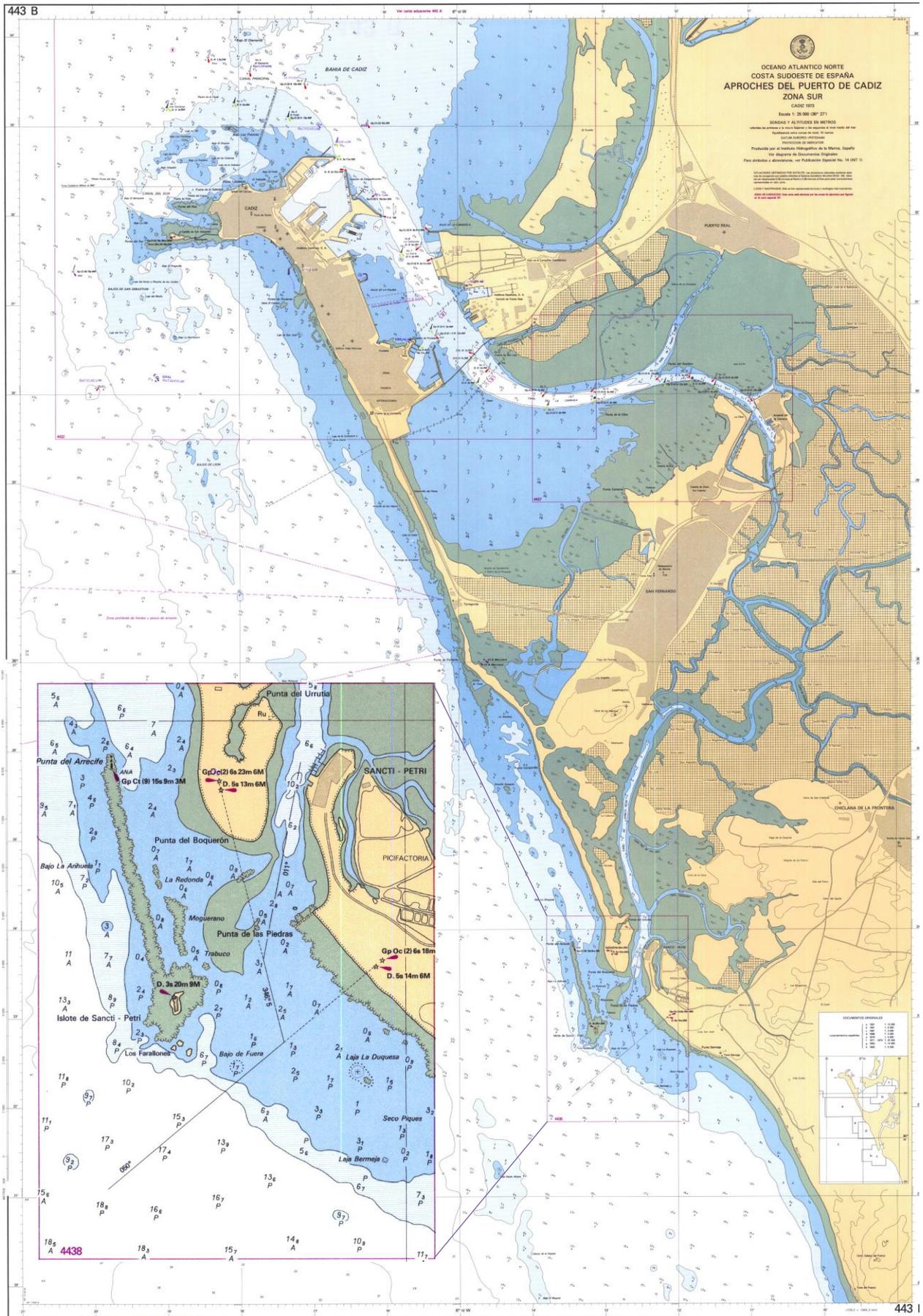


Figura 2-3. Aproxos históricos del acceso a Sancti Petri, 1973 (Instituto Hidrográfico de la Marina)

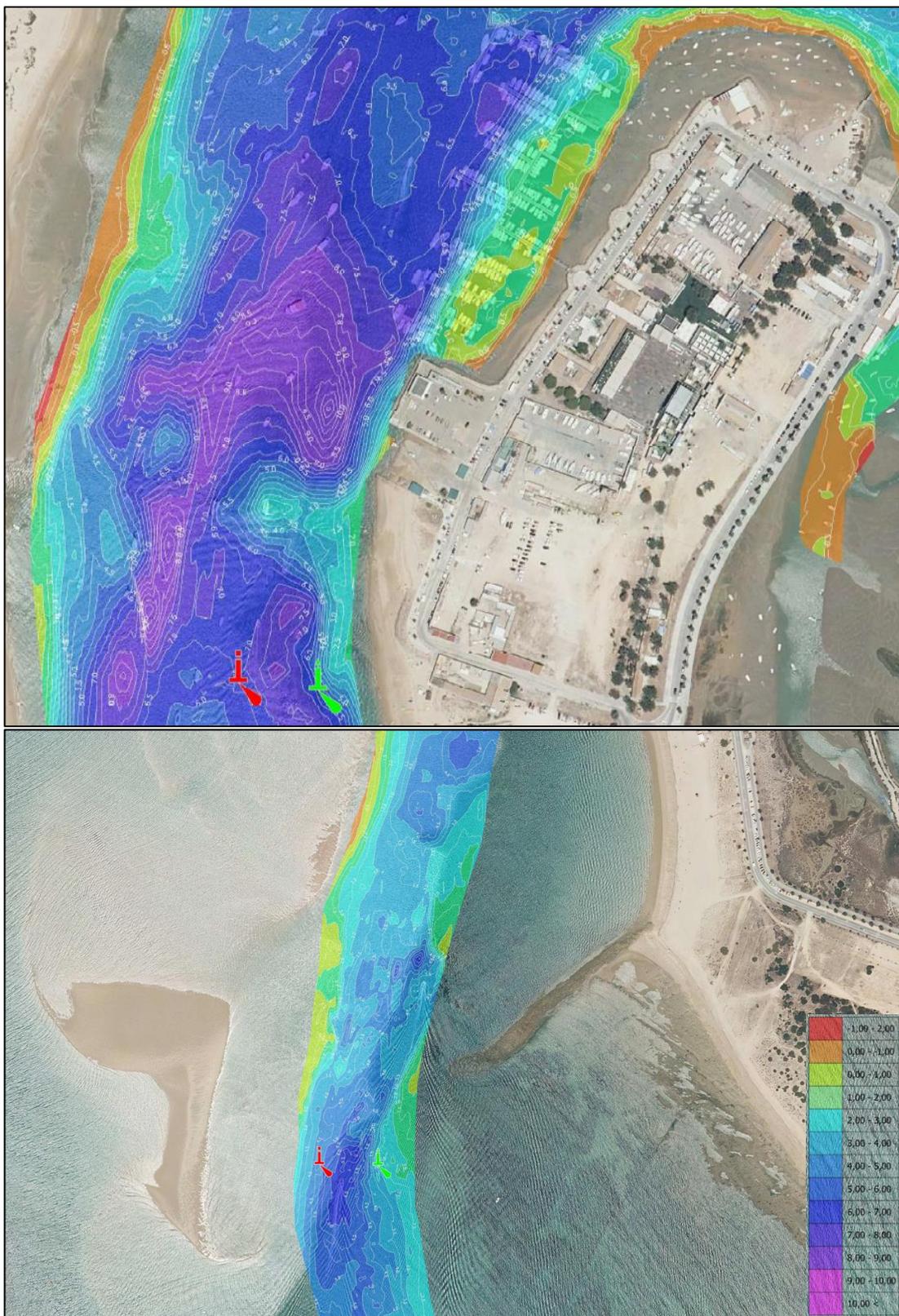


Figura 2-4. Batimetría de la canal de navegación de Sancti Petri (Agencia Pública de Puertos de Andalucía)

Puede comprobarse que, de manera histórica y, en consonancia con la necesidad del aumento de calado en la canal navegable de acceso a Sancti Petri y Gallineras, la cuota de dragado en la batimetría en la zona de acceso es del orden de 2 a 3 m, siendo en 1973 del orden de 2 m de calado disponible en el acceso a la canal y, según la batimetría a fecha de 2023 procedente de la APPA, tras el último dragado la batimetría presenta un calado de 3.5 a 6 m en la zona central del canal de acceso.

## 3 METODOLOGÍA

---

### 3.1 Estudio del clima marítimo

En el presente apartado se desarrolla el estudio del clima marítimo realizado con objeto de obtener los casos de viento extremos y medios, empleados para la definición de los escenarios de estudio. Para ello se utilizan los datos disponibles del registro de la Boya 2342 del Golfo de Cádiz y los datos del punto SIMAR 6000048, empleado para su contraste y comprobación.

Asimismo, se realizará la comparación entre los datos disponibles del modelo original (Zarzuelo, López-Ruiz, D'Alpaos, Carniello, & Ortega-Sánchez, 2018) y los nuevos estimados a partir de la Boya y el punto SIMAR, en materia de viento y oleaje. Del mismo modo, se llevará a cabo la comparación de los niveles de mar utilizados en el modelo original y los valores estimados para estos mediante otras herramientas.

#### 3.1.1 Datos de partida

De las directrices de los estudios previos realizados sobre el modelo original de partida, entre otros datos empleados para el condicionamiento de los modelos de simulación del presente estudio, se dispone de los datos aportados por las series de registro de la Boya 2342 de la Bahía de Cádiz, tomando estos datos como base para la definición de los escenarios de viento de los modelos.

Se ha realizado un estudio de la Boya 2342, disponiendo de datos de registros desde el año 1996 hasta el año 2021, existiendo varios huecos notorios sin registro en la serie completa, concretamente en los años 1998, 1999, 2003, 2004, 2006, 2011 y 2015, los cuales han sido objeto de contraste y solución con relleno mediante puntos simulados.

De este modo, se ha estudiado el punto SIMAR más cercanos a la Boya 2342 y a la zona de estudio, con objeto de completar los registros de la boya datos hasta el año 2021. En concreto, el punto SIMAR empleado para las operaciones de contraste, comparación y sustitución ha sido el 6000048 de Puertos del Estado.

Por tanto, con el objetivo de continuar con un condicionamiento similar en el modelo original de partida, con el fin de obtener resultados sobre un modelo testado y similar al modelo original empleado en otras líneas de investigación realizadas sobre este, se emplearán los datos de la Boya 2342 para la definición de los escenarios de estudio.

Finalmente, se ha realizado el estudio del punto SIMAR para completar y mejorar la serie de registros de la boya, pero como puede comprobarse en el siguiente apartado, la relación entre las probabilidades de ocurrencia de los registros reales de la boya y de los datos procedentes de las simulaciones del punto SIMAR no es buena, empleándose únicamente los datos reales de registro de la boya para la definición de los escenarios de estudio.

#### 3.1.2 Descripción general del clima para la definición de los escenarios

A continuación, se muestra el desarrollo del estudio de ajuste de los datos de los registros de la boya y del punto SIMAR, obteniendo la distribución de probabilidad de los valores de velocidad del viento de los registros.

### 3.1.2.1 Estudio de los datos de la Boya 2342

Para la Boya 2342 del Golfo de Cádiz, se dispone del siguiente registro de datos de viento, donde se muestran los valores de velocidad, disponiendo también de los valores de dirección del viento, altura de ola significativa, periodo y dirección del oleaje.

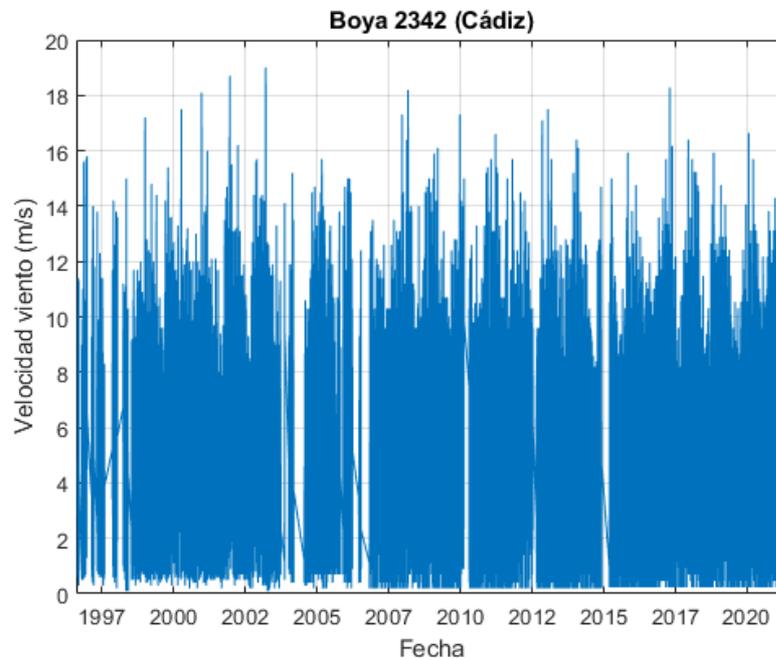


Figura 3-1. Registro de datos de viento disponibles en la Boya 2342.

Puede observarse en los registros que se han alcanzado velocidades máximas del orden de entre 18 y 20 m/s.

A continuación, se muestra el gráfico de dispersión de eventos de viento y la rosa de viento obtenida:

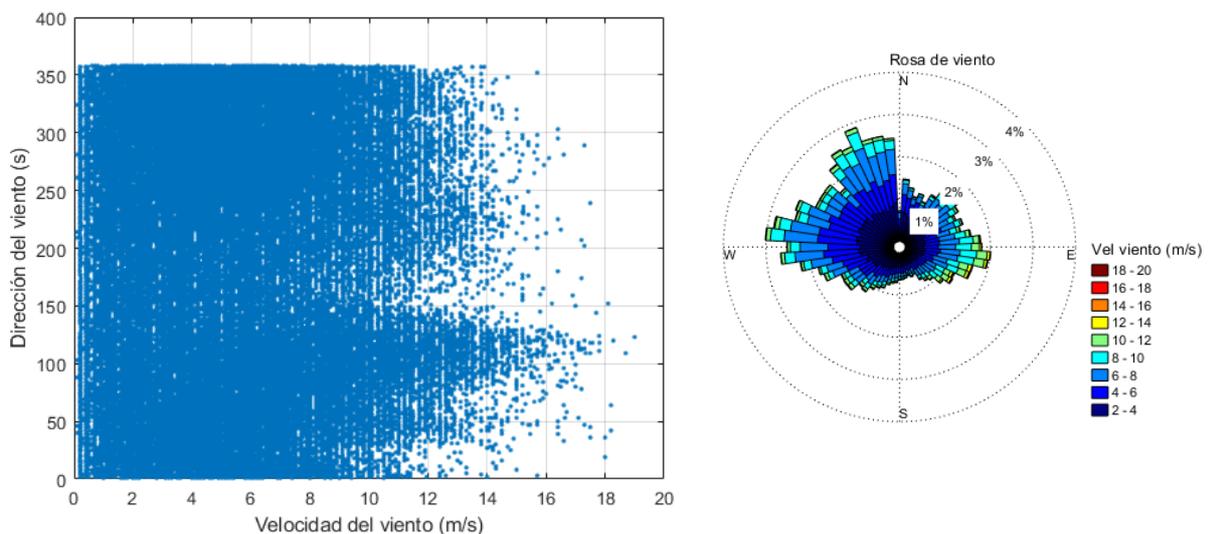


Figura 3-2. Gráfico de dispersión de eventos de viento y rosa de viento resultante en la Boya 2342.

Puede comprobarse que los vientos más frecuentes son los vientos W y N-NW, y que los más energéticos son los vientos E.

Los histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento en la Boya 2342 son los siguientes:

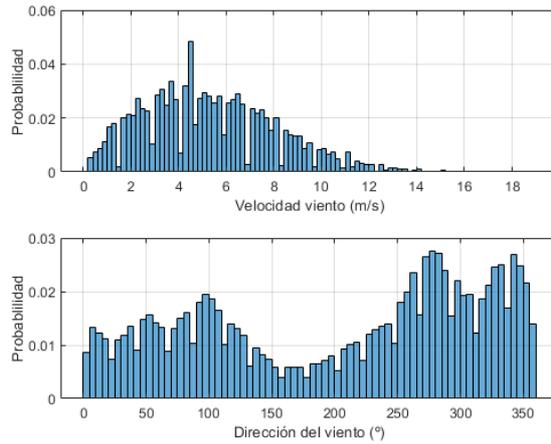


Figura 3-3. Histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento en la Boya 2342.

Se observa que los vientos con mayor probabilidad de ocurrencia (0.05) son de 4.50 m/s, empleándose este valor para determinar los eventos medios en los escenarios objeto de estudio.

Para el ajuste se han probado 3 funciones de distribución comúnmente empleadas en este campo. Estas funciones son: GEV (Función de Valores Extremos Generalizada), Weibull y Lognormal.

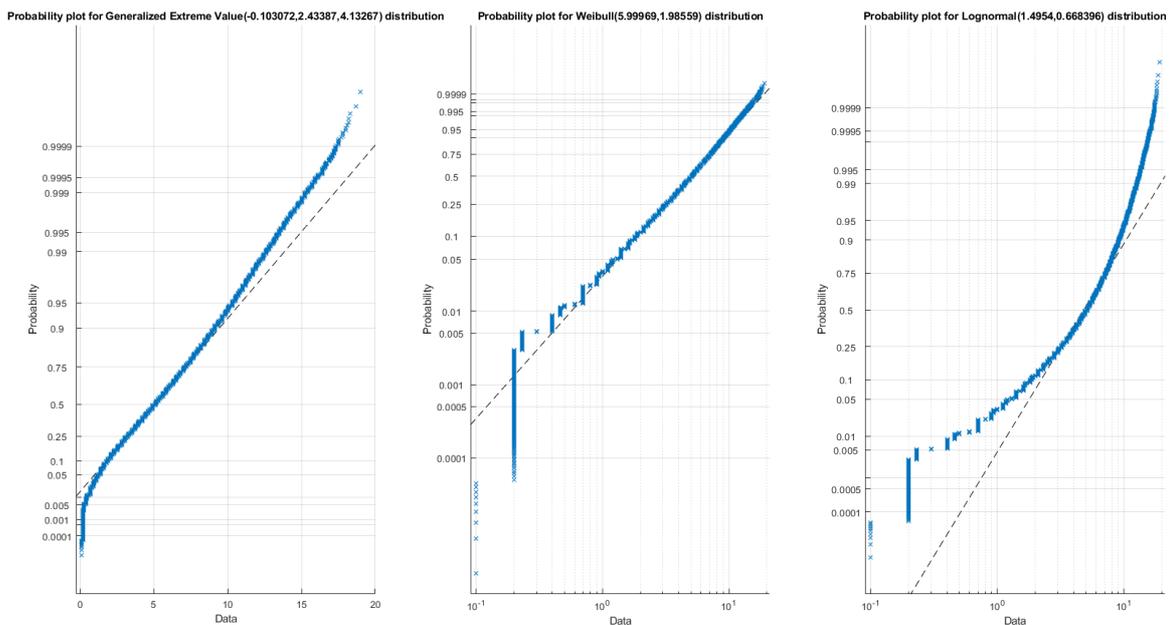


Figura 3-4. Ajuste de las funciones de distribución seleccionadas para los datos de viento de la Boya 2342.

Asimismo, se ha evaluado la calidad del ajuste en papel probabilístico, como se muestra en la siguiente figura:

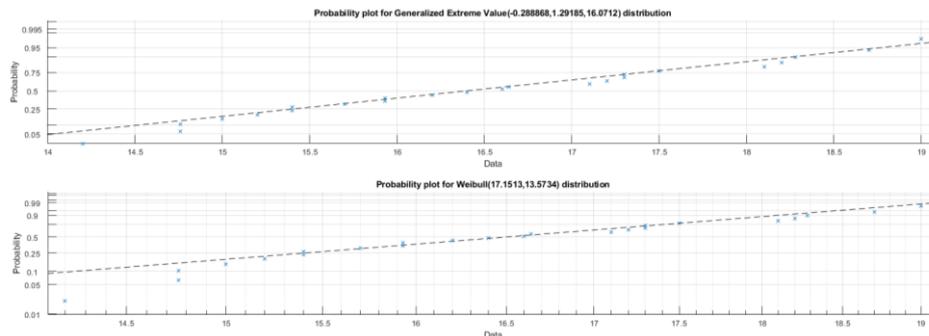


Figura 3-5. Calidad del ajuste de las funciones de distribución para los datos de viento de la Boya 2342.

Entre las anteriores, la distribución Weibull es la que presenta un mejor ajuste a los datos de velocidad de viento proporcionados por la Boya 2342.

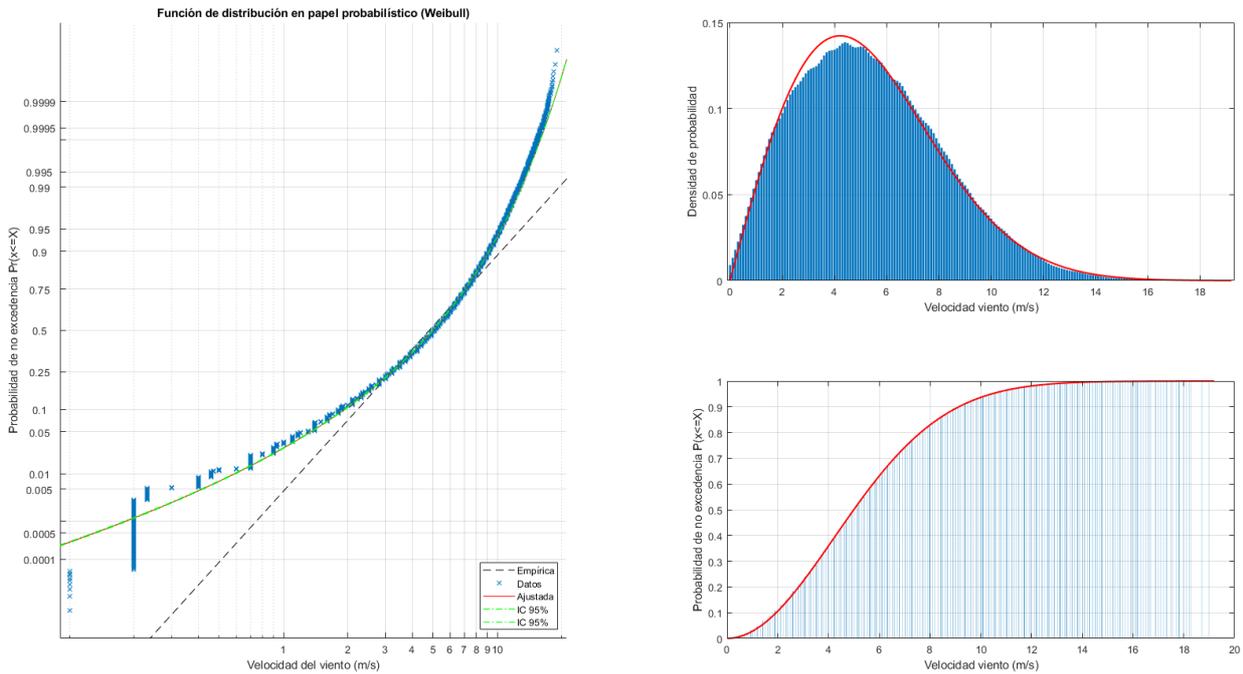


Figura 3-6. Ajuste de la Distribución Weibull para los datos de velocidad del viento de la Boya 2342.

La curva de periodo de retorno de los eventos de velocidad del viento registrados por la Boya 2342 a través del ajuste mediante la función de distribución Weibull es la siguiente:

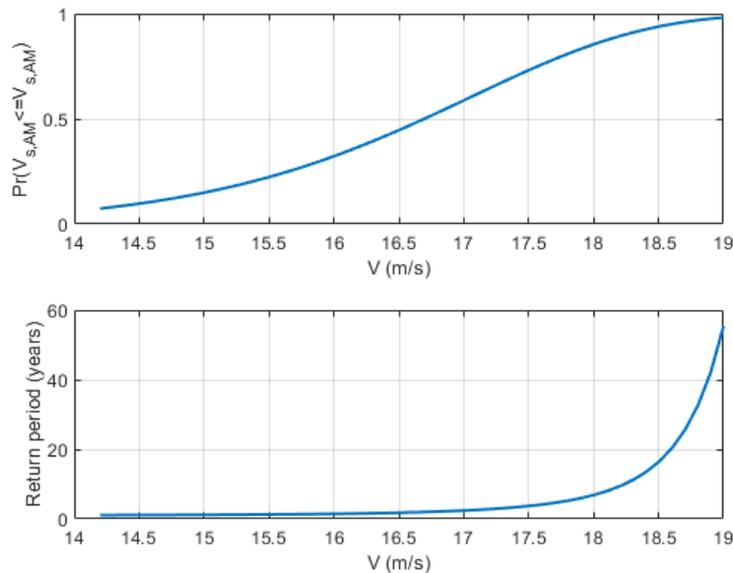


Figura 3-7. Periodo de retorno según ajuste de la distribución Weibull para los datos de velocidad del viento de los registros de la Boya 2342.

Se comprueba que los mayores registros de velocidad observados anteriormente corresponden a periodos de retorno de entre 20 y 60 años.

### 3.1.2.2 Estudio de los datos del punto SIMAR seleccionado

Para el punto SIMAR 6000048 seleccionado se dispone del siguiente registro de datos de viento, donde se muestran los valores de velocidad, disponiendo también de los valores de dirección del viento, altura de ola significativa, periodo y dirección del oleaje.

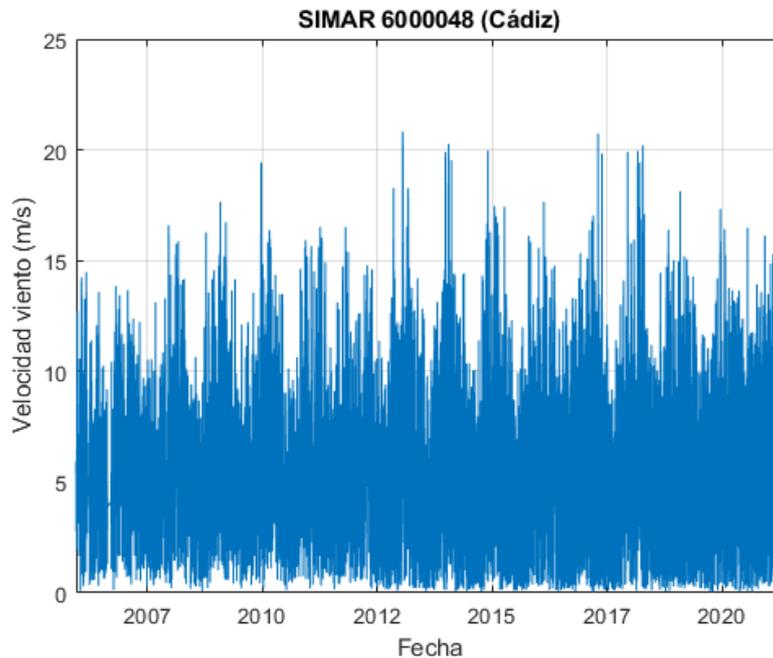


Figura 3-8. Registro de datos de viento disponibles en el punto SIMAR 6000048.

Se observa que las velocidades máximas obtenidas en el punto SIMAR son del orden de entre 19 y 21 m/s, ligeramente superiores a las mostradas en los registros de la Boya 2342.

El gráfico de dispersión de datos de viento y la rosa de viento obtenida para el punto SIMAR es la siguiente:

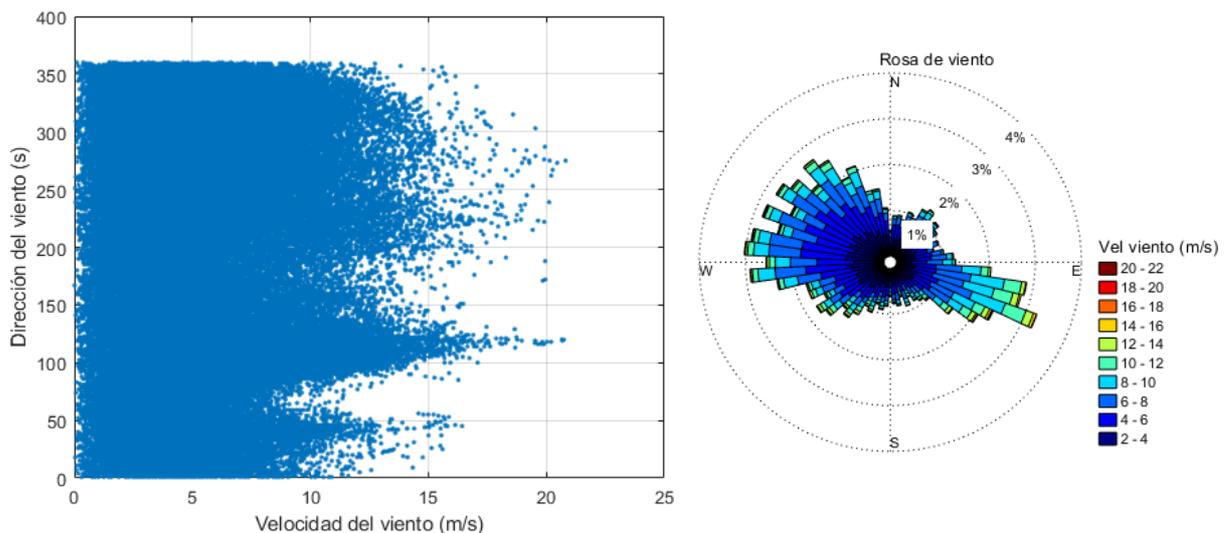


Figura 3-9. Gráfico de dispersión de eventos de viento y rosa de viento resultante en el punto SIMAR.

La rosa de vientos del punto SIMAR ofrece una tendencia de eventos frecuentes más repartida en el sector W y NW, además de mostrar una desviación en los vientos más energicos hacia el E-SE.

Los histogramas de probabilidad de ocurrencia de los datos de viento en el punto SIMAR son los siguientes:

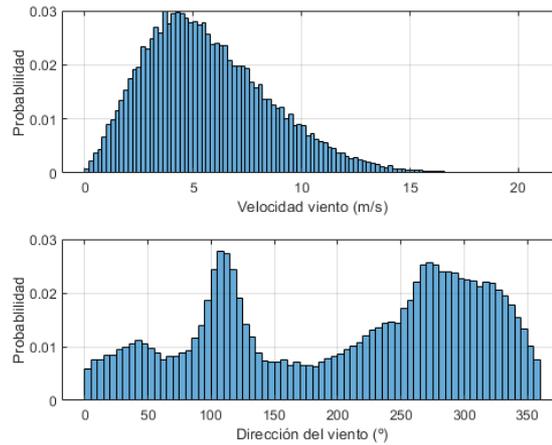


Figura 3-10. Histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento en el punto SIMAR.

Se observa que los vientos con mayor probabilidad de ocurrencia (0.03) son de 4.90 m/s, empleándose este valor para determinar los eventos medios en los escenarios objeto de estudio.

Para el ajuste se han probado 3 funciones de distribución comúnmente empleadas en este campo. Estas funciones son: GEV (Valores Extremos Generalizada), Weibull y Lognormal.

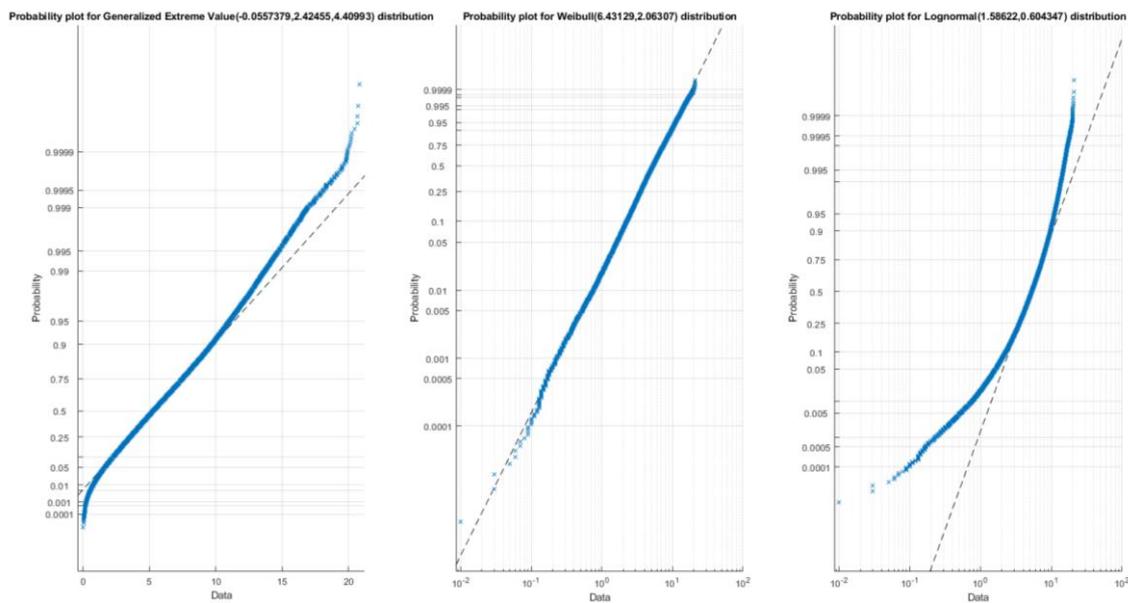


Figura 3-11. Ajuste de funciones de distribución seleccionadas para los datos de viento en el punto SIMAR.

Asimismo, se ha evaluado la calidad del ajuste en papel probabilístico, como se muestra en la siguiente figura:

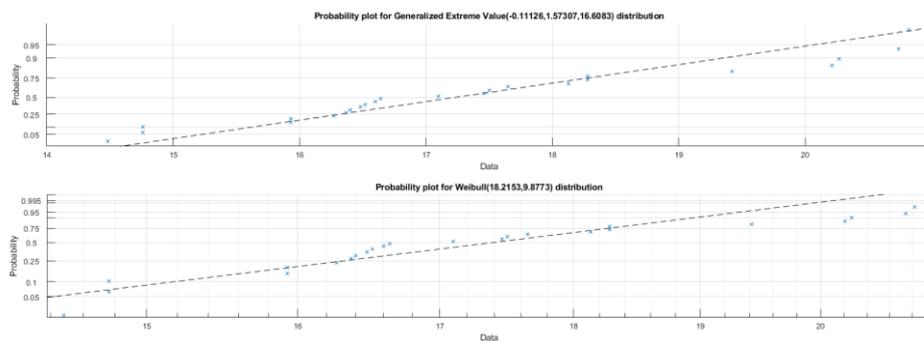


Figura 3-12. Calidad del ajuste de las funciones de distribución para los datos de viento en el punto SIMAR.

Del mismo modo que ocurría con los datos de registro de la Boya, la distribución Weibull es la que presenta un mejor ajuste a los datos de velocidad de viento proporcionados por el punto SIMAR 6000048.

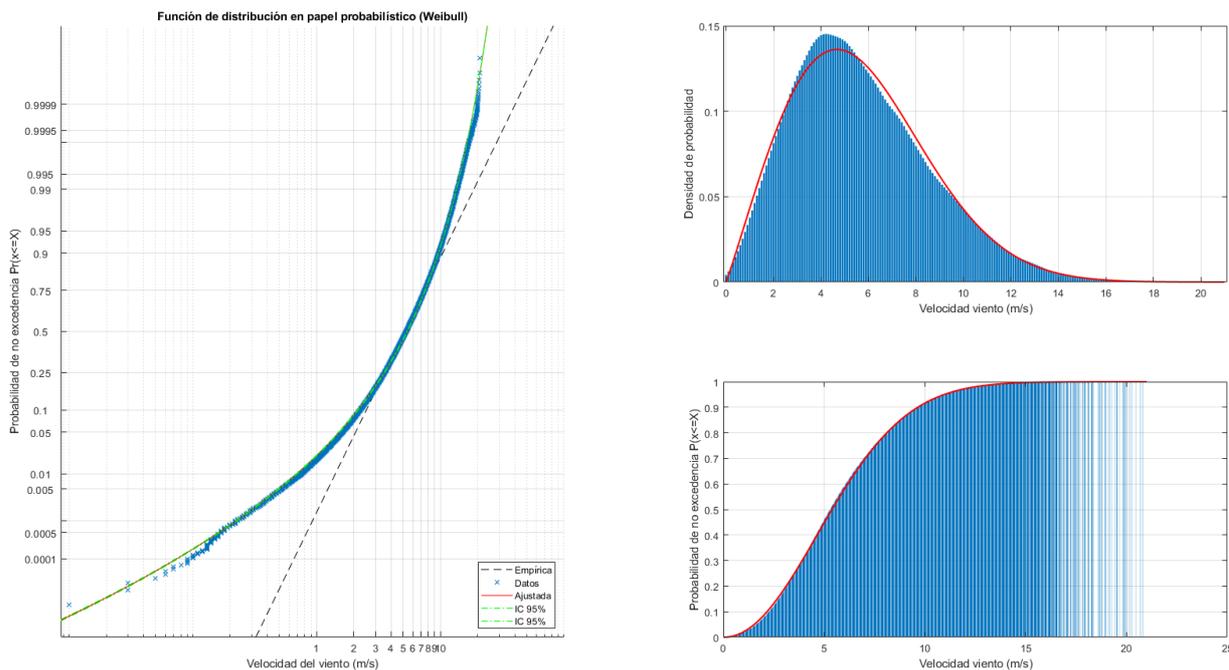


Figura 3-13. Ajuste de la Distribución Weibull para los datos de velocidad del viento en el punto SIMAR.

La curva de periodo de retorno de los datos de velocidad del viento ofrecidos por el punto SIMAR a través del ajuste mediante la función de distribución Weibull es la siguiente:

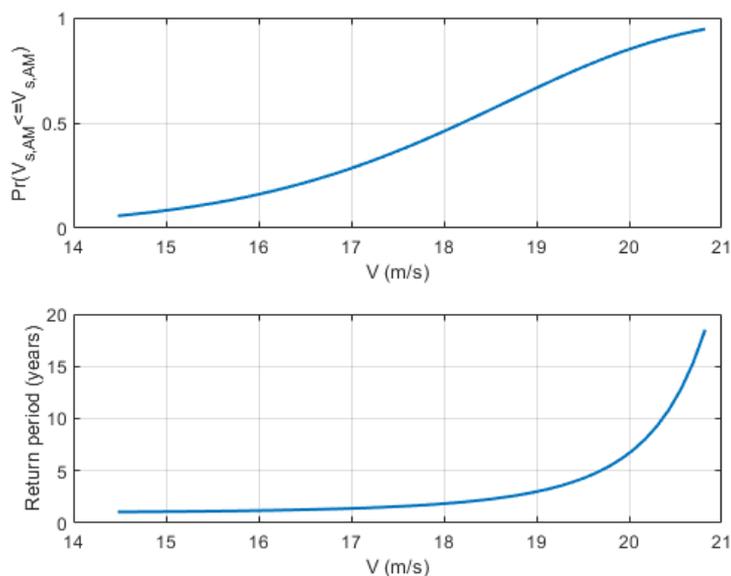


Figura 3-14. Periodo de retorno según ajuste de la distribución Weibull para los datos de velocidad del viento proporcionados por el punto SIMAR.

Se comprueba que los mayores registros de velocidad observados anteriormente corresponden a periodos de retorno de entre 5 y 20 años, siendo mucho menores que los obtenidos para el estudio de la boya.

### 3.1.2.3 Comparación de resultados y selección de datos para la definición de escenarios

De los resultados obtenidos en los puntos anteriores puede realizarse la siguiente comparación:

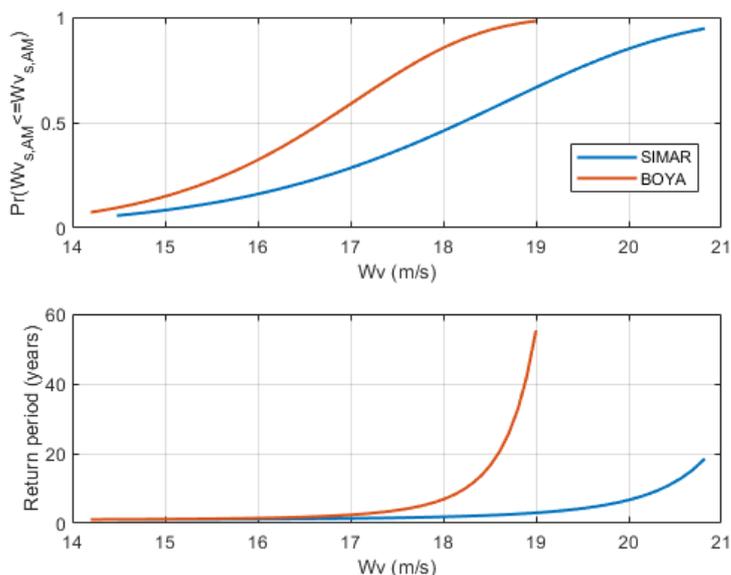


Figura 3-15. Comparación del periodo de retorno de la velocidad del viento según los datos disponibles de estudio para la Boya 2342 y el punto SIMAR 6000048.

En la figura anterior puede comprobarse que, el periodo de retorno calculado para los valores de velocidad del viento de los datos del registro de la Boya 2342 son más desfavorables que los obtenidos de los datos de las simulaciones del punto SIMAR seleccionado.

Además, se observa que el periodo de datos disponibles para la boya es de 25 años y, para el punto SIMAR es de 10 años menos, pudiendo no ser suficientes para la comparación y estimación de los valores deseados entre ambos registros.

Por tanto, para la elaboración del registro de datos definitivo, el cual será empleado para la definición de los escenarios de estudio, no se emplearán datos procedentes del punto SIMAR, empleando los datos de registro de la boya, del mismo modo que se ha realizado en los estudios y líneas de investigación previas sobre el modelo original de partida.

## 3.1.3 Definición de regímenes medio y extremal

### 3.1.3.1 Definición del evento medio y barrido de selección en el registro de datos de la boya

Para la definición del evento medio se han seguido las siguientes consideraciones:

- Se considerarán eventos predominantes de levante cuando la dirección del viento incida con un ángulo respecto al Norte de entre  $60^\circ - 90^\circ - 150^\circ$  (NEE, E, SEE respectivamente), siguiendo las direcciones predominantes en este sentido según la rosa de vientos obtenida para los datos de registro de la Boya 2342 (Figura 3-2).
- Se considerarán eventos predominantes de poniente cuando la dirección del viento incida con un ángulo respecto al Norte de entre  $220^\circ - 270^\circ - 320^\circ$  (SWW, W, NWW respectivamente), siguiendo las direcciones predominantes en este sentido según la rosa de vientos obtenida para los datos de registro de la Boya 2342 (Figura 3-2).
- Se considerará que el evento medio se sucede a lo largo de 5 días de duración y que, durante este tiempo, la velocidad media de los registros continuos sucedidos es del orden de la velocidad media con mayor probabilidad de ocurrencia en los registros predominantes de levante o poniente, según se indica en los histogramas de probabilidad obtenidos para vientos predominantes en ambas direcciones.

### 3.1.3.2 Definición del evento extremal y barrido de selección en el registro de datos de la boya

Para la definición del evento extremal se han seguido las siguientes consideraciones:

- Se considerarán eventos predominantes de levante cuando la dirección del viento incida con un ángulo respecto al Norte de entre  $60^\circ - 90^\circ - 150^\circ$  (NEE, E, SEE respectivamente), siguiendo las direcciones predominantes en este sentido según la rosa de vientos obtenida para los datos de registro de la Boya 2342 (Figura 3-2).
- Se considerarán eventos predominantes de poniente cuando la dirección del viento incida con un ángulo respecto al Norte de entre  $220^\circ - 270^\circ - 320^\circ$  (SWW, W, NWW respectivamente), siguiendo las direcciones predominantes en este sentido según la rosa de vientos obtenida para los datos de registro de la Boya 2342 (Figura 3-2).
- Se considerará como evento extremal, sucedido a lo largo de 5 días de duración, un evento continuo con velocidades del viento cuyo valor central sea el mayor entre los POT (*Peak over threshold*) por encima del umbral del percentil 99 de la serie de registros de la Boya 2342 y, que este valor de velocidad del viento esté acompañado por un valor de dirección del viento dentro del rango establecido para las direcciones predominantes de levante y poniente.
- Se considerará que el evento extremal es de dirección predominante levante o poniente cuando todos los registros de viento sucedidos a lo largo de los 5 días dispongan de una dirección del viento dentro de los rangos establecidos para cada dirección, exceptuando algunos casos puntuales donde el viento, de manera local y no generalizada a lo largo del evento, cuente con una dirección fuera de este rango, no suponiendo un cambio en la dirección media predominante del viento a lo largo del evento.

### 3.1.3.3 Análisis del clima marítimo particularizado para registros predominantes de levante

Como se ha indicado en los puntos anteriores, dentro de los datos de registro de la Boya 2342, se ha realizado un análisis particularizado del clima marítimo en los registros con dirección del viento predominante de levante y poniente, dentro de los rangos de dirección establecidos en las condiciones anteriormente expuestas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el análisis particularizado en los registros predominantes de levante.

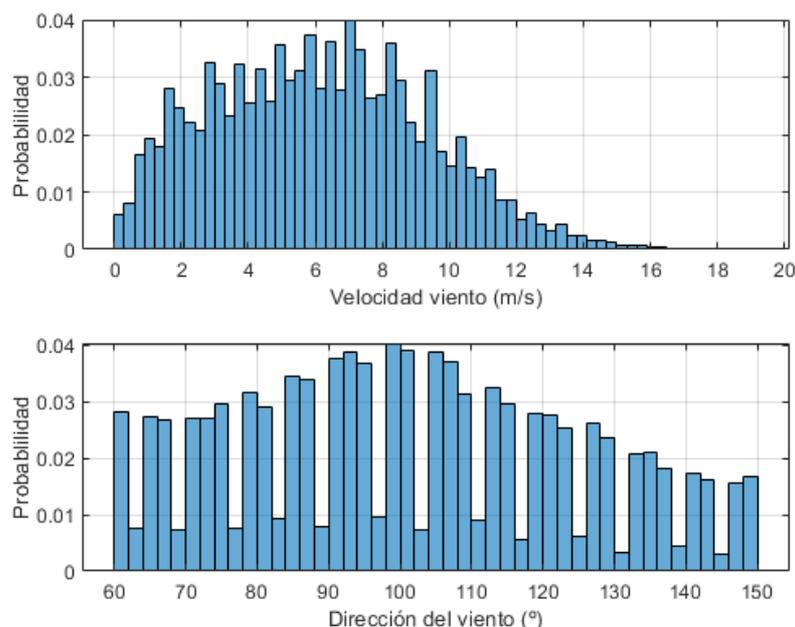


Figura 3-16. Histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento predominantes de levante.

Puede comprobarse que el valor con mayor probabilidad de ocurrencia (0.04) es de 7 m/s, valor que será empleado para realizar el barrido de selección de los eventos medios predominante de levante.

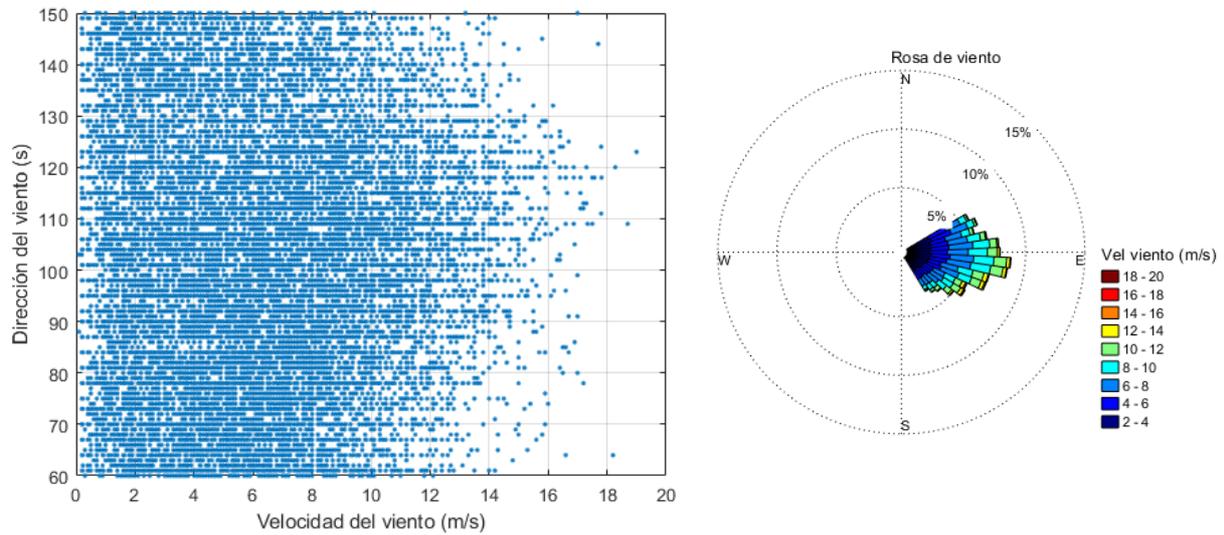


Figura 3-17. Gráfico de dispersión y rosa de viento resultante en eventos predominantes de levante.

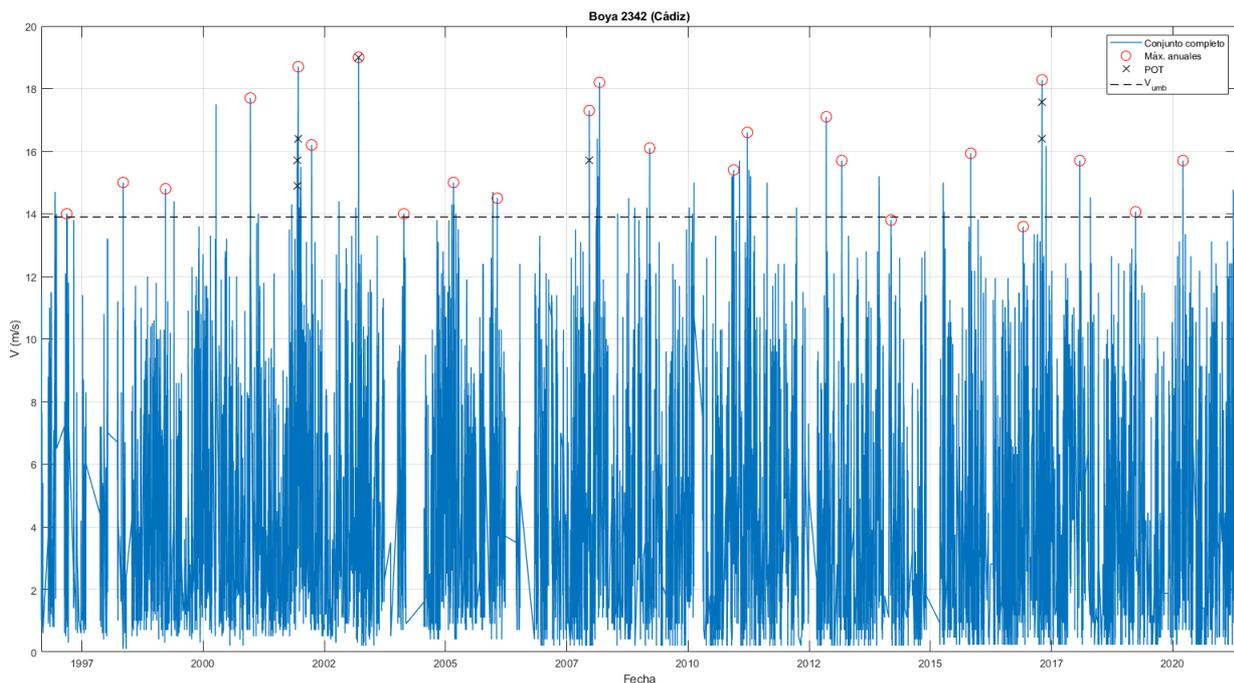


Figura 3-18. POT en los registros predominantes de levante de la serie completa de la Boya 2342.

Se han establecido una serie de puntos POT encima del umbral del percentil 99 (13.9 m/s) de la serie de registros, sobre los cuales se seleccionará el evento extremal predominante de levante, siempre que se cumplan los criterios establecidos en la sucesión de 5 días del evento, siendo el valor pico el centro del registro en dicha sucesión, señalados en rojo en la Figura 3-18.

### 3.1.3.4 Análisis del clima marítimo particularizado para registros predominantes de poniente

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el análisis particularizado en los registros predominantes de poniente.

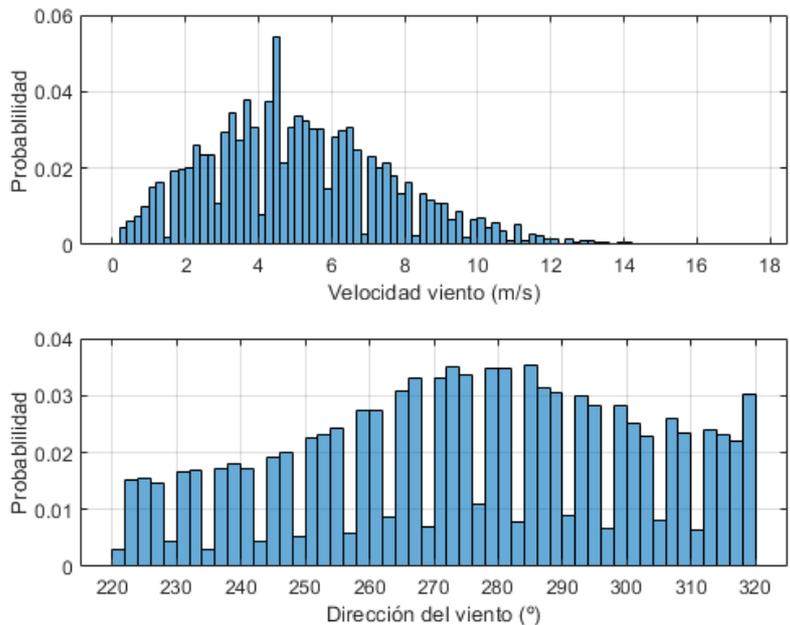


Figura 3-19. Histogramas de probabilidad de ocurrencia de los eventos de viento predominantes de poniente.

Puede comprobarse que el valor con mayor probabilidad de ocurrencia (0.035) es de 4,5 m/s, valor que será empleado para realizar el barrido de selección de los eventos medios predominante de poniente.

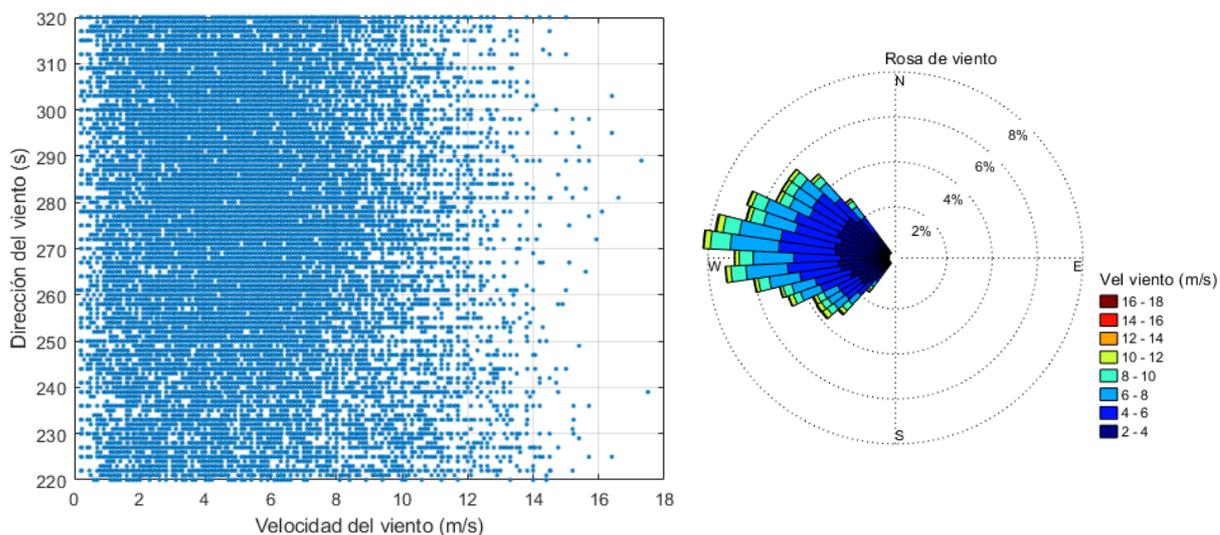


Figura 3-20. Gráfico de dispersión y rosa de viento resultante en eventos predominantes de poniente.

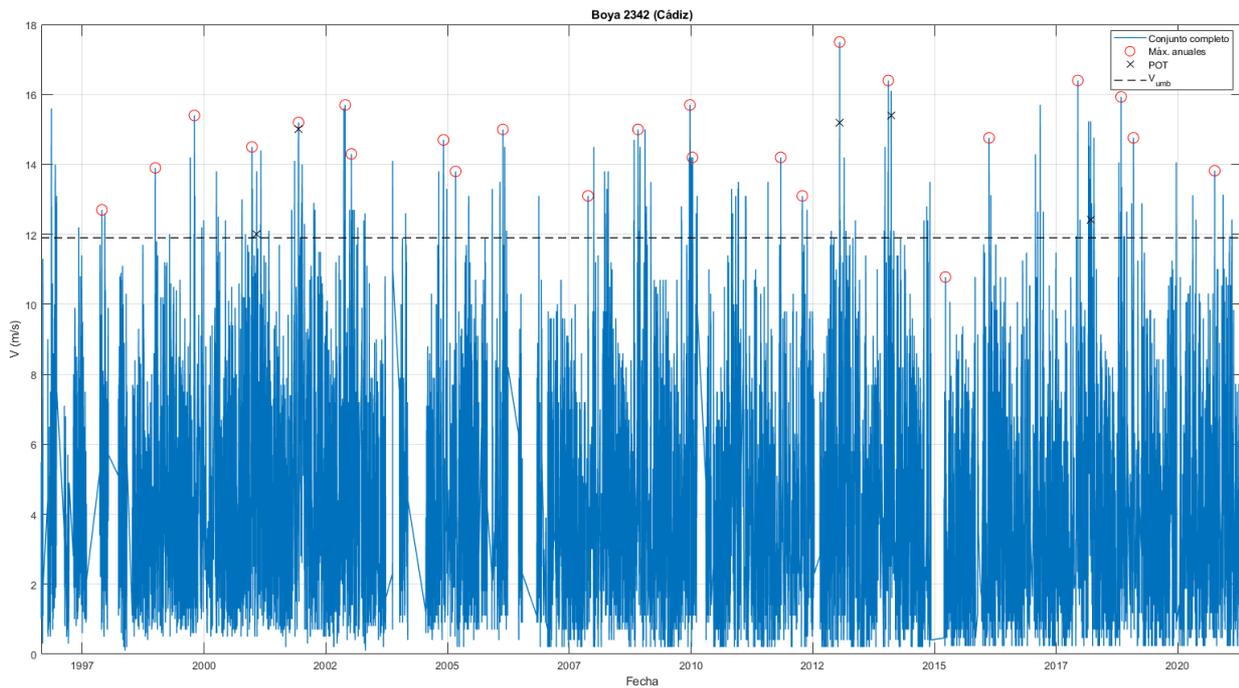


Figura 3-21. POT en los registros predominantes de poniente de la serie completa de la Boya 2342.

Del mismo modo que en el caso anterior, se han establecido una serie de puntos POT encima del umbral del percentil 99 (11.9 m/s) de la serie de registros, sobre los cuales se seleccionará el evento extremal predominante de poniente, siempre que se cumplan los criterios establecidos en la sucesión de 5 días del evento, siendo el valor pico el centro del registro en dicha sucesión, señalados en rojo en la Figura 3-21.

### 3.1.3.5 Selección de eventos medios predominantes de levante y poniente

Del barrido de selección entre los datos del registro disponible de la boya y, el análisis realizado sobre los eventos medios detectados a lo largo de estos registros, se ha seleccionado el evento medio con menor desviación media de la velocidad durante los 5 días de evento respecto al valor medio de la velocidad en el registro total de datos (no correspondientes a eventos extremales).

De este modo, para la creación del evento medio teórico de los modelos de simulación, se ha seleccionado el evento que cuenta con la sucesión de velocidades más cercanas a la media total y más constante a lo largo de los 5 días de evento seleccionado, así como con menor desviación media respecto al valor medio de eventos predominantes de levante/poniente, del mismo modo que se ha realizado con las velocidades.

A continuación, se muestran las gráficas de velocidades y dirección del viento, así como de altura de ola significativa, periodo y dirección del oleaje según los registros de la Boya 2342 en la duración del evento seleccionado:

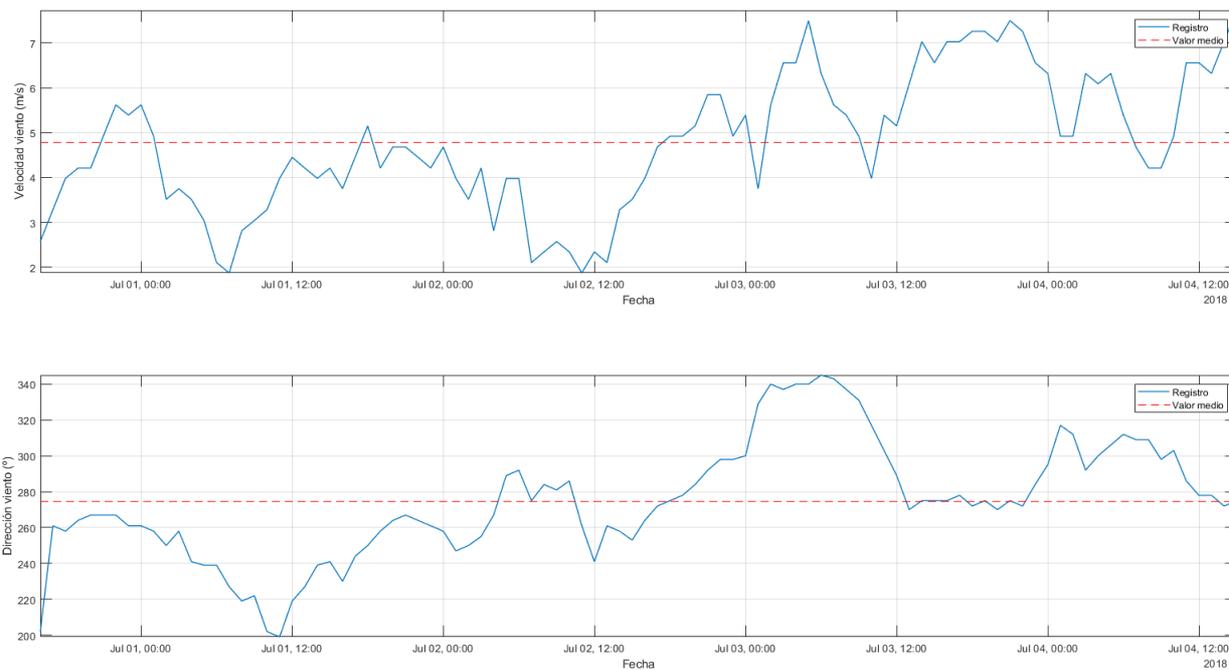


Figura 3-22. Velocidad y dirección del viento del escenario medio predominante de poniente seleccionado.

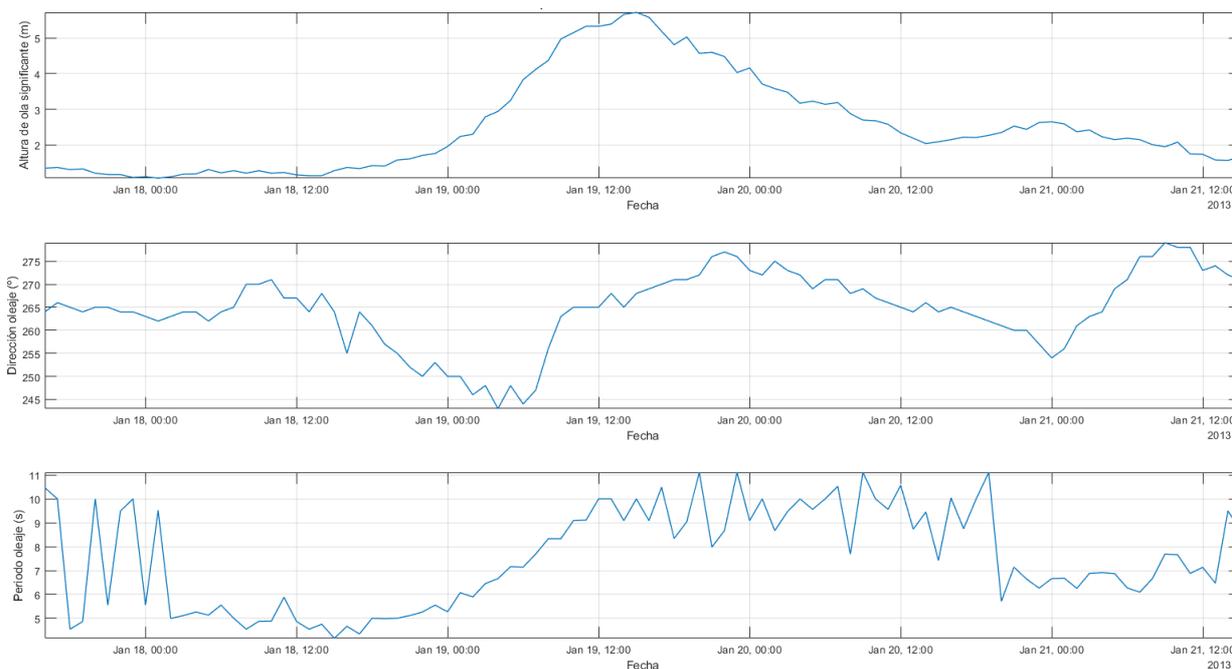


Figura 3-23. Altura de ola, periodo y dirección del oleaje del escenario medio predominante de poniente.

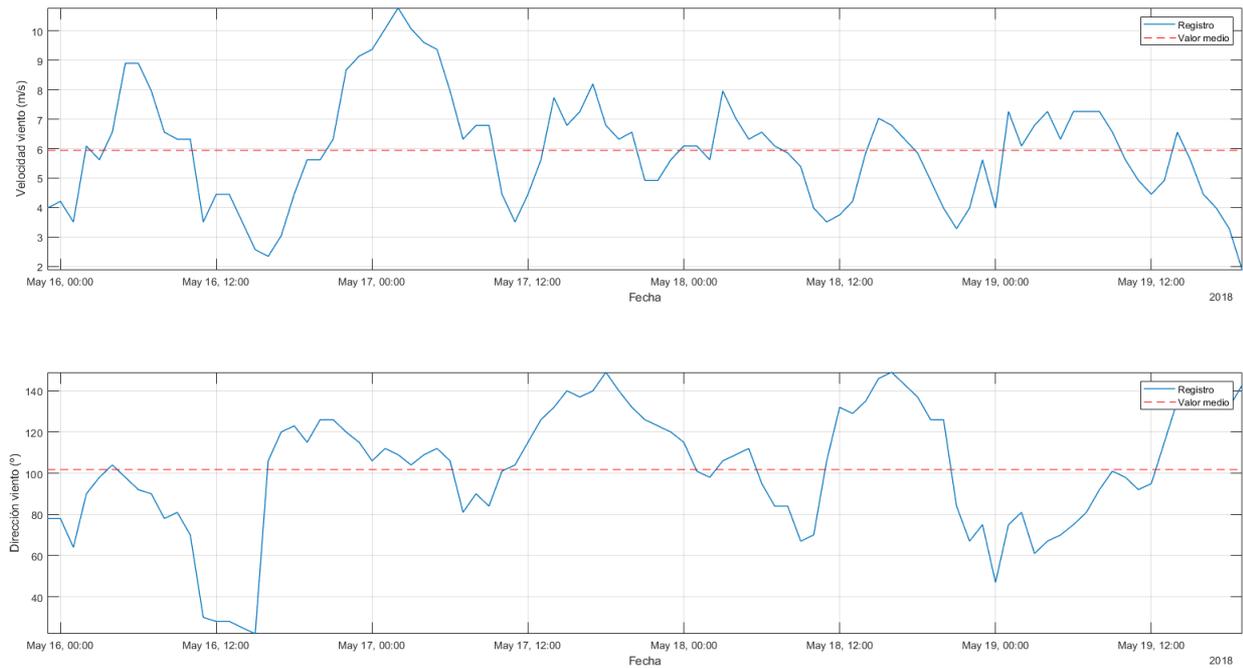


Figura 3-24. Velocidad y dirección del viento del escenario medio predominante de levante seleccionado.

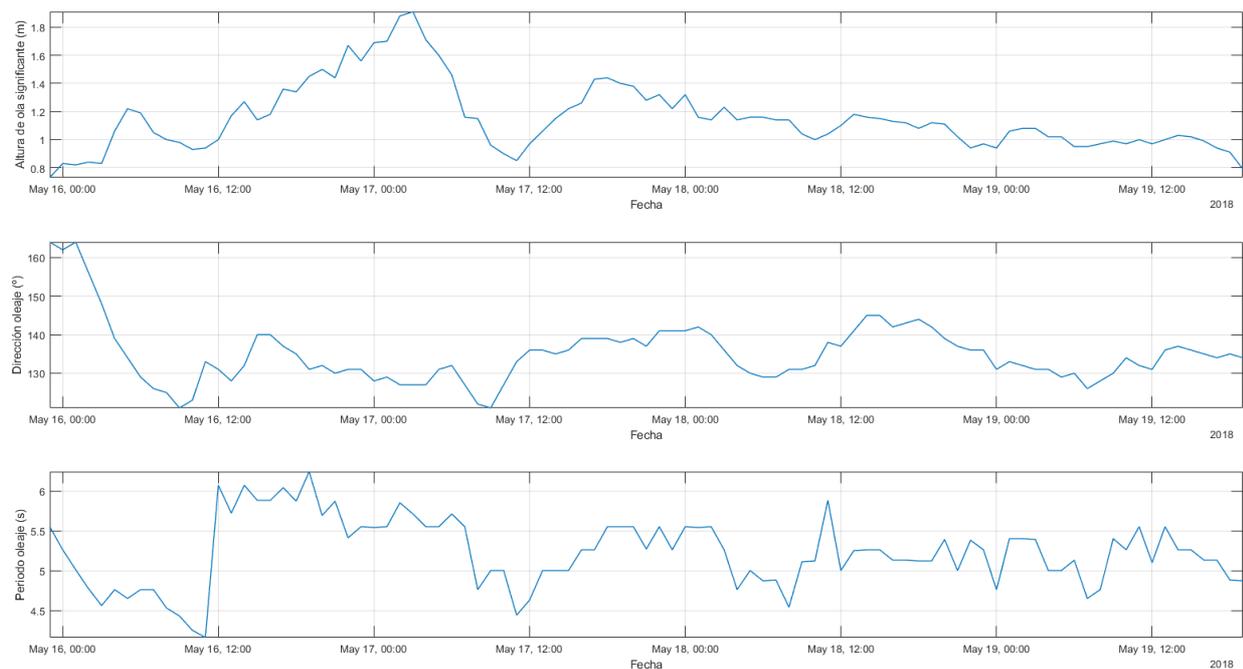


Figura 3-25. Altura de ola, periodo y dirección del oleaje del escenario medio predominante de levante.

### 3.1.3.6 Selección de eventos extremos predominantes de levante y poniente

Del barrido de selección entre los datos del registro disponible de la boya y, el análisis realizado sobre los eventos extremos detectados a lo largo de estos registros, se ha seleccionado el evento extremal que cumple con las condiciones establecidas anteriormente en la definición del mismo, obteniendo un evento con un valor máximo de velocidad centrado, seleccionado de los correspondiente a los POT analizados en los registros de ambas direcciones predominantes, así como la sucesión anterior y posterior de vientos con dirección pedominante similar a la del valor máximo, dentro de los rangos de dirección establecidos en la definición de las direcciones predominantes.

A continuación, se muestran las gráficas de velocidades y dirección del viento, así como de altura de ola significativa, periodo y dirección del oleaje según los registros de la Boya 2342 en la duración del evento seleccionado:

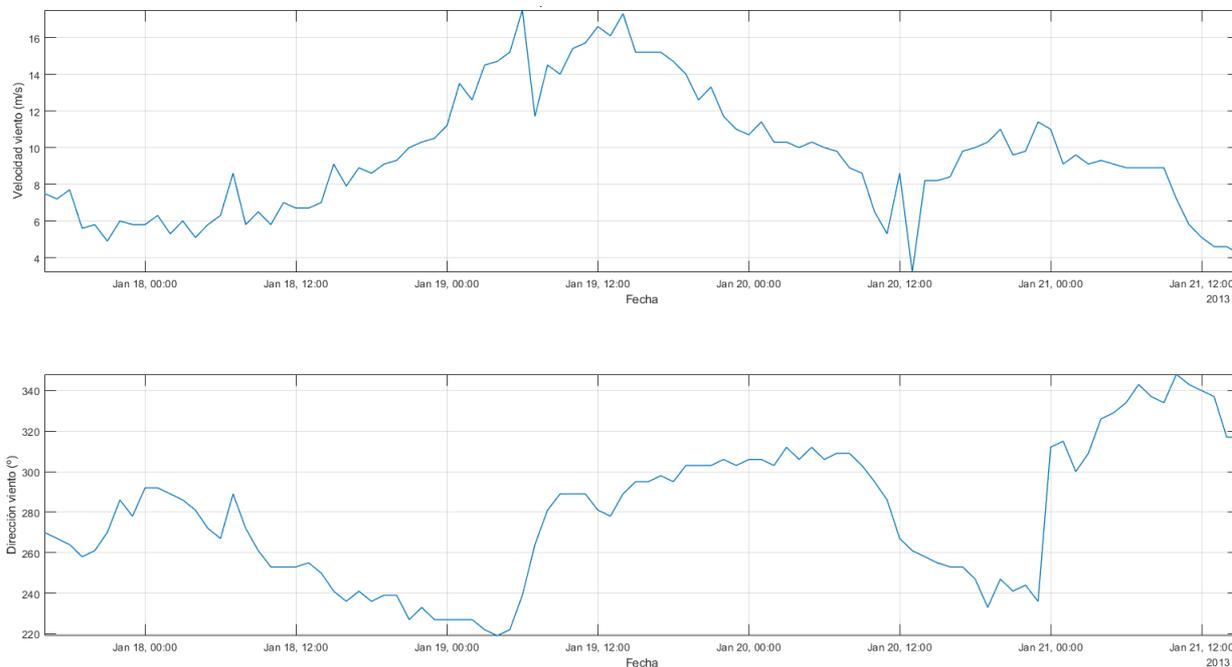


Figura 3-26. Velocidad y dirección del viento del escenario extremal predominante de poniente seleccionado.

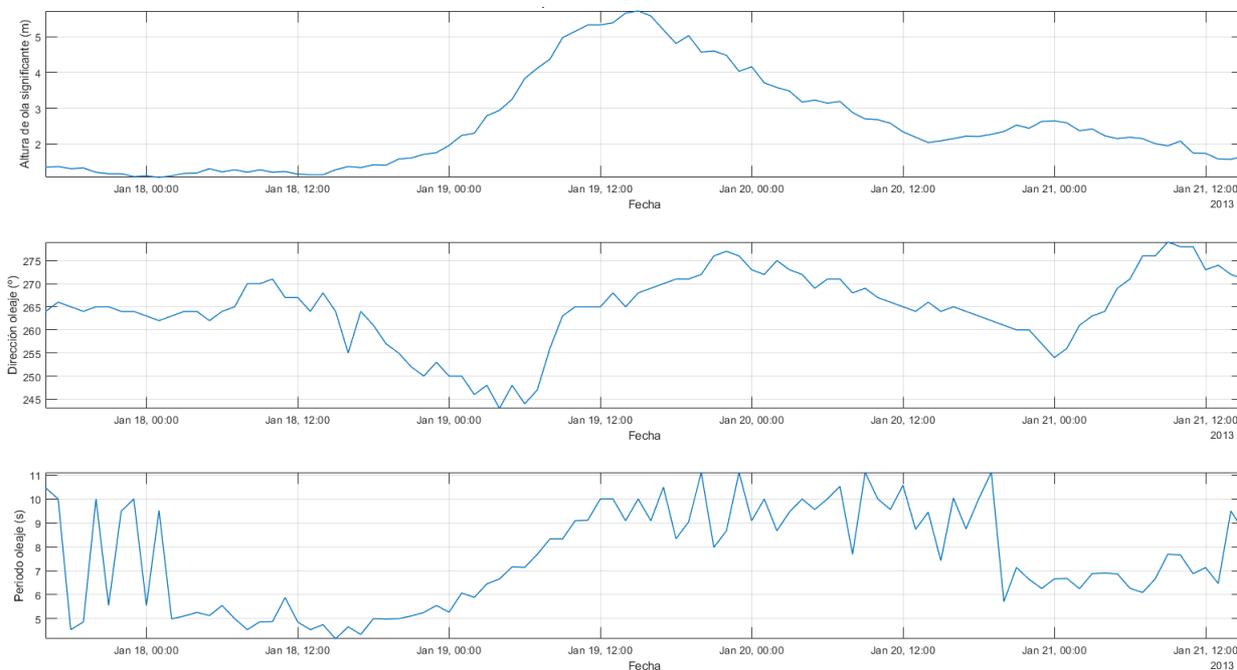


Figura 3-27. Altura de ola, periodo y dirección del oleaje del escenario extremal predominante de poniente.

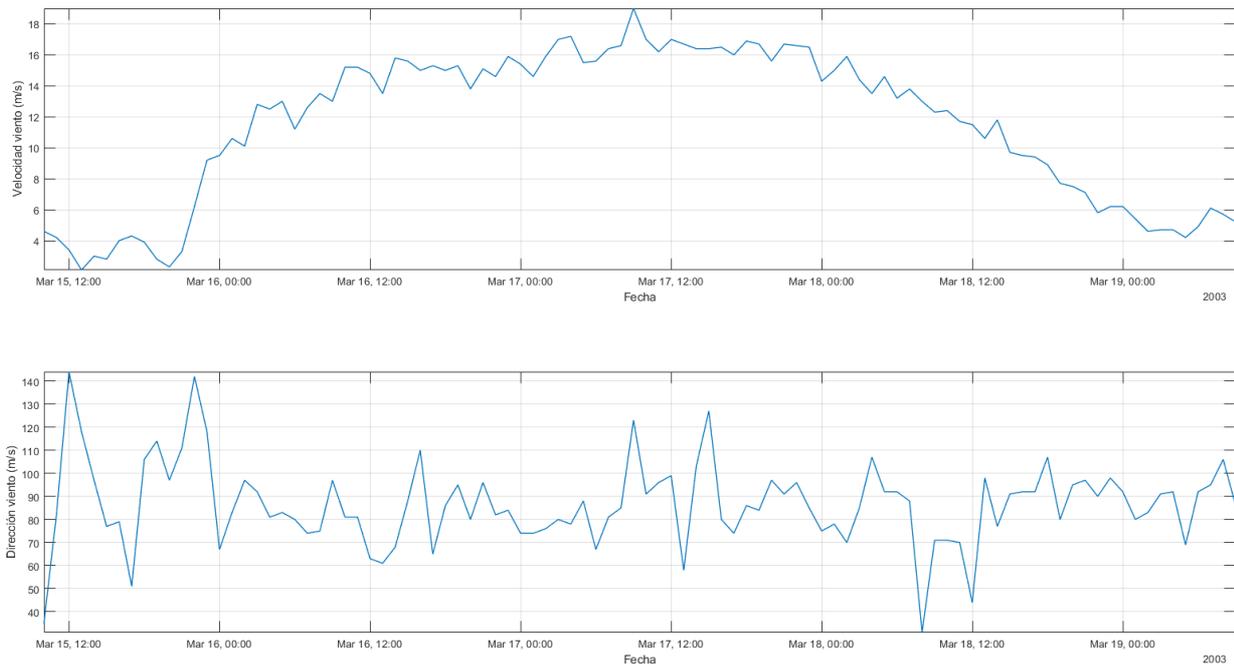


Figura 3-28. Velocidad y dirección del viento del escenario extremal predominante de levante seleccionado.

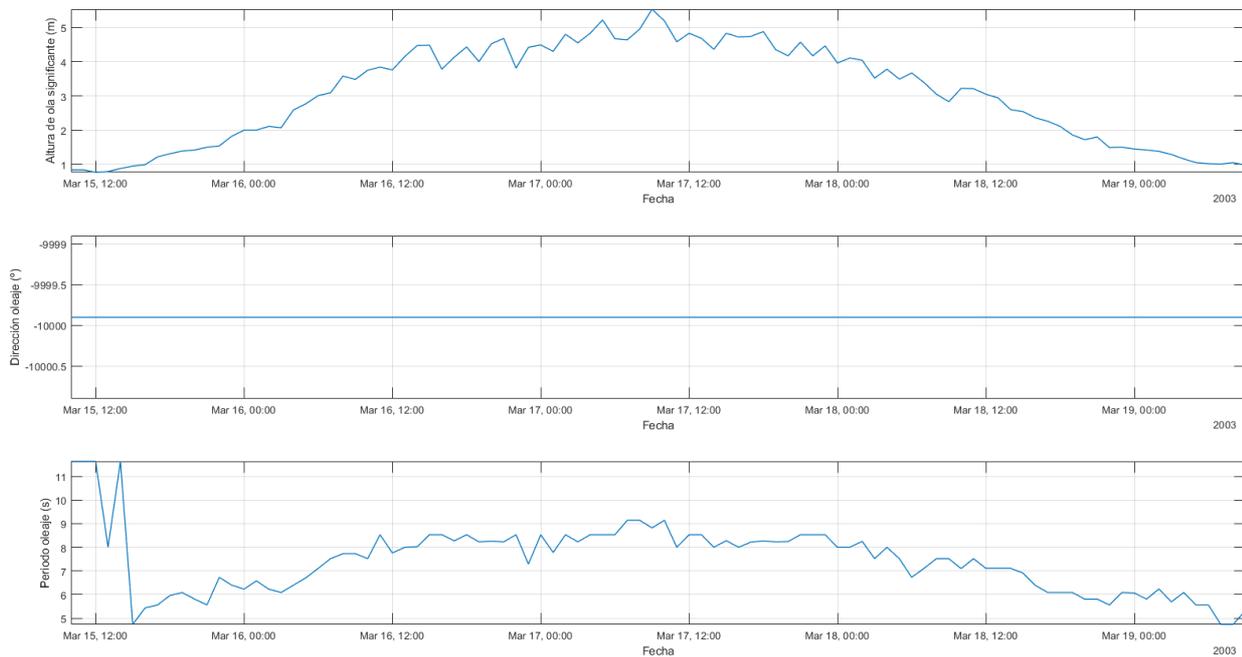


Figura 3-29. Altura de ola, periodo y dirección del oleaje del escenario extremal predominante de levante.

Cabe destacar que para el caso mostrado anteriormente (Figura 3-29), la Boya 2342 no dispone de registros de dirección del oleaje en el intervalo de tiempo de la sucesión del evento extremal de levante. Sin embargo, estos datos se presentan a modo representativo, no incorporando en los modelos de simulación el forzamiento a través del parámetro físico de oleaje (parámetro *wave* en el módulo FLOW para DELFT3D).

### 3.1.4 Definición de la variación del nivel del mar en los casos de estudio

#### 3.1.4.1 Estudio del emplazamiento con herramienta TMD

Para la estimación del nivel del mar en la ubicación de estudio y, su comparación con los datos disponibles incluidos en el modelo original, se ha empleado la herramienta TMD (Padman & Erofeeva, 2005), facilitada por parte de los Tutores del presente trabajo.

Mediante la ubicación de las coordenadas del centro de la malla de cálculo, se han obtenido los principales armónicos constituyentes del nivel del mar, para las fechas de simulación establecidas entre el 1 de abril y el 1 de junio de 2013, siguiendo las fechas disponibles en el registro de datos del modelo original de partida.

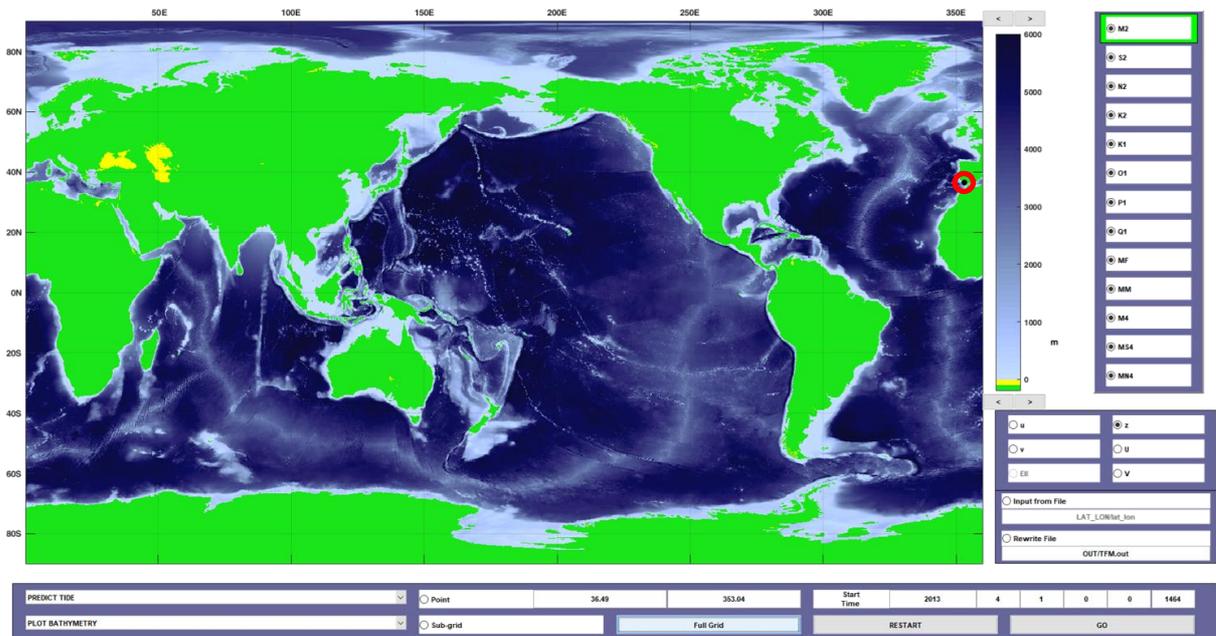


Figura 3-30. Interfaz de la herramienta TMD y selección de parámetros para la predicción de los armónicos de marea en el intervalo de tiempo establecido para la comparación con el nivel del mar del modelo original.

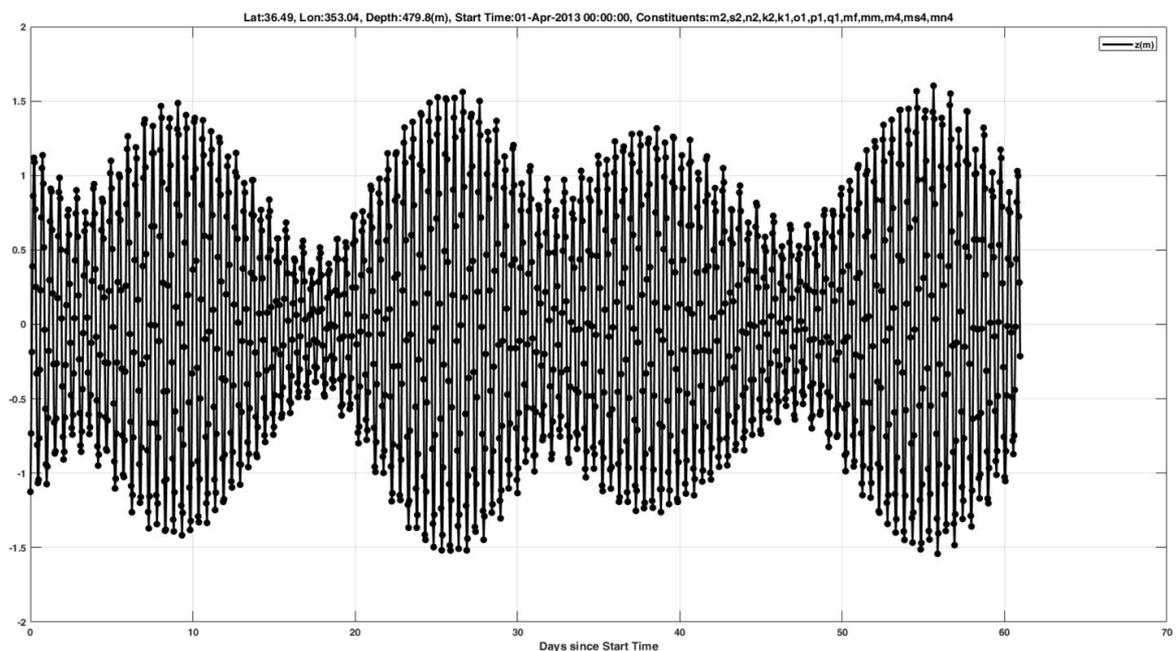


Figura 3-31. Resultados de la predicción del nivel del mar con la herramienta TMD en el intervalo de tiempo establecido para la comparación con el nivel de mar del modelo original.

### 3.1.4.2 Comparación de los resultados obtenidos con los del modelo original de partida

Se ha realizado la comparación del nivel del mar obtenido con las predicciones de la herramienta TMD con el nivel del mar empleado en el modelo original, observándose una gran similitud entre ambos resultados.

Con objeto de permanecer del lado de la seguridad, estableciendo un condicionamiento de los nuevos modelos de estudio de estudio similar al del modelo original empleado en trabajos y líneas de investigación previas, se decide continuar con los datos ofrecidos por el modelo original, ofreciendo este una carrera de marea superior a la estimada por la herramienta TMD, la cual predice acertadamente las pleamares máximas vivas y muertas, pero ofrece valores ligeramente inferiores para las bajamares máximas vivas, siendo más acertado en las bajamares máximas muertas, como se muestra en la siguiente figura:

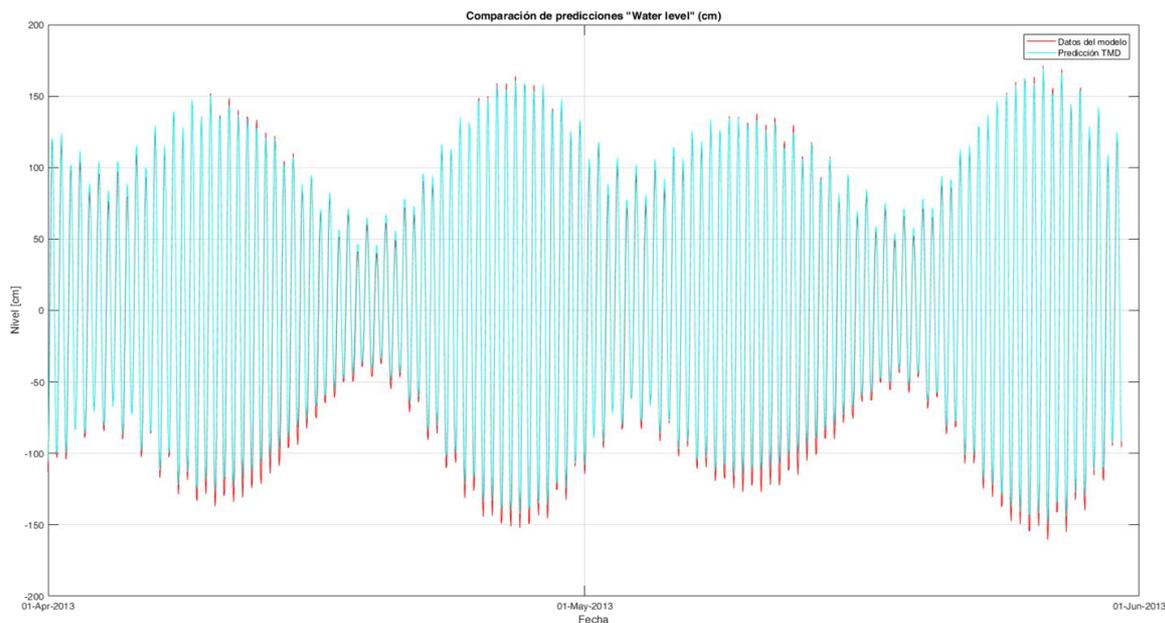


Figura 3-32. Comparación del nivel del mar entre los datos del modelo original (rojo) y las predicciones (azul) realizadas con la herramienta (TMD) en los meses de sucesión de las menores y mayores carreras de marea.

### 3.1.5 Mareas vivas y muertas más desfavorables

Dentro de la serie de datos disponibles del modelo original de partida, comprobados en el punto anterior, se ha realizado un barrido de búsqueda de las mareas vivas y muertas máximas.

La sucesión de marea viva y muerta máxima se da entre las fechas del 17 de abril y 1 de junio de 2013, como se comprueba en la figura expuesta en el punto anterior. En particular, dentro de los registros disponibles para la simulación, la marea muerta máxima sucede el 20 de abril y la marea viva máxima sucede el 27 de abril, una semana después.

Para la formación de los casos teóricos de simulación, se adaptarán los escenarios de viento seleccionados a la duración de los eventos de marea muerta y marea viva máxima establecidos, resultando un modelo de simulación con una semana de duración, es decir, con una duración igual a la transición entre marea muerta y marea viva máxima sucesivas.

El caso teórico de simulación se adaptará en las fechas de marea establecidas de tal modo que el pico del evento extremal de viento coincida con el instante de menor carrera de marea en el caso de marea muerta máxima y, que coincida con el instante mayor carrera de marea, para el caso de marea viva máxima establecida.

### 3.1.6 Esquema de escenarios y sus casos de estudio

El esquema de escenarios sintéticos de estudio definidos para el presente trabajo es el siguiente:

- Escenario extremal con viento predominante de levante:
  - Caso 1: Combinación del evento con el registro máximo de marea muerta.
  - Caso 2: Combinación del evento con el registro máximo de marea viva.
- Escenario extremal con viento predominante de poniente:
  - Caso 3: Combinación del evento con el registro máximo de marea muerta.
  - Caso 4: Combinación del evento con el registro máximo de marea viva.
- Escenario medio con viento predominante de levante:
  - Caso 5: Combinación del evento con el registro máximo de marea muerta.
  - Caso 6: Combinación del evento con el registro máximo de marea viva.
- Escenario medio con viento predominante de poniente:
  - Caso 7: Combinación del evento con el registro máximo de marea muerta.
  - Caso 8: Combinación del evento con el registro máximo de marea viva.

Para los casos particulares de estudio de la influencia entre viento y marea en el transporte de sedimentos, se han calculado los modelos sin considerar la simulación de los casos de viento en ellos. De este modo, para conocer la influencia de las mareas máximas disponibles de los registros en el transporte de sedimentos, se han realizado dos simulaciones más:

- Escenario único sin consideración del viento en la simulación:
  - Caso 9: Simulación con registro máximo de marea muerta.
  - Caso 10: Simulación con registro máximo de marea viva.

## 3.2 Modelo numérico

La simulación de los casos de estudio se ha realizado en Delft3D, mediante su módulo FLOW. Este permite simular el flujo y transporte de sedimentos en aguas someras, obtenidos del forzamiento meteorológico, para el caso particular, el viento, así como también a través de las mareas, teniendo en cuenta los siguientes procesos:

- Efecto Coriolis.
- Gradientes en la superficie libre debido a los efectos barotrópicos.
- Forzamientos de mareas en contornos abiertos.
- Modelos de turbulencia.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.
- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable en el espacio y el tiempo.
- Fuerzas generadas por las mareas.

Mediante este módulo se resuelven, entre otros parámetros contemplados en el modelo original (Zarzuelo, López-Ruiz, D'Alpaos, Carniello, & Ortega-Sánchez, 2018), el campo de velocidades, las tensiones en el fondo, el transporte de sedimentos y la evolución del fondo, objeto de análisis del presente estudio.

El modelo FLOW resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible bajo la hipótesis de aguas someras (SWE) y las hipótesis de Boussinesq (Deltares, 2016).

Se muestra la descripción simplificada de las ecuaciones de profundidad promediada que gobiernan el modelo hidrodinámico, pudiendo obtener más detalles en (Lesser, Roelvink, Van Kester, & Stelling, 2004).

La ecuación de continuidad, despreciando los efectos de la precipitación y de la evaporación, es la siguiente:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial |h\bar{u}|}{\partial x} + \frac{\partial |h\bar{v}|}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Donde  $\bar{u}$  y  $\bar{v}$  son las velocidades en profundidades promediadas en las direcciones  $x$  e  $y$  (m/s) respectivamente;  $h$  es la profundidad (m) y  $\xi$  es el nivel de la superficie libre (m).

Las ecuaciones de momento horizontal en profundidad promediada, asumiendo una ley de fricción cuadrática, velocidad nula y condiciones de contorno de deslizamiento libre (esfuerzo tangencial nulo) en el terreno, despreciando el efecto de Coriolis y del viento, se describen como:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g\bar{u}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 h} - \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g\bar{v}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{C^2 h} - \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>),  $\nu$  es la velocidad de turbulencia (m<sup>2</sup>/s) y  $C$  el coeficiente de Chèzy (m<sup>1/2</sup>/s). El coeficiente de Chèzy se define como:

$$C = 18 \log^{12} h / k_s \quad (4)$$

Donde  $k_s$  es la rugosidad de la escala longitudinal de Nikuradse.

Asimismo, el módulo de cálculo FLOW permite simular el transporte de sedimentos, permitiendo seleccionar su forma de transporte (en suspensión o por fondo), así como el tipo de sedimento (cohesivo y no cohesivo). El método que FLOW emplea de manera predeterminada está asociado a las fórmulas de Van Rijn (Van Rijn, 1993), estando compuestas por las siguientes cargas:

- Carga de fondo debido a la corriente  $S_{bc}$
- Carga de fondo debido al oleaje  $S_{bw}$
- Carga suspendida debido a las olas  $S_{sw}$

El método Van Rijn diferencia entre la carga de fondo y la de suspensión a través de la altura de referencia  $a$ . La concentración de la carga de fondo es calculada según la siguiente expresión:

$$S_b = 0,006 \rho_s w_s D_{50} M^{0,5} M_e^{0,7} \quad (5)$$

Siendo:

- $S_b$  la concentración de la carga de fondo.
- $\rho_s$  la densidad del sedimento.
- $w_s$  la velocidad de asentamiento para material no cohesivo.
- $D_{50}$  el tamaño medio del material erosionable.
- $M$  el número de movilidad del sedimento debido al oleaje.
- $M_e$  el número de movilidad del sedimento excedente.

### 3.2.1 Modelo original de estudio

#### 3.2.1.1 Dominio y mallado

El modelo original consta de una malla de cálculo de dimensiones M:367 x N:243, con un total de 89181 celdas. La resolución máxima de la malla es de 280 m y la mínima es de 30 m, con un tamaño medio de 125 m.



Figura 3-33. Dominio de cálculo del modelo original y contornos.

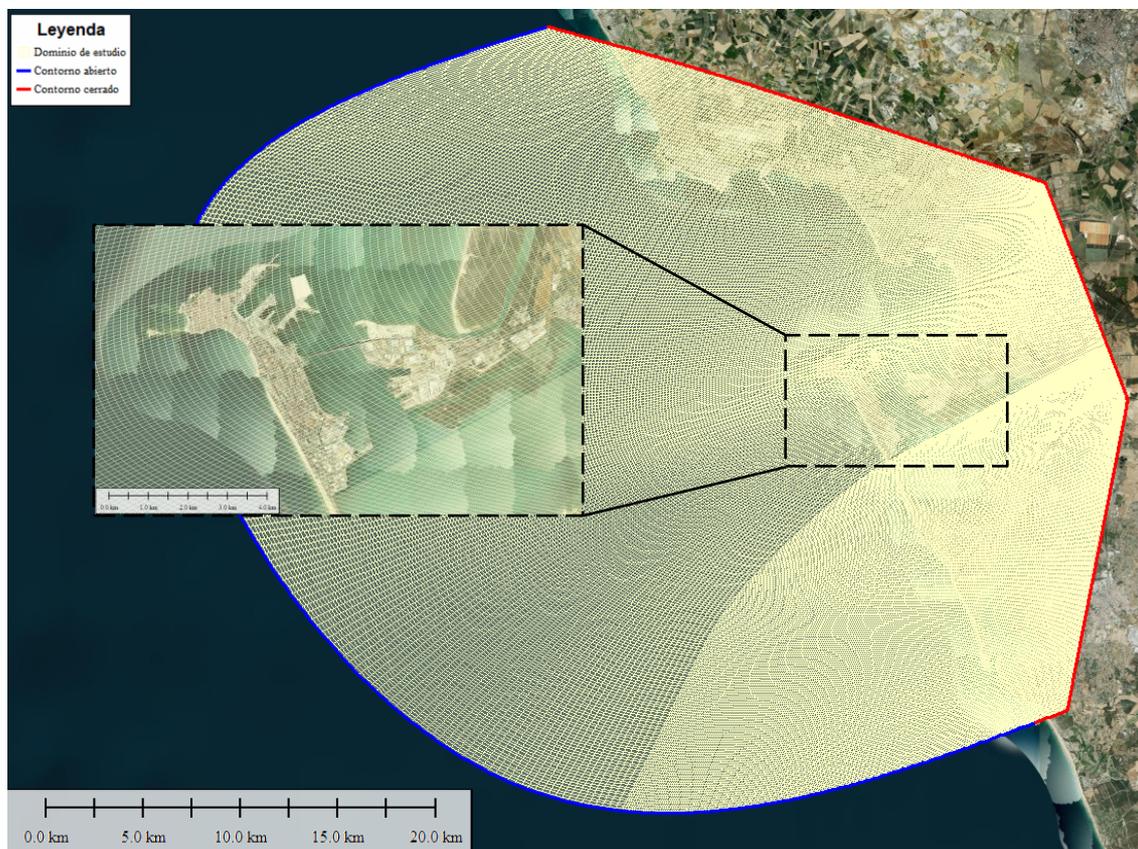


Figura 3-34. Definición del mallado del modelo original.

### 3.2.1.2 Procesos

Se han considerado en las simulaciones realizadas, para todos los casos de estudio, los procesos de salinidad, temperatura, sedimentos y viento, aunque los dos primeros no son objeto de estudio de la presente, pero podrán ser útiles en futuras líneas de investigación.

En los procesos de transporte de sedimentos se han definido dos fracciones: sedimento cohesivo y sedimento no cohesivo. El primero asociado a la fracción fina del sedimento y lodos del lecho marino, así como el segundo está relacionado con la fracción más gruesa del sedimento, correspondiente a la fracción de arenas.

La definición de los parámetros físicos y condiciones que gobiernan los procesos anteriormente mencionados puede ser comprobada en los siguientes puntos.

### 3.2.1.3 Condiciones de contorno

El modelo original cuenta con una condición de contorno tipo “nivel conocido” de la superficie libre del mar, con forzamiento tipo astronómico, incluyendo los armónicos con su amplitud y fase, para la ubicación concreta de la zona de estudio (M2, S2, SA, Q1, O1, P1, K1, 2N2, MU2, N2, NU2, L2, T2, R2, K2, MN4, M4 y MS4, siendo los de mayor relevancia por amplitud el M2 con 1,03 m, el S2 con 0,37 m y el N2 con 0,22 m).

Como se ha comentado anteriormente en el apartado de *3.1 Estudio del clima marítimo*, se han comparado las predicciones de nivel del mar del modelo original con las procedentes del modelo TMD, siendo ligeramentes superiores las del modelo original, no siendo sustituidas por nuevas predicciones, permaneciendo del lado de la seguridad.

El resto de contornos que se encuentran fuera de la costa se modelizan como contornos cerrados.

### 3.2.1.4 Condiciones iniciales

El modelo original parte con unas condiciones iniciales con valores uniformes. Establece el nivel medio del mar en 0.50 m, con una temperatura media inicial del agua de 21.8 °C y una concentración salina de 36.3 ppt.

Estos valores han sido empleados para la calibración del modelo de cálculo adaptado para el análisis de sensibilidad de cálculo del modelo y encuadre en las fechas de simulación de los distintos escenarios de estudio con los datos disponibles.

Posteriormente, se ha obtenido para los modelos definitivos un archivo *Restart file*, con un mes de simulación previa anterior a la fecha de simulación de los modelos adaptados para el presente estudio, los cuales serán descritos en apartados posteriores.

### 3.2.1.5 Parámetros físicos

Dentro de los incluidos por el modelo original, cabe destacar aquellos parámetros que han sido adaptados para las nuevas simulaciones de los casos de estudio. Es el caso de los parámetros físicos que gobiernan el transporte de sedimentos y el forzamiento del viento sobre la lámina libre del mar.

#### Sedimentos

Para la fracción no cohesiva se ha definido una densidad específica del material de 2650 kg/m<sup>3</sup> y una densidad seca del material en el lecho de 1600 kg/m<sup>3</sup>, con un diámetro medio del sedimento D<sub>50</sub> de 0.20 mm.

Para la fracción cohesiva se ha definido una densidad específica del material de 2650 kg/m<sup>3</sup> y una densidad seca del material en el lecho de 500 kg/m<sup>3</sup>, así como una velocidad de asentamiento de 0.05 mm/s para el material en agua dulce y, de 0.0325 mm/s en agua salada.

Asimismo, para esta fracción se ha definido una tensión crítica de fondo para sedimentación de 0.1 N/m<sup>2</sup> y, de 0.45 N/m<sup>2</sup> para erosión. El parámetro de erosión se establece en 0.0001 kg/m<sup>2</sup>/s.

El modelo cuenta con un archivo de zonificación de las zonas de ubicación de las capas de sedimento y con otro archivo de espesor disponible de la capa de sedimento en dichas zonas.

En la siguiente figura se muestra la zonificación de los principales sacos de masa de sedimento disponible en las simulaciones de los modelos. En rojo se muestran los sacos principales con fracción arena y, en azul, los sacos con fracción fina cohesiva.

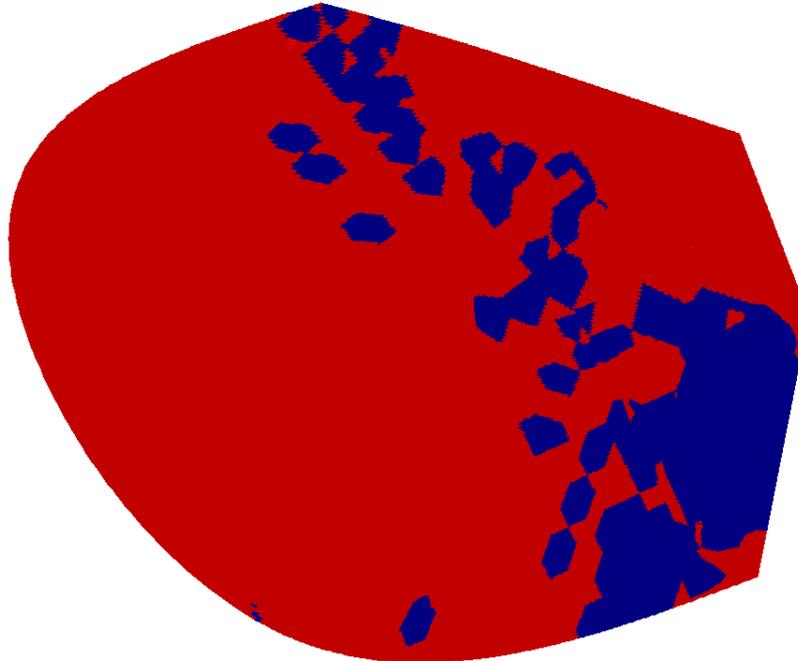


Figura 3-35. Mapa de los sacos de las dos fracciones principales de sedimentos modelizadas.

### Viento

El módulo FLOW realiza la lectura de datos de viento a través de un archivo, en el cual se pueden incluir, para cada paso de tiempo, una velocidad y dirección del viento sobre la superficie libre del modelo.

Para las simulaciones establecidas en el estudio actual, se han realizado algunas adaptaciones, las cuales serán descritas en el siguiente apartado.

#### 3.2.1.6 Secciones de control, descargas y aportaciones fluviales

Para la extracción de resultados entre los principales sacos de la bahía, según lo establecido en la Figura 2-2 en apartados anteriores, se incluyen en el modelo 5 secciones de control en los contornos abiertos en los extremos de estas zonas, zonificando los sacos de transporte según el siguiente esquema:

- **Sección A – Sección B:** Bahía Exterior.
- **Sección B – Sección C:** Canal de Puntales.
- **Sección C – Sección Carraca (CP):** Bahía Interior.
- **Sección Carraca – Sección Petri (SCP):** Caños entre Carraca y Sancti Petri.

Puede comprobarse como existen dos extremos conectados con mar abierto, así como que el sentido de circulación no es único desde el exterior hacia el interior, y viceversa, con una casuística de resultados que dependerá del sentido y la probabilidad de ocurrencia del viento predominante, así como de la marea y la combinación de ambos.

Además, se incluyen en el modelo dos puntos de descarga fluvial de los ríos Guadalete y San Pedro en la Bahía Exterior, aunque este último tiene conexión con la Bahía Interior a través de los caños de las islas de la Cortadura y el Trocadero. Cabe destacar que estos aportes fluviales no incluyen concentración de sedimento.

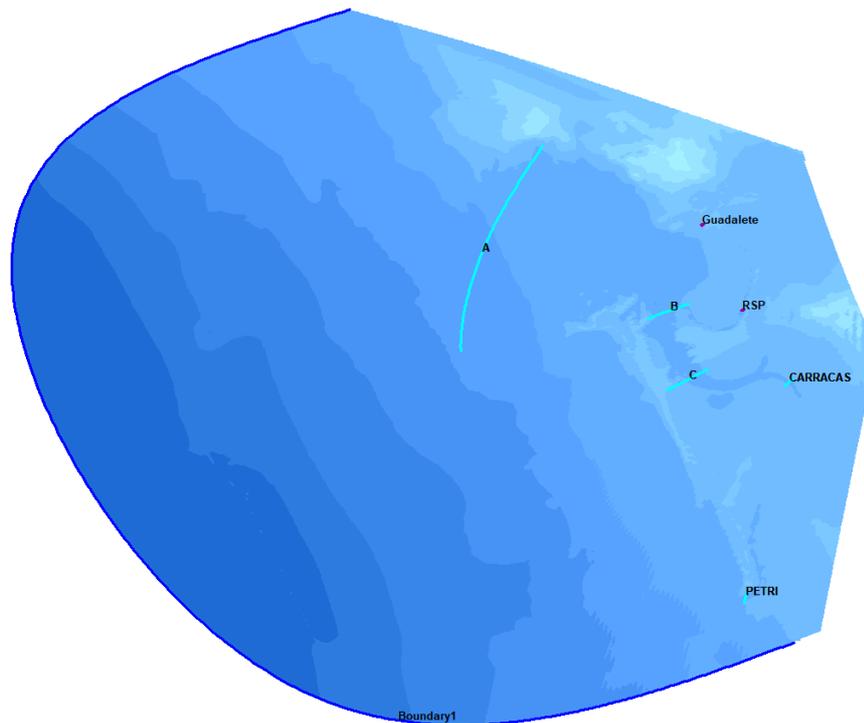


Figura 3-36. Ubicación de las secciones de control y los puntos de descarga fluvial sobre la batimetría.

### 3.2.2 Modelo de cálculo adaptado

Para la adaptación del modelo original a las simulaciones necesarias en el presente estudio, se han realizado varios cambios en los inputs de este, siguiendo el esquema que se muestra a continuación:

- Las simulaciones se han realizado para el intervalo de fechas establecido según los resultados obtenidos de mareas vivas y muertas más desfavorables, con una duración de una semana.
- Los eventos de viento extremal y medio más desfavorables, con una duración de 5 días, han sido encajados en el tiempo coincidiendo con los resultados de mareas vivas y muertas mencionados con anterioridad, desarrollando así los modelos extremales y medios más desfavorables en combinación de marea y viento.
- Las simulaciones cuentan con un archivo de simulación inicial (*restart file*) a partir del cual comenzarán a calcularse las soluciones en el transporte de sedimentos, tras el periodo de *spin-up*, de 24 horas.

Por este motivo, los eventos extremales disponen de una semana de duración, con valores nulos de viento en el primer y último día de simulación, observando que el pico de la tormenta se encuentra centrado, apareciendo en la simulación a mitad de la duración del evento, suponiéndose así un caso ideal de distribución del evento extremal centrado.

Asimismo, el primer día de viento nulo coincide con el periodo de *spin-up* del modelo y, se concede un último día de simulación sin viento en los modelos para la vuelta al equilibrio dinámico del estado medio del modelo con la actuación única de los efectos de marea, asentando los resultados de transporte de sedimento debidos a los efectos de forzamiento a través del caso de viento de estudio.

- Se obtienen resultados de la simulación cada 3 horas, coincidentes con cada estado de mar disponible para los datos de marea en el modelo, de manera aproximada, facilitando la comparación de aquellos resultados detectados relacionados con efectos de viento y de marea.

### 3.2.3 Definición de escenarios y casos de estudio

#### 3.2.3.1 Modelo de calentamiento (Restart file)

Se ha realizado un modelo de calentamiento para las simulaciones, con una duración de un mes, realizando la simulación hasta la fecha de inicio de los escenarios propuestos, los cuales son expuestos en detalle en los siguientes puntos.

Como se ha comentado en puntos anteriores, se han establecido los parámetros de simulación a través de calibraciones previas del modelo original, lo que ha permitido estabilizar los parámetros necesarios para la correcta simulación de los modelos, así como determinar el esquema de simulación para el modelo de calentamiento *restart file*, con las mismas condiciones de simulación que los modelos de simulación adaptados.

Para el modelo de calentamiento, se ha simulado durante un mes el modelo original en condiciones medias en las fechas correspondientes a un mes antes de la fecha de simulación de los escenarios sintéticos (abril 2013), con los parámetros de los modelos de simulación adaptados a los escenarios de estudio, sin incluir los efectos del viento y su forzamiento sobre la superficie libre durante el mes de simulación previa.

Por tanto, los resultados iniciales de partida de los modelos de simulación adaptados a los escenarios de estudio son debidos únicamente a los procesos dominados por las mareas, desarrollados en el mes anterior a la sucesión de las mareas viva y muerta máximas, no introduciendo en el inicio de las simulaciones de los escenarios de estudio efectos del viento en el transporte de sedimentos del modelo de calentamiento.

#### 3.2.3.2 Definición de los escenarios extremales

Los escenarios extremales se han definido mediante la combinación de los eventos de viento extremales seleccionados, tanto procedentes de levante como de poniente, centrando la consecución de dichos eventos con los casos de mareas máximas, tanto viva como muerta.

De este modo, como se ha mencionado anteriormente, se han definido cuatro escenarios extremales, dos correspondientes a mareas máximas, viva y muerta, en combinación con las dos direcciones predominantes de los eventos de viento, levante y poniente.

Para los escenarios extremales, en el centro de los 7 días de duración de las simulaciones, se sucede la marea máxima, viva o muerta, coincidiendo con la sucesión del valor máximo de viento en el evento de tormenta definido.

En el primer y último día de simulación no se aplican registros de viento al modelo, siendo el forzamiento debido al viento nulo sobre el modelo. Este aspecto es debido a la selección de eventos de viento de duración 5 días, coincidiendo con un primer día de *spin-up* del modelo y, un último día de simulación sin viento, con el objeto de devolver al escenario a la normalidad después de la sucesión del evento de tormenta.

#### 3.2.3.3 Definición de los escenarios medios

De la misma manera que en el punto anterior, los escenarios medios se han definido mediante la combinación de los eventos de viento extremales seleccionados, tanto procedentes de levante como de poniente, centrando la consecución de dichos eventos con los casos de mareas máximas, tanto viva como muerta.

Por tanto, se han definido cuatro escenarios medios, dos correspondientes a mareas máximas, viva y muerta, en combinación con las dos direcciones predominantes de los eventos de viento, levante y poniente.

Para los escenarios medios, en el centro de los 7 días de duración de las simulaciones, se sucede la marea máxima, viva o muerta, no siendo importante la variación del viento del evento medio en combinación con la aparición de la máxima marea.

En el primer y último día de simulación no se aplican registros de viento al modelo, siendo el forzamiento debido al viento nulo sobre el modelo. Este aspecto es debido a la selección de eventos de viento de duración 5 días, coincidiendo con un primer día de *spin-up* del modelo y, un último día de simulación sin viento, el cual cobra sentido en la definición de eventos extremales, siendo su definición similar en los escenarios medios con objeto de hacer ambos escenarios comparables.

### 3.2.4 Análisis de sensibilidad del modelo numérico

#### 3.2.4.1 Influencia del paso de tiempo de cálculo y del tiempo de *spin-up* en morfología

Se ha realizado un análisis previo de sensibilidad de los datos introducidos a los modelos, contemplando varios valores del paso de tiempo de cálculo de malla y, de varios valores de *spin-up* en los cálculos morfológicos dentro del modelo FLOW.

Se ha comprobado que con valores superiores a 0.50 minutos en el paso de tiempo de simulación (*step time*), tanto en las pruebas realizadas contando con el modelo de calentamiento mediante *restart file*, como en los modelos básicos de estudio de sensibilidad empleando valores uniformes en las variables de salinidad, temperatura y concentración de sólidos de las fracciones gruesa y fina del sedimento, calibrados mediante el modelo original (Zaruelo, López-Ruiz, D'Alpaos, Carniello, & Ortega-Sánchez, 2018), se produjeron los siguientes errores:

- Oscilaciones en la conservación del transporte, con fallos en elementos puntuales de la malla en aguas intermedias debidos a pasos de tiempo no suficientes para su simulación, que provocaban la indeterminación del transporte en estas celdas, corrompiendo los resultados en el resto de la malla.
- Valores del CFL demasiado bajos debidos a pasos de tiempo superiores al necesario para la estabilización del cálculo, que provocaban que el modelo abortara el cálculo por insuficiencia de medios computacionales.

Estos aspectos estaban relacionados entre sí, produciéndose en el instante de cálculo posterior al final del periodo de *spin-up* que se establecía en los modelos de pruebas de calibración, lo que ha permitido estabilizar los parámetros necesarios para la correcta simulación de los modelos, así como determinar el esquema de simulación para el modelo de calentamiento *restart file*, con las mismas condiciones de simulación que el modelo principal.

Asimismo, en el esquema numérico se ha empleado un *smoothing time* no superior a 60 min, con objeto de recoger los resultados horarios de todos los estados de mar analizados en la simulación, representando resultados en cada uno de ellos (cada 180 minutos).

Se ha tomado un valor de *spin-up* de 1440 minutos (1 día), comprobando gráficamente a través de los resultados obtenidos en los modelos de calibración, que estos resultados no mostraban oscilaciones debidas al calentamiento inicial del modelo, pudiendo representar resultados limpios no condicionados inicialmente por los parámetros de inicio impuestos en los modelos.

Por tanto, como se ha indicado en apartados anteriores, este aspecto también ha sido considerado en la selección de la duración de los eventos medios y extremos de los escenarios propuestos para las simulaciones, considerando una duración de las tormentas no menor a una semana, disponiendo de los 3 primeros días hasta el pico del evento como, empleando el primer día como *spin-up* para el inicio de variación de la morfología del modelo, comprobando que se ha conseguido satisfactoriamente el objetivo buscado en la mayoría de los escenarios estudiados, siendo residual el efecto oscilante del calentamiento inicial en algunos de los resultados mostrados en escenarios aislados.

#### 3.2.4.2 Influencia en los escenarios de cálculo

Como se ha comentado anteriormente, en algunos modelos se siguen contemplando algunas oscilaciones en los resultados de las ecuaciones conservativas de transporte de sedimentos, así como resultados anormales en puntos aislados de la malla en los resultados de erosión y cambios morfológicos en el fondo de la batimetría, relacionados con el transporte de sedimento, debidos al efecto mencionado en el punto anterior.

No obstante, se comprueba que los resultados obtenidos son consistentes y, que los valores anómalos que puedan contemplarse al inicio de gráficas de análisis de resultados o localmente en la malla y en los mapas son aislados y, no condicionan el resto de resultados obtenidos a lo largo y ancho de la malla de simulación, considerando como válidos los modelos de simulación y la calibración efectuada en estos.

### 3.3 Resultados obtenidos

En el siguiente capítulo se presentan las variables objeto de estudio, con definición a escala global y en las secciones de control, así como los objetivos perseguidos en el desarrollo de los modelos de simulación planteados y, la combinación de análisis de resultados obtenidos y la correlación entre los escenarios y casos de estudio proyectados de manera sintética.

#### 3.3.1 Variables de estudio

Para el estudio y análisis del comportamiento de los sacos de sedimento de la Bahía de Cádiz ante eventos extremos de viento, en comparación con eventos medios de viento y para la determinación de la dominancia entre marea y viento en estos eventos, se han calculado las siguientes variables en la malla de cálculo de los modelos sintéticos planteados:

- Velocidad de las corrientes promediada en profundidad.
- Transporte instantáneo y acumulado de la fracción total de sedimento.
- Erosión/sedimentación en la batimetría.

Se evaluarán los mapas de resultados de estas variables con el objeto de corroborar los resultados del comportamiento del transporte de sedimentos a través de las secciones de estudio planteadas, mostrando los resultados a escala global de la incidencia de eventos extremos y medios de viento en la bahía, así como la incidencia de la marea y la comparación de la dominancia entre ambos factores sobre el transporte del sedimento.

#### 3.3.2 Secciones de control

Para las secciones de control, las variables de análisis establecidas son las siguientes:

- Transporte instantáneo y acumulado de la fracción total de sedimento.
- Volumen de agua (prisma de marea) a través de la sección de control.

Con estas variables se analizará la tasa de transporte entre secciones contiguas, calculando así el balance en el saco contenido entre estas secciones, permitiendo conocer la pérdida o ganancia global del sedimento entre sacos, las tendencias de transporte entre ellos y la evolución del sedimento en eventos extremos y medios.



# 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

## 4.1 Resultados a escala global

### 4.1.1 Mapas de transporte de sedimentos

#### 4.1.1.1 Casos de estudio con viento predominante poniente

En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes al transporte total de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) obtenidos de las simulaciones realizadas para los casos de estudio con viento predominante de levante.

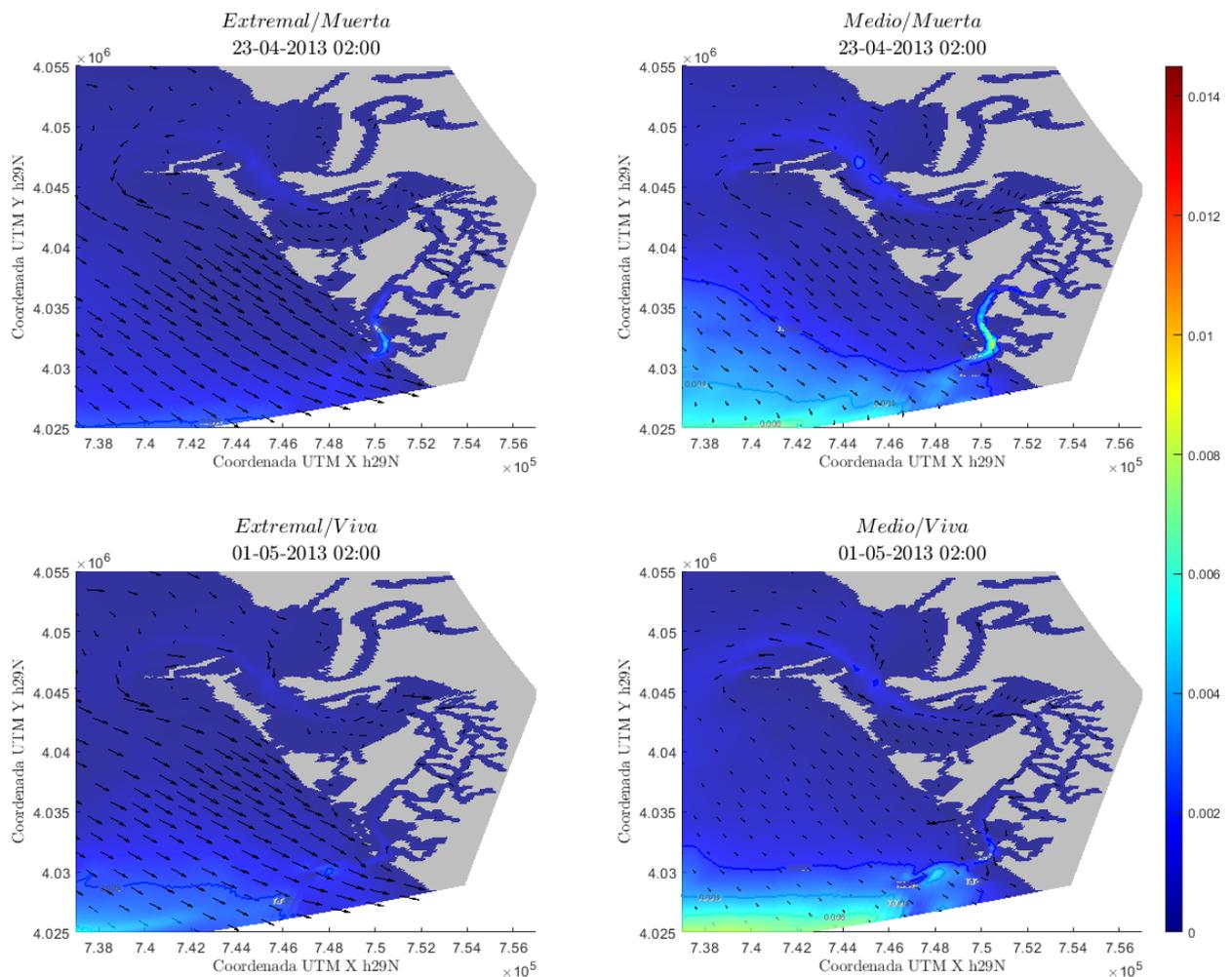


Figura 4-1. Mapa de valores máximos del transporte total de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) durante las simulaciones, para los casos con viento predominante de poniente. Las flechas indican la dirección y magnitud media máxima de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en las simulaciones.

En primer lugar, cabe destacar que el gradiente de colores indica la diferencia en cada mapa de volumen de sedimento transportado. En este sentido, se comprueba que en los casos extremales el transporte de sedimento es de un orden de magnitud similar ( $0.002 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) en la bahía exterior e interior, así como en eventos medios se comprueba que en aguas profundas en la bahía exterior el transporte de sedimento es mayor ( $0.006 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) que en la zona interior ( $0.002 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ).

Para una mejor lectura de los resultados, se han incluido curvas de nivel numeradas con el volumen de transporte, graduadas con la barra de colores incluida a la derecha de las imágenes.

Puede observarse en las imágenes anteriores el sentido predominante de la corriente hacia el Sureste de manera paralela a la bahía, con circulación hacia el interior en la zona de Sancti Petri y en la Bahía Exterior.

En la Bahía Interior los sentidos de circulación son de llenante en eventos extremales y, de vaciante en eventos medios, en contra de la dirección del viento predominante en los escenarios de estudio. Asimismo, se comprueba que el mayor transporte de sedimento ( $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) se da a través de Sancti Petri.

Se comprueba la circulación preferente del transporte a lo largo del eje del Caño de la Carraca en el interior de la bahía, con movimiento del sedimento desde la Bahía Exterior en conexión con el Canal de Puntales hacia la Bahía Interior en eventos extremales y, viceversa en eventos medios, como se ha comentado anteriormente.

#### 4.1.1.2 Caso de estudio con viento predominante levante

En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes al transporte total de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) obtenidos de las simulaciones realizadas para los casos de estudio con viento predominante de poniente.

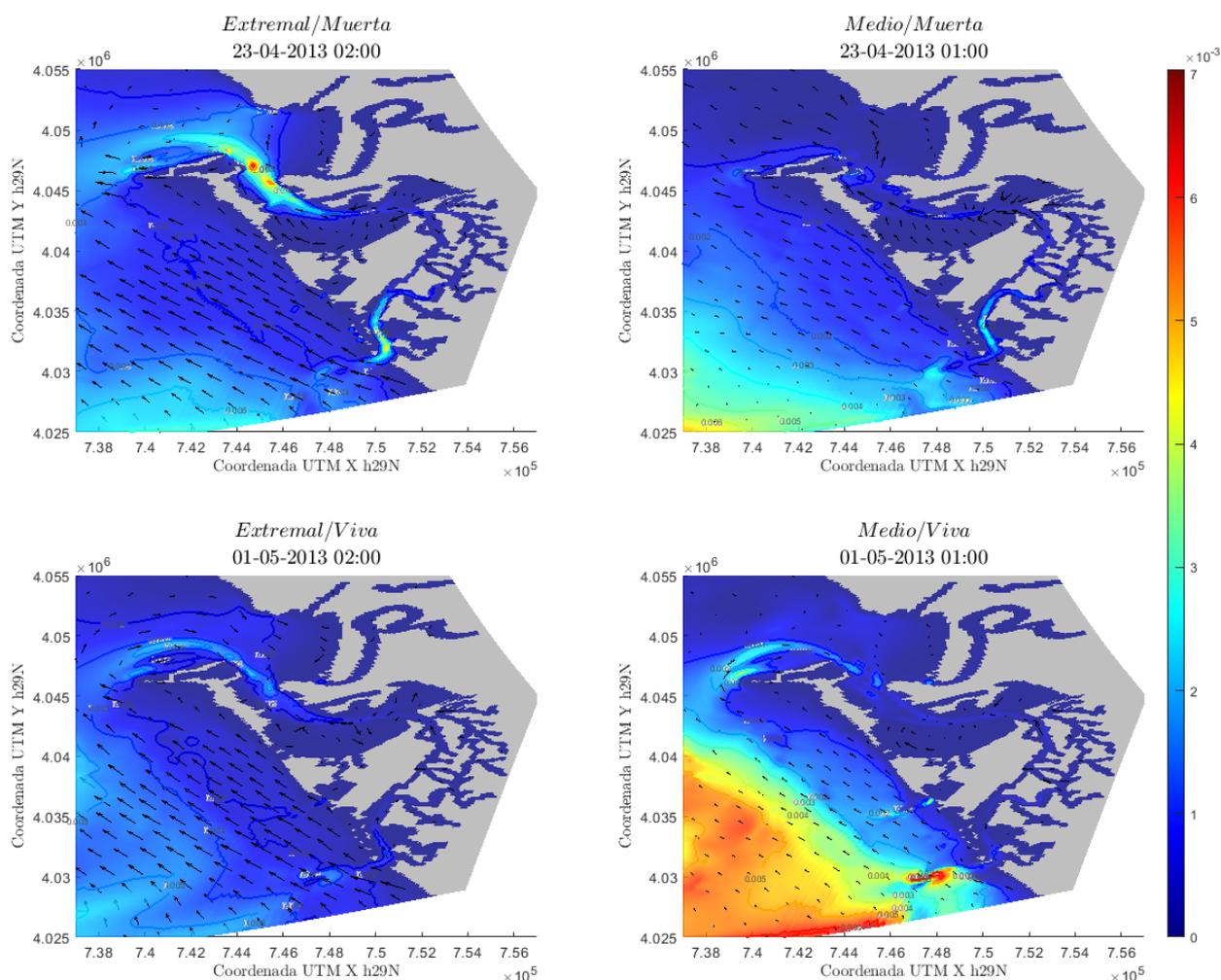


Figura 4-2. Mapa de valores máximos del transporte total de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) durante las simulaciones, para los casos con viento predominante de levante. Las flechas indican la dirección y magnitud media máxima de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en las simulaciones.

Del mismo modo, se indica que el gradiente de colores en cada mapa indica la graduación de volumen de sedimento transportado. En este sentido, se comprueba que en los casos extremos el transporte de sedimento es de un orden de magnitud similar ( $0.002 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) en la bahía exterior e interior, así como en eventos medios se comprueba que en aguas profundas en la bahía exterior el transporte de sedimento es mayor ( $0.005 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) que en la zona interior ( $0.002 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ).

Para una mejor lectura de los resultados, se han incluido curvas de nivel numeradas con el volumen de transporte, graduadas con la barra de colores incluida a la derecha de las imágenes.

En las imágenes se observa el sentido predominante de la corriente hacia el Noroeste de manera paralela a la bahía, con circulación hacia el exterior en Sancti Petri y, hacia el interior en la Bahía Exterior. En esta, la circulación de corrientes presenta, para todos los casos, un sentido preferente de vaciante, intensificándose en eventos extremos, a excepción del Canal de Puntales, siendo este aspecto objeto de estudio posterior.

Se comprueba la circulación preferente del transporte a lo largo del eje del Caño de la Carraca en el interior de la bahía, con movimiento del sedimento desde la Bahía Exterior en conexión con el Canal de Puntales hacia la Bahía Interior en eventos extremos y, viceversa en eventos medios, como se ha comentado anteriormente.

## 4.1.2 Mapas de erosión y sedimentación

### 4.1.2.1 Casos de estudio con viento predominante poniente

En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes a la erosión/sedimentación (cm) en la batimetría al final de las simulaciones de los escenarios con casos de estudio de viento de poniente.

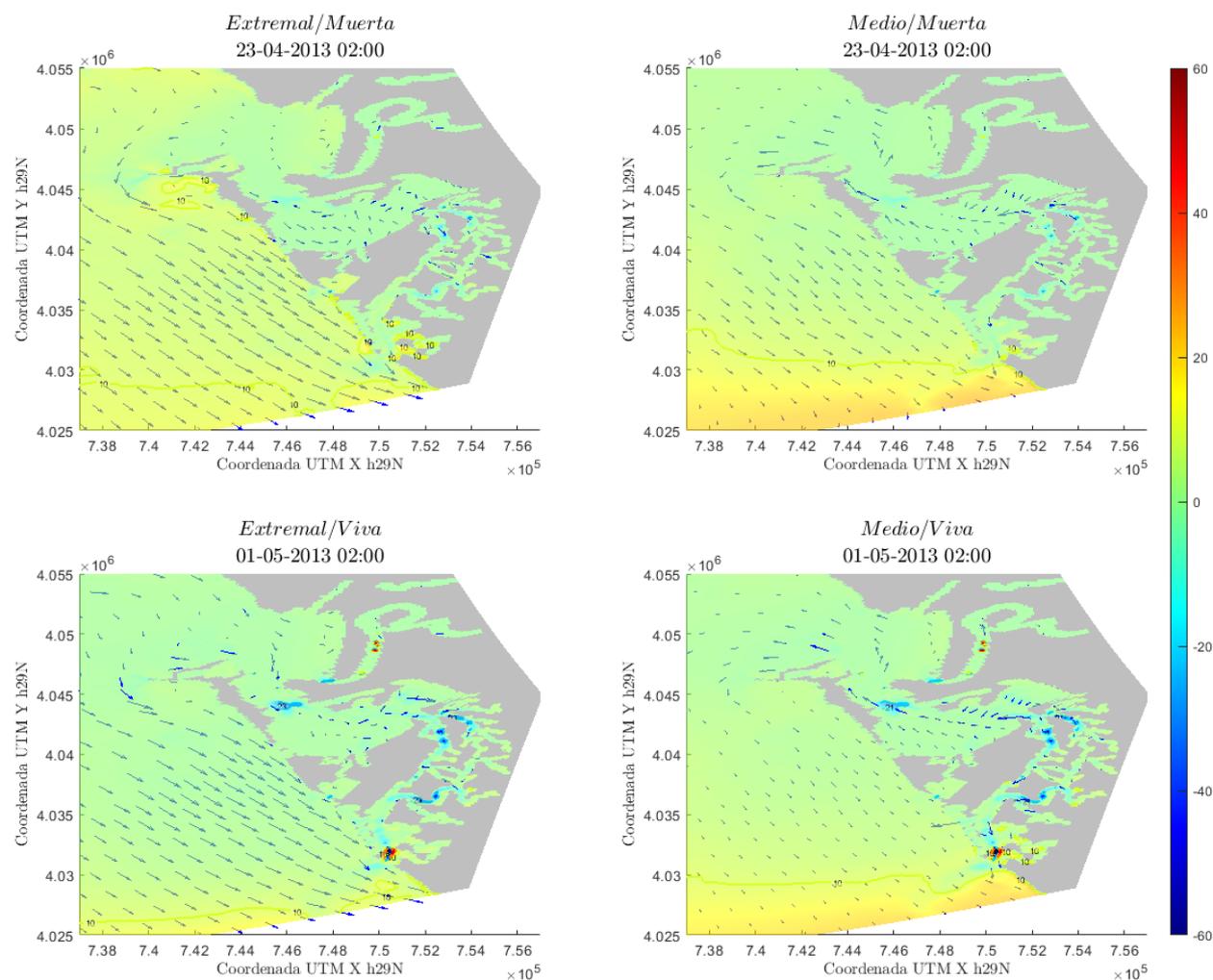


Figura 4-3. Mapa de valores máximos de erosión (negativos) y sedimentación (positivos) medidos en cm durante las simulaciones, para los casos con viento predominante de poniente. Las flechas indican la dirección y magnitud media máxima de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en las simulaciones.

Puede comprobarse que, para los escenarios de poniente planteados, las zonas de la bahía interior y exterior se encuentran en regímenes de equilibrio, con sedimentación en todos los sacos de manera global.

No obstante, se comprueba la existencia de zonas propensas a la erosión, influenciadas por la dominancia de la marea, particularmente a la salida del Canal de Puntales (-30 cm) y, en la entrada y zona media de los caños entre Sancti Petri y Carraca (-20 cm).

En la entrada del Canal de Puntales, en la zona del Puerto, aparecen menores sedimentaciones (5 cm) en comparación a las erosiones detectadas a la salida (-30 cm), debidas al efecto del canal en su expansión con la bahía interior, siguiendo el curso del Caño de la Carraca.

Sin embargo, en las márgenes de este caño, es decir, en las ensenadas laterales de la Isla del Trocadero y en Punta Canteras en la Isla de San Fernando, se produce la sedimentación de manera global (<5 cm).

Al mismo tiempo, se detecta una zona con sedimentación notable en la salida del Caño de Sancti Petri (>60 cm). El Canal Principal de Sancti Petri presenta varias zonas con sedimentación (entre 5 y 10 cm) en el tramo tras el Club Náutico de Sancti Petri hasta la curva del canal con el Río Salado, donde se produce un fenómeno de erosión localizada (-20 cm). En dicha curva el caño principal se divide en dos, continuando el anterior en la zona Oeste, apareciendo en la zona Este el Caño del Zurraque.

En el Caño de Sancti Petri hasta el Arsenal de la Carraca en la desembocadura con la Bahía Interior y, el Caño del Zurraque en toda su extensión, se observan de manera generalizada zonas de sedimentación (entre 5 y 10 cm).

En la zona del Arsenal de la Carraca en la conexión con la Bahía Interior se observan zonas de erosión (-20 cm), siguiendo el curso del Caño de la Carraca a través de la bahía interior.

Cabe destacar que las tendencias de sedimentación y erosión en las respectivas zonas mencionadas se ven aumentadas (de 10 cm a >60 cm, tanto en erosión como en sedimentación) con los efectos de las mayores carreras de marea, en los casos de simulación de mareas vivas máximas.

Asimismo, puede comprobarse que, para los casos de viento predominante de poniente, no es determinante la diferencia entre eventos extremos y medios de viento.

En este sentido, se comprueba que para eventos medios y extremos de vientos de poniente, el transporte en la zona interior de la bahía está dominada por las mareas, preferentemente en los canales de navegación y los cursos principales de los caños.

Este último aspecto será comprobado en los resultados presentados por el estudio particular de la dominancia entre marea y viento para los casos de estudio planteados, en los apartados finales del presente capítulo.

#### **4.1.2.2 Casos de estudio con viento predominante levante**

En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes a la erosión/sedimentación (cm) en la batimetría al final de las simulaciones de los escenarios con casos de estudio de viento predominante de levante.

Del mismo modo que ocurría en el punto anterior, puede comprobarse que, para los escenarios de levante planteados, las zonas de la bahía interior y exterior se encuentran en regímenes de equilibrio, con sedimentación en todos los sacos de manera global.

No obstante, como ya se comprobó en los casos de poniente, se detecta la existencia de algunas zonas interiores propensas a la erosión, concentradas en la zona de la salida del Canal de Puntales (-30 cm) y, en la entrada y zona media de los caños entre Sancti Petri y Carraca (-20 cm).

El comportamiento de los escenarios planteados para eventos de levante es similar a los estudiados previamente procedentes de poniente, pero con una mayor tendencia a la sedimentación (<5 cm) en la zona exterior de la bahía, así como se comprueba la existencia de erosión en las márgenes del Caño principal de la Carraca a lo largo de la Bahía Interior, es decir, en las ensenadas laterales de la Isla del Trocadero y en Punta Canteras en la Isla de San Fernando.

De manera global, el comportamiento de la Bahía Interior en todos los casos de estudio es la de sedimentación, como se comprobará en los resultados de los apartados finales del presente estudio. Sin embargo, para eventos extremos y medios procedentes de levante (más enérgicos que los procedentes de poniente) se produce la

erosión de manera local (-10 cm) en las márgenes de la ensenada central, lugar donde aparecen sedimentaciones en los eventos de poniente.

Por tanto, se denota que los vientos procedentes de levante *frenan* la sedimentación en la Bahía Interior, aunque no cambian el sentido generalizado de esta, alimentada principalmente por el volumen de sedimento proporcionado a través de los caños de la Carraca y Sancti Petri, el cual también se ve *frenado* en eventos de levante debido al aumento de la erosión generalizada en los caños.

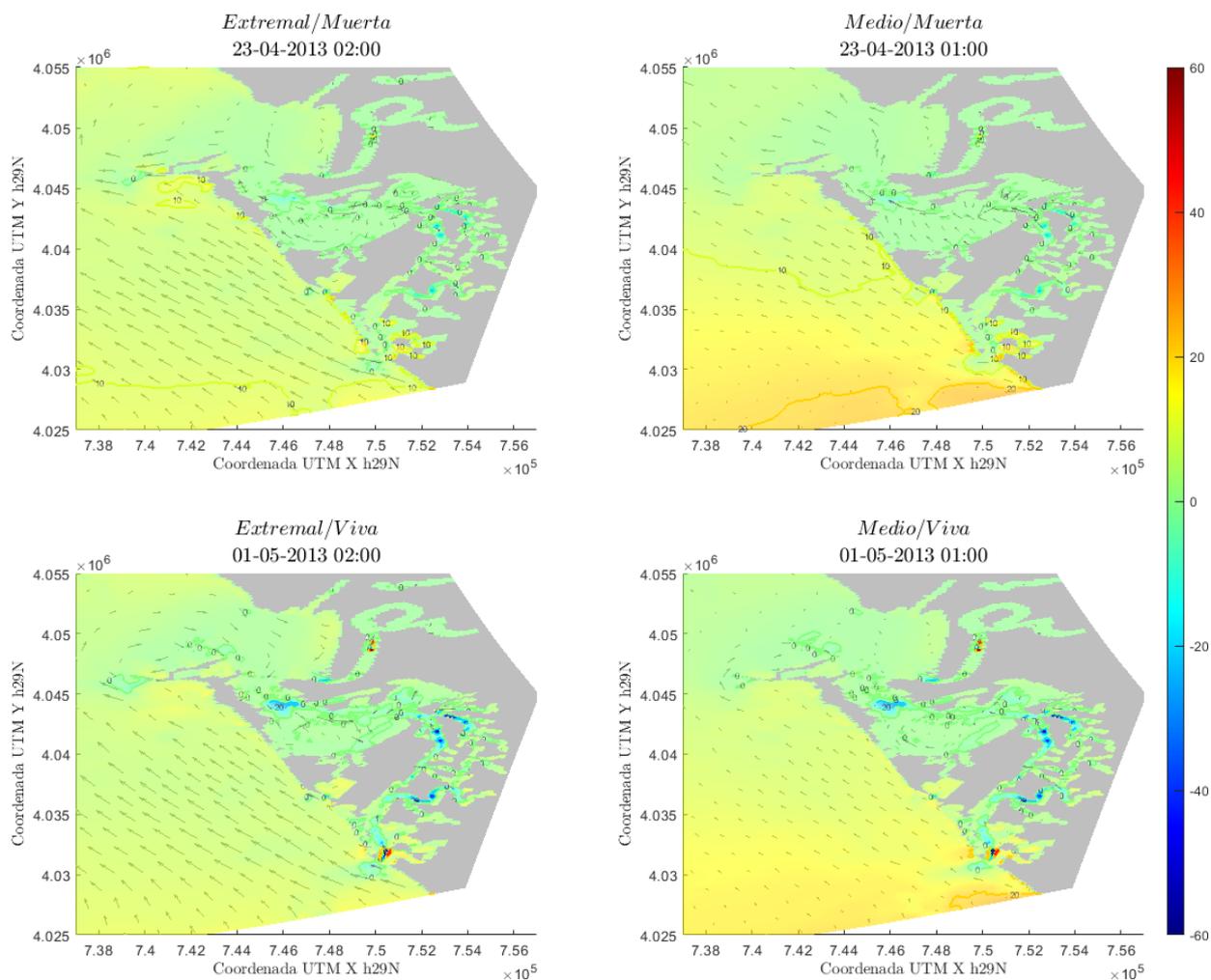


Figura 4-4. Mapa de valores máximos de erosión (negativos) y sedimentación (positivos) medidos en cm durante las simulaciones, para los casos con viento predominante de levante. Las flechas indican la dirección y magnitud media máxima de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en las simulaciones.

Como ya se ha comprobado en los resultados de los eventos con viento predominante de poniente, se detecta una sedimentación notable (>60 cm) en la salida del Caño de Sancti Petri.

El comportamiento del sedimento en la zona de los caños es similar al comprobado en los casos de estudio de poniente. Sin embargo, puede visualizarse un aumento de la de erosión de manera generalizada en los caños (las líneas de contorno verde en el mapa indican aquellas zonas con aumento de erosión).

Para el caso particular de eventos extremos de levante y, de manera contraria a lo comprobado en eventos predominantes de poniente, puede comprobarse que en estos casos sí es determinante la diferencia entre eventos extremos y medios de viento.

Para eventos extremos de poniente, el transporte en la zona interior de la bahía está dominada en combinación de viento y marea, preferentemente en las canales de navegación y los cursos principales de los caños. En cambio, y como podrá comprobarse en el estudio particular de la dominancia de marea y viento en los modelos efectuados, se visualiza que en las zonas cercanas a la línea de costa se comprueba que la dominancia del viento

supera a la de la marea, cobrando especialmente sentido este aspecto en combinación con los resultados de las zonas con mayor tendencia de erosión, aumentando esta tendencia en la Bahía Interior y en la zona de los caños.

Por último, cabe destacar que, para todos los eventos de viento combinados con mareas máximas muertas, especialmente para eventos de viento predominante de levante, se produce un nivel de sedimentación notable (20 cm) en el Canal de Carboneras, tras la Playa de Sancti Petri.

### 4.1.3 Definición de las secciones de control

Las secciones se han trazado de manera estratégica con sus normales en sentido de vaciante, es decir, desde el interior hacia el exterior de la bahía.

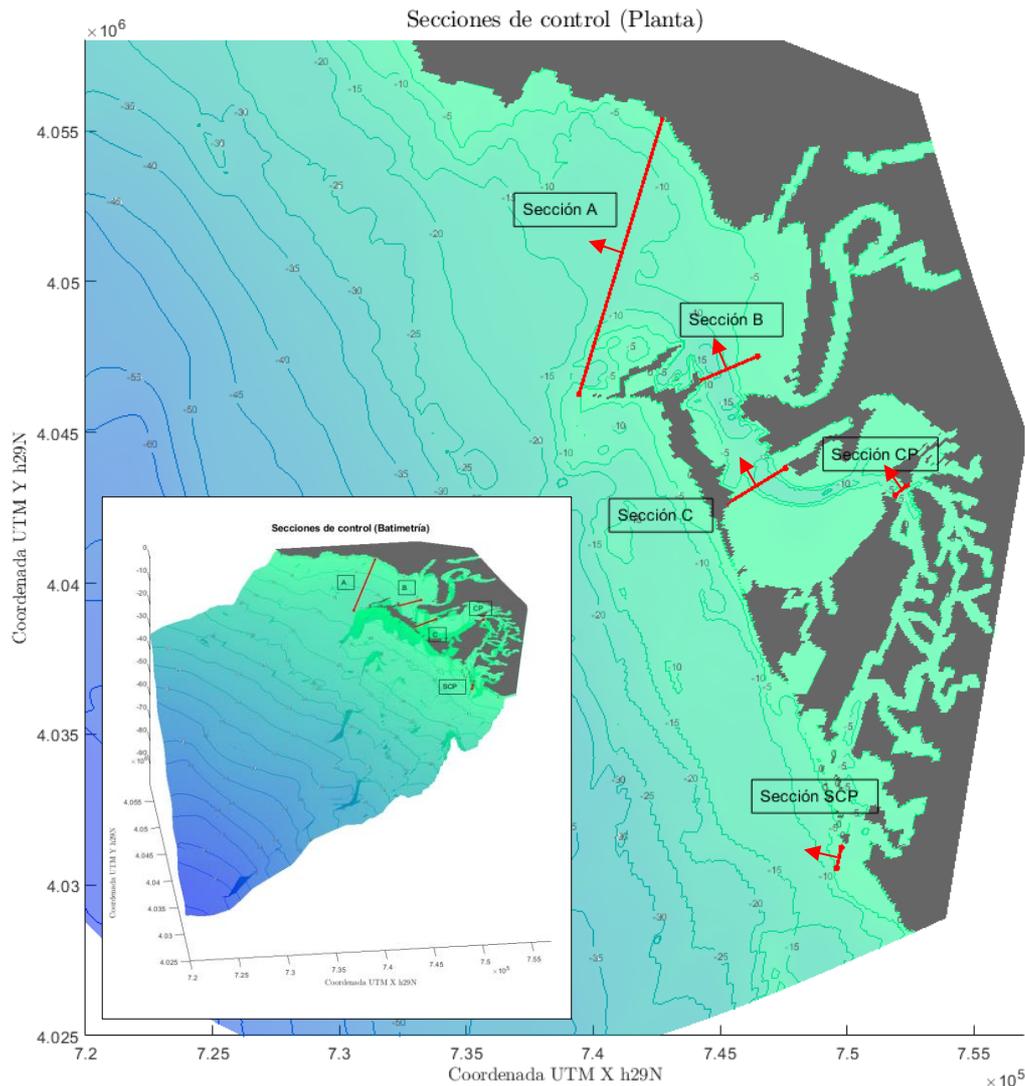


Figura 4-5. Mapa de las secciones de control en planta sobre la batimetría (con gráfico tridimensional). Las flechas en rojo indican el sentido de la normal del plano de la sección.

Resultados negativos a través de las secciones significarán la entrada de las corrientes hacia el interior de la bahía y, resultados positivos, la salida hacia el exterior.

Tendencias positivas en la diferencia entre secciones contiguas significarán la pérdida del sedimento en las corrientes a lo largo de las secciones, indicando este aspecto la sedimentación en el saco evaluado entre las secciones correspondientes., y viceversa para el caso de tendencia negativa, significando la erosión en el saco.

#### 4.1.4 Transporte de sedimentos: análisis del balance instantáneo de sedimentos

##### 4.1.4.1 Casos de estudio con viento predominante poniente

En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes al transporte instantáneo de sedimentos a través de las secciones durante las simulaciones de los escenarios con casos de estudio de viento predominante de poniente.

Por filas se muestran los resultados en cada sección y, por columnas, los resultados correspondientes para los casos con mareas máximas viva y muerta. En cada gráfica se muestran dos curvas, en azul se muestran los resultados para el escenario de evento medio y, en rojo, para el escenario de evento extremal.

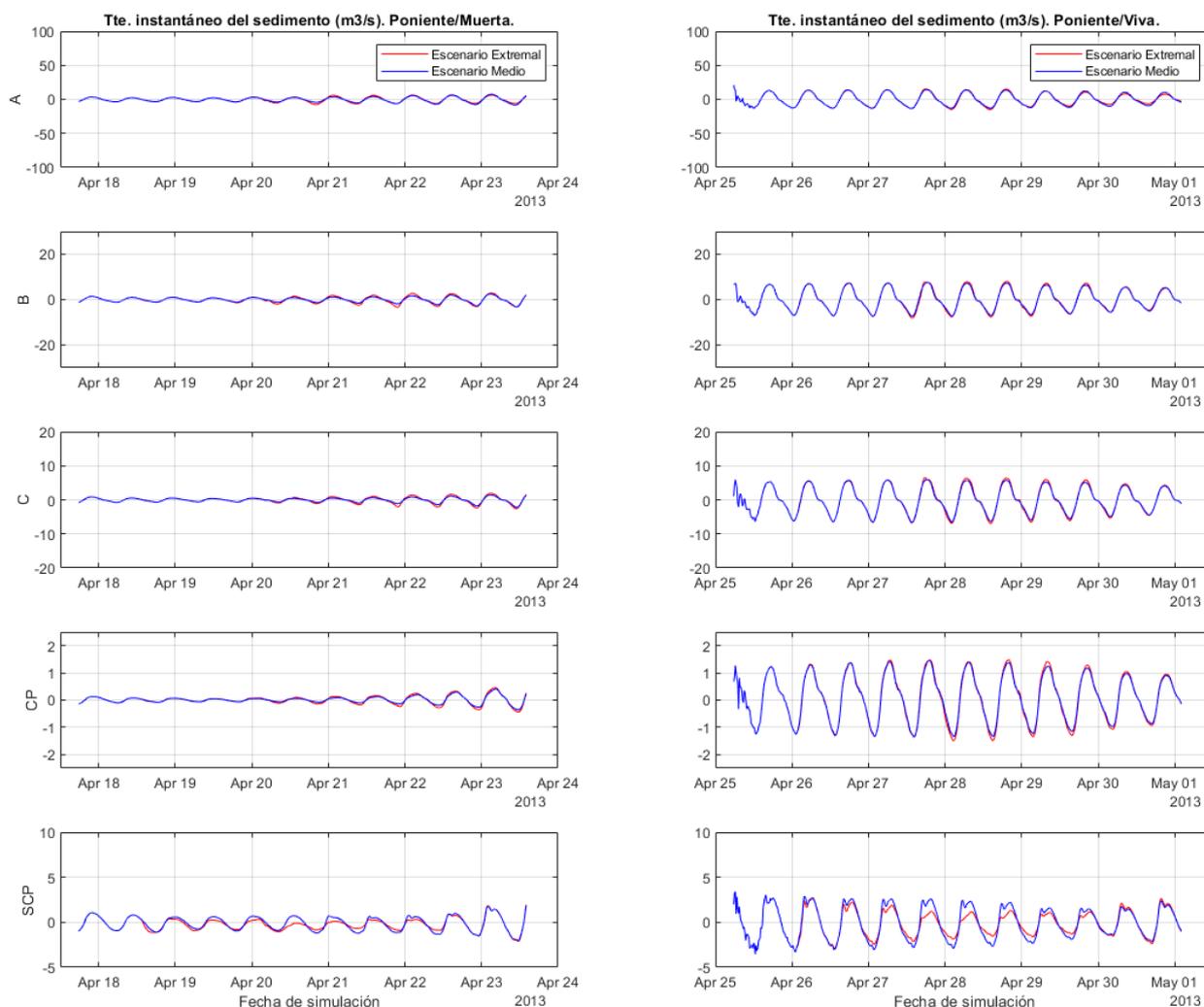


Figura 4-6. Gráficos del transporte instantáneo de la fracción total de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de poniente.

De manera general para todas las secciones, en la comparación entre los resultados de ambas columnas, se observa que el transporte aumenta con el efecto de las mareas vivas máximas, como puede comprobarse en la Tabla 4-1. Para la sección A, en la Bahía Exterior, el aumento del transporte en los escenarios de mareas vivas es del orden de 4 veces el transporte en los escenarios de mareas muertas (de 5 a  $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ).

Para las secciones B y C en el Canal de Puntales, el aumento del transporte es del orden de 3 veces (de 3 a  $8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), siendo esta tendencia similar en la sección CP en el Arsenal de la Carraca (de 0.5 a  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ).

En el caso particular de la sección SCP, en la desembocadura de Sancti Petri, se comprueba que el orden de magnitud del aumento en el transporte del sedimento es similar para los escenarios extremales (de 1 a  $3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), siendo de un orden menor, de 2 veces el aumento del transporte en los escenarios medios (de 2 a  $4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ).

Del mismo modo, como se ha comprobado en el apartado anterior, puede observarse que, para los casos de viento predominante de poniente, no es determinante la diferencia entre eventos extremales y medios de viento.

Como se ha mencionado en este sentido, se comprueba también a través de los resultados de transporte en las secciones que, para eventos medios y extremales de vientos de poniente, el transporte en la zona interior de la bahía está dominado por las mareas, preferentemente en los cursos principales de los caños, siendo el resultado de transporte del sedimento en los casos medios similar al resultado obtenido para los casos extremales.

Para el caso particular de la sección SCP en la desembocadura del Caño de Sancti Petri, en los casos de viento de poniente, siendo más notable en combinación con mareas vivas, se comprueba que la residual resultante del transporte de sedimentos es ligeramente negativa (del orden de  $-1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), siendo el transporte negativo superior al transporte positivo a lo largo de la gráfica de resultados mostrada en la Figura 4-6.

Este aspecto indica la entrada de sedimento a la bocana de la canal de navegación de Sancti Petri en condiciones de eventos medios de viento de poniente, siendo el efecto mayor en combinación con mareas vivas, produciéndose la sedimentación en esta zona. Este hecho es relevante en la actualidad para esta zona, siendo necesario el dragado de mantenimiento de la canal de navegación a la entrada de Sancti Petri.

#### 4.1.4.2 Casos de estudio con viento predominante levante

En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes al transporte instantáneo de sedimentos a través de las secciones durante las simulaciones de los escenarios con casos des estudio de viento predominante de levante.

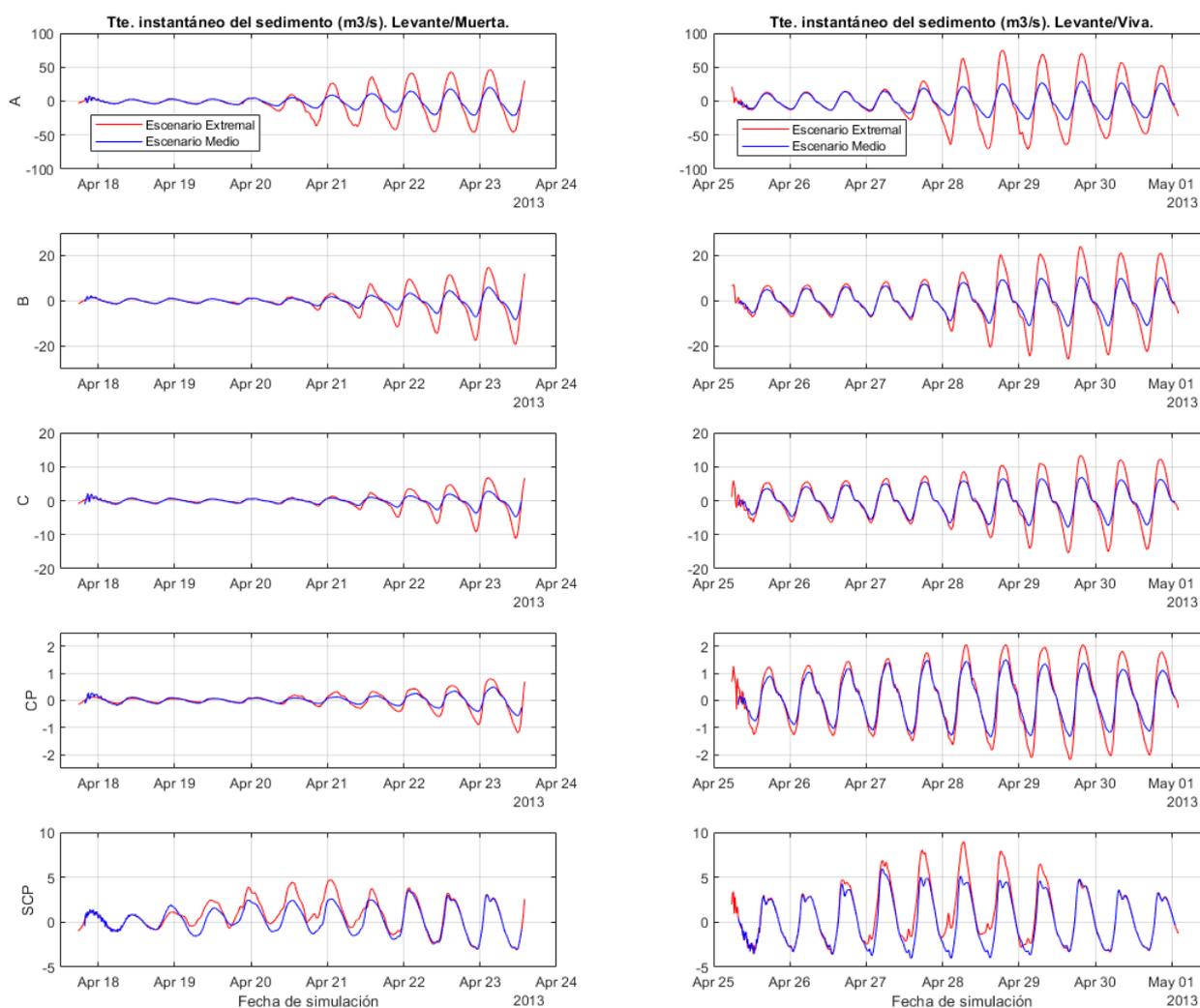


Figura 4-7. Gráficos del transporte instantáneo de la fracción total de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de levante.

De manera general para todas las secciones, para los eventos predominantes de levante puede comprobarse que, del mismo modo que ocurría en los eventos predominantes de poniente, el transporte aumenta con el efecto de las mareas vivas máximas, como puede comprobarse en la Tabla 4-1.

Para la sección A, en la Bahía Exterior, el aumento del transporte en los escenarios de mareas vivas en combinación con vientos extremos de levante es del orden de 1.5 veces el transporte en los escenarios de mareas muertas (de 50 a 70 m<sup>3</sup>/s/m). En los escenarios medios este aumento de transporte en mareas vivas es de 1.25 veces el transporte en mareas muertas (de 20 a 25 m<sup>3</sup>/s/m).

Para la sección B, en el Canal de Puntales, el aumento del transporte en los escenarios de mareas vivas en combinación con vientos extremos de levante es del orden de 1.2 veces el transporte en los escenarios de mareas muertas (de 20 a 24 m<sup>3</sup>/s/m). En los escenarios medios este aumento de transporte en mareas vivas es de 1.4 veces el transporte en mareas muertas (de 7 a 10 m<sup>3</sup>/s/m).

En el caso de la sección C, en la entrada a la Bahía Interior desde el Canal de Puntales, el aumento del transporte en los escenarios de mareas vivas en combinación con vientos extremos de levante es del orden de 1.4 veces el transporte en los escenarios de mareas muertas (de 11 a 15 m<sup>3</sup>/s/m). En los escenarios medios este aumento de transporte es de 2.5 veces (de 3 a 8 m<sup>3</sup>/s/m). Para la sección CP, en el Arsenal de la Carraca, este aumento es de 2 veces el transporte en mareas vivas respecto al de mareas muertas en escenarios extremos (de 1.1 a 2.1 m<sup>3</sup>/s/m) y, de 3 veces, en escenarios medios (de 0.5 a 1.5 m<sup>3</sup>/s/m).

En el caso particular de la sección SCP, en la desembocadura de Sancti Petri, se comprueba que el orden de magnitud del aumento en el transporte del sedimento es similar para los escenarios extremos (de 5 a 9 m<sup>3</sup>/s/m), siendo de 1.25 veces el aumento del transporte en los escenarios medios (de 4 a 5 m<sup>3</sup>/s/m).

Sin embargo, de manera contraria a los resultados en los casos predominantes de poniente, puede comprobarse que los eventos extremos de levante aumentan el transporte de sedimentos en comparación con el transporte observado en los eventos medios, no observándose una similitud de resultados entre escenarios, siendo importante el aumento del transporte en las secciones correspondientes a la Bahía Exterior (A), Canal de Puntales (B) y Bahía Interior (C), como puede comprobarse en la Tabla 4-1 y en la Figura 4-7.

Para el caso de la sección SCP en la desembocadura del Caño de Sancti Petri, se comprueba que el transporte de sedimento durante la punta del evento extremal de levante (centro de los resultados en la gráfica) no está centrado en 0.

De este modo, el transporte residual resultante no sería nulo a lo largo de la evolución del transporte en este escenario, observándose una tendencia de transporte del sedimento hacia fuera de los caños (vaciantes) del orden de 2 m<sup>3</sup>/s/m, apoyado en los resultados de erosión interior y en la sedimentación a la salida del caño principal.

#### 4.1.4.3 Resumen de los resultados del transporte instantáneo de sedimento en las secciones

En el presente apartado se muestra una tabla resumen con los resultados (máximos/mínimos) del transporte instantáneo de sedimentos a través de las secciones, haciendo alusión a algunos aspectos y comparaciones entre los resultados obtenidos para los escenarios y casos modelizados.

Los signos en los valores resultantes indican el sentido de transporte del sedimento a través de cada sección, en comparación con el sentido marcado por la normal definida para cada una de estas secciones (véase el apartado 4.1.3 *Definición de las secciones de control* y la Figura 4-5).

Según se observa en la comparación de resultados de la Tabla 4-1, para escenarios medios de viento en las secciones C y CP, el transporte de sedimento en los escenarios de poniente parece ser de un orden de magnitud similar a los resultados mostrados en los escenarios de levante.

En la sección A, el transporte medio en escenarios de levante es 4 veces superior al de los escenarios de poniente (de 5 a 20 m<sup>3</sup>/s/m) en mareas muertas y, de 1.25 veces (de 20 a 25 m<sup>3</sup>/s/m) en mareas vivas. En la sección B se observa la misma tendencia con un orden de magnitud inferior, de 3 veces, entre el transporte medio en levante en comparación con el de poniente (de 3 a 9 m<sup>3</sup>/s/m) en mareas muertas y, de 1.25 veces (de 8 a 10 m<sup>3</sup>/s/m) en mareas vivas.

Para la sección SCP, los resultados en los escenarios medios de levante son superiores a los de poniente, siendo 2 veces superior en casos de combinación con mareas muertas (de 2 a 4 m<sup>3</sup>/s/m) y, de 1.25 veces para mareas vivas (de 4 a 5 m<sup>3</sup>/s/m).

Por tanto, se comprueba que, en escenarios medios, el transporte de sedimentos en mareas muertas aumenta del orden de 4 veces en la Bahía Exterior, de 3 veces en el Canal de Puntales y, de 2 veces en los caños de Sancti Petri en comparación con el transporte resultante en mareas vivas y, que, en mareas vivas, el factor de aumento del transporte es de 1.25 de manera generalizada en estos sacos.

Aunque el aumento del transporte sea mayor en los escenarios medios combinados con mareas muertas, el transporte observado en mareas vivas es superior al transporte resultante en mareas muertas, según puede comprobarse en la Tabla 4-1.

Transporte instantáneo del sedimento ( $m^3/s$ ) - Valores máximos/mínimos (Signo indica el sentido del transporte según la normal de la sección)									
Escenarios	Viento	Poniente				Levante			
Secciones	Caso	Extremal		Medio		Extremal		Medio	
	Marea	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva
Bahía Exterior	A	+5/-5	+20/-20	+5/-5	+20/-20	+50/-50	+70/-70	+20/-20	+25/-25
Canal de Puntales	B	+3/-3	+8/-8	+3/-3	+8/-8	+18/-20	+22/-24	+7/-9	+10/-10
Bahía Interior	C	+3/-3	+8/-8	+3/-3	+8/-8	+9/-11	+13/-15	+3/-5	+8/-8
Arsenal de la Carraca	CP	+0.5/-0.5	+1.6/-1.6	+0.5/-0.4	+1.5/-1.4	+0.9/-1.1	+2/-2.1	+0.5/-0.5	+1.5/-1.2
Acceso caño Sancti Petri	SCP	+1/-1	+3/-3	+2/-2	+4/-3	+5/-3	+9/-3	+4/-3	+5/-4

Tabla 4-1. Resumen de los resultados del transporte instantáneo del sedimento en las secciones

En escenarios extremales de viento, para la sección A, el transporte en escenarios de levante es 10 veces superior al de los escenarios de poniente (de 5 a 50  $m^3/s/m$ ) en mareas muertas y, de 3.5 veces (de 20 a 70  $m^3/s/m$ ) en mareas vivas. En la sección B se observa la misma tendencia con un orden de magnitud inferior, de 6 veces, entre el transporte medio en levante en comparación con el de poniente (de 3 a 20  $m^3/s/m$ ) en mareas muertas y, de 3 veces (de 8 a 24  $m^3/s/m$ ) en mareas vivas.

Para la sección C, y de manera contraria a lo que ocurría en los escenarios medios, para los escenarios extremales se comprueba que el transporte de levante es de 3.5 veces en mareas muertas (de 3 a 11  $m^3/s/m$ ) y, de 2 veces (de 8 a 15  $m^3/s/m$ ) en mareas vivas. En la sección CP, el transporte en escenarios de levante es 2 veces superior al de los escenarios de poniente (de 0.5 a 1.1  $m^3/s/m$ ) en mareas muertas y, de 1.3 veces (de 1.6 a 2.1  $m^3/s/m$ ) en mareas vivas.

Para la sección SCP, los resultados en los escenarios extremales de levante son superiores a los de poniente, siendo 5 veces superior en casos de combinación con mareas muertas (de 1 a 5  $m^3/s/m$ ) y, de 3 veces para mareas vivas (de 3 a 9  $m^3/s/m$ ).

Por tanto, se comprueba que, en escenarios extremales, el transporte de sedimentos en mareas muertas aumenta del orden de 10 veces en la Bahía Exterior, de 6 veces en el Canal de Puntales y, de 3.5 veces en los caños de Sancti Petri en comparación con el transporte resultante en mareas vivas y, que, en mareas vivas, el factor de aumento del transporte es de 3 de manera generalizada en estos sacos.

Estos resultados muestran que la tendencia de transporte en escenarios extremales es del **doble** de la observada en los escenarios medios (factores de 10, 6 y 3.5 de aumento del transporte en escenarios extremales frente a 4, 3 y 2 en escenarios medios para mareas muertas y, factores de 3 frente a 1.25 de manera generalizada en los sacos para mareas vivas).

Finalmente, del mismo modo que se comprobó con los escenarios medios, aunque la tendencia de transporte aumente en mayor magnitud en los escenarios medios de mareas muertas, el transporte observado en mareas vivas es superior al transporte resultante en mareas muertas, según puede comprobarse en la Tabla 4-1.

## 4.1.5 Transporte de sedimentos: análisis del balance acumulado de sedimentos

### 4.1.5.1 Casos de estudio con viento predominante poniente

En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes al transporte acumulado de sedimentos a través de las secciones durante las simulaciones de los escenarios con casos de estudio de viento predominante de poniente.

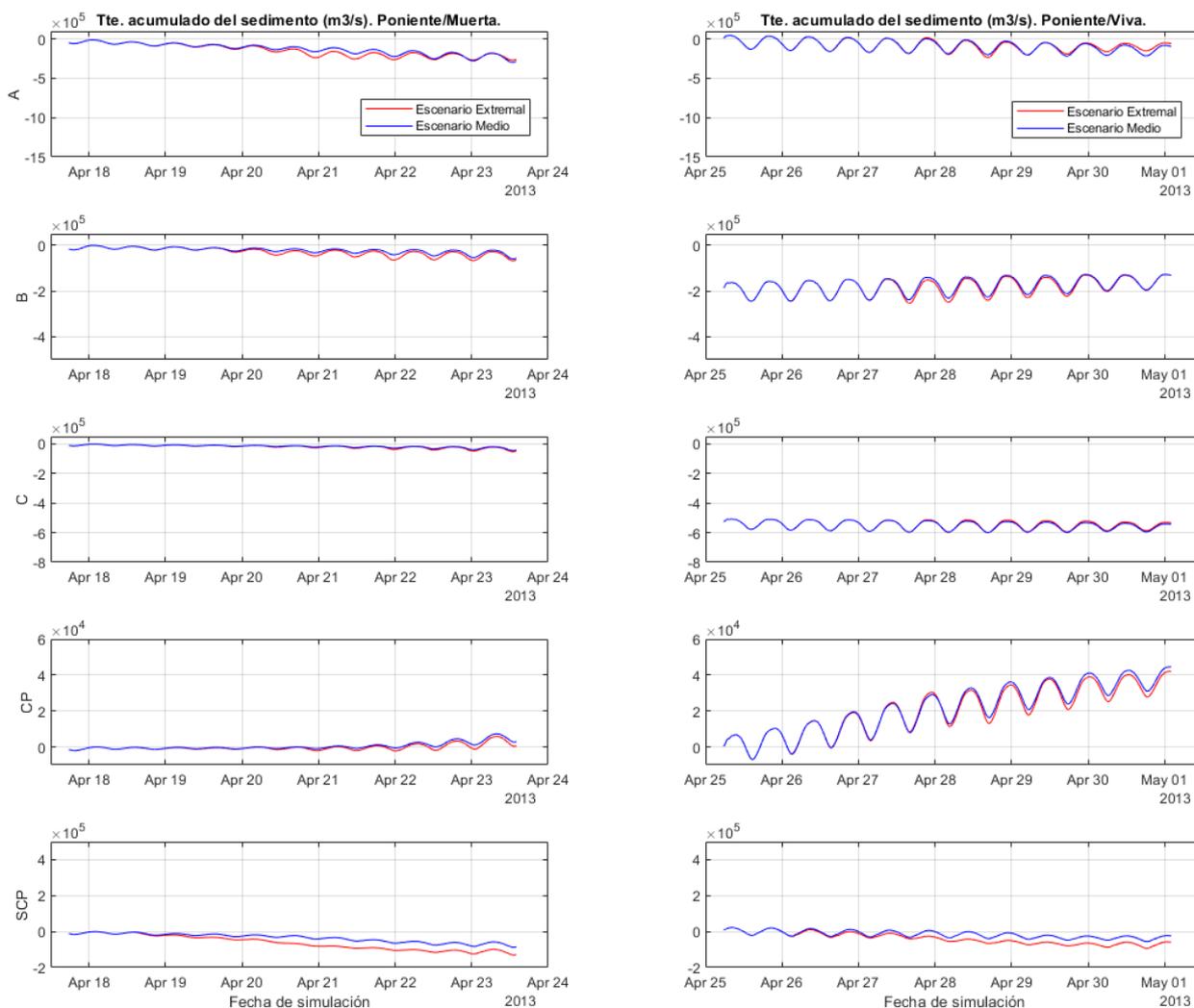


Figura 4-8. Gráficos del transporte acumulado de la fracción total de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de poniente.

Las gráficas de transporte acumulado de sedimento muestran unos resultados similares para los casos medios y extremos con vientos predominantes de poniente, como muestran los resultados en la Tabla 4-2, comprobándose que para estos casos no es dominante el viento sobre el transporte, siéndolo así la marea.

Las direcciones del transporte para estos casos son predominantemente hacia el interior de la bahía (llenante máxima), transportando el sedimento hacia la Bahía Interior.

Para la sección (SCP) a la salida de Sancti Petri, se comprueba que la dirección del transporte de sedimento es hacia el interior de los caños. El ritmo de transporte a través de la sección CP, en casos de mareas máximas, parece ser mayor al de entrada en la sección SCP, perdiendo sedimento en la zona de los caños, transportado hacia la Bahía Interior.

Este fenómeno parece ser localizado en la zona de las secciones, comprobándose en los mapas que en la mayoría de la zona de los caños la tendencia generaliza es la sedimentación, a excepción de ciertas zonas singulares, como en el caso de la desembocadura de Sancti Petri, donde se produce sedimentación con mayor ritmo (debido

a este aporte de sedimentos observado) y erosión en la zona del Arsenal de la Carraca, como se comprueba en los resultados de aporte de sedimento hacia la Bahía Interior a través de la sección CP.

#### 4.1.5.2 Casos de estudio con viento predominante levante

En la siguiente figura se muestran los resultados correspondientes al transporte acumulado de sedimentos a través de las secciones durante las simulaciones de los escenarios con casos de estudio de viento predominante de levante.

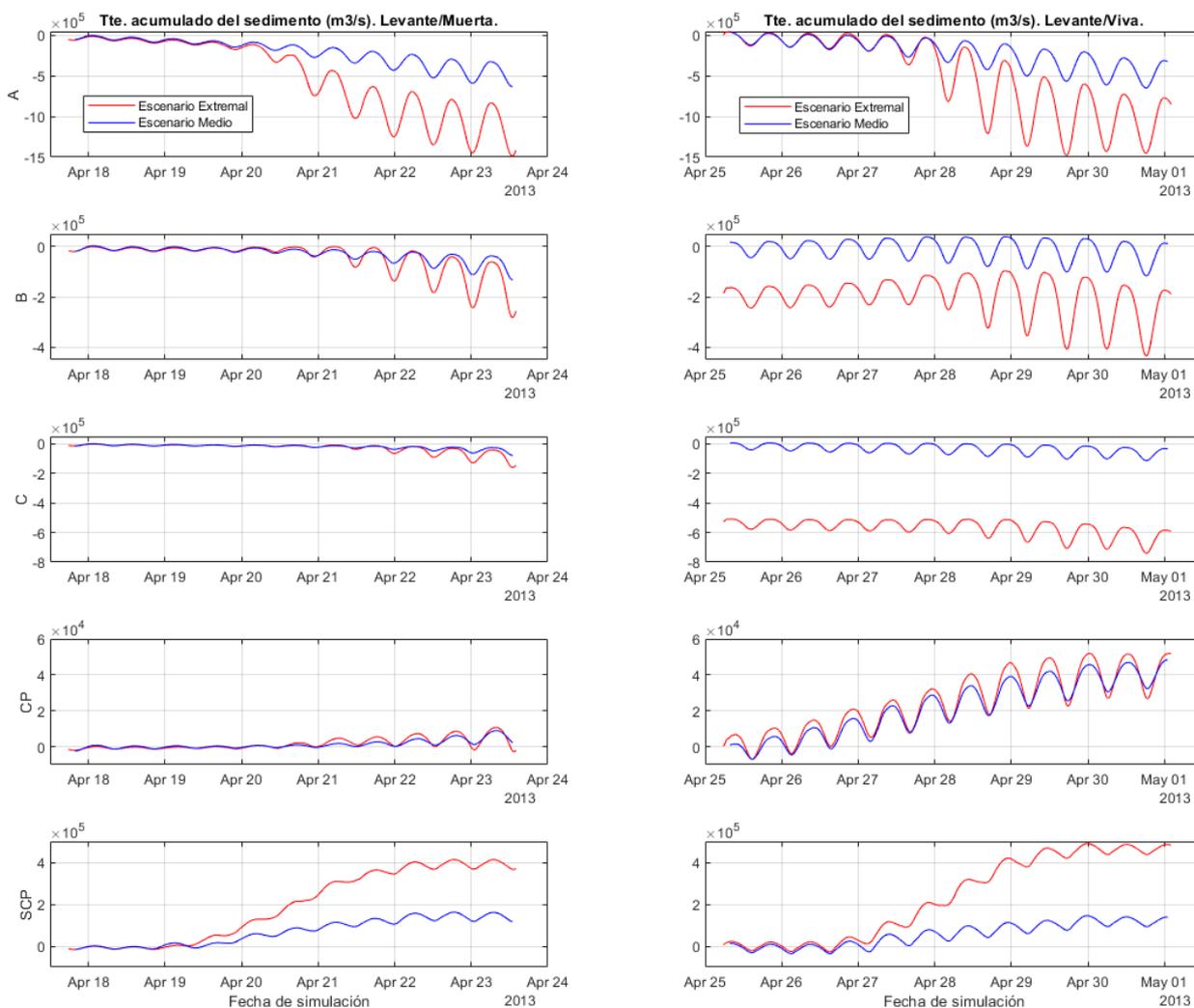


Figura 4-9. Gráficos del transporte acumulado de la fracción total de sedimentos ( $m^3/s$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de levante.

De manera contraria a los resultados obtenidos en los eventos con vientos predominantes de poniente, para los casos de levante se comprueba que la aparición de eventos extremales de viento produce un aumento generalizado en el transporte de sedimentos, observándose en la Figura 4-9 la diferencia entre las curvas de color azul (escenarios medios) y las de color rojo (escenarios extremales).

Se comprueba que el mayor transporte se da en combinación con mareas vivas máximas, a excepción de la zona de la Bahía Interior (secciones C y CP) donde el comportamiento en eventos medios y extremales parece ser similar, con ligeros aumentos en combinación con mareas vivas, como puede comprobarse en los resultados mostrados por la Tabla 4-2.

Sin embargo, para el caso particular de la sección C a la salida del Canal de Puntales con la Bahía Interior, el transporte aumenta en 3 veces (de 0.18 a 0.6  $hm^3/s$ ) para eventos extremales en combinación con mareas vivas máximas con respecto a los escenarios medios, del mismo modo que ocurre en eventos de poniente (0.04 a 0.5

$\text{hm}^3/\text{s}$ ), aunque para eventos de levante parece estar dominado por el viento y, para el caso de poniente, por las mareas, según puede comprobarse en los resultados de las curvas de la Figura 4-8, donde los resultados en eventos medios y extremos son similares.

Cabe destacar que el transporte de sedimentos también se realiza hacia el interior de la bahía, a excepción de la desembocadura de Sancti Petri, donde el sedimento sale a través de la sección (SCP) hacia el exterior de la bahía.

Este aspecto coincide con el fenómeno local de sedimentación en la desembocadura de Sancti Petri en todos los eventos, aunque en este caso la pérdida de sedimento es mucho mayor que la entrada en los casos de poniente (de 0.5 de salida frente a los 0.04  $\text{hm}^3/\text{s}$  de entrada en mareas vivas y, de 0.4 en salida frente a 0.12  $\text{hm}^3/\text{s}$  de entrada en mareas muertas), aunque la aparición de estos últimos es más frecuente que la aparición de eventos de levante.

#### 4.1.5.3 Resumen de los resultados del transporte acumulado de sedimento en las secciones

En la siguiente tabla se muestran los resultados del transporte acumulado de sedimento evaluado en las secciones, es decir, el transporte de sedimento acumulado en cada sección en el instante final de la simulación de cada escenario.

Transporte acumulado del sedimento ( $\text{hm}^3/\text{s}$ ) – Acumulado en la sección al final de cada simulación (Signo indica el sentido del transporte según la normal de la sección)									
Escenarios	Viento	Poniente				Levante			
Secciones	Caso	Extremal		Medio		Extremal		Medio	
	Marea	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva
Bahía Exterior	A	-0.3	-0.1	-0.3	-0.1	-1.5	-0.9	-0.6	-0.4
Canal de Puntales	B	-0.05	-0.02	-0.05	-0.02	-0.25	-0.19	-0.16	0
Bahía Interior	C	-0.04	-0.5	-0.04	-0.5	-0.18	-0.6	-0.1	-0.05
Arsenal de la Carraca	CP	0.001	0.04	0.001	0.04	-0.005	0.05	0.005	0.05
Acceso caño Sancti Petri	SCP	-0.12	-0.04	-0.08	-0.01	0.4	0.5	0.18	0.18

Tabla 4–2. Resumen de los resultados del transporte acumulado del sedimento en las secciones

Puede comprobarse que, para los escenarios medios, los acumulados del transporte de sedimento en las secciones en escenarios con vientos de levante son superiores a los balances resultantes en los escenarios con vientos de poniente.

Del mismo modo, en consonancia con los resultados observados en el punto 4.1.4 *Transporte de sedimentos: análisis del balance instantáneo de sedimentos*, se comprueba que los resultados del transporte acumulado en las secciones en escenarios de poniente son similares entre eventos extremos y medios.

Para los escenarios de levante, en comparación frente a los escenarios de poniente, se comprueba que en eventos extremos de viento, el aumento del acumulado del transporte de sedimento es de 5 veces para mareas muertas. Para mareas vivas, el aumento es de 10 veces en las secciones A, B y SCP.

En cambio, para las secciones C y SCP, se comprueba que en escenarios extremos de levante y poniente con mareas vivas, el transporte es similar (-0.5 en poniente y -0.6  $\text{hm}^3/\text{s}$  en levante para la sección C y, 0.04 en poniente y 0.05  $\text{hm}^3/\text{s}$  en levante para la sección CP).

Para mareas muertas en las secciones C y CP, se comprueba el aumento en 5 veces el transporte acumulado entre escenarios de levante y poniente, (de -0.04 a -0.18  $\text{hm}^3/\text{s}$  en C y, de 0.001 a -0.005  $\text{hm}^3/\text{s}$  en CP) según se indicaba anteriormente. Además, se comprueba que el sentido de transporte en CP en escenario extremal de levante con mareas muertas, con transporte hacia el interior del saco de los caños de Sancti Petri.

## 4.1.6 Análisis del volumen instantáneo de agua

### 4.1.6.1 Casos de estudio con viento predominante poniente

A continuación, se muestran los resultados de volumen de agua instantáneo a través de las secciones de control en los escenarios con casos de estudio de viento predominante de poniente.

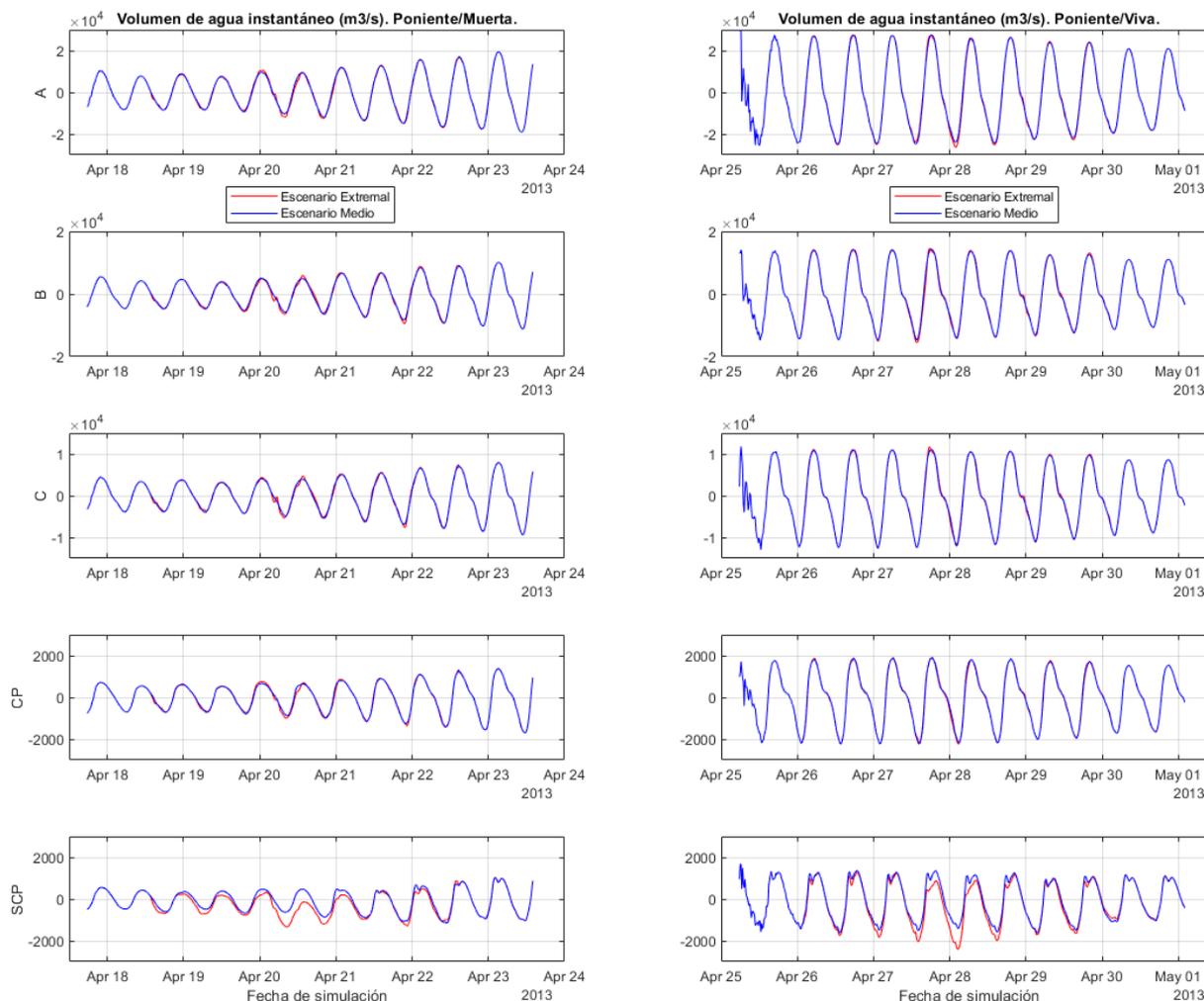


Figura 4-10. Gráficos del transporte instantáneo del volumen de agua ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de poniente.

Puede observarse en la figura anterior que, en los escenarios con viento predominante de poniente, el volumen de agua a través de las secciones es similar entre casos medios y extremos, aumentando el volumen de agua en los escenarios combinados con mareas vivas máximas, con un incremento de 1.25, 1.8, 1.5, 1.2 y 1.8 veces el transporte en escenarios con mareas muertas, para las secciones A, B, C, CP y SCP, respectivamente, como puede comprobarse en la Tabla 4-3.

Por tanto, del mismo modo que se ha comprobado con los resultados de transporte de sedimento en las secciones, se observa que para eventos de poniente el viento no es dominante en el volumen de agua, siéndolo la marea.

De manera particular, se observan ligeras diferencias en el volumen de agua en la sección SCP, en la desembocadura de Sancti Petri, en consonancia con el aumento de transporte de sedimento en esta sección. Estas diferencias marcan un transporte residual no nulo en dirección hacia el exterior de la bahía a través de la desembocadura de Sancti Petri, con una diferencia del orden de  $-0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  en mareas muertas y, de  $-0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  en mareas vivas, según puede comprobarse en la Tabla 4-3.

#### 4.1.6.2 Casos de estudio con viento predominante levante

A continuación, se muestran los resultados de volumen de agua instantáneo a través de las secciones de control en los escenarios con casos des estudio de viento predominante de levante.

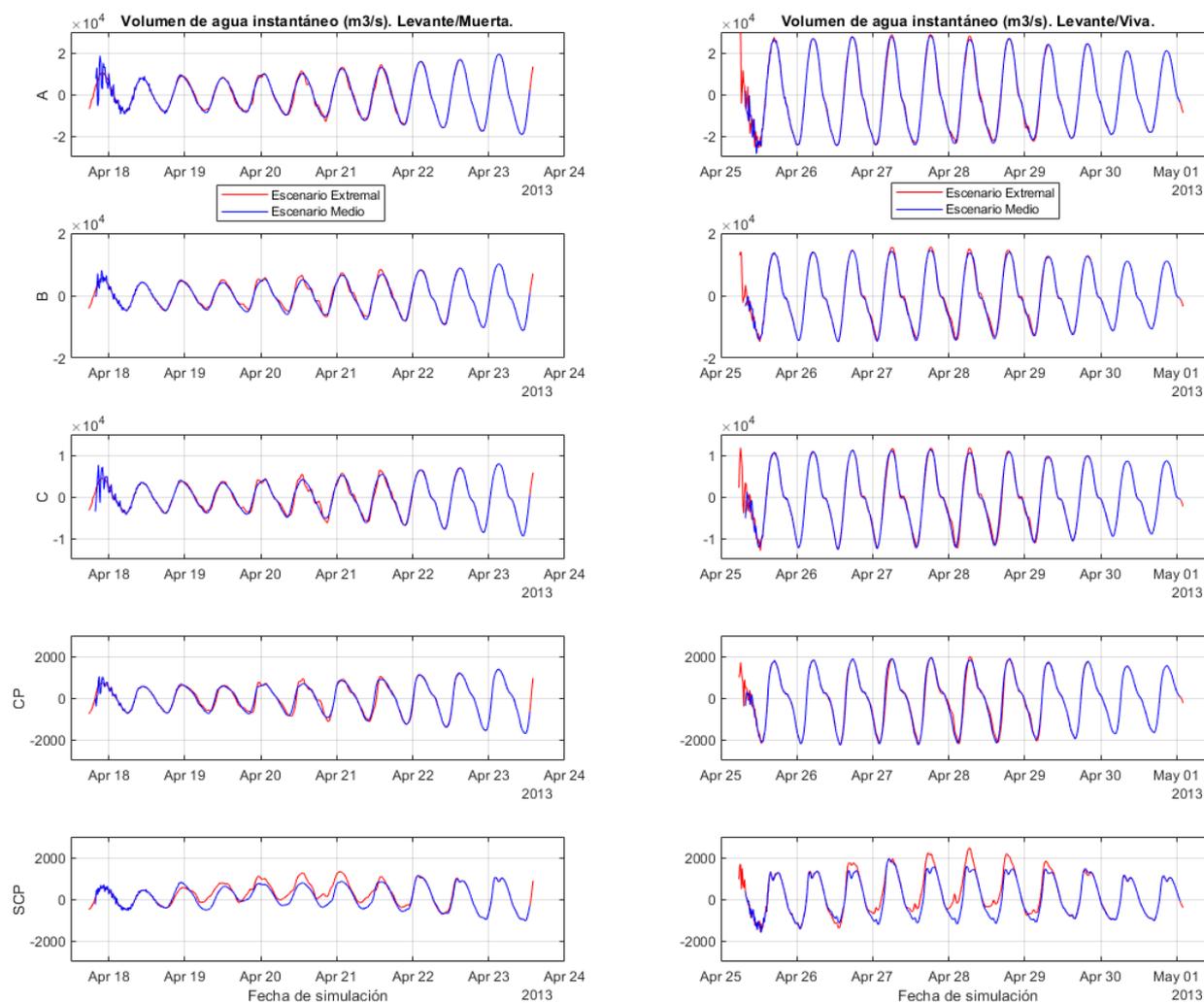


Figura 4-11. Gráficos del transporte instantáneo del volumen de agua ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de levante.

Del mismo modo que en los escenarios de poniente, puede comprobarse que, en los escenarios con viento predominante de levante, el volumen de agua a través de las secciones es similar entre casos medios y extremales, aumentando el volumen de agua en los escenarios combinados con mareas vivas máximas, con los mismos incrementos de 1.25, 1.8, 1.5, 1.2 y 1.8 veces el transporte en escenarios con mareas muertas, para las secciones A, B, C, CP y SCP, respectivamente, como puede comprobarse en la Tabla 4-3.

De nuevo y, del mismo modo que se ha comprobado con los resultados de transporte de sedimento en las secciones, se observa que para eventos de poniente el viento no es dominante en el volumen de agua, siéndolo la marea.

Asimismo, vuelven a observarse ligeras diferencias en el volumen de agua en la sección SCP, en la desembocadura de Sancti Petri, en consonancia con el aumento de transporte de sedimento en esta sección. Estas diferencias marcan un transporte residual no nulo en dirección hacia el exterior de la bahía a través de la desembocadura de Sancti Petri, con una diferencia del orden de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  en mareas muertas y, de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  en mareas vivas, según puede comprobarse en la Tabla 4-3.

### 4.1.6.3 Resumen de los resultados del volumen instantáneo de agua en las secciones

En la siguiente tabla se muestran los resultados del volumen instantáneo de agua evaluado en las secciones, a modo de resumen de los resultados descritos en los apartados anteriores.

Los signos en los valores resultantes indican el sentido de transporte del volumen de agua a través de cada sección, en comparación con el sentido marcado por la normal definida para cada una de estas secciones (véase el apartado 4.1.3 *Definición de las secciones de control* y la Figura 4-5).

Las conclusiones extraídas de los resultados del volumen instantáneo de agua, evaluado a través de las secciones, han sido descritas en los apartados 4.1.6.1 *Casos de estudio con viento predominante poniente* y 4.1.6.2 *Casos de estudio con viento predominante levante*.

Volumen de agua instantáneo (dam <sup>3</sup> /s) - Valores máximos/mínimos (Signo indica el sentido según la normal de la sección)									
Escenarios	Viento	Poniente				Levante			
Secciones	Caso	Extremal		Medio		Extremal		Medio	
	Marea	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva
Bahía Exterior	A	+20/-20	+25/-25	+20/-20	+25/-25	+20/-20	+25/-25	+20/-20	+25/-25
Canal de Puntales	B	+10/-10	+18/-18	+10/-10	+18/-18	+10/-10	+18/-18	+10/-10	+18/-18
Bahía Interior	C	+8/-8	+12/-12	+8/-8	+12/-12	+8/-8	+12/-12	+8/-8	+12/-12
Arsenal de la Carraca	CP	+1.8/-1.8	+1.9/-2.1	+1.8/-1.8	+1.9/-2.1	+1.8/-1.8	+1.9/-2.1	+1.8/-1.8	+1.9/-2.1
Acceso caño Sancti Petri	SCP	+1/-1.5	+1.8/-2.1	+1/-1	+1.8/-1.8	+1.7/-1	+2.2/-1	+1/-1	+2/-1

Tabla 4-3. Resumen de los resultados del volumen instantáneo de agua en las secciones

## 4.1.7 Análisis del volumen acumulado de agua

### 4.1.7.1 Casos de estudio con viento predominante poniente

En la Figura 4-12 se muestran los resultados del volumen de agua acumulado a través de las secciones de control en los escenarios con casos de estudio de viento predominante de poniente.

Se comprueba en los resultados el aumento del volumen de agua para los escenarios extremales en la sección de la desembocadura del caño de Sancti Petri (SCP), la cual mostraba un aumento del volumen de transporte de sedimento, comprobado en el apartado anterior y en la Tabla 4-3. Este aumento es de  $-60 \text{ hm}^3/\text{s}$  en escenarios extremales de poniente con mareas muertas y, de  $-75 \text{ hm}^3/\text{s}$  con mareas vivas.

Para el resto de secciones, la tendencia del volumen de agua a través de las secciones en eventos extremales es similar a la tendencia marcada en eventos medios, según puede comprobarse en los resultados mostrados por la Tabla 4-4, corroborando los resultados obtenidos para el transporte de sedimentos a través de las secciones, evaluados en el apartado anterior.

Las tendencias de crecimiento y decrecimiento, es decir, la pendiente media de las curvas de transporte acumulado a través de las secciones (mostradas en la Figura 4-12) son similares en ambas variables de estudio. De este modo, se comprueba que los sentidos en el transporte de sedimentos y en el volumen de agua a través de las secciones son los mismos.

Por tanto, se comprueba el sentido de circulación a través de las secciones descrito en los resultados referentes al transporte de sedimentos, evaluada en los puntos anteriores. Para el caso particular, en los escenarios de poniente el sentido del transporte se da hacia el interior de la bahía.

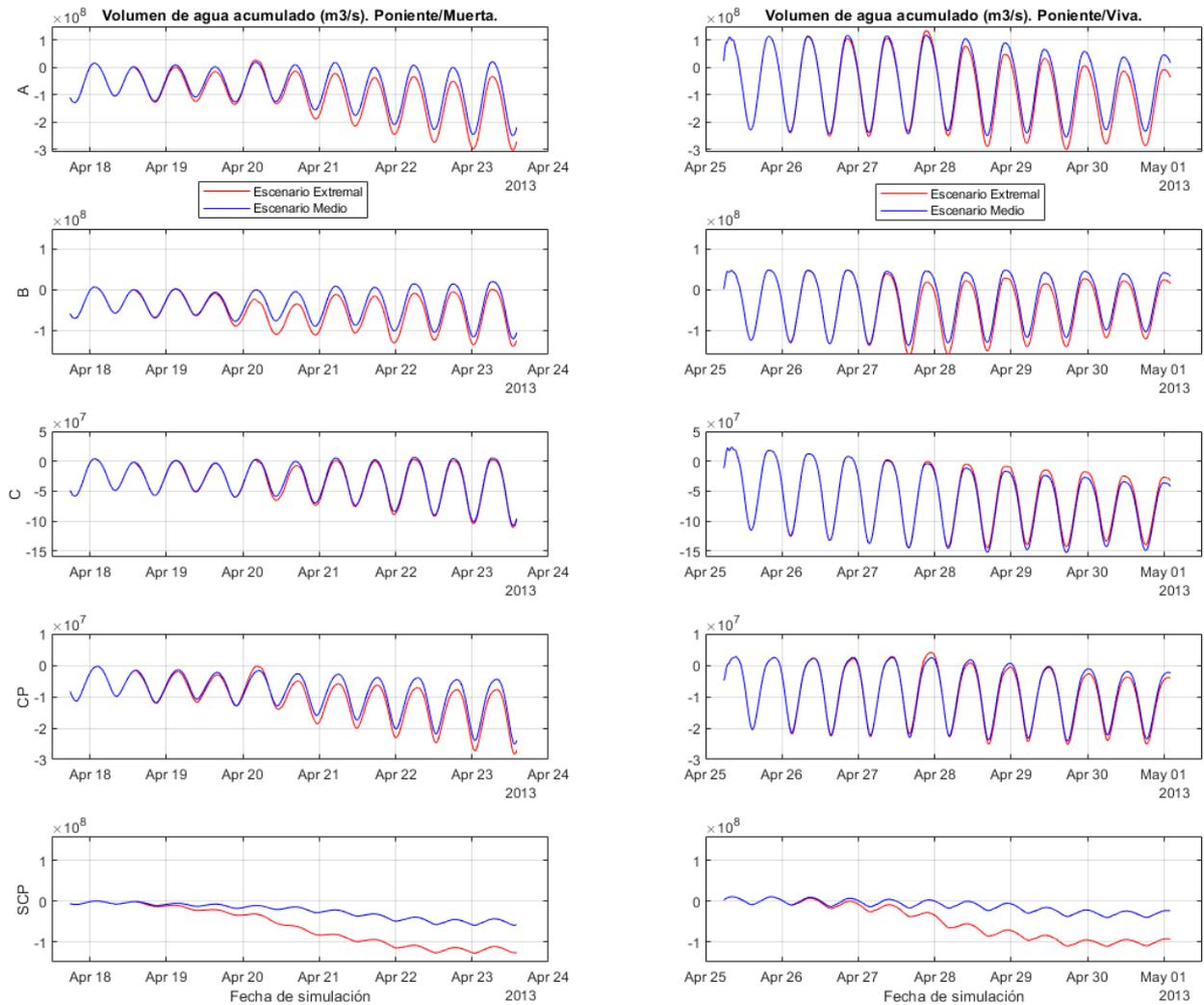


Figura 4-12. Gráficos del transporte acumulado del volumen de agua ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de poniente.

#### 4.1.7.2 Casos de estudio con viento predominante levante

En la Figura 4-13 se muestran los resultados del volumen de agua acumulado a través de las secciones de control en los escenarios con casos de estudio de viento predominante de levante.

Se comprueba en los resultados el aumento del volumen de agua para los escenarios extremos en la sección de la desembocadura del caño de Sancti Petri (SCP), la cual mostraba un aumento del volumen de transporte de sedimento, comprobado en el apartado anterior y en la Tabla 4-3. Este aumento es de  $50 \text{ hm}^3/\text{s}$  en escenarios extremos de poniente con mareas muertas y, de  $70 \text{ hm}^3/\text{s}$  con mareas vivas.

Para el resto de secciones, la tendencia del volumen de agua a través de las secciones en eventos extremos es similar a la tendencia marcada en eventos medios, según puede comprobarse en los resultados mostrados por la Tabla 4-4, a excepción de la sección B, corroborando los resultados obtenidos para el transporte de sedimentos a través de las secciones, evaluados en el apartado anterior.

De la misma manera que se observa en la Figura 4-12 para escenarios de poniente, las tendencias de crecimiento y decrecimiento, es decir, la pendiente media de las curvas de transporte acumulado a través de las secciones (mostradas en la Figura 4-13) son similares en ambas variables de estudio. De este modo, se comprueba que los sentidos en el transporte de sedimentos y en el volumen de agua a través de las secciones son los mismos.

Por tanto, se comprueba el sentido de circulación a través de las secciones descrito en los resultados referentes al transporte de sedimentos, evaluada en los puntos anteriores. En los escenarios de levante el sentido del transporte se da hacia el interior de la bahía, a excepción del saco de Sancti Petri, hacia el exterior de la bahía.

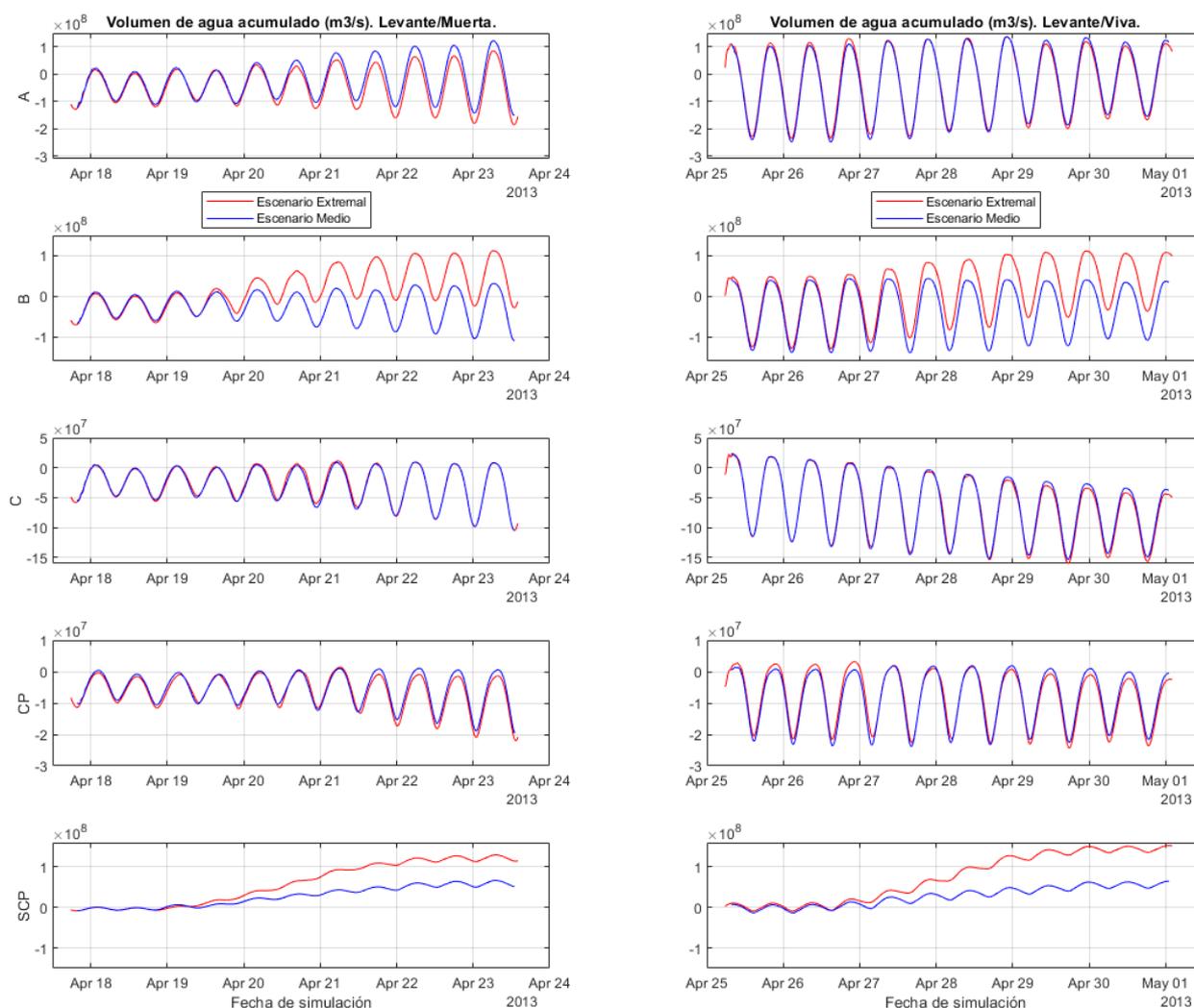


Figura 4-13. Gráficos del transporte acumulado del volumen de agua ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a través de las secciones en las simulaciones para los casos con viento predominante de levante.

#### 4.1.7.3 Resumen de los resultados del volumen acumulado de agua en las secciones

En la siguiente tabla se muestran los resultados del volumen acumulado de agua evaluado en las secciones, es decir. Se muestran estos resultados tabulados a modo de resumen, los cuales han sido mostrados en las gráficas de la Figura 4-12 y la Figura 4-13, y los cuales han sido descritos en los apartados anteriores.

Volumen de agua acumulado ( $\text{hm}^3/\text{s}$ ) - Valores máximos/mínimos (Signo indica el sentido según la normal de la sección)									
Escenarios	Viento	Poniente				Levante			
Secciones	Caso	Extremal		Medio		Extremal		Medio	
	Marea	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva
Bahía Exterior	A	+20/-220	+110/-300	+20/-220	+110/-250	+120/-150	+120/-230	+90/-190	+120/-230
Canal de Puntales	B	+20/-130	+50/-150	+25/-110	+50/-120	+30/-105	+50/-140	+110/-80	+110/-110
Bahía Interior	C	+1/-103	+3/-155	+1/-104	+3/-140	+1/-11	+3/-15	+1/-11	+3/-16
Arsenal de la Carraca	CP	+0/-29	+5/-25	+0/-25	+4/-23	+1/-19	+2/-24	+1/-21	+3/-22

Volumen de agua acumulado (hm <sup>3</sup> /s) - Valores máximos/mínimos (Signo indica el sentido según la normal de la sección)									
Escenarios	Viento	Poniente				Levante			
Secciones	Caso	Extremal		Medio		Extremal		Medio	
	Marea	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva
Acceso caño Sancti Petri	SCP	+0/-120	+10/-105	+0/-60	+10/-30	+70/-5	+70/-10	+120/-5	+140/-10

Tabla 4-4. Resumen de los resultados del volumen acumulado de agua en las secciones

## 4.2 Balance total acumulado del transporte de sedimentos entre secciones

### 4.2.1 Casos de estudio con viento predominante poniente

En la siguiente figura se muestran los resultados del balance de sedimento entre las secciones que conforman los sacos principales definidos en la Bahía de Cádiz (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021), para los escenarios con viento predominante de poniente.

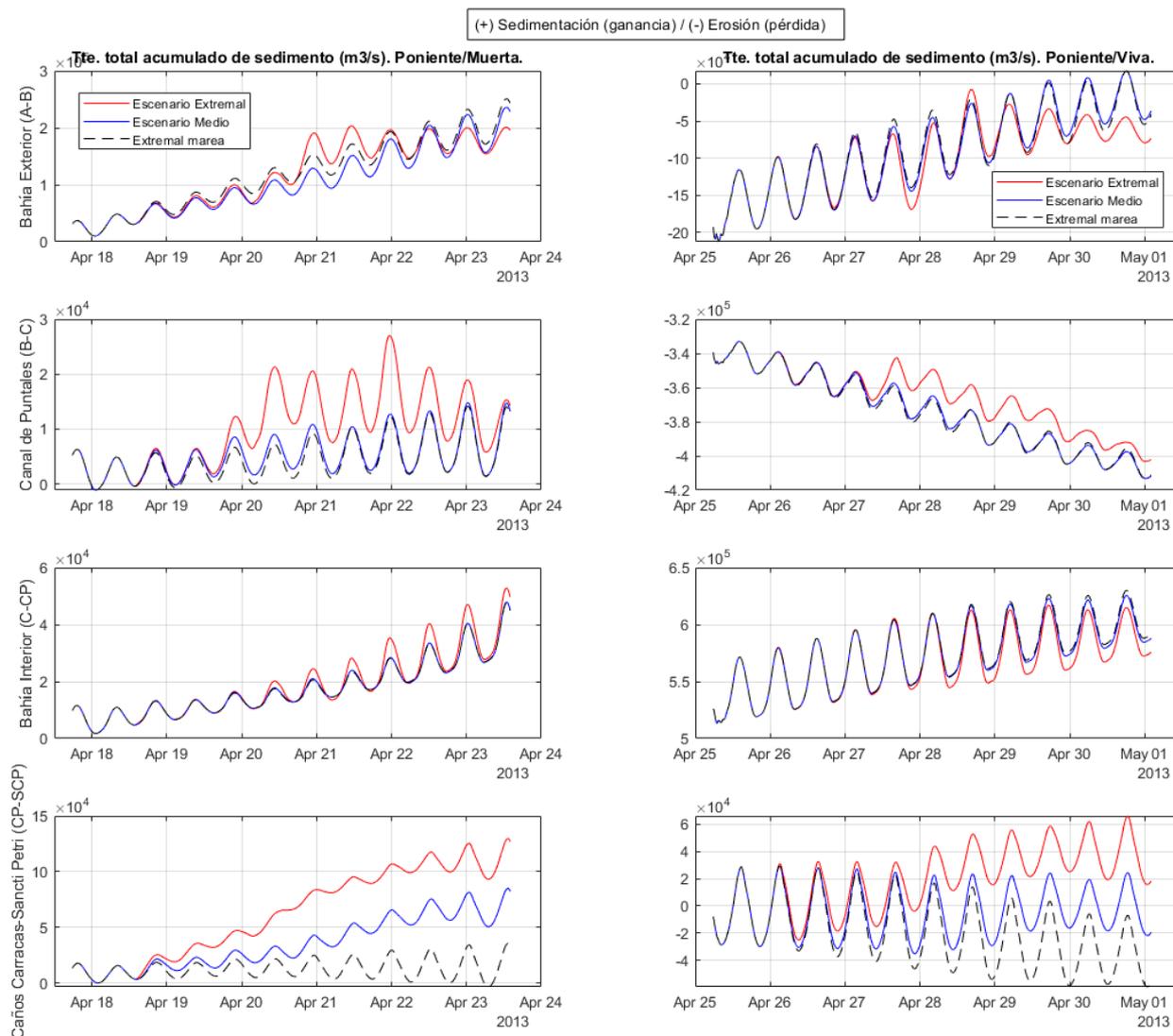


Figura 4-14. Gráficos del balance del transporte total acumulado del sedimento (m<sup>3</sup>/s) entre secciones (balance del transporte de la fracción total del sedimento en los sacos) para los casos con viento predominante poniente.

En las Figura 4-14 se muestran en azul los resultados correspondientes a los escenarios medios analizados, en rojo los escenarios extremales y, en línea negra discontinua los resultados del transporte de sedimentos puramente de marea, sin incidencia de viento, para los casos de mareas vivas y muertas máximas.

Se comprueba que, a excepción de los resultados mostrados en el saco de los caños de Sancti Petri, en todos los eventos medios el transporte de sedimentos está principalmente dominado por la marea, siendo los resultados en eventos medios muy similares a los resultados en los casos con simulación única de marea.

Además, las gráficas de resultados muestran una tendencia global a la sedimentación en el interior de todos los sacos (pendiente creciente en las curvas de la Figura 4-14 indica ganancia de volumen de sedimento en el saco, y viceversa), a excepción del Canal de Puntales para el escenario extremal en combinación con mareas vivas máximas, donde la tendencia o pendiente decreciente indica pérdida de volumen del sedimento en el saco, en consonancia con los resultados en los mapas de erosión para la conexión del canal con la Bahía Interior, con importante influencia en este escenario.

En dichos mapas de erosión se comprueba este fenómeno localizado en ambos escenarios, medio y extremal, por lo cual, podemos observar que es debido principalmente al efecto de marea, pero se ve aumentado con vientos extremales, cambiando la tendencia del balance de sedimento en el saco del Canal de Puntales, particularmente en su borde interior.

De este modo, se comprueba que, en los caños de Sancti Petri los vientos sí tienen incidencia sobre el transporte de sedimentos, observando de manera clara la progresión del transporte puramente de marea, en eventos medios y en eventos extremales, pudiendo obtener un factor de escala  $\times 2$  (el doble de volumen) entre resultados, como puede comprobarse en la Tabla 4-5, de  $0.04 \text{ hm}^3$  en el transporte de marea,  $0.08 \text{ hm}^3$  en transporte medio y  $0.13 \text{ hm}^3$  en transporte extremal para mareas muertas y, de  $-0.06 \text{ hm}^3$  en el transporte de marea,  $-0.02 \text{ hm}^3$  en transporte medio y  $0.02 \text{ hm}^3$  en transporte extremal para mareas vivas.

Los eventos medios y extremales de poniente aumentan el volumen de sedimento transportado hacia el interior del saco de Sancti Petri, indicando la tendencia de sedimentación en este, como se comprueba en los resultados de la Tabla 4-5.

Se ha comprobado en los resultados de los mapas de erosión/sedimentación a escala global que, en la zona de los caños se produce esta tendencia de sedimentación que se observa en el balance general del volumen de sedimento en el interior del saco definido.

Sin embargo, pueden diferenciarse en los mapas de erosión/sedimentación (Figura 4-3), que en la zona de los caños se dan de manera localizada zonas con sedimentación, ubicadas en la desembocadura de Sancti Petri y en la zona media de los caños principales de Sancti Petri y Zurraque.

Asimismo, aparecen otras zonas con erosión, repartidas a su vez en la zona intermedia de los caños y en la zona del Arsenal de la Carraca en la conexión con la Bahía Interior.

Para los escenarios sin viento en combinación con mareas vivas máximas, en el saco de Sancti Petri se comprueba que la marea tiende a mover el sedimento hacia fuera del saco, en dirección hacia la Bahía Interior.

Los escenarios medios con viento predominante procedente de poniente, los más frecuentes según la rosa de vientos obtenida para el estudio, contrarrestan este efecto, sumando sedimento a los caños, apareciendo un ritmo de sedimentación leve a lo largo del evento simulado (pendiente media con tendencia horizontal de la curva de resultados medios de la gráfica Poniente/Viva del saco CP-SCP).

En cambio, los eventos extremales duplican este ritmo de sedimentación, como se ha comentado anteriormente (factor escala  $\times 2$ ), favoreciendo la entrada de sedimento con un ritmo superior, aunque con un crecimiento menor que en comparación con los escenarios combinados con casos de mareas muertas máximas, siendo la diferencia de volumen total de sedimento entre ambos escenarios de  $0.11 \text{ hm}^3$  ( $0.13 \text{ hm}^3$  para escenarios extremales con mareas muertas y,  $0.02 \text{ hm}^3$ , para mareas vivas).

Para el caso de eventos extremales con viento predominante de poniente, en los sacos interiores del Canal de Puntales y la Bahía Interior, se comprueba que no existen grandes variaciones en el balance de sedimentos en comparación con los eventos medios, según se muestra en los resultados de la Tabla 4-5.

Para el caso particular del Canal de Puntales, se comprueba en la Figura 4-14 que en escenarios con mareas muertas máximas se produce un aumento del transporte de sedimento a través del canal, aunque al final del

balance el resultado sea similar al de los escenarios medios ( $0.01 \text{ hm}^3$ ).

Sin embargo, en escenarios con mareas vivas máximas, se comprueba la pérdida del sedimento en este saco, reduciéndose ligeramente esta pérdida (desde  $-0.32$  hasta  $-0.41 \text{ hm}^3$  al final de las simulaciones) con el efecto de eventos extremos de poniente.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del balance del transporte de sedimento acumulado en los sacos, evaluado en el instante final de las simulaciones realizadas para los escenarios de poniente. Del mismo modo que en los resultados mostrados en la Figura 4-14, los valores positivos indican la ganancia de sedimento en el saco y, los valores negativos, la pérdida de este.

Balance del volumen de sedimento en los sacos ( $\text{hm}^3$ )							
Escenarios	Viento	Poniente					
Sacos	Caso	Extremal		Marea (sin viento)		Medio	
	Marea	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva
Bahía Exterior	A-B	0.19	-0.07	0.24	-0.04	0.23	-0.03
Canal de Puntales	B-C	0.01	-0.41	0.01	-0.41	0.01	-0.41
Bahía Interior	C-CP	0.05	0.58	0.04	0.59	0.05	0.59
Caños de Sancti Petri	CP-SCP	0.13	0.02	0.04	-0.06	0.08	-0.02

Tabla 4-5. Resumen de los resultados del balance de volumen de sedimento transportado en los sacos para los escenarios con viento predominante de poniente

#### 4.2.2 Casos de estudio con viento predominante levante

En la Figura 4-15 se muestran los resultados del balance de sedimento entre las secciones que conforman los sacos principales definidos en la Bahía de Cádiz (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2021), para los escenarios con viento predominante de levante.

De manera contraria a lo observado en los resultados de los modelos con viento predominante de poniente, para los escenarios de levante se comprueba que los vientos tienen una fuerte influencia en el transporte de sedimentos, de manera generalizada para todos los sacos definidos en la bahía.

Además, se comprueba que el transporte aumenta para los escenarios en combinación con mareas vivas máximas (según se muestra en la Tabla 4-6), comprobando que la dominancia del transporte de sedimento es compartida por marea y viento, aunque entre ambas predomina el viento, siendo las aportaciones del viento superiores en los casos extremos.

También se comprueba que los casos con vientos medios de levante aumentan el transporte de sedimento respecto al producido puramente por la marea, a excepción de la Bahía Interior en los casos con mareas vivas, donde los vientos medios frenan el transporte de sedimento, según se observa en la Figura 4-15.

Asimismo, los vientos extremos aumentan el transporte de sedimento, según puede comprobarse en la Tabla 4-6, siendo superior al observado para los casos medios de viento.

Los resultados muestran una tendencia global a la sedimentación en los sacos de las Bahías Exterior e Interior (pendiente creciente en las curvas de la Figura 4-15 indica ganancia de volumen de sedimento en el saco, y viceversa), y de erosión en el saco de los caños de Sancti Petri y Carraca, con un balance negativo en el transporte de sedimentos en todos los escenarios con viento predominante de levante, según se muestra en la Tabla 4-6.

En base a lo anterior, se observa la excepción en este comportamiento para los eventos en combinación con mareas vivas máximas en el saco del Canal de Puntales, donde se observa la pérdida de volumen de sedimento, con un decrecimiento del volumen muy ligero en eventos medios ( $-0.04 \text{ hm}^3$ ), pero muy elevado en eventos extremos ( $-0.41 \text{ hm}^3$ ), siendo este similar al transporte de la marea.

Esta particularidad en el transporte de marea también se observa en la Bahía Inteor para los escenarios en combinación con mareas máximas vivas.

Por ende, se comprueba que en la zona interior de la Bahía de Cádiz (Canal de Puntales y Bahía Interior), en combinación con mareas vivas máximas, la aparición de eventos medios con viento predominante de levante *frena* el transporte de sedimento en los sacos (con sentido de llenante hacia el interior de la bahía), reduciendo el balance del volumen de sedimento en estos sacos (véase la Tabla 4-6), ya sea con tendencia de erosión y sedimentación respectivamente para el Canal de Puntales y la Bahía Interior, dándose el transporte de sedimento desde el primero hacia el segundo de manera preferente.

Es importante destacar este efecto reconocido en el comportamiento del transporte del sedimento en el interior de la bahía en la sucesión de eventos extremales de viento predominante de levante en combinación con mareas vivas máximas.

Los vientos extremales predominantes de levante, los más enérgicos según los resultados mostrados por la rosa de vientos analizada para la boya de estudio, contrarrestan el efecto de *freno*, dominando los vientos por completo el transporte de sedimento en los sacos, siendo el resultado del balance de transporte de sedimento similar al obtenido con los efectos puramente de marea.

Adelantándonos a los resultados del apartado siguiente, puede comprobarse en los mapas del Índice de Dominancia entre marea y viento (Figura 4-17) que, para los eventos medios en combinación con mareas vivas máximas, el índice presenta un valor cercano a 0 en la zona interior de la bahía (colores blancos en el mapa).

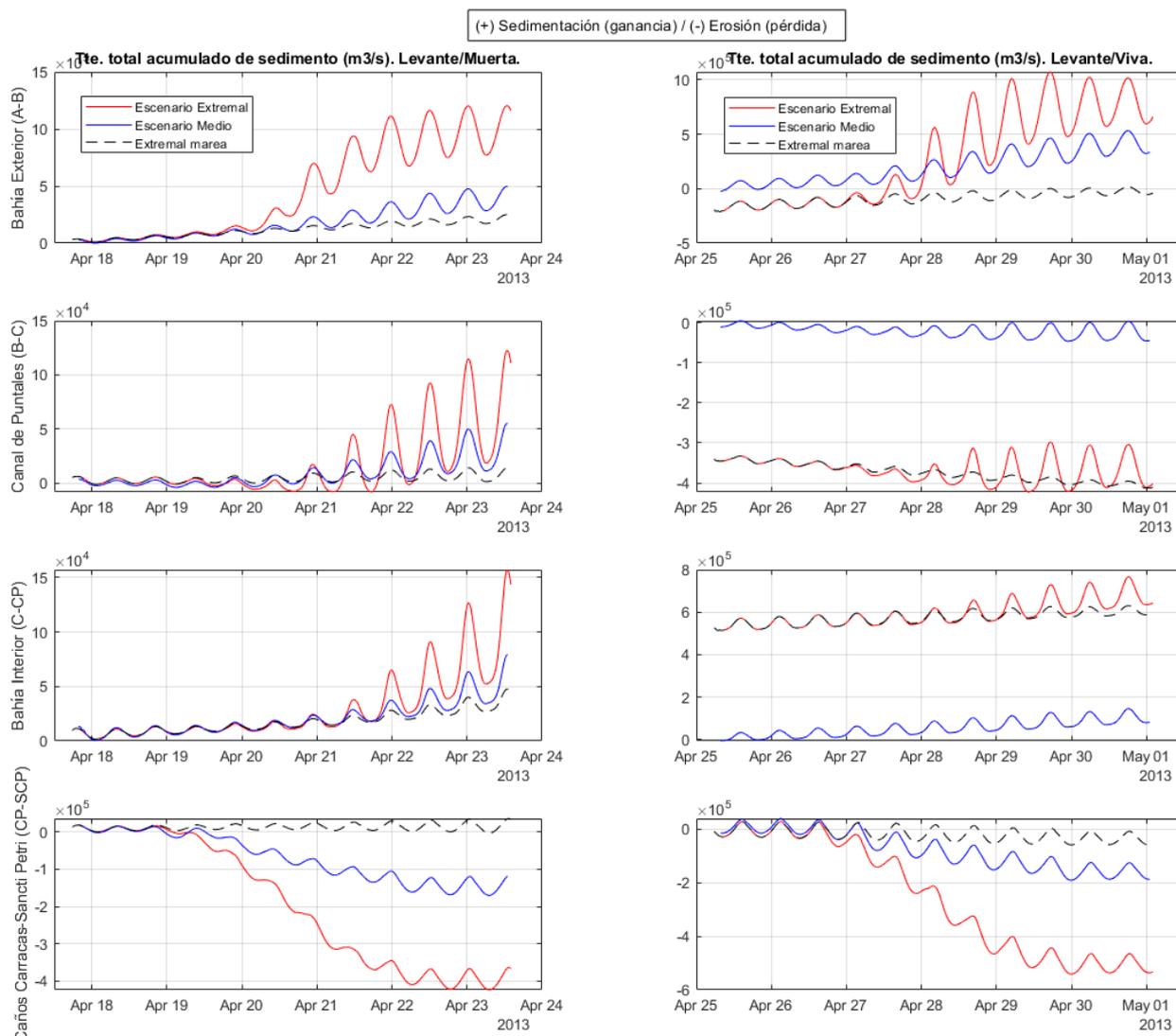


Figura 4-15. Gráficos del balance del transporte total acumulado del sedimento (m<sup>3</sup>/s) entre secciones (balance del transporte de la fracción total del sedimento en los sacos) para los casos con viento predominante levante.

Estos resultados muestran una dominancia compartida entre viento y marea en el transporte de sedimentos, comprobando así la importancia del efecto de viento medio en dirección contraria al sentido de llenante de la marea, consiguiendo frenarla haciendo casi nulo el balance de transporte de sedimento en los sacos, aunque no consigue vencerla, siendo la resultante del transporte positiva en la Bahía Interior (sedimentación de  $0.08 \text{ hm}^3$ ) y negativa en el Canal de Puntales (pérdida de sedimento de  $-0.04 \text{ hm}^3$ ).

Sin embargo, puede comprobarse en los mapas del Índice de Dominancia entre marea y viento (Figura 4-17) que, para los eventos extremos en combinación con mareas vivas máximas, el índice presenta un valor cercano a -1 en la zona interior de la bahía (colores azules en el mapa).

En cambio, estos resultados mencionados muestran una dominancia total del viento sobre el transporte del sedimento en estos sacos, desapareciendo el efecto de *freno*, venciendo el efecto del viento a los efectos de marea, produciendo un balance de sedimentos no nulo en los sacos ( $-0.41 \text{ hm}^3$  en el Canal de Puntales y,  $0.65 \text{ hm}^3$  en la Bahía Interior), que parece ser similar al balance de sedimentos resultado del transporte producido únicamente por las mareas máximas vivas sin combinación de eventos de viento ( $-0.41 \text{ hm}^3$  en el Canal de Puntales y  $0.59 \text{ hm}^3$  en la Bahía Interior).

Cabe destacar que, para los eventos de viento en combinación con mareas máximas muertas, no se observa la aparición de este fenómeno. Para estos casos, se produce el aumento del transporte debido a la aparición de eventos extremos de viento, mayores en comparación con los resultados ofrecidos por los eventos medios, como puede comprobarse en los resultados mostrados por la Tabla 4-6.

Por otra parte, se comprueba que en los caños de Sancti Petri los vientos tienen influencia sobre el transporte de sedimentos, observando de manera clara la progresión del transporte puramente de marea, en eventos medios y en eventos extremos, pudiendo obtener un factor de escala  $x^3$  (el triple de volumen) entre resultados (véase la Tabla 4-6), siendo este factor de escala de pérdida de sedimento mayor que el obtenido para los casos con viento predominante de poniente, el cual era del doble de volumen en tendencia de ganancia en el saco.

Se ha comprobado en los resultados de los mapas de erosión/sedimentación (Figura 4-4) a escala global que, en la desembocadura de los caños se produce esta tendencia de sedimentación que se observa en el balance general del volumen de sedimento hacia el exterior del saco.

Asimismo, aparecen otras zonas con erosión, repartidas a su vez en la zona intermedia de los caños y en la zona del Arsenal de la Carraca en la conexión con la Bahía Interior, acentuadas en eventos extremos con viento predominante de levante, corroborando los resultados obtenidos en las secciones.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del balance del transporte de sedimento acumulado en los sacos, evaluado en el instante final de las simulaciones de los escenarios de levante. Los valores positivos indican la ganancia de sedimento en el saco y, los valores negativos, la pérdida de este.

Balance del volumen de sedimento en los sacos ( $\text{hm}^3$ )							
Escenarios	Viento	Levante					
Sacos	Caso	Extremal		Marea (sin viento)		Medio	
	Marea	Muerta	Viva	Muerta	Viva	Muerta	Viva
Bahía Exterior	A-B	1.16	0.66	0.24	-0.04	0.5	0.33
Canal de Puntales	B-C	0.11	-0.41	0.01	-0.41	0.05	-0.04
Bahía Interior	C-CP	0.14	0.65	0.04	0.59	0.08	0.08
Caños de Sancti Petri	CP-SCP	-0.37	-0.53	0.03	-0.06	-0.12	-0.19

Tabla 4-6. Resumen de los resultados del balance de volumen de sedimento transportado en los sacos para los escenarios con viento predominante de levante

### 4.3 Estudio de la dominancia entre marea y viento sobre el transporte de sedimentos

#### 4.3.1 Definición del Índice de Dominancia “DI”

Con el objetivo de conocer la influencia o dominancia en la comparativa entre la marea y el viento sobre el transporte de sedimentos, se realiza un estudio a escala global en la bahía, basado en la definición del Índice de Dominancia (Jinshan, et al., 2022) calculado como:

$$DI = \frac{A_{marea} - A_{viento}}{A_{marea} + A_{viento}} \quad (6)$$

Donde  $A$  representa la magnitud del transporte de sedimento en suspensión ( $m^3/s$ ) calculado para los eventos en combinación de marea y viento y, para los eventos modelizados únicamente con incidencia de la marea.

Valores del  $DI = 0$  indican una dominancia compartida entre viento y marea, es decir, la misma contribución de viento y marea sobre el transporte de sedimentos. Valores  $DI < 0$  indican la dominancia del viento sobre la marea y, valores  $DI > 0$  indican la dominancia de la marea sobre el viento en el transporte del sedimento.

#### 4.3.2 Análisis de la dominancia entre marea y viento en los escenarios de poniente

En la siguiente figura se muestran los resultados a escala global de los mapas del Índice de Dominancia para eventos con viento predominante de poniente.

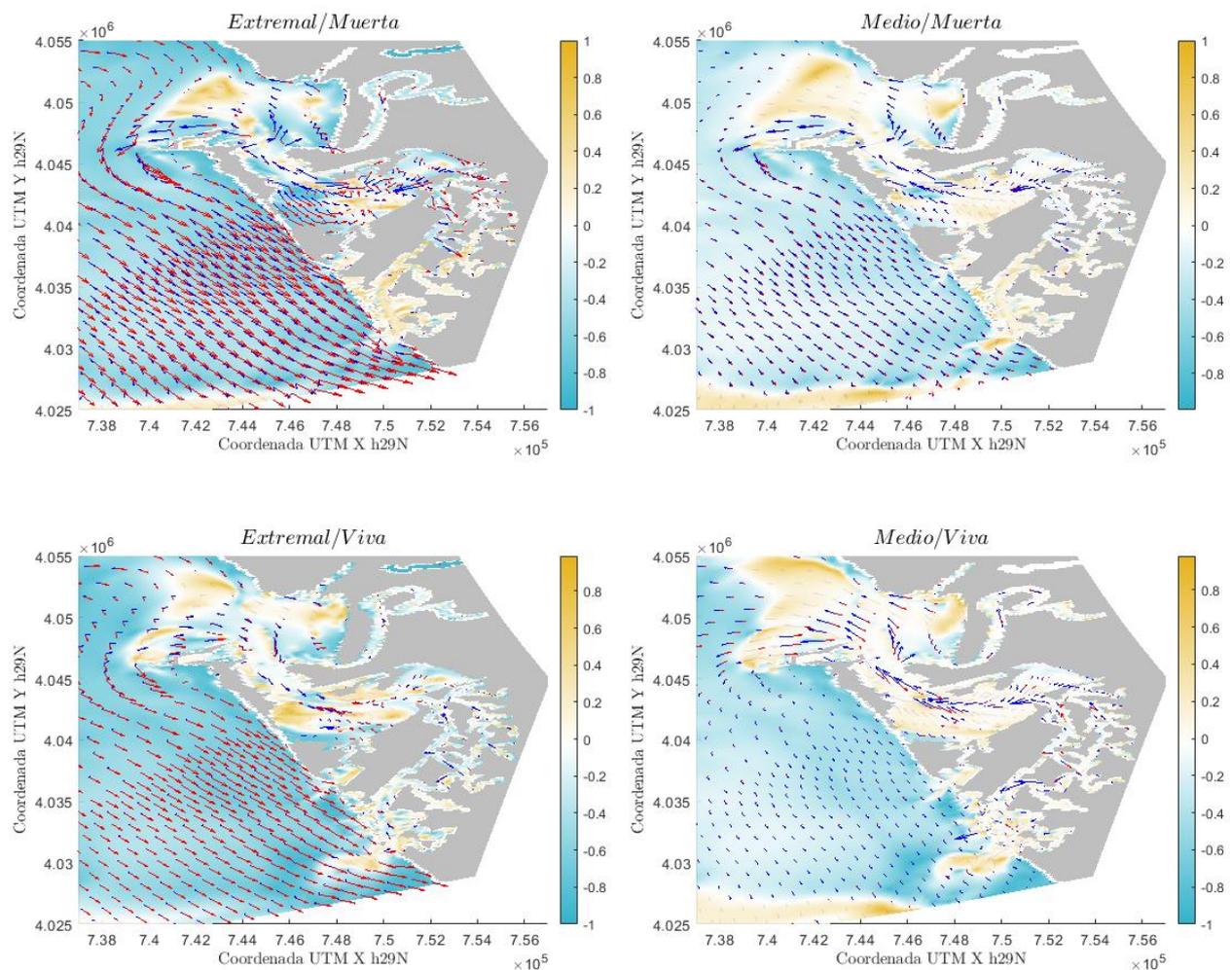


Figura 4-16. Mapas del Índice de Dominancia (DI) entre viento y marea en el transporte de la fracción total del sedimento para los escenarios con viento predominante de poniente. Las flechas azules muestran la dirección y magnitud de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en los casos medios y, las flechas rojas, la dirección y magnitud de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en los casos extremales.

Sobre los mapas del Índice de Dominancia en eventos con viento predominante de poniente se observa que, de manera generalizada, el transporte en el interior de la bahía está dominado preferentemente por las mareas máximas, siendo este efecto más acentuado en mareas vivas máximas. Del mismo modo, se comprueba que en la zona exterior de la bahía el transporte está dominado por el efecto del viento.

De manera particular, se comprueba que a la salida de Sancti Petri el transporte de sedimento está dominado por la marea, pudiendo observar en los mapas la pluma de descarga en la desembocadura, que coincide con las zonas de sedimentación marcadas por los mapas de erosión/sedimentación, así como coinciden con las zonas con problemas de sedimentación en la entrada a la canal de navegación del Caño de Sancti Petri en la actualidad.

Los resultados observados de dominancia de la marea sobre el transporte del sedimento de manera generalizada en todos los sacos de la bahía concuerdan con los resultados obtenidos en el transporte de sedimentos a través de las secciones de control.

Por tanto, puede concluirse que, tanto en eventos medios como extremos de viento predominante de poniente, el transporte del sedimento en el interior de la bahía está dominado de manera preferente por las mareas, aumentando el transporte en combinación con el efecto de mareas máximas vivas.

### 4.3.3 Análisis de la dominancia entre marea y viento en los escenarios de levante

En la siguiente figura se muestran los resultados del Índice de Dominancia para eventos con viento predominante de levante.

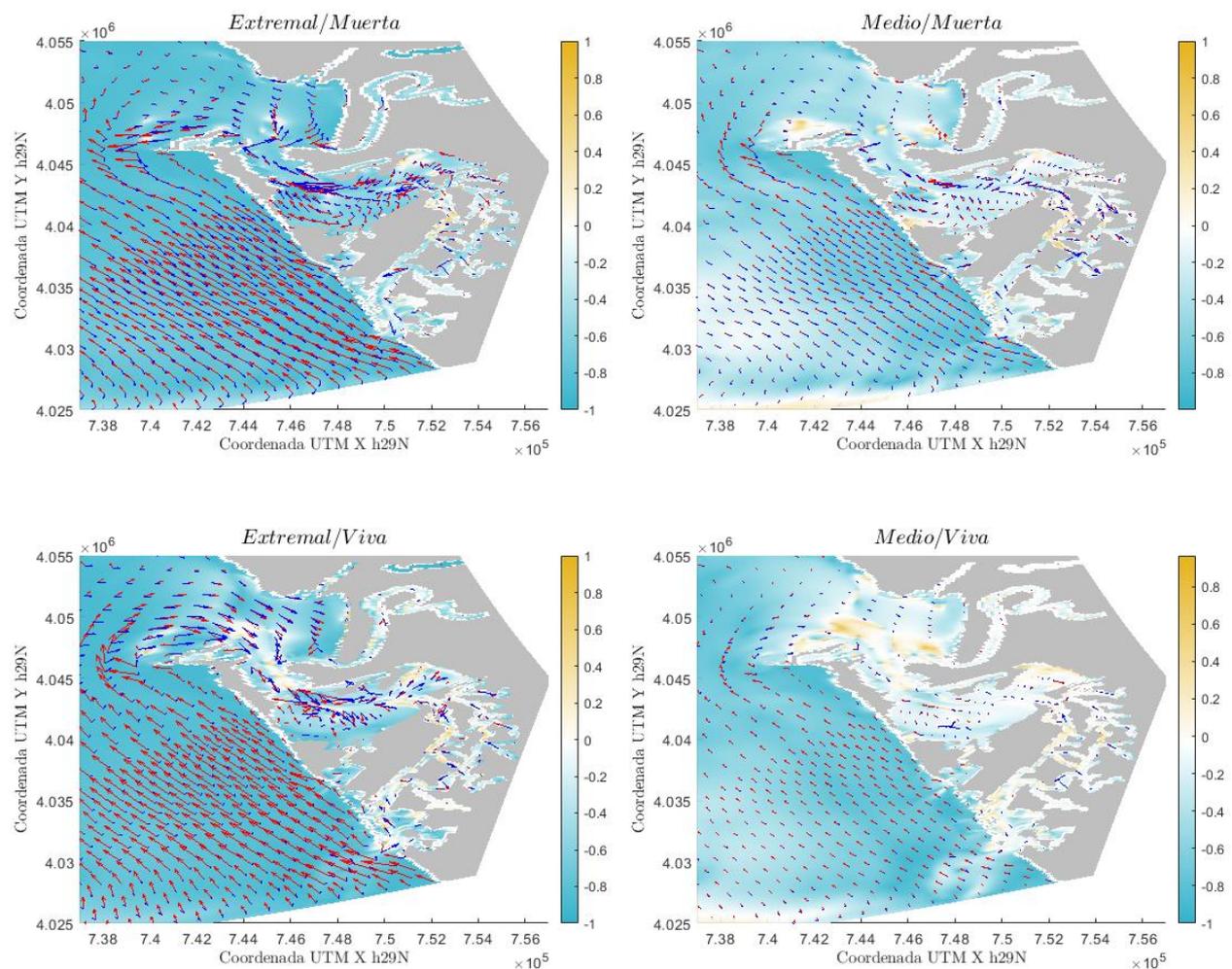


Figura 4-17. Mapas del Índice de Dominancia (DI) entre viento y marea en el transporte de la fracción total del sedimento para los escenarios con viento predominante de levante. Las flechas azules muestran la dirección y magnitud de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en los casos medios y, las flechas rojas, la dirección y magnitud de la velocidad promediada en profundidad de las corrientes en los casos extremos.

Sobre los mapas del Índice de Dominancia en eventos con viento predominante de levante se observa que, de manera generalizada, el transporte tanto en el exterior como en el interior de la bahía está dominado preferentemente por el viento, siendo este efecto más acentuado en mareas vivas máximas, donde la aportación de marea desaparece casi al completo, siendo muy minoritaria, aunque persistiendo en algunas zonas de la Bahía Exterior e Interior en escenarios medios de combinación con mareas muertas máximas.

Asimismo, se comprueba que, en el Canal de Puntales y en la Bahía Interior, para los escenarios en eventos medios, los valores del *DI* tienden a ser nulos, observándose una dominancia equilibrada entre las aportaciones de vientos medios predominantes de levante y las aportaciones de marea, máximas en sentido de llenante según indican las flechas de corrientes y, según indicaban los resultados de transporte de sedimento en las secciones de control analizadas.

Para el caso de escenarios medios en combinación con marea muerta máxima el efecto del viento vence ligeramente al efecto de la marea, observándose una densidad mayor de valores del *DI* superiores a 0, aunque con un efecto de marea no despreciable en las contribuciones del transporte del sedimento.

Sin embargo, para el caso particular de escenarios medios en combinación con marea viva máxima, los valores del *DI* muestran un valor igual a 0 de manera generalizada en el interior del saco del Canal de Puntales y del saco de la Bahía Interior.

De esta manera se comprueba el efecto de *freno* en el balance del volumen de sedimento transportado en estos sacos, detectado para los escenarios medios en combinación con mareas máximas vivas. Las aportaciones de marea en sentido de vaciante se ven enfrentadas a las aportaciones efecto del viento predominante de levante en casos medios, siendo estos casos más enérgicos que los sucedidos desde poniente, aunque en comparación, menos frecuentes.

Del mismo modo, se comprueba que este efecto de *freno* se ve contrarrestado en los mismos casos de marea máxima viva, aunque en la combinación con escenarios de viento extremal, siendo el viento extremal dominante de manera preferente sobre el transporte de sedimento, desapareciendo la contribución de llenante de marea, produciendo la aparición de un balance no nulo de sedimento en los sacos del Canal de Puntales y de la Bahía Interior, siendo la tendencia de pérdida en el primero y ganancia en el segundo, con una dirección de transporte desde el primero hacia el segundo.

Además, se comprueba en los resultados del balance de volumen de sedimento en los sacos del Canal de Puntales y de la Bahía Interior que, dicho balance para los escenarios analizados anteriormente parece ser similar al balance de sedimentos resultado del transporte producido únicamente por las mareas máximas vivas sin combinación de eventos de viento.

Este aspecto es importante ya que, se observa en los resultados del balance de transporte del sedimento que, aunque los vientos extremales predominantes de levante consigan contrarrestar el efecto de freno en los sacos interiores del estuario, no consiguen cambiar el sentido del transporte preferente del sedimento, permaneciendo el sentido del transporte en llenante a través de las secciones hacia el interior del estuario, en sentido contrario al evento de viento, de manera antintuitiva al efecto esperado en el cambio de sentido del transporte, siendo la dominancia completa del viento en el movimiento de este.

Por otra parte, se comprueba para los mapas asociados a escenarios extremales que, la dominancia del viento es completa en casi todas las zonas del estuario, a excepción de algunas zonas de aguas someras en los caños y en la Bahía Interior, aumentando el transporte del sedimento en todos los sacos definidos.

Es importante destacar que, aunque los vientos predominantes de levante se enfrentan a las direcciones frecuentes de transporte del sedimento entre sacos, observadas en el resto de los escenarios modelizados, estas direcciones de transporte no se ven afectadas en ninguno de los sacos, a excepción de la desembocadura de Sancti Petri, donde el transporte cambia de sentido hacia el exterior del estuario.

En cambio, en el contorno superior de este saco, en la zona del Arsenal de la Carraca en la conexión con la Bahía Interior, el sentido de transporte se mantiene igual que en el resto de escenarios modelizados, dándose hacia el interior de la anterior, provocando la acusada pérdida de volumen de sedimento observada en el saco de Sancti Petri en los escenarios extremales de vientos predominantes de levante, viéndose aumentada en combinación con los casos de marea máxima viva.

## 4.4 Mapa del balance total acumulado de sedimentos entre sacos

### 4.4.1 Casos de estudio en escenarios de poniente

En la siguiente figura se muestran los mapas de balance del volumen total acumulado de sedimento en escenarios de poniente, sobre los mapas de dominancia entre marea y viento para la combinación de escenarios.

En la escala graduada, los colores marrones indican zonas con dominancia de la marea sobre el transporte del sedimento ( $DI > 0$ ) y, los colores azules, zonas con dominancia del viento sobre el transporte del sedimento ( $DI < 0$ ). Los colores claros con tendencia al color blanco ( $DI = 0$ ) indican que el transporte de sedimento es debido a una combinación entre viento con contribuciones similares.

Sobre los mapas se muestran los sacos definidos en la Bahía de Cádiz. Por columnas se muestran los mapas resultantes para los eventos extremos y medios de viento y, por filas, se muestran los resultados de los escenarios anteriores en combinación con los casos de mareas máximas muerta y viva, respectivamente.

En el interior de los sacos se muestra el volumen de sedimento ganado (+) o perdido (-) en unidades de  $\text{hm}^3$  (millones de metros cúbicos). En negro se indica el volumen resultante en combinación de marea máxima y viento. En verde se indica el volumen resultante únicamente debido al efecto de transporte de las mareas.

Las flechas indican la dirección y sentido del transporte del sedimento a través de las secciones control definidas en los contornos de los sacos.

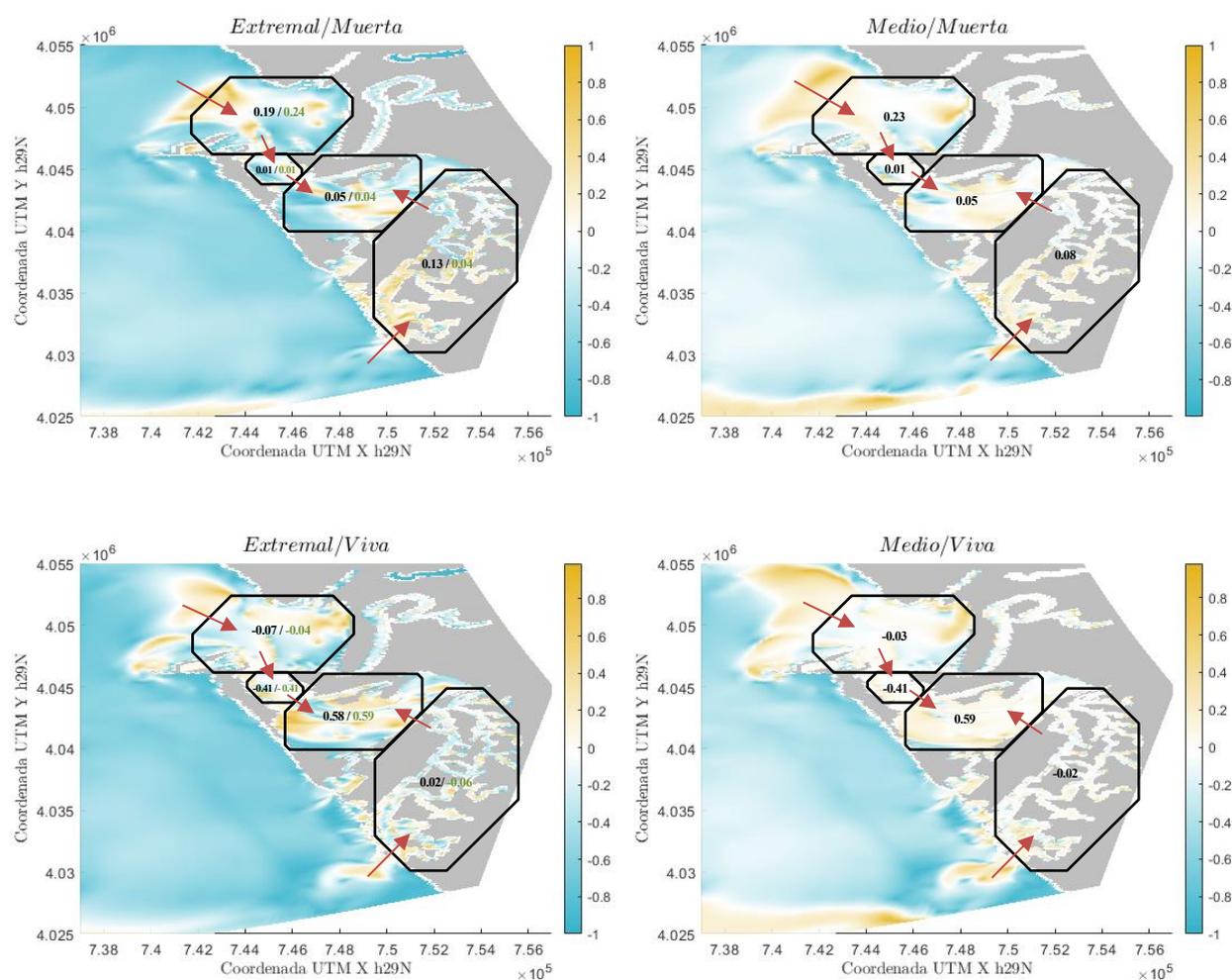


Figura 4-18. Balance del volumen total acumulado del sedimento ( $\text{hm}^3$ ) entre sacos, evaluado entre los escenarios de poniente, mostrados sobre el mapa del Índice de Dominancia entre viento y marea. Las flechas rojas indican la dirección del balance del sedimento entre los sacos. Los números en negro indican la aportación de sedimento a través de las secciones en combinación de marea máxima y viento. Los números en verde indican la aportación de sedimento, únicamente debida al efecto de marea máxima.

Para eventos de viento predominantes de poniente se comprueba que, en los escenarios extremos y medios en combinación con los casos de mareas máximas muertas, el balance de sedimentos en los sacos interiores y en la bahía exterior permanece estable entre escenario, siendo el transporte dominado preferentemente por las mareas.

Para estos escenarios, los sacos definidos en la bahía presentan una tendencia de sedimentación, siendo el volumen de sedimentación mayor en los sacos extremos que en los sacos interiores. Es decir, en la Bahía Exterior y en los caños de Sancti Petri la ganancia de sedimento es superior a la resultante en los sacos interiores.

De manera particular para los escenarios anteriores, en el saco de los caños de Sancti Petri, el evento extremal produce un aumento del volumen del sedimento del orden del doble del resultante en el evento medio ( $0.13 \text{ hm}^3$  frente a  $0.08 \text{ hm}^3$ ). De esta forma se comprueba que los eventos extremos de poniente aceleran la tendencia, ya existente, de sedimentación y aterramiento de los caños de Sancti Petri.

Para los escenarios extremos y medios en combinación con los casos de mareas máximas vivas, el balance de sedimento cambia en los sacos. Sin embargo, se observa que los sentidos del transporte de sedimentos entre sacos no cambian.

De este modo, el signo negativo nos indica la pérdida de volumen de sedimento en los sacos exteriores, aunque cercana al 0, pudiendo observar que estos sacos se encuentran en equilibrio con una ligera tendencia a la erosión o pérdida de sedimento generalizada.

De manera particular para el saco del Canal de Puntales, se observa que la pérdida de sedimento es muy acusada ( $-0.41 \text{ hm}^3$ ), comprobándose en los mapas de erosión/sedimentación (Figura 4-3) que el saco de la Bahía Exterior cede sedimento al Canal de Puntales, sedimentando parte de este volumen en la zona cercana al Puerto de Cádiz y, pasando el resto del volumen de sedimento hacia la Bahía Interior, localizándose la tendencia erosiva en la bocana de conexión de la canal de Puntales con la Bahía Interior, en el inicio del caño de la Carraca que atraviesa la Bahía Interior.

Para los escenarios de poniente, en escenarios extremos y medios, combinados con la sucesión de las mareas máximas vivas, se observa que el saco de la Bahía Interior recibe un gran volumen de sedimento ( $0.58$  y  $0.59 \text{ hm}^3$  para los escenarios extremal y medio, respectivamente), muy superior a la ligera tendencia de sedimentación observada en los casos de mareas máximas muertas (de  $0.05 \text{ hm}^3$  en ambos escenarios extremal y medio).

A la vista de los resultados anteriores, puede comprobarse que el transporte está dominado completamente por el efecto de la marea, siendo los resultados de los escenarios extremos de viento en combinación con mareas máximas iguales a los resultados en los escenarios medios, con la misma combinación de casos.

Además, se observa que la sucesión de eventos extremos sólo es notable en el saco de los caños de Sancti Petri, donde el balance resultante de volumen de se hace positivo, aunque con la misma tendencia de transporte hacia el interior de la bahía.

#### 4.4.2 Casos de estudio en escenarios de levante

En la figura de la siguiente página se muestran los mapas de balance del volumen total acumulado de sedimento escenarios de levante, sobre los mapas de dominancia entre marea y viento para la combinación de escenarios.

En primer lugar, se observa que para el escenario extremal de viento combinado con marea máxima viva, se observa que el volumen de sedimento recibido en el saco de la Bahía Interior ( $0.65 \text{ hm}^3$ ) es similar al recibido en su escenario homólogo de poniente ( $0.58 \text{ hm}^3$ ), aunque con una ganancia mayor debida a las aportaciones del viento sobre el transporte del sedimento, comprobando así que los eventos extremos de levante son más energéticos que los de poniente, como indica la rosa de vientos resultante del estudio de la Boya 2342.

Por otro lado, para el caso extremal de viento combinado con marea máxima muerta, se observa el gran aumento del volumen de sedimento en el saco de la Bahía Exterior ( $1,16 \text{ hm}^3$ ), debido de manera preferente a los efectos del viento en el transporte. En los sacos interiores se observa una tendencia de crecimiento en el volumen de sedimento, no así en el saco de Sancti Petri ( $-0.37 \text{ hm}^3$ ), en el cual los vientos extremos provocan una salida de grandes proporciones de volumen de sedimentos hacia los sacos interiores ( $0.14 \text{ hm}^3$ ) y hacia la desembocadura del caño de Sancti Petri (10 veces mayor a la provocada por el efecto de las mareas, en sentido contrario, según se muestra en los resultados de la Tabla 4-6).

Este efecto de se ve aumentado en el escenario extremal combinado con el caso de marea máxima viva, donde

la salida de sedimento de los caños ( $-0.53 \text{ hm}^3$ ) hacia el saco interior de la bahía y hacia fuera de la misma es del orden del doble que el resultado observado para el caso de marea máxima muerta ( $-0.37 \text{ hm}^3$ ).

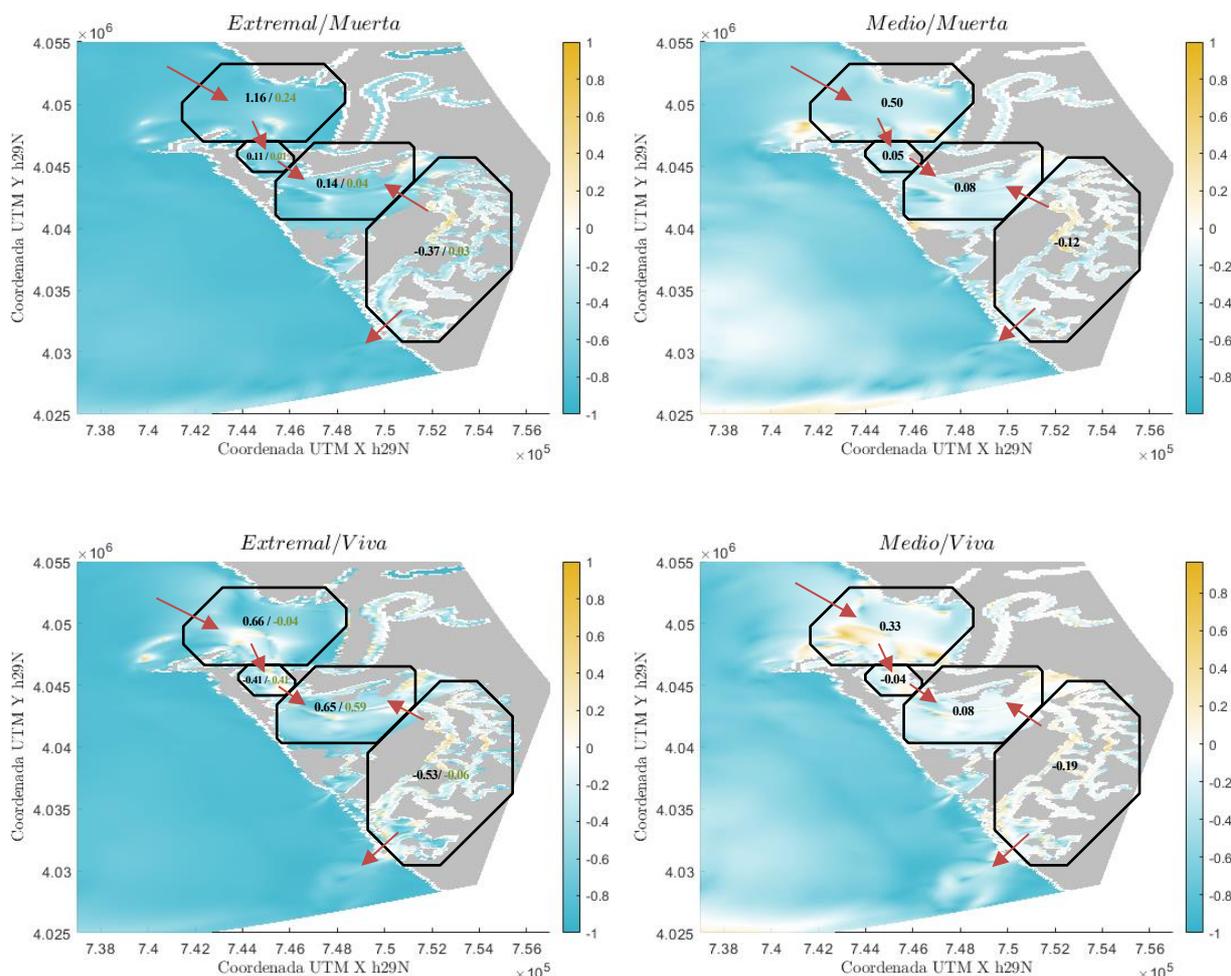


Figura 4-19. Balance del volumen total acumulado del sedimento ( $\text{hm}^3$ ) entre sacos, evaluado entre los escenarios de levante, mostrados sobre el mapa del Índice de Dominancia entre viento y marea. Las flechas rojas indican la dirección del balance del sedimento entre los sacos. Los números en negro indican la aportación de sedimento a través de las secciones en combinación de marea máxima y viento. Los números en verde indican la aportación de sedimento, únicamente debida al efecto de marea máxima.

Para el escenario medio de viento, en combinación con marea máxima viva, se observa el efecto de *freno* en los sacos del Canal de Puntales ( $-0.04 \text{ hm}^3$ ) y la Bahía Interior ( $0.08 \text{ hm}^3$ ), provocado por la dirección contraria del viento ante la dirección preferente de llenante del transporte por la marea, siendo el balance en los sacos interiores próximo a 0, con una ligera tendencia de pérdida de sedimento en el Canal de Puntales y, de ganancia en la Bahía Interior, como se comprobó en los resultados de la Tabla 4–6.

En cambio, para el escenario extremal de viento, en combinación con marea máxima viva, se observa que este efecto se ve contrarrestado, obteniendo un balance de sedimentos en los sacos interiores ( $-0.41$  y  $0.65 \text{ hm}^3$  para el Canal de Puntales y la Bahía Interior, respectivamente) con valores similares a los resultados obtenidos por el transporte realizado únicamente por efecto de marea ( $-0.41$  y  $0.59 \text{ hm}^3$  para el Canal de Puntales y la Bahía Interior, respectivamente), que a su vez son similares a los resultados ofrecidos por los mismos casos modelizados, pero para dirección predominante de viento de poniente ( $-0.41$  y  $0.58 \text{ hm}^3$ , respectivamente).

Por último, para el escenario medio de viento, en combinación con marea máxima muerta, se observa que los resultados obtenidos para levante son similares a los obtenidos en poniente, a excepción de los sacos exteriores, aumentando el volumen de sedimento ganado en el saco de la Bahía Exterior ( $0.50 \text{ hm}^3$  frente a los  $0.23 \text{ hm}^3$  en poniente) y, cambiando la tendencia de transporte en el saco de Sancti Petri, con una pérdida de volumen de sedimento ligeramente superior al volumen que se ganaba en eventos de poniente ( $-0.12 \text{ hm}^3$  frente a  $0.08 \text{ hm}^3$ ).



# 5 CONCLUSIONES

---

## 5.1 Sobre el estudio global de circulación de corrientes y sedimentos

Del estudio global de circulación de corrientes y sedimentos, con los mapas a escala global de resultados de transporte de sedimentos y erosión/sedimentación, puede extraerse que:

- En eventos de poniente, el sentido predominante de la corriente es hacia el Sureste de manera paralela a la bahía, con circulación hacia el interior en la zona de Sancti Petri y en la Bahía Exterior. En eventos de levante, el sentido predominante de la corriente es hacia el Noroeste de manera paralela a la bahía, con circulación hacia el exterior en la zona de Sancti Petri y, hacia el interior en la Bahía Exterior.
- En eventos de poniente, en la Bahía Interior los sentidos de circulación son de llenante en eventos extremales y, de vaciante en eventos medios, en contra de la dirección del viento predominante en los escenarios de estudio. En eventos de levante, en la Bahía Interior la circulación de corrientes presenta, para todos los casos, un sentido preferente de vaciante, intensificándose en eventos extremales, a excepción del Canal de Puntales, donde predomina la llenante y, en eventos medios con mareas máximas vivas, este sentido de circulación se ve *frenado* por efecto de la dirección contraria del viento.
- El sentido preferente de vaciante detectado en las simulaciones para los casos de levante ocurre de manera localizada en el tiempo coincidiendo con los picos máximos durante el temporal. Mediante el estudio de las secciones se comprueba que el sentido de la residual del transporte en los sacos es preferentemente en llenante, corroborando así la aparición de este efecto de *freno* en mareas muertas.
- Para todos los escenarios, se comprueba que la circulación preferente del transporte en el saco de la Bahía Interior se da a lo largo del eje del Caño de la Carraca su zona media, con movimiento del sedimento desde la Bahía Exterior en conexión con el Canal de Puntales hacia la Bahía Interior.
- El saco de los caños de la Carraca y Sancti Petri se comporta de manera distinta en los escenarios de poniente y levante. Para los primeros, se observa una tendencia de circulación desde el exterior de la bahía, con transporte del sedimento a través de los caños hacia la Bahía Interior. En escenarios de levante, el volumen de sedimento contenido en los caños se ve repartido en un transporte dividido en dos direcciones, hacia la Bahía Interior por el caño de la Carraca y, hacia el exterior de la bahía por la desembocadura de Sancti Petri.
- En materia de erosión y sedimentación localizada, de manera global para los escenarios simulados, se comprueba que en la Bahía Exterior existe una tendencia generalizada de sedimentación (<5 cm), siendo máxima en la zona del Puerto de Cádiz (5 cm) y, que en el Canal de Puntales las tendencias de erosión y sedimentación cambian entre escenarios, aunque a la salida de la canal en la conexión con la Bahía Interior aparece una zona con tendencia acusada de erosión (-30 cm). En la Bahía Interior, la tendencia es de sedimentación en las márgenes de la ensenada (5 cm), es decir, en las zonas intermareales de aguas someras, con una ligera tendencia erosiva (-20 cm) en el canal principal del Caño de la Carraca. En la zona de los caños la tendencia global es de sedimentación, a excepción de algunas zonas, así como una alta tendencia de sedimentación (>60 cm) en la desembocadura de Sancti Petri.

## 5.2 Sobre el estudio de las secciones de control

Del análisis de las variables propuestas para su evaluación en el presente estudio, siendo estas el transporte de sedimentos instantáneo y acumulado, así como el volumen de agua instantáneo y acumulado a través de las secciones, se extrae lo siguiente:

- En eventos de poniente, se comprueba que el sentido de transporte del sedimento es hacia el interior de la bahía desde ambos extremos, convergiendo en la ensenada de la Bahía Interior. Se observa que el mayor volumen de sedimento transportado (véase la Tabla 4-1 y la Tabla 4-2) se da a través de las secciones exteriores (Bahía Exterior y Sancti Petri), concentrando la recepción del sedimento en la Bahía Interior. Estas tendencias de transporte se ven aumentadas durante las mareas máximas vivas, indicando una dominancia preferente de la marea en el transporte, siendo notable la aportación del viento únicamente en la sección de control de Sancti Petri y, ligeramente en la sección de la Bahía Exterior.
- En eventos de levante, se comprueba que el sentido de transporte del sedimento también se da hacia el interior de la bahía, a excepción de la sección de la desembocadura de Sancti Petri, donde el transporte se da hacia el exterior de la bahía.
- Para los escenarios extremales de levante, el transporte del sedimento está fuertemente dominado por la contribución del viento, siendo dominante sobre la contribución de la marea en el transporte, afectando así a las secciones de los contornos de la Bahía Interior, dominadas de manera preferente por los efectos de la marea en eventos medios, a excepción de la sección de contorno del Canal de Puntales para eventos extremales con marea muerta, en la cual el viento iguala a la contribución de la marea en el transporte, identificando el efecto de *freno* en el Canal de Puntales en este escenario particular.
- En la comparación de escenarios de levante y poniente, se comprueba que el transporte de sedimento en eventos medios es, de manera generalizada, similar entre escenarios, aunque siendo superior el transporte en eventos de levante (véase la Tabla 4-1 y la Tabla 4-2). Para eventos extremales, el transporte en los escenarios de levante es muy superior al de los escenarios de poniente, siendo estos eventos más enérgicos, aunque menos frecuentes, según el estudio realizado sobre la rosa de vientos resultante de los registros empleados en la boya.
- En cuanto al estudio del volumen de agua a través de las secciones (véase la Tabla 4-3 y la Tabla 4-4), no se observan cambios significativos de este volumen en los escenarios simulados y en la comparación de escenarios extremales y medios, a excepción de ligeras variaciones del volumen debido al aumento del transporte del sedimento en la sucesión de eventos extremales, en particular para los sacos exteriores.
- Para el saco de Sancti Petri, en escenarios extremales de poniente se observa la pérdida de volumen de agua a través de la sección (de  $-0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  en combinación con mareas muertas y, de  $-0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , en mareas vivas), indicando el aumento del volumen de sedimento en su interior, con tendencia a la sedimentación y aterramiento, siendo este un problema real que está ocurriendo y siendo estudiado en la actualidad. En escenarios extremales de levante se observa el aumento de volumen de agua (de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  en combinación con mareas muertas y, de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , en mareas vivas), de acuerdo con la cesión del volumen de sedimento hacia el exterior de la bahía y, en consonancia con la problemática existente en la zona, como se ha comentado anteriormente.

## 5.3 Sobre el estudio longitudinal del transporte de sedimentos entre sacos

En base al análisis realizado en los sacos definidos en la Bahía de Cádiz, mediante la diferencia de transporte entre las secciones de control que marcan los contornos en cada uno de los sacos, se extrae lo siguiente:

- Para los eventos de poniente se comprueba que, a excepción de los resultados mostrados en el saco de los caños de Sancti Petri, en todos los eventos medios el transporte de sedimentos está principalmente dominado por la marea, siendo los resultados en eventos medios muy similares a los resultados en los casos con simulación única de marea (véase la Tabla 4-5).

- Asimismo, los resultados para eventos de poniente muestran una tendencia global a la sedimentación en el interior de todos los sacos, a excepción del Canal de Puntales para el escenario extremal en combinación con mareas vivas máximas, donde se observa una tendencia de pérdida de volumen de sedimento en el saco (-0,41 hm<sup>3</sup>).
- La tendencia de sedimentación generalizada se mantiene en todos los sacos en eventos extremales de poniente, aunque aumentado ligeramente el volumen de sedimento en los sacos (véase la Tabla 4-5) debido a la aportación de los vientos extremales. Para el caso particular en los caños de Sancti Petri, se comprueba que los efectos de vientos extremales de poniente son mayores que en el resto de las secciones, con una dominancia en el transporte compartida entre viento y marea.
- Para los eventos de levante, de manera contraria a lo observado en los eventos de poniente, se comprueba que los vientos tienen una fuerte influencia en el transporte de sedimentos de manera generalizada para todos los sacos definidos en la bahía (véase la Figura 4-17).
- Se comprueba que el transporte aumenta para los escenarios en combinación con mareas vivas máximas (véase la Figura 4-19), comprobándose que la dominancia del transporte de sedimento parece ser compartida por marea y viento en algunas zonas de los sacos interiores, aunque siendo los efectos de viento superiores en los casos extremales (como se muestra en la Tabla 4-5 y la Tabla 4-6).
- De manera global, se observa una tendencia de sedimentación en los sacos de las Bahías Exterior e Interior y, de erosión en el saco de los caños de Sancti Petri y Carraca, con un balance negativo en el transporte de sedimentos en todos los escenarios con viento predominante de levante, en consonancia con las conclusiones extraídas en el análisis de transporte en las secciones realizado anteriormente (véase la Figura 4-18 y la Figura 4-19).
- De manera particular, para todos los escenarios medios y extremales analizados, se comprueba la tendencia de sedimentación de manera localizada en la zona de la sección de la desembocadura de Sancti Petri, congruentemente con la problemática existente en esta zona en la actualidad.

En referencia a lo anterior, empleando como base de partida los modelos realizados para el presente estudio, pueden continuarse otras líneas de investigación abiertas en el litoral atlántico sobre los efectos y el impacto de los dragados en estuarios (Zarzuelo, López-Ruiz, & Ortega-Sánchez, 2018), ampliando el alcance de estudio para la zona de la Bahía de Cádiz y la problemática identificada en el acceso a la canal de navegación en la desembocadura de Sancti Petri.

## 5.4 Sobre la dominancia de marea y viento en el transporte de sedimentos

Por último, del estudio de dominancia de marea y viento realizado sobre la variable de transporte de sedimento en suspensión en los escenarios modelizados, se extraen las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, cabe destacar que los resultados obtenidos (Figura 4-16 y Figura 4-17) del Índice de Dominancia (DI) son congruentes con los resultados obtenidos para el resto de variables analizadas en los escenarios sintéticos propuestos y, que estos resultados dan sentido y explican los efectos del transporte entre los sacos de la Bahía de Cádiz en las condiciones de modelización de los distintos escenarios.
- De manera general, el transporte de sedimentos en escenarios de poniente está dominado por las contribuciones de marea en todos los sacos de la bahía, siendo mayor este efecto en combinación con marea máxima viva.
- De manera contraria, el transporte de sedimentos en escenarios de levante está fuertemente dominado por las contribuciones de vientos en los sacos de la bahía, existiendo algunas zonas interiores del saco de los caños de Sancti Petri y de la Bahía Interior donde las contribuciones de viento y marea son similares, viéndose aumentado este efecto en combinación con marea máxima viva y, de manera general, aunque en menor proporción, en la sucesión de eventos medios.



## REFERENCIAS

---

- Deltares. (2016). *Delft3d Flow: User Manual*. Deltares.
- Jinshan, P., Yongping, C., Min, S., Jinya, M., Xinyi, Y., Zhibin, Y., & Peng, Y. (2022). Residual sediment transport in the fine-grained Jiangsu Coast under changing climate: The role of wind-driven currents. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute: Water Journal*.
- Lesser, G., Roelvink, J., Van Kester, J., & Stelling, G. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*.
- Padman, L., & Erofeeva, S. (2005). Tide Model Driver (TMD) Manual. Earth and Space Research Institute.
- Van Rijn, L. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*.
- Zarzuelo, C., Díez-Minguito, M., Ortega-Sánchez, M., López-Ruiz, A., & Losada, M. (2015). Hydrodynamics response to planned human interventions in a highly altered embayment: The example of the Bay of Cádiz (Spain). *Elsevier*.
- Zarzuelo, C., López-Ruiz, A., & Ortega-Sánchez, M. (2018). Evaluating the impact of dredging strategies at tidal inlets: Performance assesment. *Elsevier*.
- Zarzuelo, C., López-Ruiz, A., & Ortega-Sánchez, M. (2021). The role of waves and heat exchange in the hydrodynamics of multi-basin bays: The example of Cádiz Bay (Southern Spain). *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- Zarzuelo, C., López-Ruiz, A., D'Alpaos, A., Carniello, L., & Ortega-Sánchez, M. (2018). Assesing the morphodynamic response of human-altered tidal embayments. *Elsevier*.
- Zarzuelo, C., López-Ruiz, A., Díez-Minguito, M., & Ortega-Sánchez, M. (2017). Tidal and subtidal hydrodynamics and energetics in a constricted estuary. *Elsevier*.