

TOMO II (1ª Parte)

Anexos del I al XII

*Estudio de Impacto Ambiental de la Nueva Terminal
de Contenedores en la Bahía de Cádiz*

Asesoría Técnica



ANEXOS AL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DE LA “NUEVA TERMINAL DE CONTENEDORES DE CADIZ”

ANEXO I.- Análisis preliminar de alternativas

ANEXO II: Estudios previos para la optimización de la alternativa del proyecto.

ANEXO III: Clima marítimo.

ANEXO IV: Propagaciones del oleaje.

ANEXO V: Estudio de agitación de ondas cortas.

ANEXO VI: Estudio de agitación de ondas largas.

ANEXO VII: Dimensiones del dique de abrigo. Estudios previos.

ANEXO VIII: Dimensiones del muelle. Estudios previos.

ANEXO IX: Análisis ambiental preliminar.

ANEXO X: Influencia sobre la playa de Valdelagrana.

ANEXO XI: Análisis de corrientes.

ANEXO XII: Campaña de campo ambiental.

ANEXO XIII: Campaña de campo hidrodinámica.

ANEXO XIV: Estudio de patrimonio arqueológico sumergido.

ANEXO XV: Criterios generales según ROM 0.0.

ANEXO XVI: Maniobrabilidad de los buques.

ANEXO XVII: Campaña de seguimiento ambiental del dragado del Muelle Sur de Cabezuela.

ANEXO XVIII: Campañas geofísicas de prospección arqueológica.

ANEXO XIX: Inspección de sedimentos para su caracterización físico-química.

ANEXO XX: Impacto de las obras de ampliación y dragado del Puerto de la Bahía de Cádiz sobre la circulación y el transporte de sedimentos en la bahía.

ANEXO XXI: Reportaje fotográfico ampliado.

ANEXO I

ANÁLISIS PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS.

Nota.- En el documento de Estudio de Impacto Ambiental (E.I.A.) se matizan algunos datos de este análisis preliminar de alternativas.

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción.....	1
2.ÁREA DE UBICACIÓN DE LA ACTUACIÓN	4
2.1. Área de trabajo.....	4
2.2. Descripción del Puerto de Cádiz.....	6
2.2.1. Dársena de Cádiz	7
2.2.2. Cabezuela-Puerto Real	8
3.DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE PROYECTO	9
3.1. Alternativa 1: Exterior Norte.....	12
3.1.1. Rutas de acceso y maniobras náuticas	13
3.1.2. Agitación en líneas de atraque.....	13
3.1.3. Líneas de muelle y calados.....	13
3.1.4. Longitud de obras exteriores.....	13
3.1.5. Dragados	14
3.1.6. Interferencia con otras obras	14
3.1.7. Accesibilidad de la terminal desde tierra	15
3.1.8. Valoración económica aproximada	16
3.2. Alternativa 2: Dique de Levante.....	18
3.2.1. Rutas de acceso y maniobras náuticas	18
3.2.2. Agitación en líneas de atraque.....	19
3.2.3. Líneas de muelle y calados.....	19
3.2.4. Longitud de obras exteriores.....	19
3.2.5. Dragados	19
3.2.6. Interferencia con otras obras	20
3.2.7. Accesibilidad de la terminal desde tierra	20
3.2.8. Valoración económica aproximada	20
3.3. Alternativa 3: Cabezuela Oeste.....	23
3.3.1. Rutas de acceso y maniobras náuticas	23
3.3.2. Agitación en líneas de atraque.....	23
3.3.3. Líneas de muelle y calados.....	24
3.3.4. Longitud de obras exteriores.....	24
3.3.5. Dragados	24
3.3.6. Interferencia con otras obras	25

3.3.7. Accesibilidad de la terminal desde tierra	25
3.3.8. Valoración económica aproximada	25
3.4. Comentarios generales a las alternativas propuestas	28
3.5. Evaluación técnica de las alternativas propuestas.....	29
3.5.1. Caracterización de las alternativas	29
3.5.2. Comparación técnica entre alternativas mediante análisis multicriterio	29



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz inicia un estudio de viabilidad ambiental, técnica y económica para la construcción de una nueva Terminal de Contenedores con los siguientes objetivos:

- Separación de tráfico de mercancías y pasajeros. La construcción de la nueva Terminal de Contenedores posibilita que la dársena comercial actual se destine a tráfico ro-ro mixto (pasajeros y mercancías en el Muelle Marqués de Comillas) y tráfico de cruceros y línea regular de pasajeros en la Bahía (desde el Muelle Ciudad hasta el Reina Sofía). De esta manera se resuelven los problemas de seguridad, operatividad e imagen derivados de la mezcla de tráficos.
- Impulso definitivo al tráfico de contenedores. La nueva terminal de contenedores tendría una superficie de entre 35-40 Has con una longitud de línea de atraque superior a los 1000 m. De esta manera el Puerto de la Bahía de Cádiz se posicionaría en el tráfico internacional de contenedores aumentando su competitividad en este contexto.
- Consolidación del Puerto de la Bahía de Cádiz como motor socioeconómico de la Bahía. El Puerto de Cádiz contribuye de forma esencial al funcionamiento y competitividad del tejido industrial de la Bahía de Cádiz, actuando como motor de desarrollo económico. En la actualidad, el paro es el problema económico más grave de la Bahía, por lo que se hace necesario reforzar el papel del puerto como elemento dinamizador de la economía regional.
- Mejora ambiental de la Bahía de Cádiz. Las actuaciones llevadas a cabo a lo largo de los siglos en la zona, han mermado la calidad ambiental de la Bahía de Cádiz. Este hecho hace que se plantee la necesidad de mejorar la renovación de aguas en la Bahía Interior para aumentar la calidad ambiental de todo el entorno.



En función de los estudios realizados sobre la evolución del transporte marítimo, así como de las dimensiones de los buques portacontenedores, se han obtenido los siguientes requisitos de proyecto para la nueva Terminal de Contenedores:

- Las dimensiones de los buques y la eficiencia operacional imponen calados y longitud de línea de atraque. Para el caso que nos ocupa el calado de los muelles debe ser de 13-15 m y la longitud mínima de 800 m.
- El volumen de tráfico estimado exige una superficie de almacenamiento y operaciones que debe estar entre 35 – 40 Ha.

Para cumplir con estos requisitos y satisfacer las necesidades mencionadas anteriormente, se han planteado una serie de alternativas de actuación. Tras eliminar a priori todas aquellas opciones que pudieran ocasionar impactos críticos en el entorno, se ha realizado un análisis comparativo de tres alternativas de proyecto viables desde el punto de vista ambiental, técnico y económico. En la Figura 1 se muestra una fotografía aérea del área de estudio y un esquema de las tres alternativas seleccionadas. Las tres alternativas son:

- **Alternativa 1: “Exterior Norte”**. Consiste en la creación de una nueva dársena al Norte de la dársena comercial del Puerto de Cádiz compuesta por una obra de abrigo exterior con la bocana orientada hacia el Este. La futura Terminal de Contenedores estaría adosada a la Terminal de Contenedores existente.
- **Alternativa 2: “Dique de Levante”**. Consiste en la creación de una Terminal de Contenedores al E de la dársena comercial del Puerto de Cádiz, adosada al actual dique de Levante, con la línea de atraque principal en el exterior.
- **Alternativa 3: “Cabezuela Oeste”**. Consiste en la creación de una explanada al Oeste del Bajo de la Cabezuela, adosada a la frontera Norte de la Factoría de Dragados Off-Shore, con la línea de atraque al W.

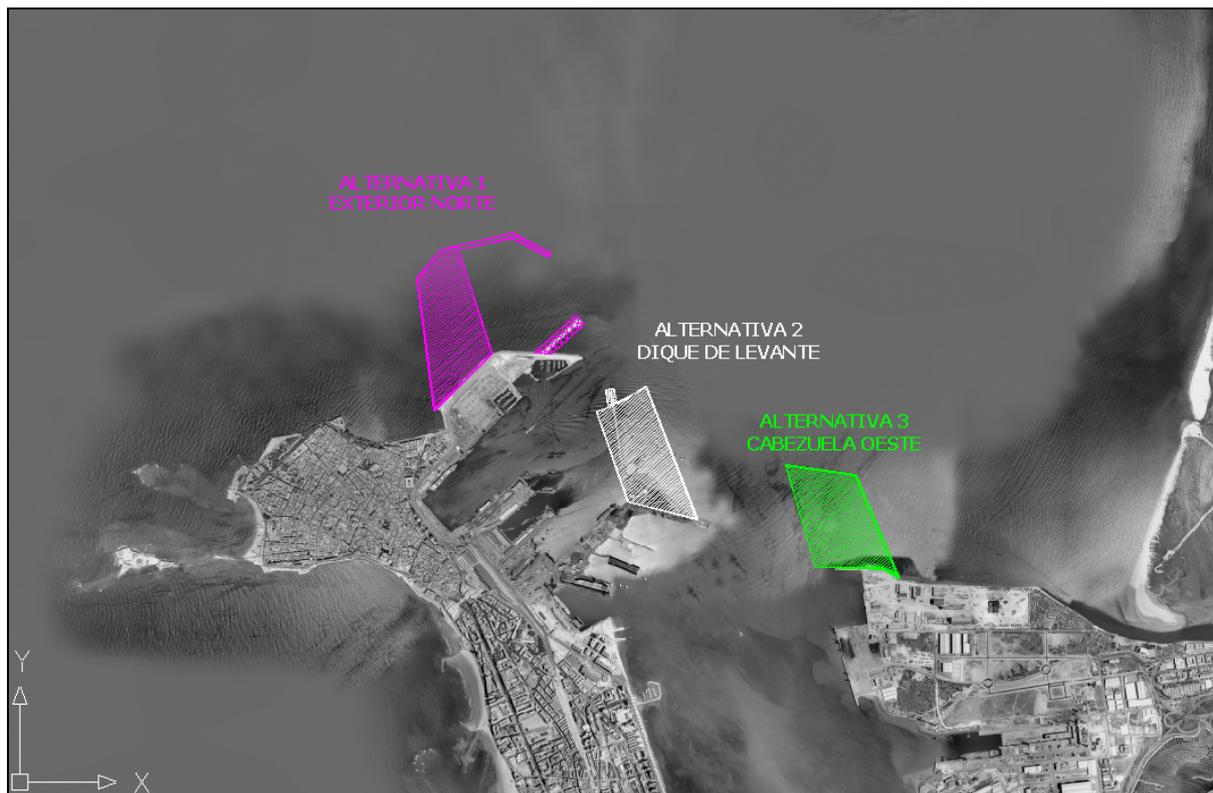


Figura 1: Fotografía aérea del área de estudio y esquema de alternativas consideradas.



2. ÁREA DE UBICACIÓN DE LA ACTUACIÓN

2.1. Área de trabajo

El área de ubicación donde se encuentra la actuación a considerar en esta Memoria-Resumen es la Bahía de Cádiz. Esta bahía se encuentra situada en el sector oriental del Golfo de Cádiz, al Este de la línea imaginaria que une Punta Candor (Rota) y el Castillo de Sancti Petri, (Chiclana).

En la Bahía de Cádiz se pueden distinguir varios sectores:

- Bahía Externa, situada al N del Estrecho de Puntales, y conectada directamente al Océano Atlántico a través de las más de 5 millas que separan Punta del Sur de Punta Morena. A esta parte de la Bahía se asoman las poblaciones de Cádiz y el Puerto de Santa María. Desembocan en este sector los ríos Guadalete y San Pedro. En este entorno se pueden encontrar marismas y zonas inundables, ambientes que dan un alto valor ambiental a la zona.
- Sector Central, que se corresponde con el Estrecho de Puntales. Se trata de una franja que conecta la Bahía Externa con la Interna y que se corresponde con el área marina situada entre el bajo de la Cabezuela y las costas orientales de la ciudad de Cádiz.
- Bahía Interna, situada al Sur y Suereste del Estrecho de Puntales, bañando las costas de San Fernando y Puerto Real. Las marismas también están presentes en esta zona.



Figura 2. Provincias de la Bahía de Cádiz

Por el alto valor ecológico y paisajístico de las zonas naturales de esta región, playas, marismas, dunas y pinares costeros entre otros, así como por la flora y la fauna que albergan estos ambientes, se constituye en 1989 el Parque Natural de la Bahía de Cádiz, con una superficie total de 10.000 hectáreas, que también es zona de especial protección para las aves (zona ZEPA) y forma parte del lugar de interés comunitario (LIC) denominado Bahía de Cádiz. El área sumergida de Bahía de Cádiz da lugar al LIC Fondos marinos de la Bahía de Cádiz.

Los términos municipales que se asientan a las orillas de la bahía son Cádiz, Puerto Real, San Fernando, Chiclana de la Frontera y El Puerto de Santa María. Constituyen una aglomeración urbana de gran importancia en Andalucía, con más de 400000 habitantes en su conjunto, que se ve incrementada en verano por la afluencia de turistas. Las extensas playas de arena existentes en la zona, como son las de Valdelagrana, la Puntilla y Vistahermosa, constituyen un reclamo turístico y también una importante fuente de ingresos. La actividad militar, la acuicultura y la industrial relacionada con la construcción de barcos y aeronáutica son otras actividades económicas de interés, si bien el desempleo es uno de los principales problemas de la zona. En tiempos pretéritos, el comercio con América hizo de esta bahía uno de los principales puertos del mundo al ser el punto por el que las mercancías entraban y salían de Europa.



Figura 3. Zona de estudio

2.2. Descripción del Puerto de Cádiz

Se puede afirmar que la bahía natural de Cádiz, albergó en sus orillas un puerto o centro de actividad portuaria importante desde la fecha de la fundación de la actual ciudad de Cádiz. Por tanto, el papel como puerto natural de la Bahía de Cádiz es al menos tan antiguo como el poblamiento de este arco litoral. A lo largo de los siglos se ha producido una transformación del paisaje de la Bahía al hilo de los avances tecnológicos, pero es en el siglo XX cuando se produce la consolidación de la zona como una bahía portuaria.

En la actualidad el Puerto de la Bahía de Cádiz está estructurado en cuatro zonas:

- Dársena de Cádiz-ciudad (pasajeros, comercial y pesquera).
- Dársena de Cádiz-Zona Franca (comercial).
- Instalaciones de Puerto Real-Cabezuela (comercial).
- El Puerto de Santa María (comercial y pesquera).



Y además existen instalaciones de particulares, en régimen de concesión administrativa:

- Instalaciones para construcción y reparación de buques de NAVANTIA en Puerto Real y Cádiz
- Planta Off-Shore de Dragados y Construcciones en Puerto Real
- Instalaciones dedicadas a la náutica y la vela de: R.C. Náutico de Cádiz y Puerto América en Cádiz y R.C. Náutico y Puerto Sherry en el Puerto de Santa María.

Ofrece así la Bahía un conjunto de instalaciones y servicios a la navegación poco común si bien, la actividad más notable es el transporte de mercancías, contribuyendo eficaz y eficientemente al desarrollo económico y social de la Bahía de Cádiz en su conjunto.

Dado que las alternativas de proyecto analizadas se ubican en las dársenas de Cádiz-ciudad y las instalaciones de Puerto Real-Cabezuela, a continuación se realiza una breve descripción de las mismas.

2.2.1. Dársena de Cádiz

La dársena de Cádiz incluye las instalaciones portuarias más próximas al Casco Histórico de la ciudad, por lo que constituye el enclave nordeste de la zona de servicio terrestre del puerto de la Bahía de Cádiz. Comprende tres áreas de distinta especialización:

- La concesión de NAVANTIA, en la que se realizan tareas de reparación de buques, que se extiende desde el extremo meridional del muelle de Astilleros hasta las instalaciones de la dársena pesquera, abarcando los distintos muelles, diques (dos flotantes y dos secos) y Duques de Alba afectos al funcionamiento de la factoría, así como una planta “Delta” de limpieza y desgasificación, actualmente en desuso.
- La dársena pesquera, que se extiende entre la avenida de Astilleros, la concesión de NAVANTIA, y una vía interior al puerto, que separa las instalaciones pesqueras de las puramente comerciales. Comprende los muelles de Levante, de la Lonja y de Fernández Ladreda, y está protegida por el dique de Poniente.
- La dársena comercial, que se extiende entre la Avenida del Puerto, las instalaciones pesqueras y el dique de mar de leva, y que comprende los muelles Marqués de Comillas, Reina Victoria, Ciudad, Alfonso XIII y Reina Sofía, así como la instalación deportiva de Puerto América. Incluye también las infraestructuras de defensa del dique de San Felipe y del espigón contra el mar de leva.



2.2.2. Cabezuela-Puerto Real

El muelle de la Cabezuela - Puerto Real está situado en la costa oriental de la Bahía. El muelle es colindante con las instalaciones de NAVANTIA de Puerto Real, una parte de las cuales se encuentra sobre suelo de concesión, ocupando entre ambas casi la totalidad de lo que fue el Bajo de la Cabezuela.

El área comprende 2 subzonas de distinto uso y características:

- El muelle y plataformas colindantes, empleados en la actualidad fundamentalmente por tráficos de graneles sólidos.
- La planta de Dragados Off Shore, dedicada a la construcción de plataformas petrolíferas y grandes estructuras metálicas.



3. DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE PROYECTO

El resultado de este estudio preliminar es el planteamiento de 3 alternativas de proyecto para la construcción de la futura Terminal de Contenedores sensiblemente homogéneas desde un punto de vista técnico con las siguientes características operacionales:

- Máxima seguridad y operatividad de las instalaciones para garantizar la competitividad de la instalación.
- Mínima interferencia con la actividad portuaria en las instalaciones existentes.
- Área de almacenamiento para contenedores entre 35 - 40 Ha.
- Anchura media de la Terminal entre 350 - 400 m.
- Longitud mínima de la línea de atraque: 800 m.
- Calado de la línea de atraque entre 13 - 15 m.

Las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM 0.0) recomiendan unos valores mínimos de la vida útil y la operatividad, así como la máxima probabilidad de fallo en la vida útil de la obra en función de la repercusión económica y la repercusión social y ambiental de la instalación, Tabla 1. Estos valores están íntimamente ligados con la competitividad de la Terminal, ya que si los requerimientos de seguridad y operatividad no están garantizados, se pierde competitividad en el mercado.

Tabla 1: Requisitos de seguridad, servicio, uso y explotación.

CARÁCTER GENERAL	Vida útil mínima	25 años
	Probabilidad máxima de fallo en ELU	0.10
	Probabilidad máxima de fallo en ELS	0.10
CARÁCTER OPERATIVO	Operatividad mínima	0.95
	Número medio de paradas al año	10
	Duración máxima probable de la parada	12 horas



Las 3 alternativas de proyecto consideradas son:

- Alternativa 1: “Exterior Norte”. Consiste en la creación de una nueva dársena al Norte de la dársena comercial del Puerto de Cádiz compuesta por una obra de abrigo exterior con la boca orientada hacia el Este. La futura Terminal de Contenedores estaría adosada a la Terminal de Contenedores existente.
- Alternativa 2: “Dique de Levante”. Consiste en la creación de una Terminal de Contenedores al E de la dársena comercial del Puerto de Cádiz, adosada al actual dique de Levante, con la línea de atraque principal en el exterior.
- Alternativa 3: “Cabezuela Oeste”. Consiste en la creación de una explanada al Oeste del Bajo de la Cabezuela, adosada a la frontera Norte de la Factoría de Dragados Off-Shore, con la línea de atraque al W.

La Figura 4 muestra la situación actual del entorno del proyecto, mientras que en la Figura 5 se representan las alternativas consideradas para el análisis y comparación. A continuación se exponen las principales características desde el punto de vista técnico de las 3 alternativas de proyecto consideradas, cuyas dimensiones y geometría pueden variar sensiblemente a la luz de las conclusiones de estudios posteriores.



Figura 4: Situación actual del entorno del proyecto.

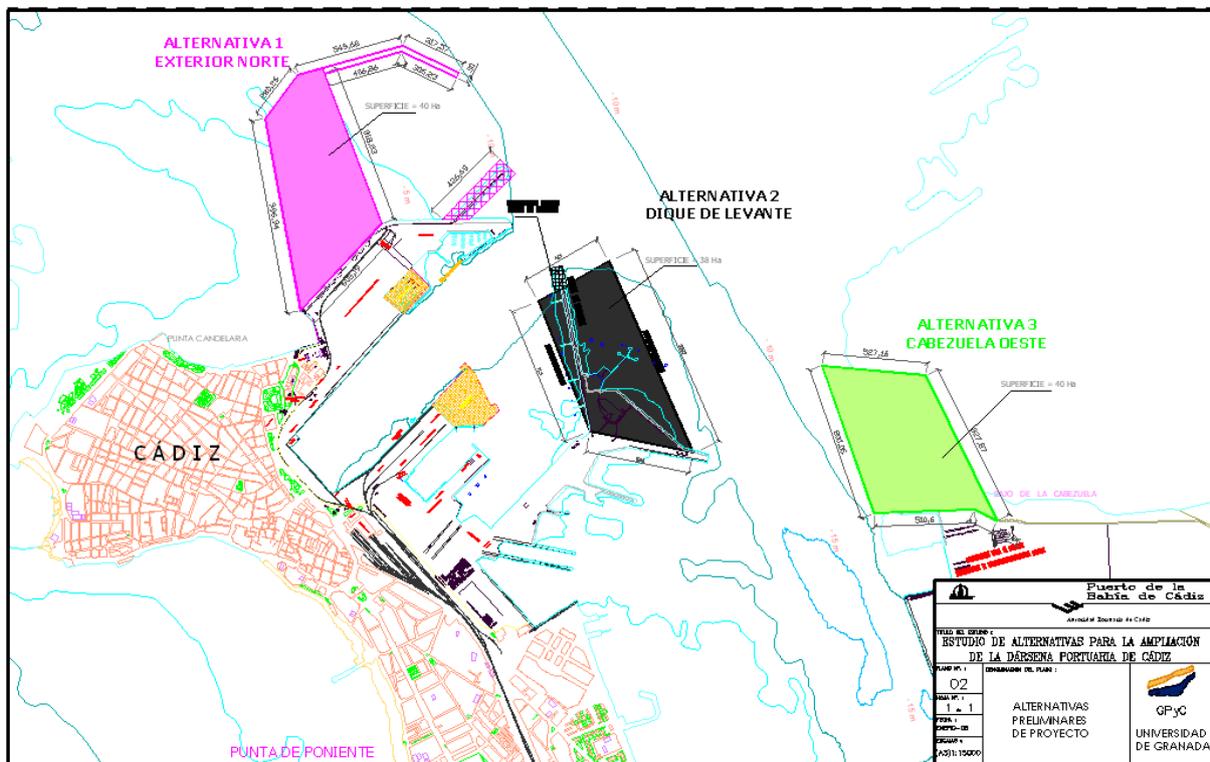


Figura 5: Alternativas de ampliación consideradas para el análisis.



3.1. Alternativa 1: Exterior Norte

Esta alternativa consiste en la creación de una nueva dársena con la bocana orientada hacia el Este, al Norte de la dársena comercial del Puerto de Cádiz, compuesta por una obra de abrigo exterior. La nueva Terminal de Contenedores quedaría de esta manera adosada a la existente Terminal de Contenedores Reina Sofía.

El dique de abrigo está compuesto por cuatro alineaciones que van a proporcionar el abrigo de los temporales dominantes procedentes del sector Oeste. El arranque del dique parte del extremo Sur del dique de San Felipe, de unos 1000 m de longitud, con una orientación sensiblemente NNW. Esta alineación conecta con una segunda de unos 280 m de longitud con orientación NE. La obra de abrigo se completa con una tercera alineación de unos 550 m de longitud con orientación ENE y una cuarta de unos 315 m de longitud con orientación ESE que se aproxima al canal de navegación actual. El contradique de la nueva dársena está formado por el dique Mar de Leva existente, que tiene unos 350 m de longitud.

De esta manera se crea una superficie de agua abrigada de 56 Ha y una superficie terrestre en el extremo Oeste de la nueva dársena de unas 40 Ha destinada a la futura Terminal de Contenedores. La longitud de atraque de la nueva Terminal sería de unos 850 m.

En esta alternativa se puede plantear una primera fase donde se construiría la obra de abrigo y una segunda donde se construiría el muelle propuesto y la explanada.

Esta configuración en planta se resume en las siguientes cifras:

Longitud obras de abrigo [m]	2145
Superficie de agua abrigada [Ha]	56
Superficie de tierra [Ha]	40
Anchura media superficie tierra [m]	450
Longitud línea de atraque [m]	850

A continuación se describen algunos aspectos importantes a tener en cuenta en esta alternativa: (1) Rutas de acceso y maniobra de buques; (2) Agitación en las líneas de atraque; (3) Líneas de muelle y calados; (4) Superficie de tierra; (5) Longitud de obras de abrigo; (6) Dragados, (7) Interferencia con otras obras, (8) Accesibilidad desde tierra a la Terminal y (9) Valoración económica aproximada.



3.1.1. Rutas de acceso y maniobras náuticas

La disposición en planta de esta alternativa con el dique exterior aproximándose al canal de navegación y con la bocana orientada hacia el E no presenta inconvenientes desde el punto de vista de acceso a la nueva dársena.

El acceso a la nueva dársena se realiza por el canal de navegación existente, con orientación NW. Las maniobras de atraque pueden realizarse en el interior de la dársena, en aguas abrigadas, para lo cual se han dispuesto dimensiones suficientes para reviro con remolcadores del buque máximo de proyecto.

3.1.2. Agitación en líneas de atraque

La configuración geométrica de esta alternativa permite tener un abrigo suficiente frente a los oleajes de mayor contenido energético procedentes del sector W. Adicionalmente, las obras exteriores propuestas proporcionan abrigo a la dársena comercial actual.

Las dimensiones y orientación de la bocana indican que el oleaje tipo “Sea” local puede penetrar directamente en la nueva dársena. Debido a que el fetch en el sector N-E es muy reducido, el contenido energético de éste es muy pequeño y las características del oleaje generado será de corto periodo, entre 2 y 5 s., lo que indica un efecto despreciable sobre los buques portacontenedores que atracarán en la futura Terminal.

3.1.3. Líneas de muelle y calados

La solución planteada introduce unos 850 m de línea de muelle directamente adosada a la superficie de almacenamiento de contenedores.

El calado mínimo necesario para el buque máximo de cálculo es de 15 m, lo que implica que se debería realizar un dragado de la nueva dársena exterior hasta la -15 m. En la actualidad los calados de esta zona están entre la -5 y la -10 m y el fondo está compuesto de roca y arena.

3.1.4. Longitud de obras exteriores

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la longitud de las obras exteriores de abrigo es de unos 2145 m, para reducir la agitación en el interior de la nueva dársena para los oleajes del sector W. En principio, la tipología deberá ser tal que permita controlar las reflexiones de oleaje para que no aumente los niveles de agitación en el canal de navegación.



3.1.5. Dragados

Teniendo en cuenta las características de la alternativa de proyecto a analizar se distinguen dos obras de dragado principales:

- Dragados en la nueva dársena para alcanzar los calados de proyecto. Los calados impuestos por los buques tipo considerados implican la necesidad de realizar dragados en el interior de la nueva dársena. El calado mínimo de la dársena debe ser de unos 13 m en BMVE para asegurar la operatividad de la nueva Terminal de Contenedores. En la actualidad, el área destinada a la dársena tiene unos calados comprendidos entre los 5 y los 10 m, por lo que se hace indispensable la realización de dragados para alcanzar los calados necesarios.
- Material de relleno para la explanada de almacenamiento. Teniendo en cuenta que la profundidad media del área de ubicación de la explanada es 7 m, estaría coronada a la +7 m con respecto a la BMVE y la superficie es de 40 Ha, el orden de magnitud del volumen de relleno a necesitar sería de 4 millones de m³. Para la obtención de este volumen de material de relleno se plantea la alternativa del transporte terrestre y del dragado.
 - Transporte terrestre. Desde un punto de vista económico y ambiental la alternativa de transporte terrestre presenta importantes inconvenientes debido a la disponibilidad de este volumen de material y al itinerario urbano que tendría que seguir el transporte incrementando el riesgo de accidentes, ruido, vibraciones, emisión de polvo e interferencias con el tráfico.
 - Dragado. Se plantea la posibilidad de realizar un dragado para obtener el material necesario para el relleno contemplado. Una posible zona de dragado sería la zona del canal de navegación y el Estrecho de Puntales. Esta operación presenta las siguientes ventajas:
 - Mejora sustancial de la seguridad en la navegación de los buques al incrementar el calado y anchura del canal de navegación.
 - Mejora de las condiciones de circulación marina aumentando la capacidad de intercambio de agua en la Bahía.
 - Desde el punto de vista de la construcción de la obra, aportaría el material de relleno necesario.

3.1.6. Interferencia con otras obras

Las obras más importantes proyectadas en el entorno que podrían tener interferencia con la alternativa analizada son:

- Puente sobre la Bahía del Nuevo Acceso a Cádiz.



- Nuevo Canal de Acceso a los Astilleros de Puerto Real

El nuevo puente sobre la Bahía arranca junto al testero Norte del Muelle de la Cabezuela, y alcanza la orilla opuesta junto a la dársena de embarcaciones deportivas en el barrio de la Concepción. El mencionado puente posee un tramo levadizo para evitar las restricciones a la navegación por limitaciones de altura de los buques que pudiera comercializar NAVANTIA en Puerto Real.

En combinación con el tramo levadizo del puente también se ha planteado la construcción de un nuevo canal de acceso a los astilleros de Puerto Real que prestará servicio a los buques de mayor calado aéreo que prevé comercializar NAVANTIA. El canal arranca frente a la planta DELTA y termina en los astilleros de Puerto Real.

Esta alternativa se desarrolla al NW de la dársena comercial por lo que no hay interferencia entre las obras del nuevo puente sobre la Bahía ni sobre el dragado del canal de acceso a los astilleros de Puerto Real.

3.1.7. Accesibilidad de la terminal desde tierra

La accesibilidad terrestre de los puertos es un aspecto importante a considerar, ya que éstos son nodos de intercambio modal integrados dentro de la cadena de transporte, y se deben buscar soluciones que aseguren de una manera eficiente la conexión del puerto con sus actuales y potenciales áreas de influencia económica.

La carretera N-IV es el acceso terrestre principal para el tráfico rodado, conectando el puerto con la autopista Cádiz-Sevilla y con el resto del sistema viario andaluz y nacional. La conexión entre el puente Carranza y la dársena de Cádiz se ha realizado a través de la carretera industrial (Avenidas de Segunda Aguada - Astilleros).

Debido a que esta alternativa plantea la construcción de la futura Terminal adosada a la actual Terminal de Contenedores Reina Sofía, la capacidad y calidad de la accesibilidad a la nueva terminal sería similar a la actual, aunque se supone mejorará cuando esté finalizado el nuevo puente sobre la Bahía de Cádiz.



3.1.8. Valoración económica aproximada

En este apartado se incluye una primera valoración económica aproximada de las obras descritas. Los precios usados deben considerarse como aproximados con el objetivo de establecer un marco de comparación entre las alternativas analizadas.

Concepto	Precio Unitario [€]	Medición	Importe [€]
Longitud de obra de abrigo exterior [m]	50000	2145	107250000
Longitud de muelle [m]	30000	850	25500000
Relleno explanada procedente de dragado [m ³]	6	4000000	24000000
Superestructura: Pavimento, urbanización y edificios [m ²]	80	400000	32000000
Inversión Total			188750000 €

La inversión total a realizar sin tener en cuenta IVA, beneficio industrial ni gastos generales ascendería a ciento ochenta y ocho millones setecientos cincuenta mil euros. Es de destacar que, prácticamente más del 50% del presupuesto de la obra estaría destinado a la construcción de la obra de abrigo.

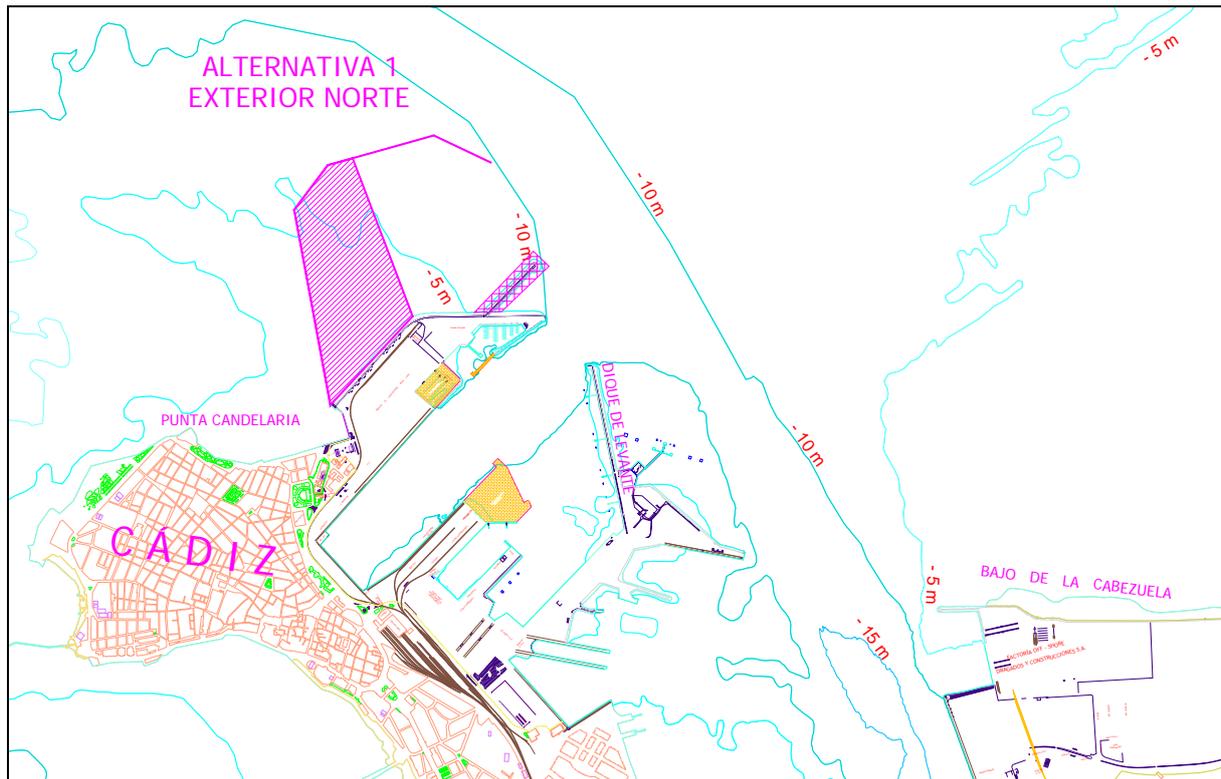


Figura 6: Ubicación y geometría de la Alternativa 1.



3.2. Alternativa 2: Dique de Levante

Esta alternativa consiste en la creación de una Terminal de Contenedores al E de la actual dársena comercial, adosada al actual dique de Levante. La Terminal está compuesta por un muelle exterior a la dársena de 1065 m de longitud, con una orientación sensiblemente paralela al eje del canal de navegación, es decir, NNW. Existe una posibilidad de crear otro muelle en el interior de la dársena de unos 715 m de longitud, si el esquema de explotación de la Terminal así lo requiriera. El límite Norte de la Terminal está formado por un elemento de abrigo en talud que permita el control de la reflexión y la agitación en la bocana. La frontera Sur de la Terminal lo forma el actual Muelle N° 5. De esta manera se crea una superficie de tierra de aproximadamente 38 Ha, con una anchura media de 425 m y una longitud de atraque de 1065 con posibilidades de ampliarla a 1780 m, si se incluye el muelle interior.

La ubicación de la Terminal de Contenedores propuesta ocupa parte de las instalaciones de la Estación de Limpieza y Desgasificación (Planta DELTA), actualmente en desuso.

Esta configuración en planta se resume en las siguientes cifras:

Longitud obras de abrigo [m]	415
Superficie de agua abrigada [Ha]	-
Superficie de tierra [Ha]	38
Anchura media superficie tierra [m]	425
Longitud línea de atraque [m]	1065

A continuación se analizan algunos aspectos importantes a tener en cuenta en esta alternativa: (1) Rutas de acceso y maniobra de buques; (2) Agitación en las líneas de atraque; (3) Líneas de muelle y calados; (4) Superficie de tierra; (5) Longitud de obras de abrigo; (6) Dragados, (7) Interferencia con otras obras, (8) Accesibilidad desde tierra a la Terminal y (9) Evaluación económica aproximada.

3.2.1. *Rutas de acceso y maniobras náuticas*

El acceso a las líneas de atraque consideradas se realiza por el canal de navegación existente. Las maniobras de reviro con ayuda de remolcadores se realizarían en el exterior de la dársena comercial para los buques que atraquen en el muelle exterior, mientras que para los buques que atracaran en el muelle interior podrían realizarse en el interior.



3.2.2. Agitación en líneas de atraque

La ubicación de la Terminal de Contenedores propuesta, adosada al actual dique de Levante, hace que las líneas de atraque queden abrigadas frente a los oleajes de mayor contenido energético procedentes del sector W debido al abrigo proporcionado por el dique Mar de Leva, el dique San Felipe y el elemento de abrigo frontal de la alternativa propuesta, sin necesidad de obras de abrigo adicionales. El oleaje tipo “Sea” local no representa ningún problema para el tipo de buques considerados debido a las longitudes del fetch en la zona del proyecto.

3.2.3. Líneas de muelle y calados

La solución planteada introduce 1065 m de línea de muelle directamente adosada a la superficie destinada al almacenamiento de contenedores, con la posibilidad de ampliarlo a 1780 si se incluye una línea de atraque interior de 715 m de longitud.

El calado mínimo necesario para el muelle exterior debe ser de 15 m, mientras que para el interior sería suficiente con 13 m. Los calados existentes en las zonas donde se ubicarían las líneas de atraque rondan los 10 m, lo que implica que los dragados a realizar para alcanzar los calados de proyecto no serían importantes.

3.2.4. Longitud de obras exteriores

En esta alternativa no se consideran obras exteriores propiamente dichas, ya que se usan las obras existentes para proporcionar abrigo a las nuevas líneas de atraque. Sin embargo, la frontera Norte de la Terminal de Contenedores propuesta podría considerarse como una obra de abrigo. Ésta debe tener una tipología tal que permita controlar la reflexión y minimizar la agitación en la bocana de la dársena comercial.

3.2.5. Dragados

Teniendo en cuenta las características de la alternativa de proyecto a analizar, se distinguen dos obras de dragado principales:

- Dragados en la línea de atraque para alcanzar los calados de proyecto. Los calados impuestos por los buques tipo considerados implican la necesidad de realizar dragados en la nueva línea de atraque a la cota -15 m.
- Material de relleno para la explanada de almacenamiento. Teniendo en cuenta que la profundidad media del área de ubicación de la explanada son 9 m, estaría coronada a la +7 m con respecto a la BMVE y la superficie de nueva creación sería de unas 30 Ha (38 Ha totales menos 8 Ha correspondientes a la superficie terrestre de la planta DELTA), el orden de magnitud del volumen de relleno a necesitar sería de tres millones seiscientos



mil m³. Para la obtención de este volumen de material de relleno se plantea la alternativa del transporte terrestre y del dragado.

- Transporte terrestre. Desde un punto de vista económico y ambiental la alternativa de transporte terrestre presenta importantes inconvenientes debido a la disponibilidad de este volumen de material y al itinerario urbano que tendría que seguir el transporte incrementando el riesgo de accidentes, ruido, vibraciones, emisión de polvo e interferencias con el tráfico.
- Dragado. Se plantea la posibilidad de realizar un dragado para obtener el material necesario para el relleno contemplado. Una posible zona de dragado sería la zona del canal de navegación y el Estrecho de Puntales. Esta operación presenta las siguientes ventajas:
 - Mejora sustancial de la seguridad en la navegación de los buques al incrementar el calado y anchura del canal de navegación.
 - Mejora de las condiciones de circulación marina aumentando la capacidad de intercambio de agua en la Bahía.
 - Desde el punto de vista de la construcción de la obra, aportaría el material de relleno necesario.

3.2.6. Interferencia con otras obras

Esta alternativa propone la ubicación de la futura Terminal de Contenedores adosada al dique de Levante sin invadir los límites del canal de navegación actual, por lo que no hay interferencia entre las obras del nuevo puente sobre la Bahía ni sobre el dragado del canal de acceso a los astilleros de Puerto Real.

3.2.7. Accesibilidad de la terminal desde tierra

Debido a que esta alternativa plantea la construcción de la futura Terminal adosada al actual dique de Levante de la dársena comercial del Puerto de Cádiz, la capacidad y calidad de la accesibilidad a la nueva terminal sería similar a la actual, aunque se supone mejorará cuando esté finalizado el nuevo puente sobre la Bahía de Cádiz.

3.2.8. Valoración económica aproximada

En este apartado se incluye una primera valoración económica aproximada de las obras descritas. Los precios usados deben considerarse como aproximados con el objetivo de establecer un marco de comparación entre las alternativas analizadas, susceptible de variar en función de estudios posteriores de mayor detalle.



Concepto	Precio Unitario [€]	Medición	Importe [€]
Longitud de obra de abrigo [m]	50000	415	20750000
Longitud de muelle [m]	30000	1065	31950000
Relleno explanada procedente de dragado [m ³]	6	3600000	21600000
Superestructura: Pavimento, urbanización y edificios [m ²]	80	380000	30400000
Inversión Total			104700000 €

La inversión total a realizar sin tener en cuenta IVA, beneficio industrial ni gastos generales ascendería a ciento cuatro millones setecientos mil euros.

En esta primera valoración no se incluyen las partidas derivadas de la construcción del muelle interior y de un posible paso elevado de acceso a la Terminal.

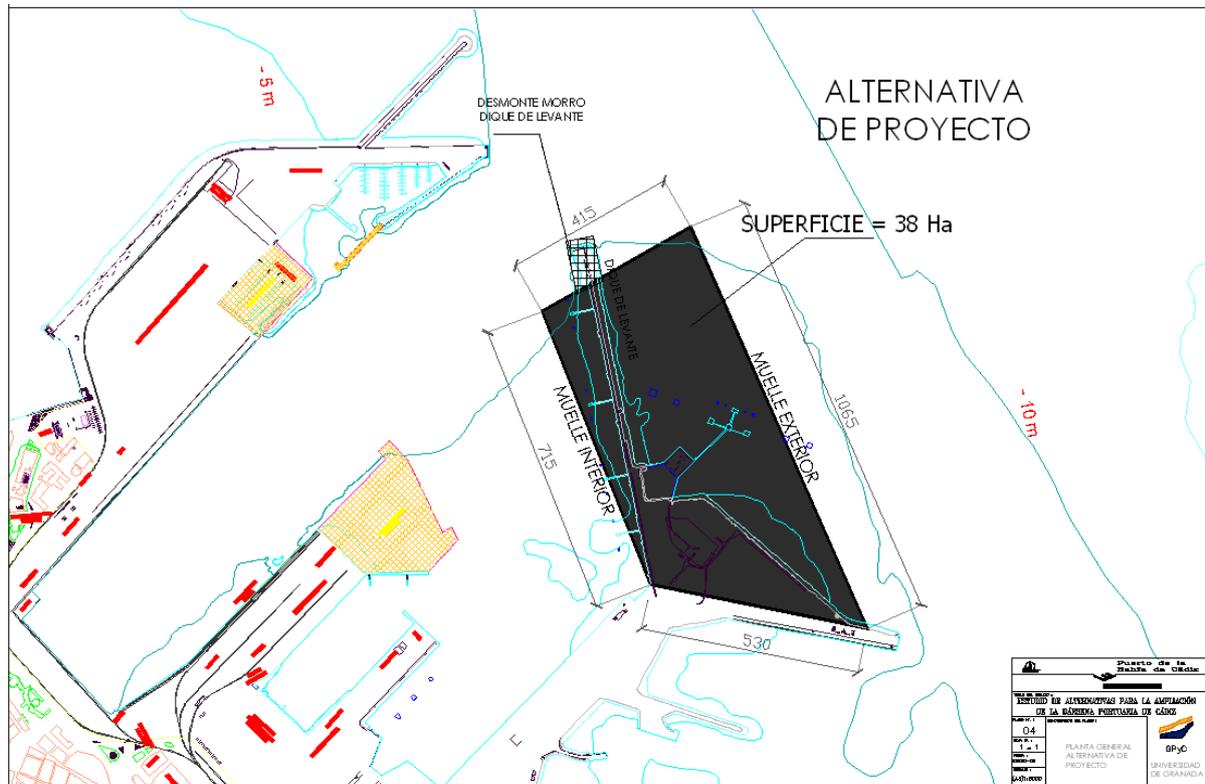
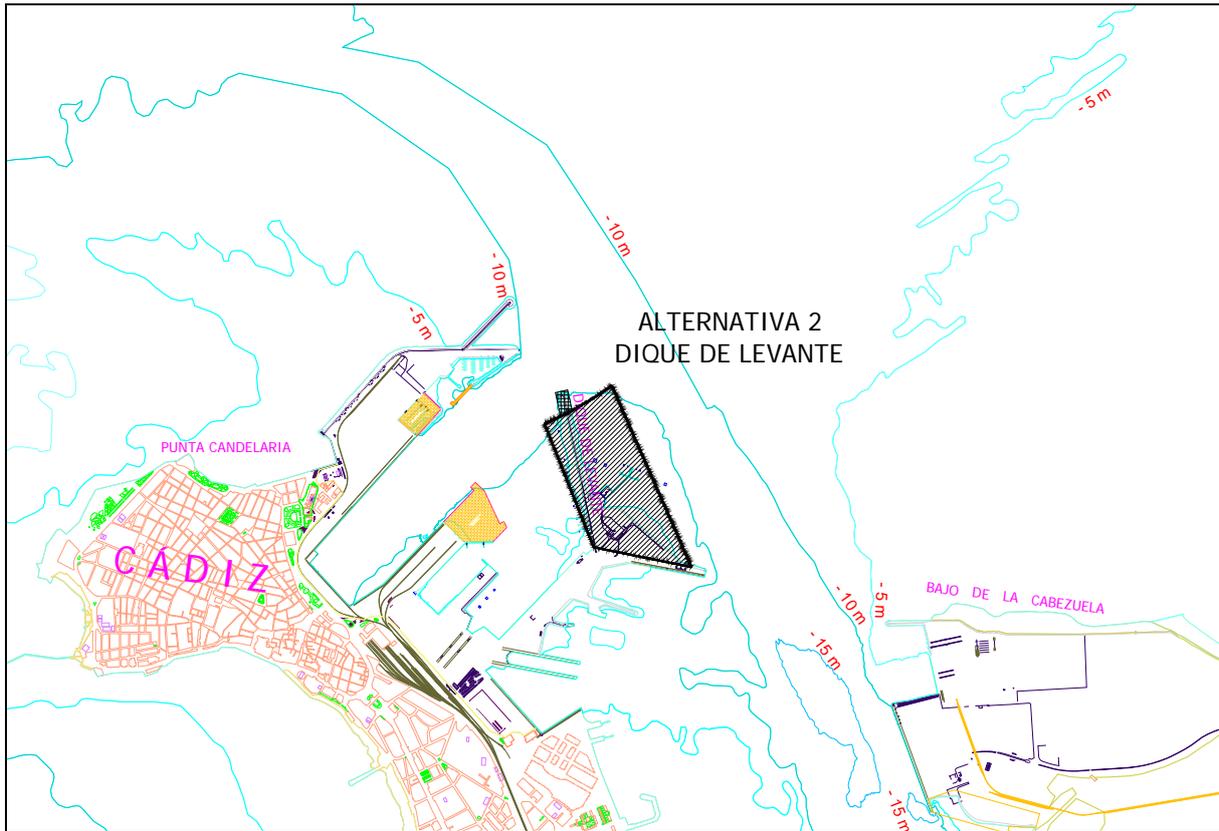


Figura 7: Ubicación y geometría de la Alternativa 2.



3.3. Alternativa 3: Cabezuela Oeste

Esta alternativa consiste en la creación de una explanada al Oeste del Bajo de la Cabezuela, adosada a la frontera Norte de la Factoría de Dragados Off-Shore. Estaría compuesta por un muelle de 800 m de longitud, de orientación aproximadamente Norte, resultando una superficie de explanada de unas 40 Has y una anchura media de 500 m. El perímetro de la superficie de tierra quedaría cerrado en sus fronteras Este y Norte por motas de cierre perimetral de 830 y 530 m de longitud, respectivamente.

Esta configuración en planta se resume en las siguientes cifras:

Longitud obras de abrigo [m]	-
Longitud mota de cierre [m]	1360
Superficie de agua abrigada [Ha]	-
Superficie de tierra [Ha]	40
Anchura media superficie tierra [m]	500
Longitud línea de atraque [m]	800

A continuación se analizan algunos aspectos importantes a tener en cuenta en esta alternativa: (1) Rutas de acceso y maniobra de buques; (2) Agitación en las líneas de atraque (3) Líneas de muelle y calados; (4) Superficie de tierra; (5) Longitud de obras de abrigo; (6) Dragados, (7) Interferencia con otras obras, (8) Accesibilidad desde tierra a la Terminal, y (9) Valoración económica aproximada.

3.3.1. *Rutas de acceso y maniobras náuticas*

La disposición en planta de esta alternativa no presenta dificultades desde el punto de vista de acceso y maniobras náuticas. El acceso se realiza por el canal de navegación existente realizando la aproximación a los muelles por el NW de igual manera que se realiza en la actualidad para acceder a los muelles de La Cabezuela.

3.3.2. *Agitación en líneas de atraque*

La ubicación de la Terminal de Contenedores propuesta, al Oeste del Bajo de La Cabezuela, hace que las líneas de atraque queden parcialmente abrigadas frente a los oleajes de mayor contenido energético procedentes del sector W, debido al abrigo proporcionado por la dársena comercial. Sin embargo, el nivel de protección es menor que la Alternativa 2 y sería necesario estudiar con mayor detalle la agitación en las líneas de atraque propuestas. Esto podría representar una disminución en la operatividad de la instalación.



3.3.3. Líneas de muelle y calados

La solución planteada introduce 800 m de línea de muelle directamente adosada a la futura Terminal de Contenedores en un muelle de orientación Norte de 800 m de longitud.

El calado necesario para los buques considerados sería de 15 m y el fondo en la zona propuesta para la futura Terminal se encuentra aproximadamente a la -5 m. Esto implica que se deberían realizar dragados en la línea de atraque para alcanzar los calados de proyecto.

3.3.4. Longitud de obras exteriores

En esta alternativa no se consideran obras exteriores propiamente dichas, ya que se usan las obras existentes para proporcionar abrigo a las nuevas líneas de atraque. Por el contrario se hace necesario el cierre de las fronteras Norte y Este con una mota perimetral.

3.3.5. Dragados

Teniendo en cuenta las características de la alternativa de proyecto a analizar, se distinguen dos tipos de dragado principales:

- Dragados en la línea de atraque para alcanzar los calados de proyecto. Los calados impuestos por los buques tipo considerados implican la necesidad de realizar dragados en la nueva línea de atraque a la cota -15 m. En la actualidad, el área destinada al muelle tiene unos calados de aproximadamente 5 m, por lo que los dragados para alcanzar los calados necesarios serían algo mayores que para la alternativa 2.
- Material de relleno para la explanada de almacenamiento. Teniendo en cuenta que la profundidad media del área de ubicación de la explanada son 5 m y la superficie de nueva creación sería de unas 40 Ha, el orden de magnitud del volumen de relleno a necesitar sería de 4 millones de m³. Para la obtención de este volumen de material de relleno se plantea la alternativa del transporte terrestre y del dragado.
 - Transporte terrestre. Desde un punto de vista económico y ambiental la alternativa de transporte terrestre presenta importantes inconvenientes debido a la disponibilidad de este volumen de material y al itinerario urbano que tendría que seguir el transporte incrementando el riesgo de accidentes, ruido, vibraciones, emisión de polvo e interferencias con el tráfico.
 - Dragado. Se plantea la posibilidad de realizar un dragado para obtener el material necesario para el relleno contemplado. Una posible zona de dragado sería la zona del canal de navegación y el Estrecho de Puntales. Esta operación presenta las siguientes ventajas:



- Mejora sustancial de la seguridad en la navegación de los buques al incrementar el calado y anchura del canal de navegación.
- Mejora de las condiciones de circulación marina aumentando la capacidad de intercambio de agua entre la Bahía Interna y la Externa.
- Desde el punto de vista de la construcción de la obra, aportaría el material de relleno necesario.

3.3.6. Interferencia con otras obras

Esta alternativa propone la ubicación de la futura Terminal de Contenedores adosada al extremo Norte del la factoría de Dragados Offshore sin invadir los límites del canal de navegación actual, por lo que no hay interferencia entre las obras del nuevo puente sobre la Bahía ni sobre el dragado del canal de acceso a los astilleros de Puerto Real.

3.3.7. Accesibilidad de la terminal desde tierra

Esta alternativa plantea la ubicación de la Terminal en el bajo de la Cabezuela, evitando de esta manera el paso de las mercancías por el viario urbano de la ciudad de Cádiz y mejorando su accesibilidad terrestre. Sin embargo, debido a la ubicación de la factoría de Dragados Offshore, sería necesario ejecutar un enlace viario paralelo, adosado a la frontera Norte de la concesión de Dragados Offshore.

3.3.8. Valoración económica aproximada

En este apartado se incluye una primera valoración económica aproximada de las obras descritas. Los precios usados deben considerarse como aproximados con el objetivo de establecer un marco de comparación entre las alternativas analizadas.



Concepto	Precio Unitario [€]	Medición	Importe [€]
Longitud de obra de abrigo exterior [m]	50000	-	-
Longitud mota de cierre perimetral [m]	20000	1360	27200000
Longitud de muelle [m]	30000	800	24000000
Relleno explanada procedente de dragado [m ³]	6	4000000	24000000
Superestructura: Pavimento, urbanización y edificios [m ²]	80	400000	32000000
Inversión Total		107200000 €	

La inversión total a realizar sin tener en cuenta IVA, beneficio industrial ni gastos generales ascendería a ciento siete millones doscientos mil euros.

En esta valoración no se ha incluido la partida derivada del acceso a la Terminal.

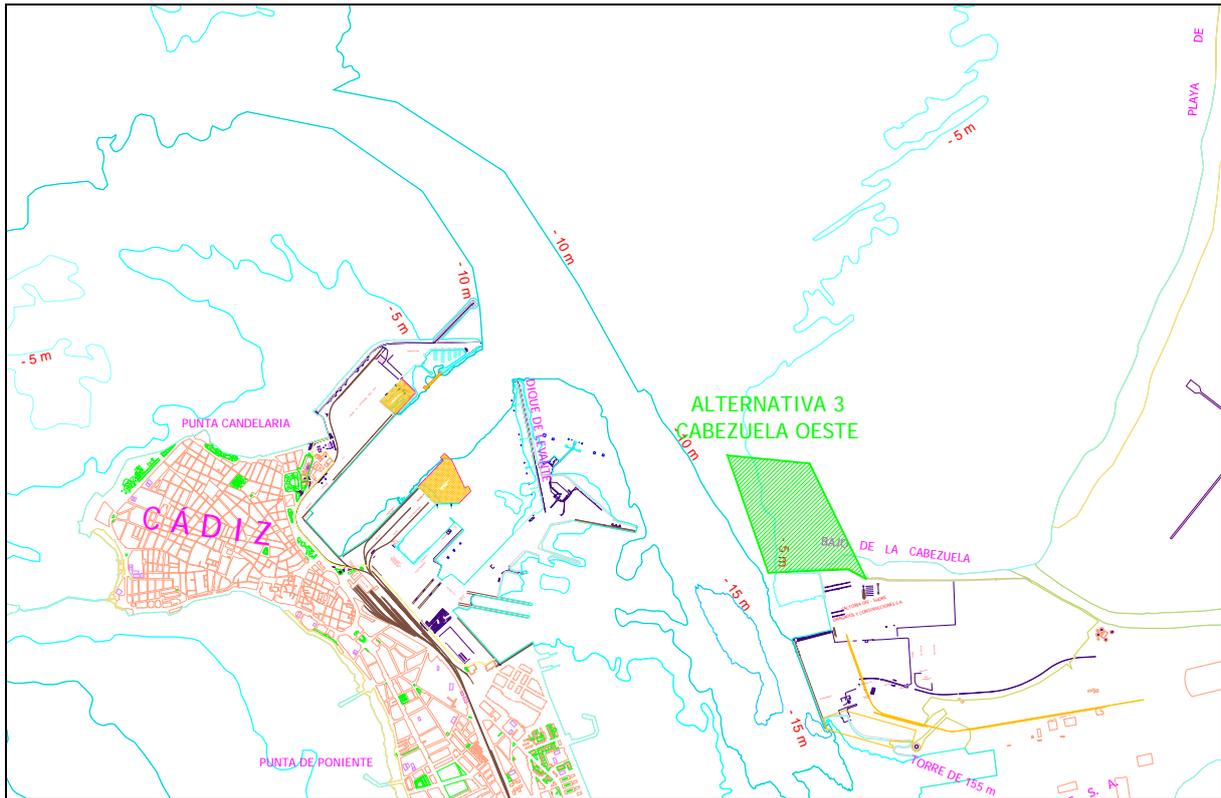


Figura 8: Ubicación y geometría de la Alternativa 3.



3.4. Comentarios generales a las alternativas propuestas

Para llevar a cabo el estudio de la disposición en planta de la futura Terminal de Contenedores de la Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz se han planteado tres alternativas con características técnicas similares resultantes de las necesidades a medio y largo plazo planteadas por la APBC. Antes de realizar una valoración y comparación multicriterio se puede decir que:

- Todas las alternativas consideradas proporcionan longitud de línea de atraque, superficie de almacenamiento y calados suficientes para solventar las necesidades planteadas.
- El principal factor diferenciador entre todas las alternativas es la ubicación, y de ésta derivan las diferencias más importantes.
- Ninguna de las alternativas analizadas presenta problemas desde el punto de vista de las rutas de navegación y maniobras náuticas.
- La alternativa 1 es la única que requiere de una obra de abrigo importante, localizándose las demás en aguas semi-abrigadas, siendo la alternativa 2 la que presenta mejores condiciones de agitación.
- Las diferencias en la valoración económica se deben fundamentalmente a la necesidad de obras de abrigo, siendo este el motivo de la gran diferencia entre la alternativa 1 y las dos restantes. El presupuesto de las alternativas 2 y 3 es similar y del orden de 100 millones de euros.
- Debido a condicionantes geográficos, la incorporación de superficie emergida debe ser generada ganando terrenos al mar. Como consecuencia, las tres alternativas requieren un volumen importante de material de relleno para formar la explanada. Este volumen está entre 3 y 4 millones de m³, siendo la que menor volumen de relleno necesita la alternativa 2.
- Las posibilidades de ampliación futura de la Terminal son técnicamente inviables para la alternativa 1, por requerir una obra de abrigo adicional exterior, mientras que las alternativas 2 y 3 permiten ampliar la longitud de la línea de atraque con un muelle en el interior de la dársena, en el caso de la alternativa 2, y la construcción de un muelle en la frontera Norte de la explanada, para la alternativa 3.
- Desde el punto de vista de accesibilidad terrestre la alternativa 3 presenta mejores características que las demás, siendo el principal inconveniente de las alternativas 1 y 2 la necesidad de penetrar en el viario urbano de Cádiz. Aunque se supone que el nuevo puente sobre la Bahía mejorará la accesibilidad de la dársena comercial de Cádiz, en cuanto a este aspecto se refiere, la ubicación de la Cabezuela presenta mayores ventajas.



- No se encuentran interferencias importantes entre el desarrollo de las dos grandes obras consideradas en la zona de actuación y las tres alternativas de proyecto descritas. Del mismo modo no existen interferencias importantes con la actividad portuaria actual.
- La alternativa 2 presenta la ventaja de la reutilización de una superficie industrial degradada y en desuso (Planta DELTA), y su reconversión en una zona de actividad portuaria de tráfico “limpio”, como son los contenedores.

3.5. Evaluación técnica de las alternativas propuestas

En esta sección se realiza un análisis de viabilidad técnica de las distintas alternativas contempladas. En primer lugar, se han establecido los criterios de comparación que permitan analizar las ventajas e inconvenientes de las distintas soluciones posibles.

3.5.1. Caracterización de las alternativas

Para el análisis de las diferentes alternativas se tiene en cuenta una serie de aspectos relacionados con la geometría y ubicación de los distintos elementos que las definen, así como su influencia en las rutas de aproximación y maniobras interiores de los buques de proyecto. Tales criterios se enumeran a continuación:

1. Rutas de acceso y maniobras náuticas.
2. Longitud de las obras de abrigo.
3. Longitud línea de atraque.
4. Agitación en las líneas de atraque.
5. Interferencia durante la ejecución de la obra con el puerto actual.
6. Interferencia con otras obras.
7. Accesibilidad de la Terminal desde tierra.
8. Posibilidades de ampliación.
9. Valoración económica aproximada.

3.5.2. Comparación técnica entre alternativas mediante análisis multicriterio

Teniendo en cuenta los criterios funcionales y operativos enumerados en el punto anterior, se va a realizar una comparación entre las alternativas analizadas, confiriendo a cada uno un valor (entre 1 y 5, a mayor capacidad determinante más valor) según su importancia para el proyecto, ejecución y explotación de cada una de las alternativas. Para cada uno de los criterios se asigna una magnitud (de 1 a 10) en orden creciente según su adecuación. La importancia y la magnitud para cada elemento y alternativa se multiplican entre sí, sumándose entre sí los productos



correspondientes a cada alternativa. Aquella alternativa que obtenga mayor puntuación será la alternativa más favorable desde un punto de vista técnico.

Criterio	Importancia	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
Rutas de acceso y maniobras náuticas	3	8	24	7	21	7	21
Longitud de las obras de abrigo	4	5	20	9	36	7	28
Longitud línea de atraque	4	5	20	9	36	5	20
Agitación en las líneas de atraque	4	8	32	8	32	7	28
Interferencia con el puerto actual	2	8	16	7	14	8	16
Interferencia con otras obras	2	9	18	8	16	8	16
Accesibilidad terrestre de la Terminal	4	6	24	6	24	9	36
Posibilidades de ampliación	3	6	18	7	21	7	21
Valoración económica	5	5	25	7	35	7	35
Valoración Total		197		235		221	

La tabla anterior recoge la valoración realizada donde se observa que la Alternativa 1 obtiene la mínima puntuación, fundamentalmente por la diferencia entre la valoración económica de ésta con las demás, y las alternativas 2 y 3 son similares desde un punto de vista técnico.

ANEXO II

ESTUDIOS PREVIOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA ALTERNATIVA DEL PROYECTO.



ÍNDICE

1.OPTIMIZACIÓN FUNCIONAL EN PLANTA.....	3
1.1. Introducción	3
1.2. Planteamiento del proceso de optimización	3
1.3. Metodología de trabajo.....	4
1.4. Descripción de la geometría en planta	8
1.5. Análisis de agitación frente a onda corta	10
1.6. Análisis de agitación frente a onda larga.....	22
1.7. Análisis de la acción del viento sobre el buque atracado.....	29
1.8. Conclusiones.....	34



1. OPTIMIZACIÓN FUNCIONAL EN PLANTA

1.1. Introducción

En este anejo se realiza una optimización de la forma en planta de la nueva Terminal de Contenedores frente a la operatividad de los muelles, caracterizada por los niveles de agitación frente a onda corta y onda larga y la acción del viento sobre el buque atracado. Para la realización del proceso de optimización en planta se van a comparar tres prediseños de la planta de la futura Terminal de Contenedores entre sí, y con la situación actual desde el punto de vista de la operatividad. En realidad la operatividad se define a través de los modos de parada operativa, y en concreto se cuantifica a través de la probabilidad de excedencia sobre umbral y duración del ciclo de solicitud de los movimientos del buque en las zonas de atraque. Sin embargo, para optimizar el diseño en planta se va a tomar como criterio de comparación el nivel de agitación frente a onda corta y onda larga, así como la acción del viento sobre el buque en las zonas de atraque.

1.2. Planteamiento del proceso de optimización

- **¿Qué se dimensiona?** Partiendo de las restricciones de rango de superficie (35-40 Ha), de anchura (mayor a 300 m) y de longitud de muelle exterior (mayor a 800 m), se dimensiona la planta de la Terminal, es decir:
 - Alineación de los muelles
 - Disposición del elemento de abrigo frontal
 - Anchura de la bocana
- **¿Qué se optimiza?** Máxima operatividad
- **¿Cómo se define?** A través de los modos de parada operativa
- **¿Cómo se cuantifica?** Excedencia sobre umbral y duración del ciclo de solicitud de los movimientos del buque en la zona de atraque.



- **¿Agentes actuantes?** Agentes climáticos atmosféricos y oceanográficos:
 - Nivel del mar
 - Oscilaciones del mar
 - Viento
 - Corrientes
- **Metodología de análisis:**
 - Caracterización estadística de factores de proyecto en ausencia de la obra.
 - Optimización de la anchura de bocana frente a las oscilaciones del mar (onda corta + onda larga), teniendo en cuenta la renovación de aguas en dársena, verificando los niveles de operatividad en los muelles interiores de la dársena comercial de Cádiz y teniendo en cuenta las restricciones operativas impuestas (Superficie, Anchura y Longitud línea de atraque).

1.3. Metodología de trabajo

Para la realización del proceso de optimización en planta se van a comparar tres prediseños de la planta de la futura Terminal de Contenedores entre sí, y con la situación actual desde el punto de vista de la operatividad. En realidad la operatividad se define a través de los modos de parada operativa, y en concreto se cuantifica a través de la probabilidad de excedencia sobre umbral y duración del ciclo de solicitud de los movimientos del buque en las zonas de atraque. Sin embargo, para optimizar el diseño en planta se va a tomar como criterio de comparación el nivel de agitación frente a onda corta y onda larga, así como la acción del viento sobre el buque en las zonas de atraque.

A partir del análisis del clima marítimo se han seleccionado 3 casos representativos de estados de mar correspondientes a la cola superior del régimen medio de oleaje. Los casos seleccionados se presentan en la Tabla 1, donde los valores de H_{mo} corresponden a la probabilidad de no ser superado en el 95% del año medio, condicionados a la probabilidad de presentación del sector direccional del que proceden. En otras palabras, estos valores representan una cota superior de las condiciones medias anuales.



Tabla 1: Estados de mar seleccionados para la optimización en planta.

Caso	Dirección Procedencia	Prob. Presentacn Sector [%]	H_{mo} [m]	T_p [s]	Nivel del Mar [m]
1	WSW	10.45	3.8	13	2.0
2	W	46.71	2.5	13	2.0
3	WNW	19.64	1.6	13	2.0

Una vez seleccionados estos casos representativos, se ha procedido a la propagación del oleaje desde 50 m de profundidad (ubicación del punto WANA analizado) hasta las inmediaciones del puerto. Para ello se ha usado el modelo numérico REF-DIF que resuelve de forma parabólica la ecuación de pendiente suave, tiene en cuenta los fenómenos de refracción, difracción, asomeramiento, rotura y fricción con el fondo, e incorpora términos no lineales. Este modelo se usa para dar las condiciones de contorno a un modelo elíptico que se usará posteriormente. En la Fig. 1 se presenta un esquema de las mallas usadas en el modelo numérico Ref-Dif, donde la resolución en el sentido de avance del oleaje de la malla exterior es de 35 m, mientras que en las mallas anidadas la resolución es de 15 y 11 m respectivamente.

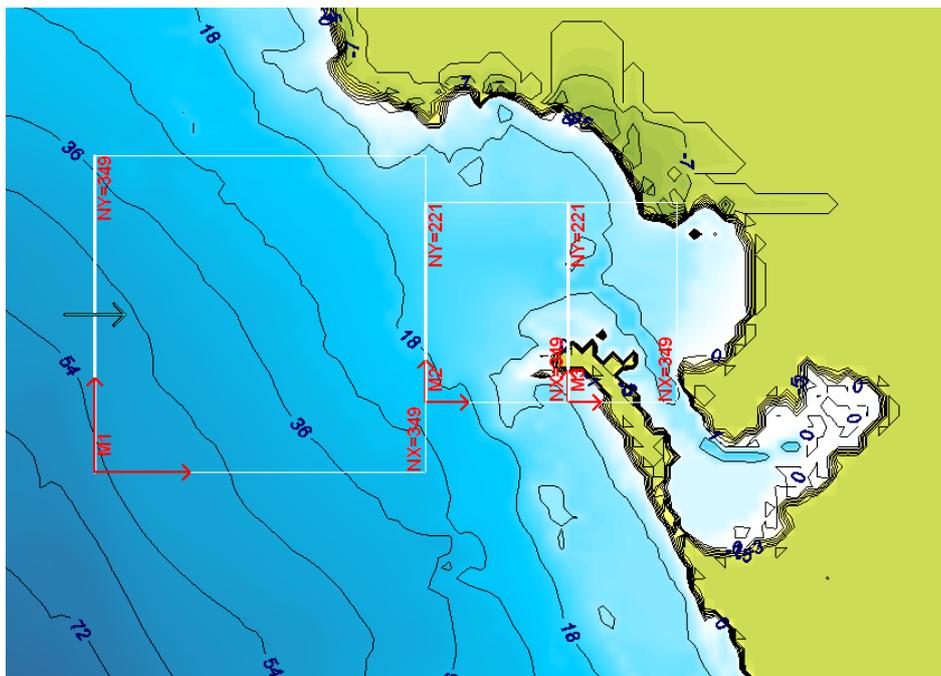


Fig. 1: Esquema de las mallas usadas en el modelo de propagación Ref-Dif.



Una vez propagados los casos seleccionados en la Tabla 1, se extraen los resultados en varios puntos del exterior de la Bahía y se utiliza el modelo numérico elíptico MSP-UGR para determinar los coeficientes de agitación en las zonas de atraque.

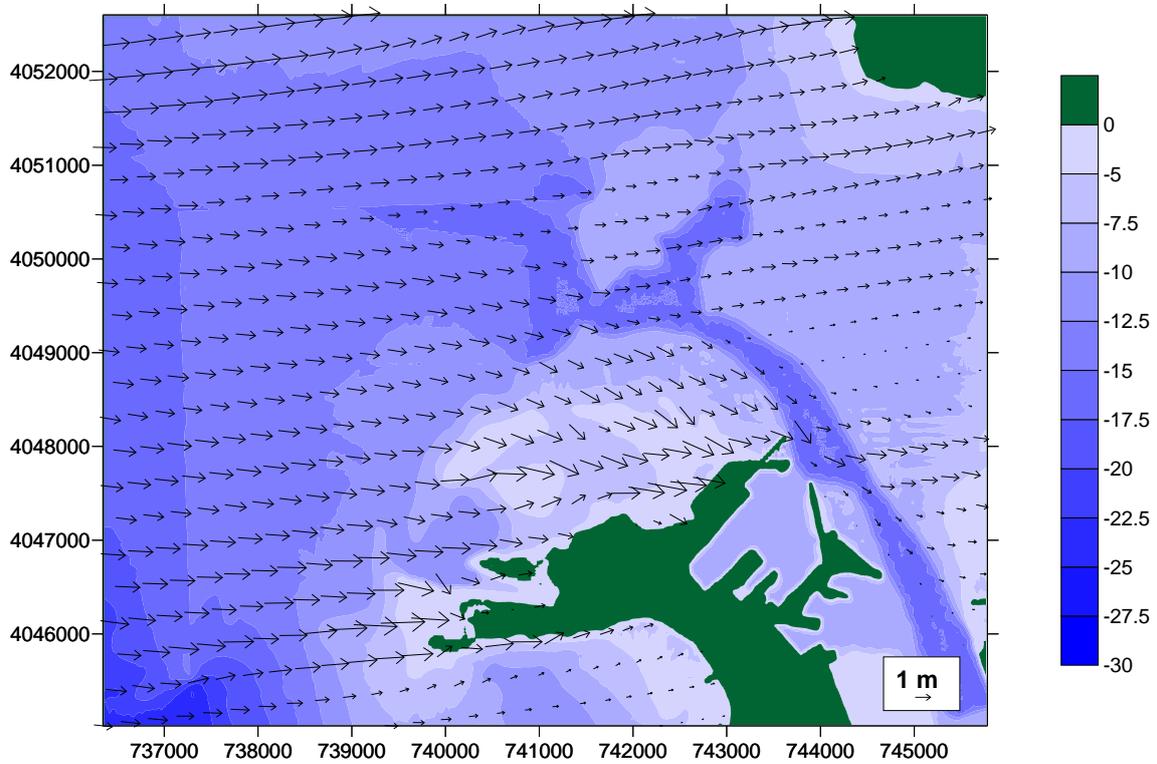


Fig. 2: Gráfico de vectores de altura de ola para dirección WNW, H=1.6 m, T=13s, NM=2 m.

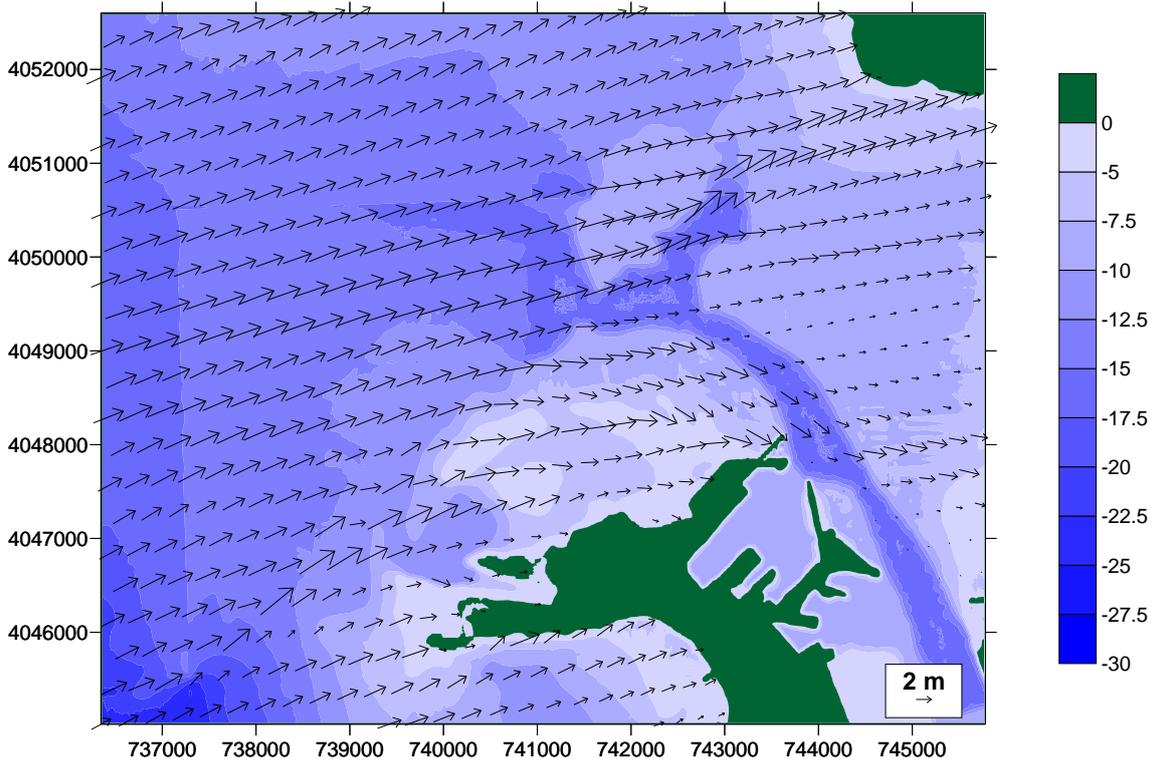


Fig. 3: Gráfico de vectores de altura de ola para dirección WSW, H=3.8 m, T=13s, NM=2 m.

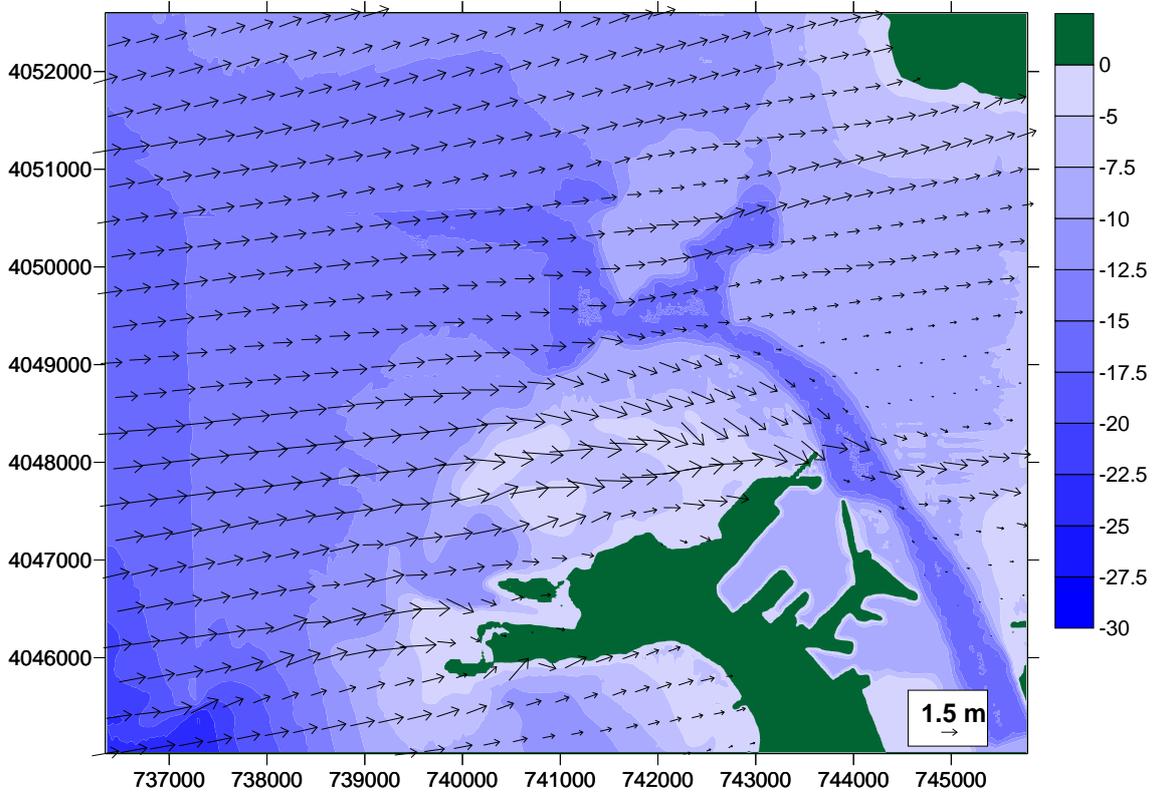


Fig. 4: Gráfico de vectores de altura de ola para dirección W, H=2.5 m, T=13s, NM=2 m.



Una vez analizada la agitación frente a onda corta se procederá a realizar el análisis del comportamiento de las alternativas contempladas frente a oscilaciones de largo periodo y frente a la acción del viento sobre el buque atracado.

1.4. Descripción de la geometría en planta

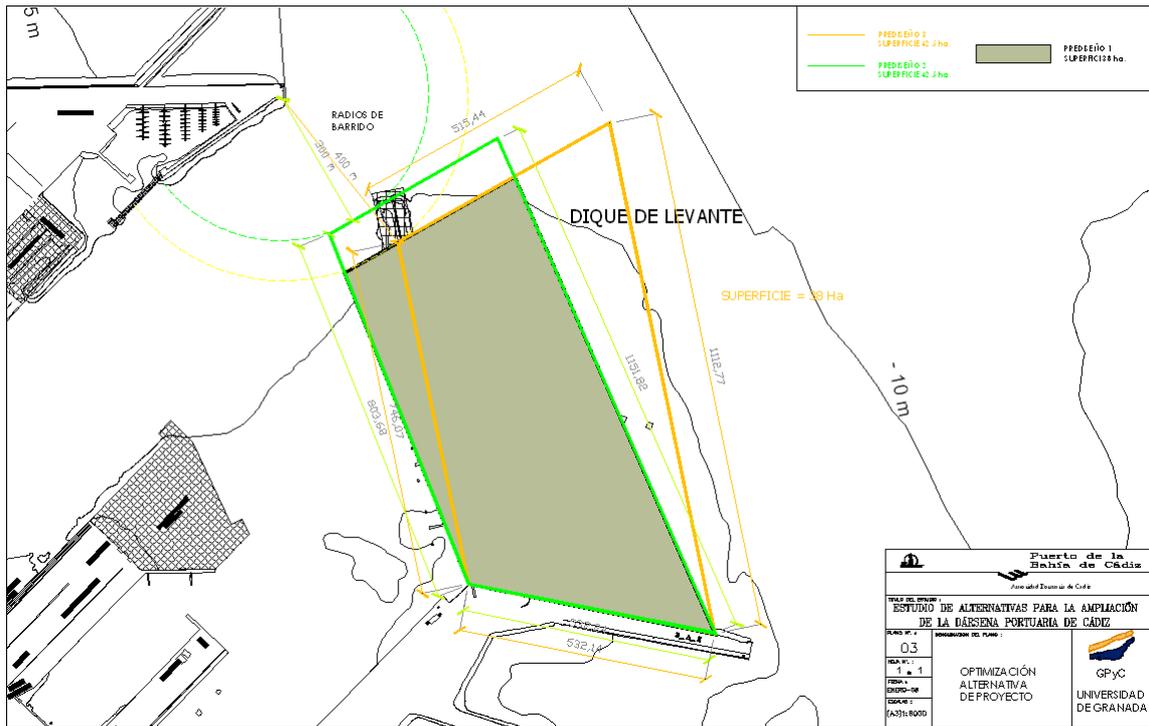
La geometría en planta de la terminal de contenedores queda determinada por las siguientes restricciones:

- Superficie de la terminal: 35-40 Ha
- Anchura de la terminal: mayor a 300 m
- Longitud del muelle exterior: mayor a 800 m
- Anchura de la bocana de acceso a la dársena comercial: mayor a 300 m.
- Frontera Sur de la terminal: Limitada por el Muelle N° 5

Obviamente, existen multitud de soluciones que cumplen estas restricciones, pero en esta fase de estudio se van a analizar tres prediseños distintos:

Obviamente, existen multitud de soluciones que cumplen estas restricciones, pero en esta fase de estudio se han analizado tres prediseños distintos, esquematizados en la Fig. 5:

- **Prediseño 1.** Los muelles exterior e interior son prácticamente paralelos entre sí y están girados 10° hacia el W con respecto a la alineación del dique de Levante actual. El elemento de abrigo frontal (frontera Norte) está retranqueado 100 m con respecto al morro del dique de Levante, aumentando de esta forma la anchura de bocana de 300 a 400 m. Con esta configuración se consigue una superficie de explanada de aproximadamente 38 Ha.
- **Prediseño 2.** Básicamente consiste en la modificación del Prediseño 1 aumentando la longitud de los muelles obteniendo una anchura de bocana de 300 m. De esta manera se consigue una superficie de explanada de aproximadamente 41.5 Ha.
- **Prediseño 3.** Los muelles son paralelos al dique de Levante, y el elemento de abrigo frontal está dispuesto con la misma alineación que en los prediseños 1 y 2. La anchura de bocana de entrada a la dársena comercial para a ser de 400 m y la superficie de explanada obtenida es de 45.5 Ha.





1.5. Análisis de agitación frente a onda corta

El objetivo principal de este apartado es la comparación de las condiciones de agitación frente a onda corta entre los tres prediseños planteados (incluyendo la nueva Terminal de Contenedores) y la situación actual.

Se ha empleado el modelo numérico MSP-UGR con las siguientes características generales:

- Se han considerado 4 configuraciones geométricas: Situación Actual y 3 prediseños.
- El periodo propagado ha sido 13 s.
- Las direcciones de incidencia consideradas han sido: WSW, W y WNW, teniéndose un total de 12 casos.
- Se ha tenido en cuenta un nivel de marea de +2 m. sobre el cero del puerto.
- La batimetría considerada en los análisis de agitación en los prediseños se ha modificado adaptándose a los mismos.

Se muestra a continuación un detalle de la malla de elementos finitos empleada en las propagaciones para uno de los prediseños, así como la batimetría interpolada sobre los nodos de dicha malla.

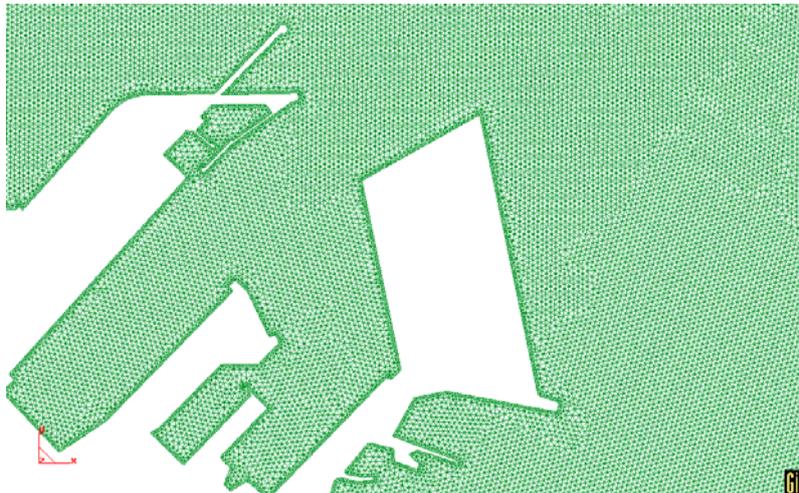


Fig. 6: Detalle de la malla de elementos finitos empleada en la propagación. Prediseño 3.

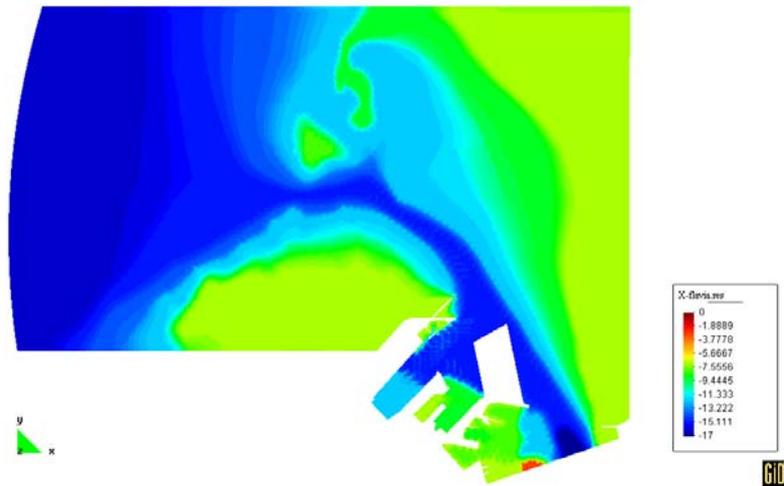


Fig. 7. Batimetría interpolada sobre los nodos de la malla anterior. Prediseño 3

El modelo usado requiere la especificación de las condiciones de contorno en todos los límites del dominio, a través del coeficiente de absorción α , definido como $\alpha = 1 - R$, siendo R = el coeficiente de reflexión. Se han tomado los siguientes valores para el coeficiente de absorción, dependiendo del tipo de contorno:

- Contorno reflejante (estructuras verticales): $\alpha = 0.0$ (Color azul)
- Contorno parcialmente reflejante (diques en talud): $\alpha = 0.6$ (Color verde)
- Contornos artificiales de absorción total (radio de la corona): $\alpha = 1.0$ (Color amarillo)
- Contorno de radiación, donde se genera el oleaje (arco de la corona): (Color magenta)

En las Fig. 8 a Fig. 11 se pueden ver las condiciones impuestas para cada caso de estudio. Se ha considerado que los muelles interior y exterior de la nueva Terminal de Contenedores son completamente reflejantes.

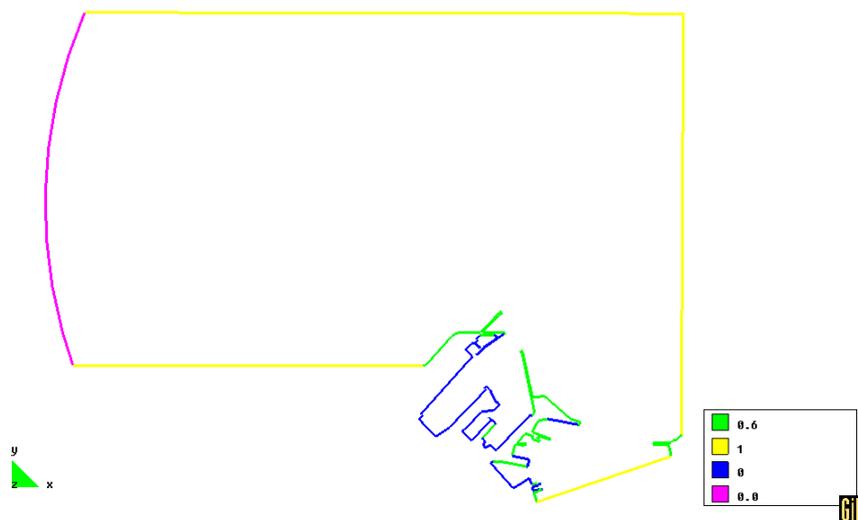


Fig. 8. Condiciones de contorno del modelo. Situación Actual.

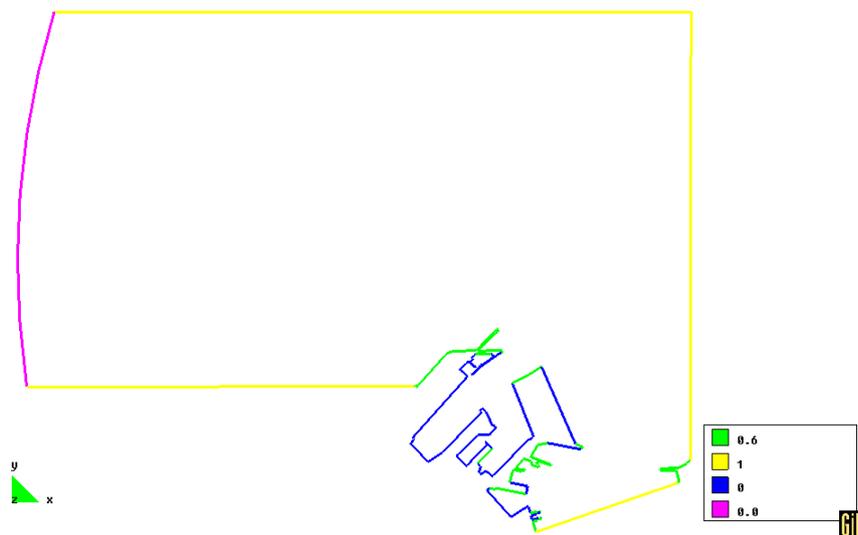


Fig. 9. Condiciones de contorno del modelo. Prediseño 1.

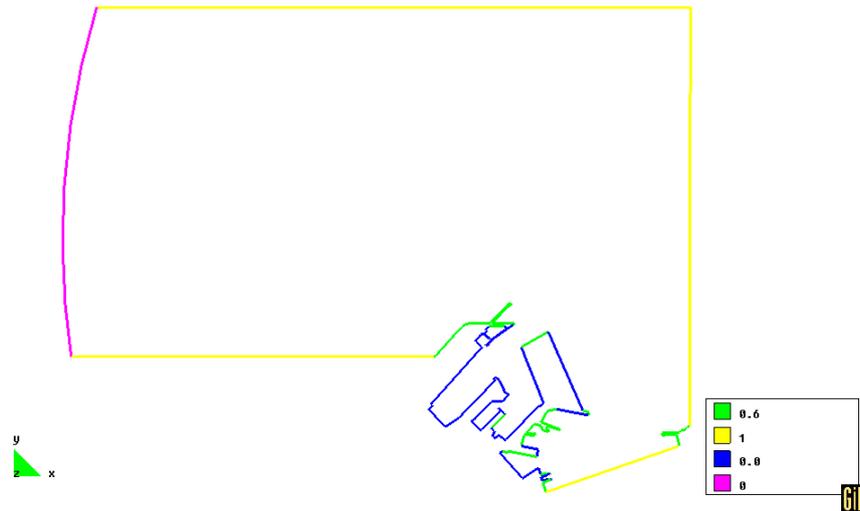


Fig. 10. Condiciones de contorno del modelo. Prediseño 2.

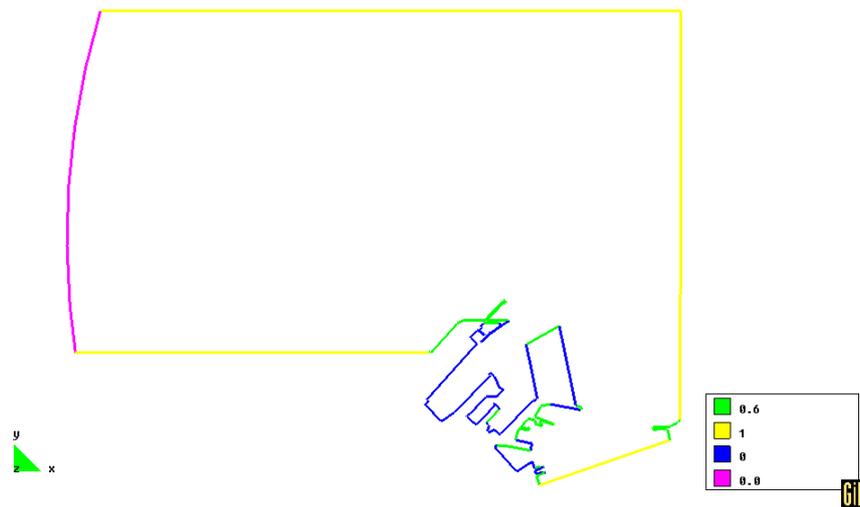


Fig. 11. Condiciones de contorno del modelo. Prediseño 3.

Una de las salidas que proporciona el modelo MSP-UGR es el factor de ampliación en todo el dominio de estudio. Este factor nos informa del valor de la amplitud del oleaje en cada punto en función del oleaje en el contorno exterior.

En las siguientes figuras (Fig. 12 a Fig. 17) se muestran las salidas gráficas de los coeficientes de agitación en la situación actual y en los tres prediseños, según las direcciones del oleaje consideradas, así como un detalle de dichos coeficientes en la zona de ampliación.

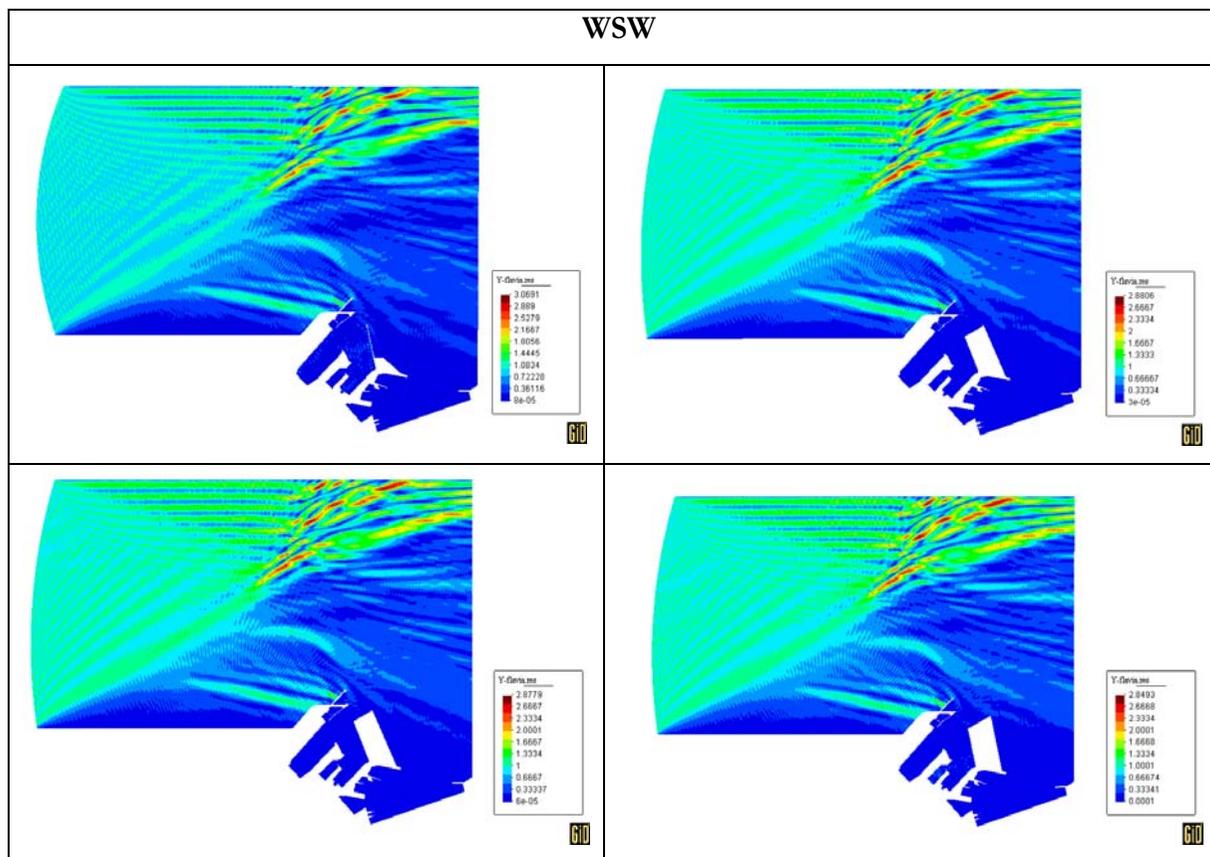


Fig. 12: Coeficiente de agitación en todo el dominio, para oleaje WSW. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Situación actual, Prediseño 1, Prediseño 2 y Prediseño 3.

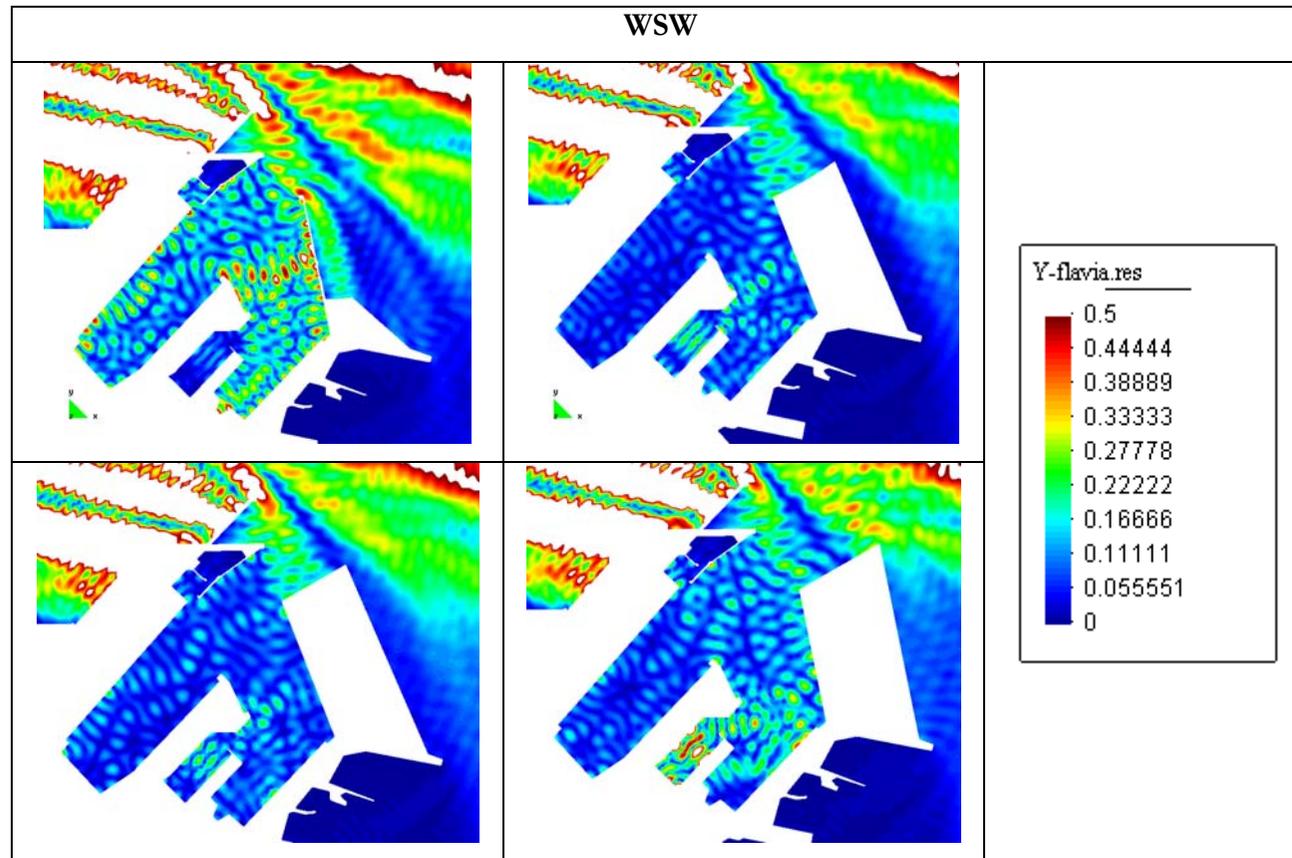


Fig. 13: Detalle de los coeficientes de agitación en la zona de ampliación, para oleaje WSW.

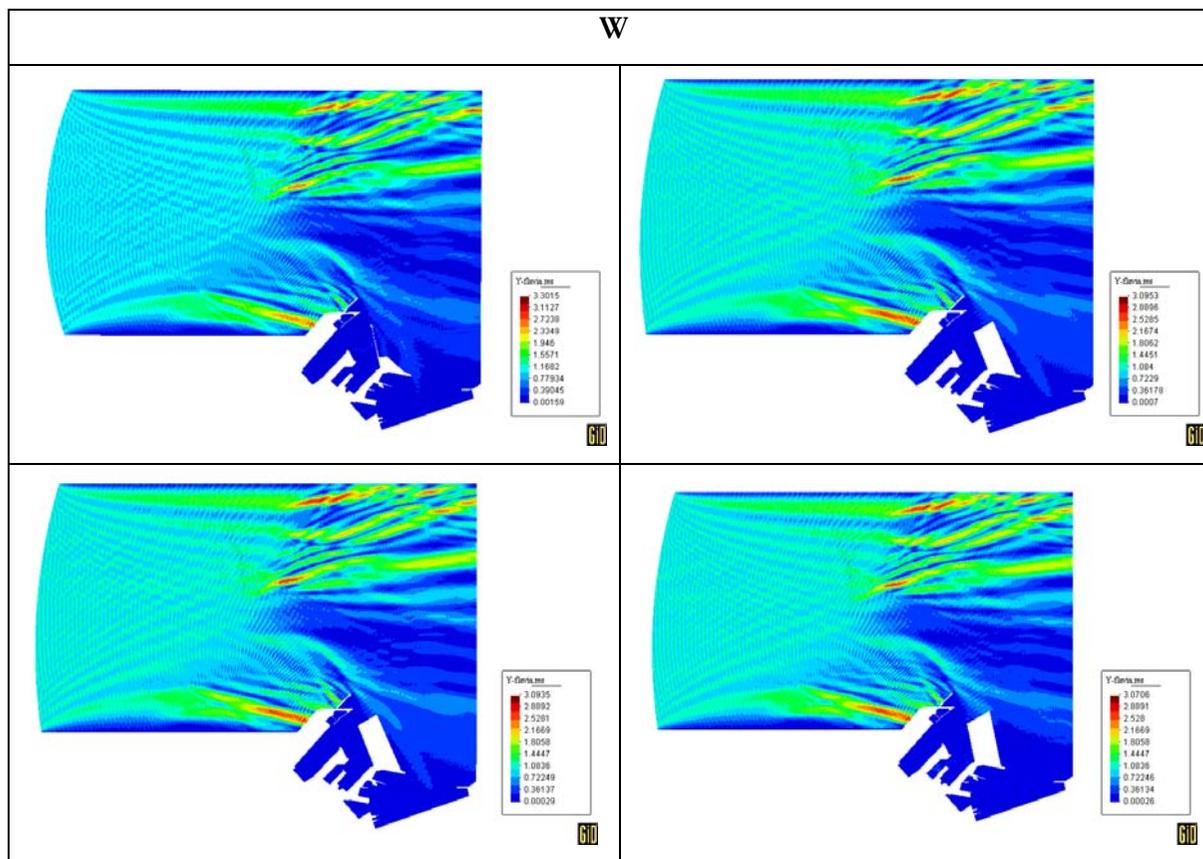


Fig. 14: Coeficiente de agitación en todo el dominio, para oleaje W. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Situación actual, Prediseño 1, Prediseño 2 y Prediseño 3.

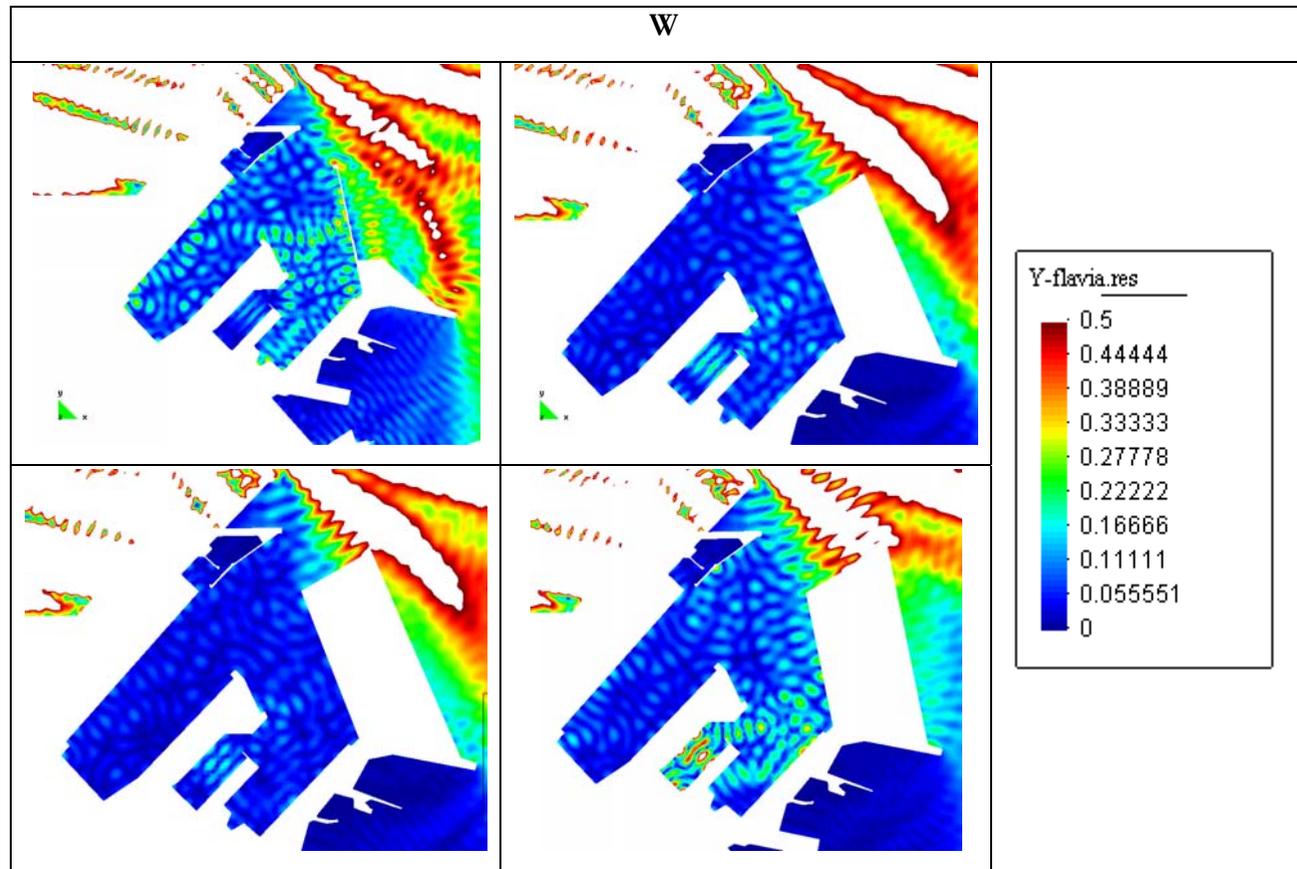


Fig. 15: Detalle de los coeficientes de agitación en la zona de ampliación, para oleaje W.

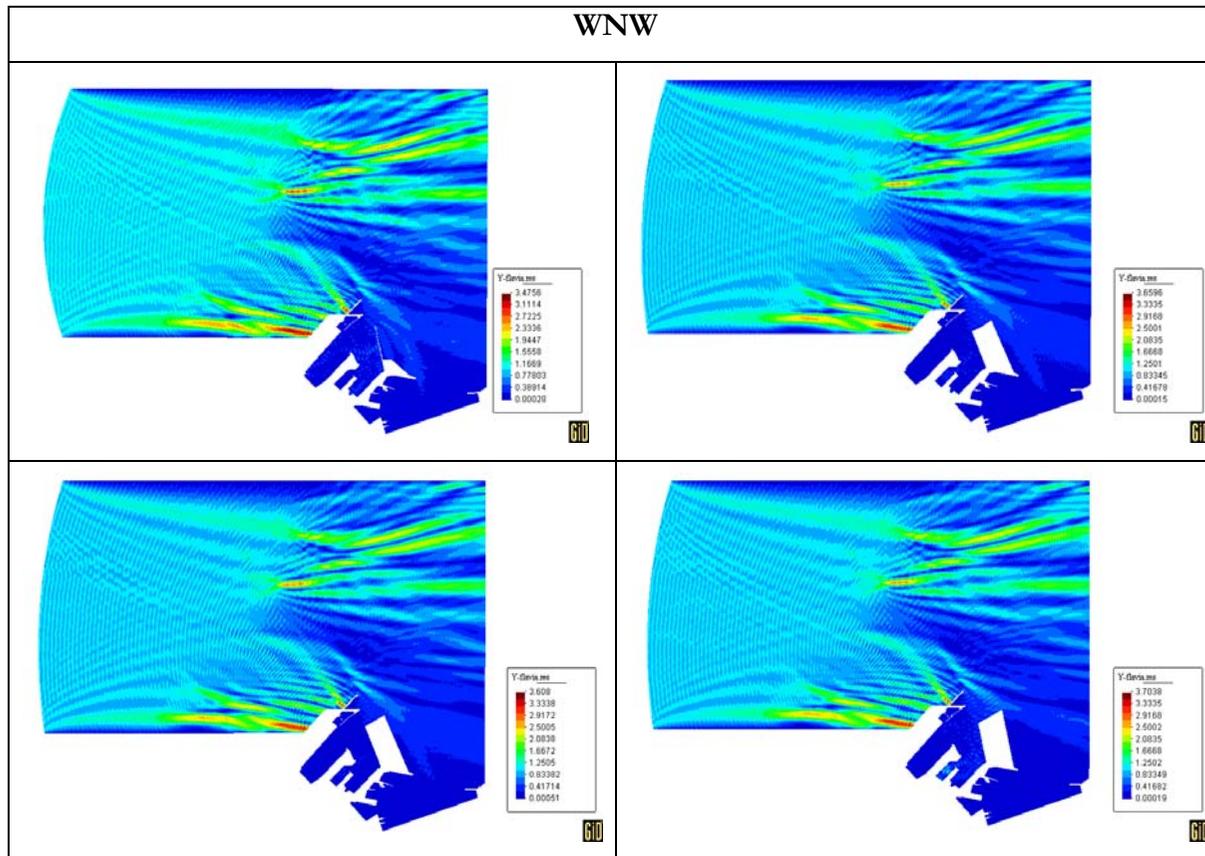


Fig. 16: Coeficiente de agitación en todo el dominio, para oleaje WNW. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Situación actual, Prediseño 1, Prediseño 2 y Prediseño 3.

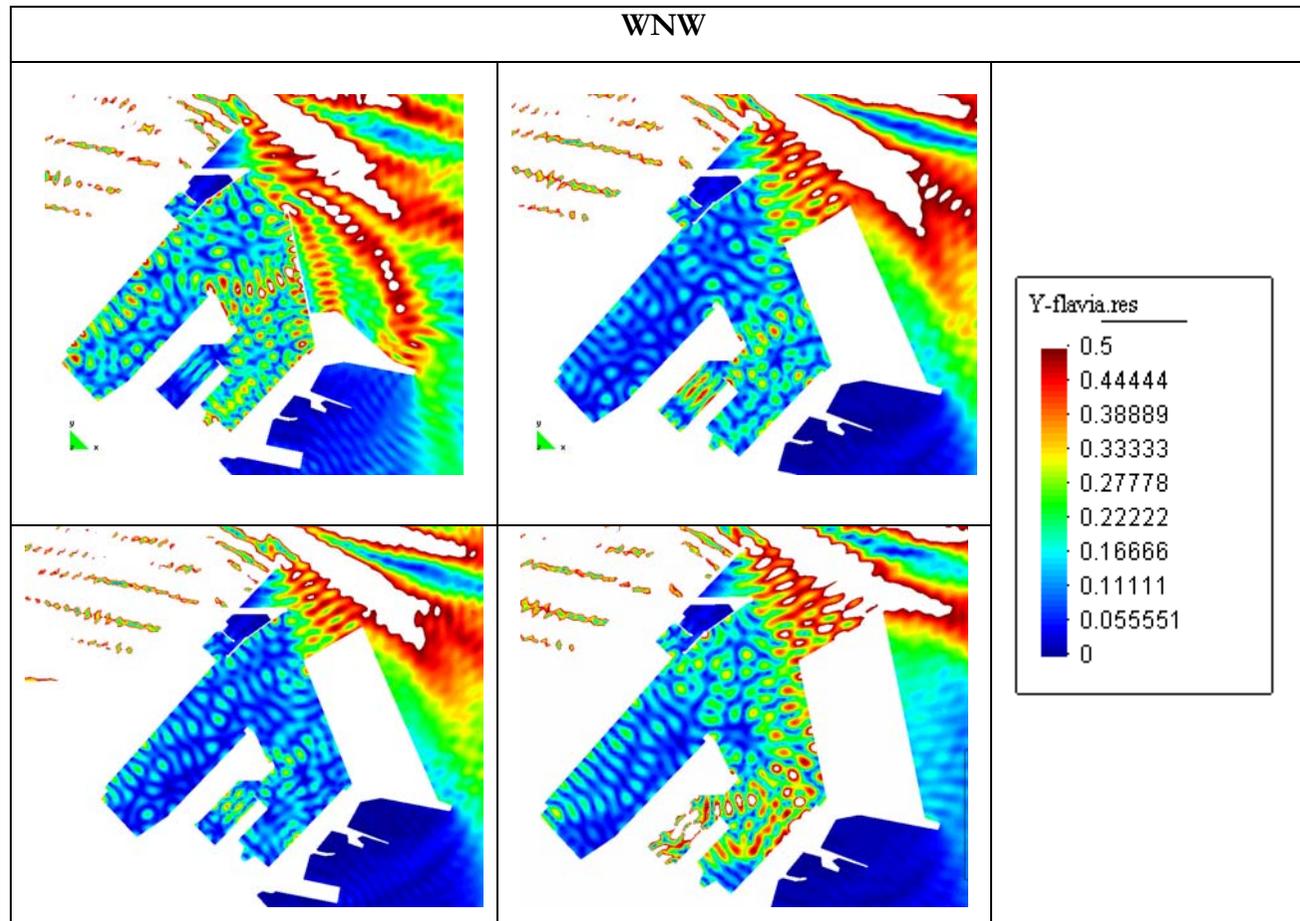


Fig. 17: Detalle de los coeficientes de agitación en la zona de ampliación, para oleaje WNW.



Tras la ejecución del modelo para los 12 casos, se ha extraído el valor del coeficiente de agitación en 18 puntos pertenecientes a 5 zonas diferenciadas, denominadas: Zona 1 (Bocana), Zona 2 (Muelle Reina Sofía), Zona 3 (Terminal Ro-Ro en Marqués de Comillas), Zona 4 (Muelle Interior) y Zona 5 (Muelle Exterior). Las coordenadas exactas de los puntos analizados para el muelle interior y exterior varían en función del prediseño que se trate. Los valores del coeficiente de agitación en estas zonas se obtienen como media del valor calculado en determinados puntos. Las coordenadas UTM de dichos puntos se exponen en las siguientes tablas.

En la Fig. 18 se representa el coeficiente medio de agitación para cada una de las tres direcciones de procedencia del oleaje, de las 5 zonas analizadas y para los 3 prediseños considerados junto con la situación actual. Como tendencia general el coeficiente de agitación no supera 0.5 en cada para cada uno de los casos y zonas analizadas. Al mismo tiempo se puede observar que:

- Los coeficientes de agitación obtenidos para el Prediseño 1 y 2 son muy similares en todas las zonas, lo que implica que su comportamiento frente a onda corta es prácticamente el mismo.
- El coeficiente de agitación para la Zona 4 (Muelle Interior) para los Prediseños 1 y 2 es del orden del 50 % menor que para la situación actual y el Prediseño 3, debidos fundamentalmente al abrigo proporcionado por el elemento de abrigo frontal y el cambio de alineación de 10° hacia el W con respecto a la alineación actual del dique de Levante.
- El coeficiente de agitación en el muelle exterior es aproximadamente igual a 0.2 para los oleajes del W y WNW para los 3 prediseños. Sin embargo, para los oleajes procedentes del WSW el coeficiente de agitación en el muelle exterior es mayor para el prediseño 3 que para los otros 2, provocado por la interacción de la energía radiada en el morro del dique Mar de Leva y el extremo oriental del elemento de abrigo frontal.
- La agitación en la zona 3 (Terminal Ro-Ro en el Muelle Marqués de Comillas) se reduce a menos de un 50% con los prediseños planteados con respecto a la situación actual.
- En definitiva, los prediseños 1 y 2 son los que, a priori, presentan un mejor comportamiento en lo que a la agitación frente a onda corta se refiere en las distintas zonas analizadas del Puerto de Cádiz, aunque las diferencias entre los tres prediseños no son importantes.



Tabla 2: Coordenadas UTM de los puntos de control. Situación Actual.

SITUACIÓN ACTUAL		
X	Y	
743987.6819	4047867.9645	ZONA 1: Bocana
744091.9114	4047753.0051	
743817.6708	4047762.6259	
743921.9003	4047647.6665	
743197.9551	4047377.0886	ZONA 2: M. Reina Sofía
743114.8971	4047283.8413	
743032.3039	4047191.2796	
743507.0704	4047103.3288	ZONA 3: T. Ro-Ro
743560.6038	4047003.5328	
743761.8836	4047385.2008	ZONA 4: Muelle Interior
743828.0128	4047217.7883	
743894.142	4047050.3758	
743960.2711	4046882.9634	
744429.6768	4047646.0925	ZONA 5: Muelle Exterior
744469.9913	4047450.2532	
744510.1289	4047254.3294	
744550.2571	4047058.4519	
744590.3947	4046862.528	

Tabla 3: Coordenadas UTM de los puntos de control. Prediseño 1 y 2.

PREDISEÑO 1 Y 2		
X	Y	
743987.6819	4047867.9645	ZONA 1: Bocana
744091.9114	4047753.0051	
743817.6708	4047762.6259	
743921.9003	4047647.6665	
743197.9551	4047377.0886	ZONA 2: M. Reina Sofía
743114.8971	4047283.8413	
743032.3039	4047191.2796	
743507.0704	4047103.3288	ZONA 3: T. Ro-Ro
743560.6038	4047003.5328	
743761.8836	4047385.2008	ZONA 4: Muelle Interior
743828.0128	4047217.7883	
743894.142	4047050.3758	
743960.2711	4046882.9634	
744257.9868	4047529.6264	ZONA 5: Muelle Exterior
744325.8942	4047373.7829	
744393.8017	4047217.9394	
744461.7091	4047062.0958	
744529.6165	4046906.2523	

Tabla 4: Coordenadas UTM de los puntos de control. Prediseño 3.

PREDISEÑO 3		
X	Y	
743987.6819	4047867.9645	ZONA 1: Bocana
744091.9114	4047753.0051	
743817.6708	4047762.6259	
743921.9003	4047647.6665	
743197.9551	4047377.0886	ZONA 2: M. Reina Sofia
743114.8971	4047283.8413	
743032.3039	4047191.2796	
743507.0704	4047103.3288	ZONA 3: T. Ro-Ro
743560.6038	4047003.5328	
743887.9344	4047380.8377	ZONA 4: Muelle Interior
743922.2785	4047214.3744	
743956.6225	4047047.9111	
743990.9665	4046881.4478	
744429.6768	4047646.0925	ZONA 5: Muelle Exterior
744469.9913	4047450.2532	
744510.1289	4047254.3294	
744550.2571	4047058.4519	
744590.3947	4046862.528	

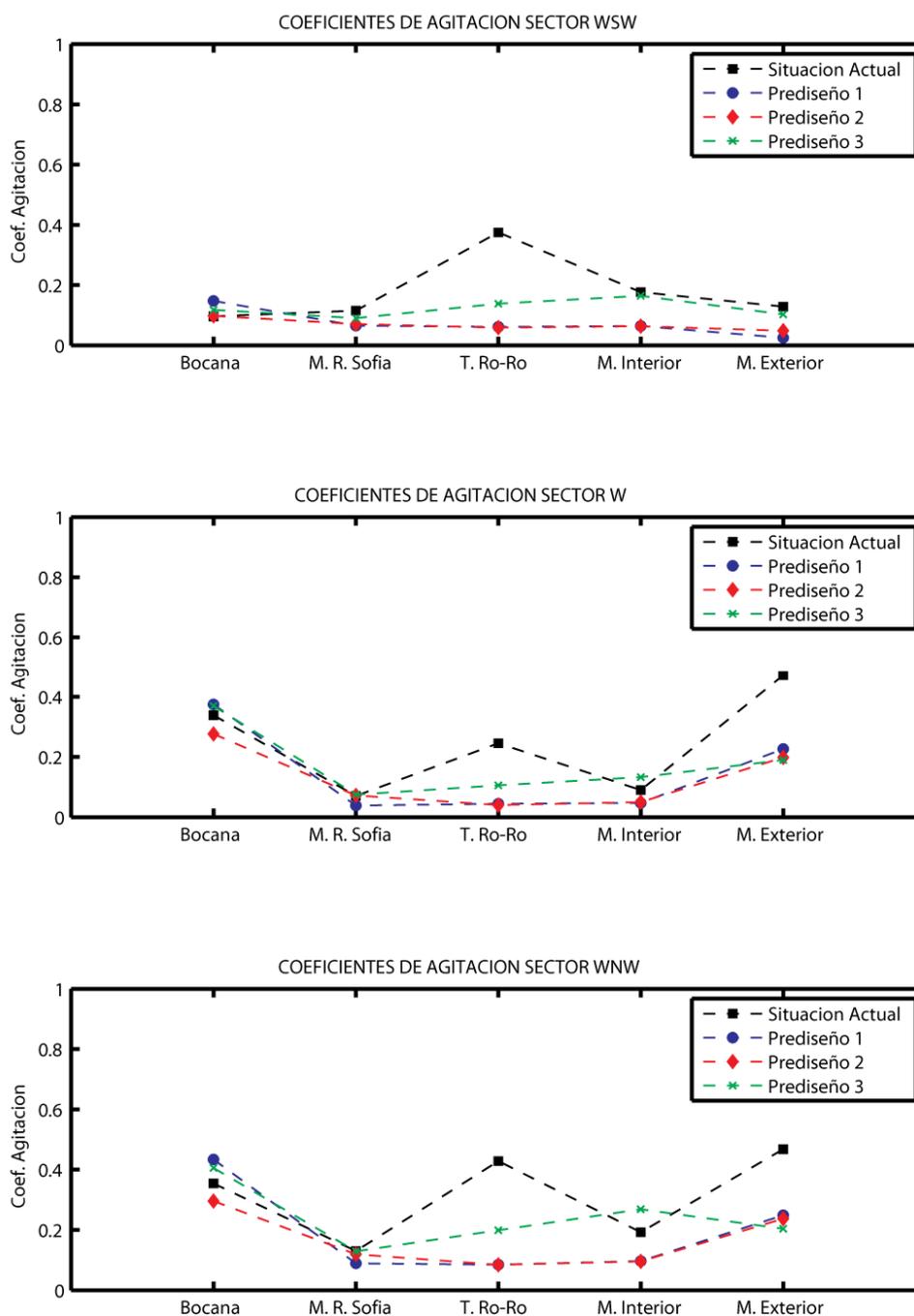


Fig. 18: Coeficientes de agitación en las zonas analizadas para 3 direcciones de incidencia.

1.6. Análisis de agitación frente a onda larga

El objetivo principal de este apartado es la comparación de las condiciones de agitación frente a oscilaciones de largo periodo entre los tres prediseños planteados (incluyendo la nueva Terminal de



Contenedores) y la situación actual (con una anchura de bocana de 300 m, e incluyendo la Terminal Ro-Ro en el Muelle Marqués de Comillas actualmente en construcción).

Se ha usado el modelo numérico MSP-UGR y las características generales del análisis son:

- Se han considerado 4 configuraciones geométricas: Situación Actual y 3 prediseños.
- Los periodos propagados han variado entre 40 y 240 s. con un incremento de 10 s., lo que resulta en 21 casos.
- La dirección de incidencia de los casos analizados es aproximadamente $N42^{\circ}E$, es decir, perpendicular a la bocana.
- Se ha tenido en cuenta sólo la situación de BMVE.
- Las características de la malla de elementos finitos y la batimetría consideradas son similares para las dos configuraciones geométricas comparadas.

Una de las salidas que proporciona el modelo MSP-UGR es el factor de amplificación en todo el dominio de estudio. Este factor nos informa del valor de la amplitud del oleaje en cada punto en función del oleaje en el contorno exterior. Tras la ejecución del modelo para los 21 casos se ha extraído el valor del coeficiente de agitación en 4 puntos de control, denominados P1, P2, P3 y P4, (Fig. 19) en función del periodo de la onda incidente.



Fig. 19: Localización de los puntos de control P1, P2, P3 y P4.

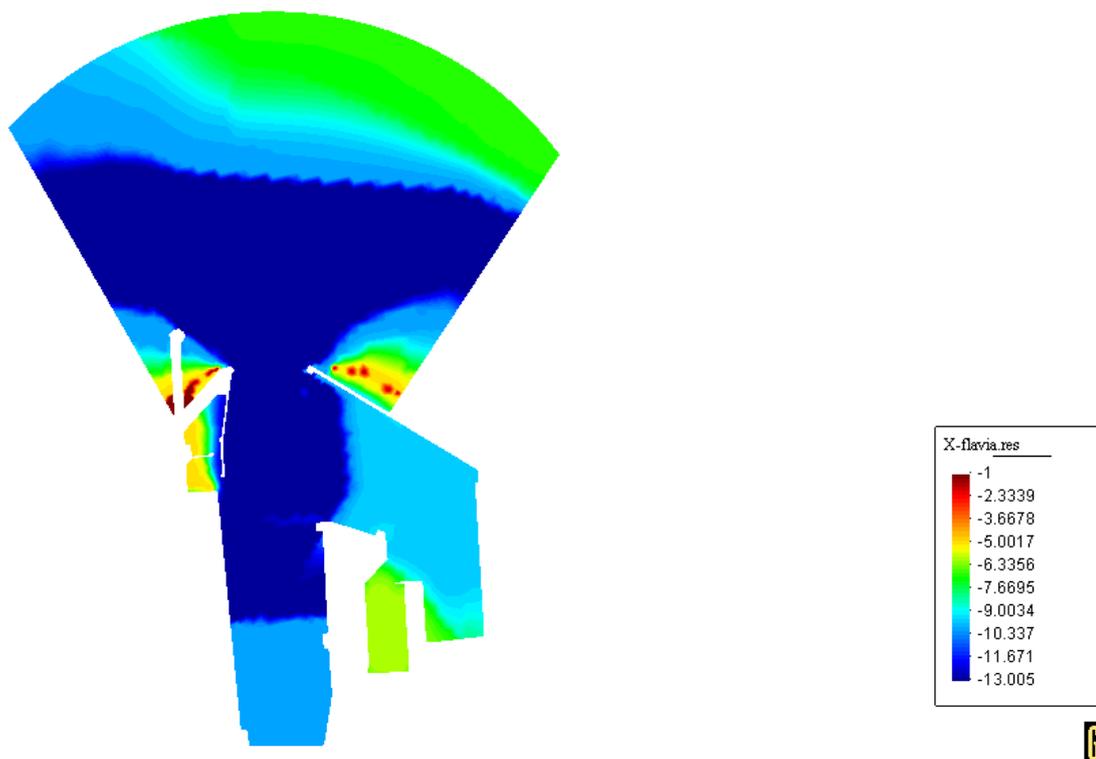


Fig. 20: Batimetría interpolada y geometría de la considerada Situación Actual.

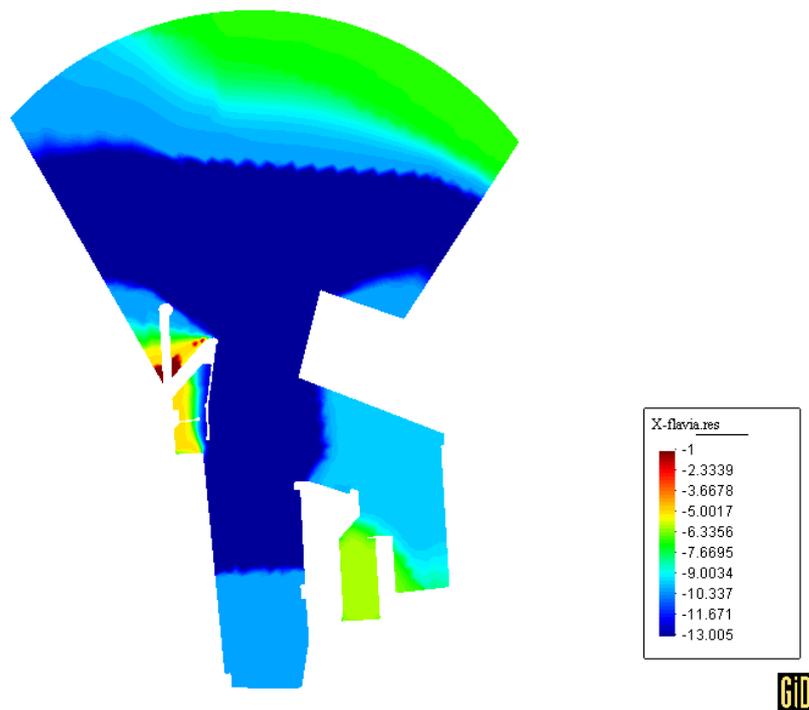


Fig. 21: Batimetría interpolada y geometría del prediseño 1.

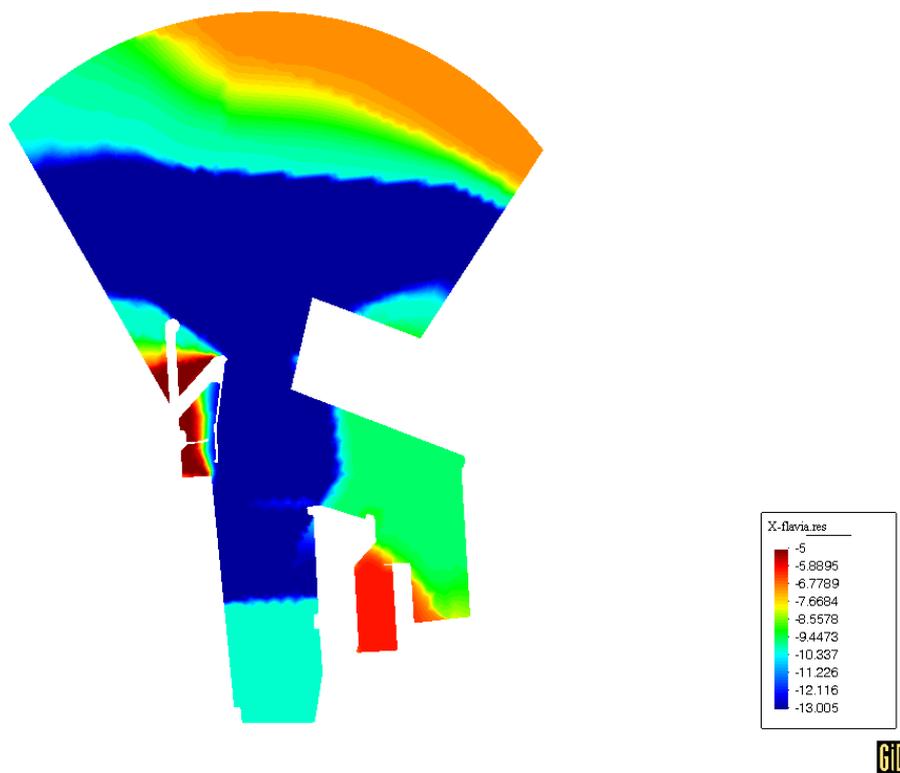


Fig. 22: Batimetría interpolada y geometría del prediseño 2.

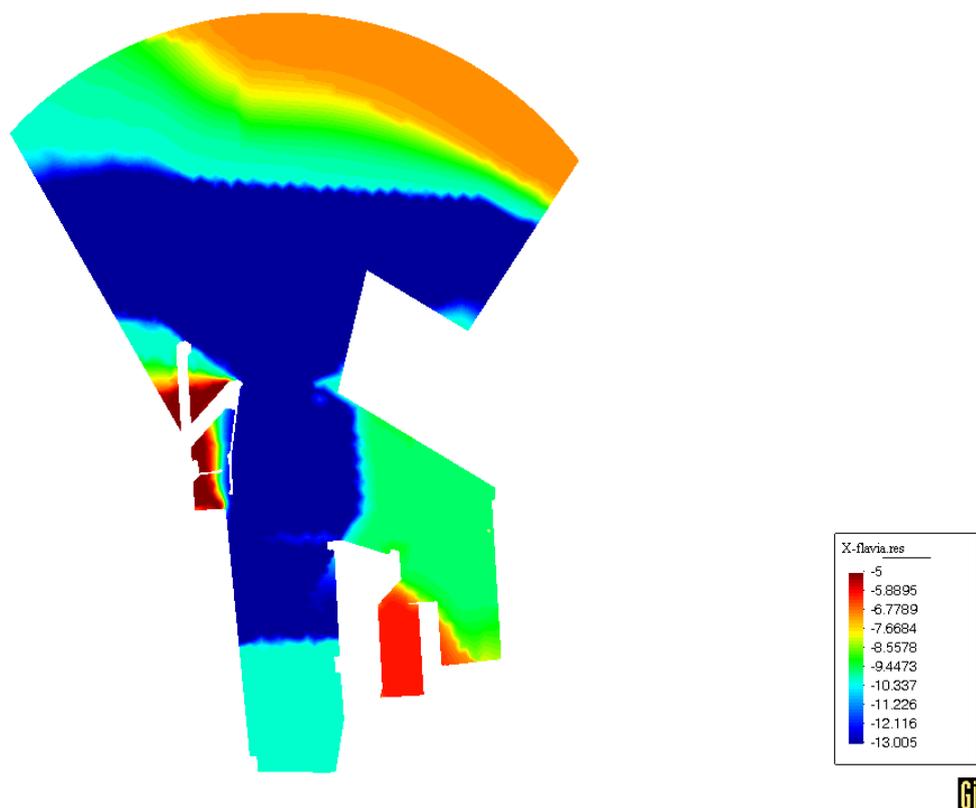


Fig. 23: Batimetría interpolada y geometría del prediseño 3.

El modelo usado requiere la especificación de las condiciones de contorno en todos los límites del dominio, a través del coeficiente de absorción α , definido como $\alpha = 1 - R$, siendo R = el coeficiente de reflexión. Se han tomado los siguientes valores para el coeficiente de absorción, dependiendo del tipo de contorno:

- Contorno reflejante (estructuras verticales): $\alpha = 0.0$ (Color amarillo)
- Contorno parcialmente reflejante (diques en talud): $\alpha = 0.6$ (Color verde)
- Contornos artificiales de absorción total (radio de la corona): $\alpha = 1.0$ (Color azul)
- Contorno de radiación, donde se genera el oleaje (arco de la corona): (Color magenta)

En la Fig. 24 se pueden ver las condiciones impuestas para el caso de estudio. En este caso se ha considerado que los muelles interior y exterior de la nueva Terminal de Contenedores son completamente reflejantes.

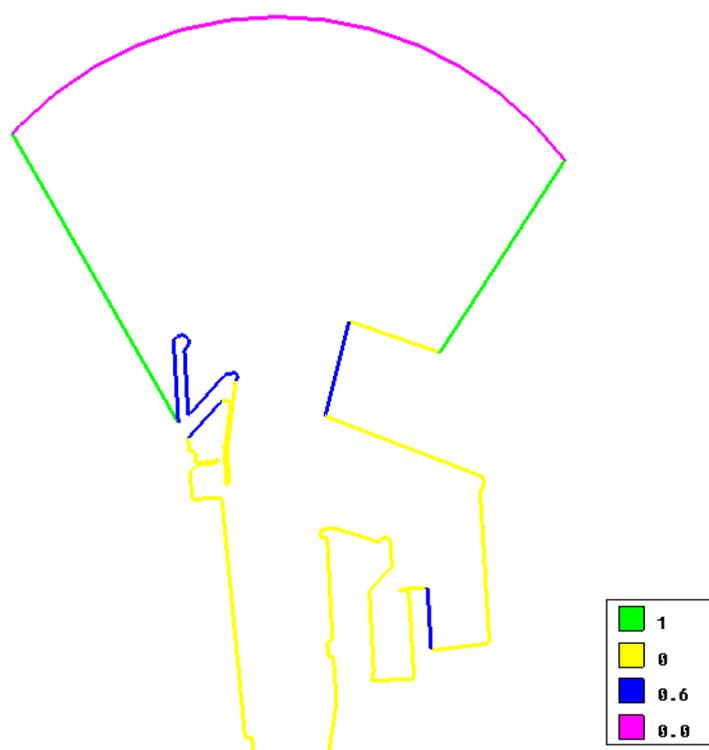


Fig. 24: Condiciones de contorno del modelo.

Es necesario resaltar que se ha empleado un modelo lineal donde no se han incluido términos disipadores de energía, lo que implica que los resultados deben ser interpretados de forma cualitativa. De esta manera se detectan los modos resonantes de las distintas configuraciones, pero la magnitud del coeficiente de agitación no es real. Sin embargo, los resultados arrojan suficiente información para realizar una intercomparación del comportamiento de las distintos prediseños frente a onda larga.

En la Fig. 25 se realiza una comparación del coeficiente de agitación en los cuatro puntos de control para las configuraciones analizadas. Se puede observar que la dársena presenta modos resonantes para periodos de 50, 100, 200 y 230 s, detectables en los 4 puntos de control elegidos. El coeficiente de agitación se ve amplificado especialmente en los prediseños 2 y 3, siendo éstos incluso mayores que en la situación actual. En definitiva, tras este análisis preliminar efectuado, se puede decir que el prediseño 1, presenta un mejor comportamiento en lo que se refiere a la agitación frente a onda larga con respecto a la situación actual y los prediseños 2 y 3.

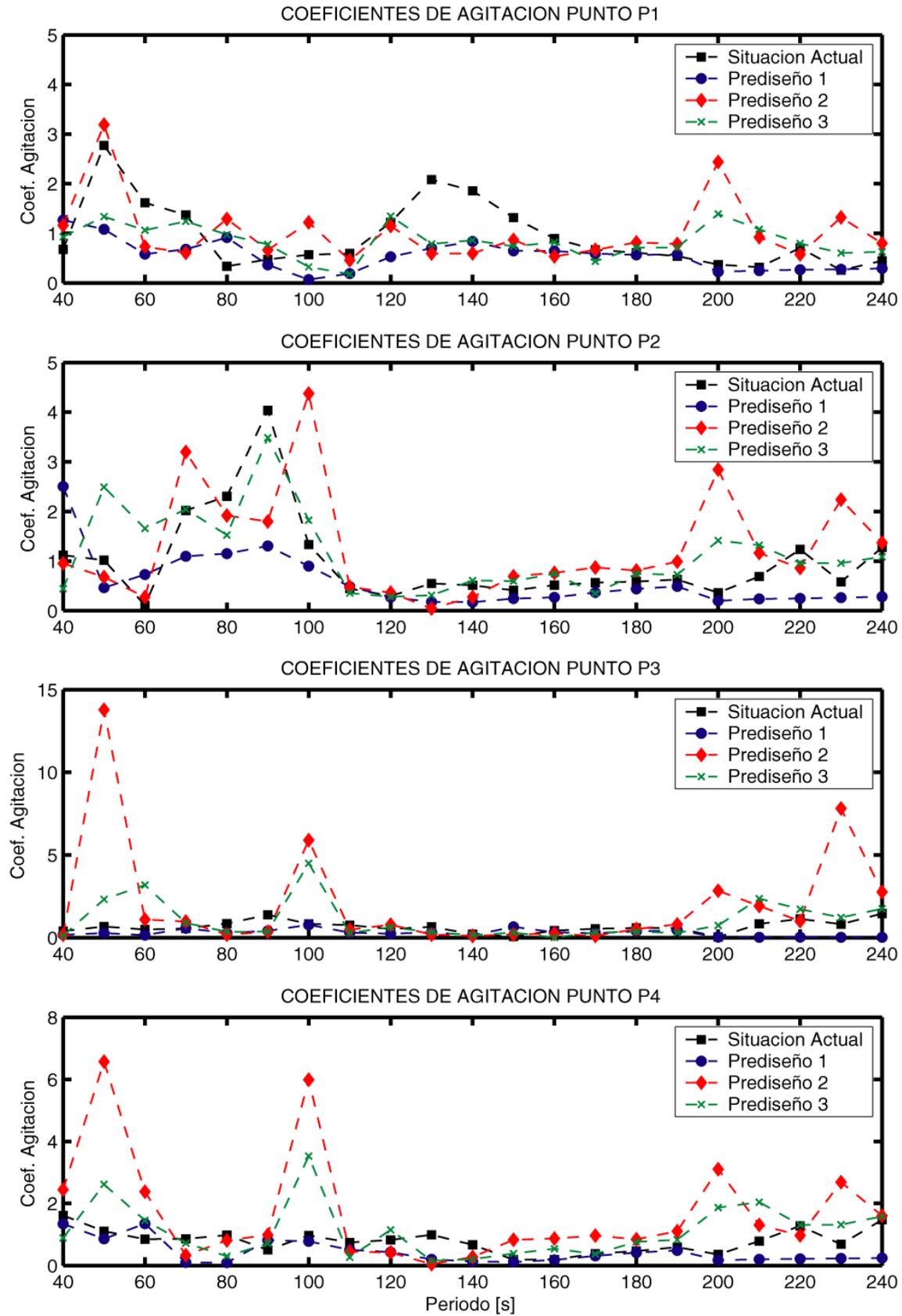


Fig. 25: Comparación del coeficiente de agitación en los 4 puntos de control para las 4 configuraciones.



1.7. Análisis de la acción del viento sobre el buque atracado

En esta sección se va a analizar la acción del viento sobre el buque atracado. Para ello se va a seguir el procedimiento descrito en la ROM 0.4-95 “Acciones Climáticas II: Viento”, usando los datos de viento suministrados por Puertos del Estado correspondientes a la estación meteorológica ubicada en el morro del Dique de Levante del Puerto de Cádiz.

Se va a calcular la fuerza de arrastre sobre los dos buques de proyecto considerados, haciendo uso de la formulación de Hughes, que viene dada por,

$$R_{vt} = \frac{(C_{vx} \cos(\alpha)^2 A_{ex} + C_{vy} \sin(\alpha)^2 A_{ey}) \rho V_v^2}{2 \cos(\phi - \alpha)}$$

donde R_{vt} = fuerza total de arrastre; C_{vx} = factor de arrastre para el viento actuando en la dirección x (eje longitudinal del buque); C_{vy} = factor de arrastre para el viento actuando en la dirección y (eje transversal del buque); α = ángulo formado entre el eje longitudinal del flotador y la dirección de actuación del viento; A_{ex} = área expuesta al viento de la proyección del buque sobre un plano normal al eje x, incluyendo obra muerta y superestructura; A_{ey} = área expuesta al viento de la proyección del buque sobre un plano normal al eje y, incluyendo obra muerta y superestructura; ϕ = ángulo formado entre el eje longitudinal del buque y la dirección de actuación de la fuerza, que podrá aproximarse por $\tan(\phi) = [A_{ey} / A_{ex}] \cdot \tan(\alpha)$; V_v = velocidad del viento y ρ = densidad del aire.

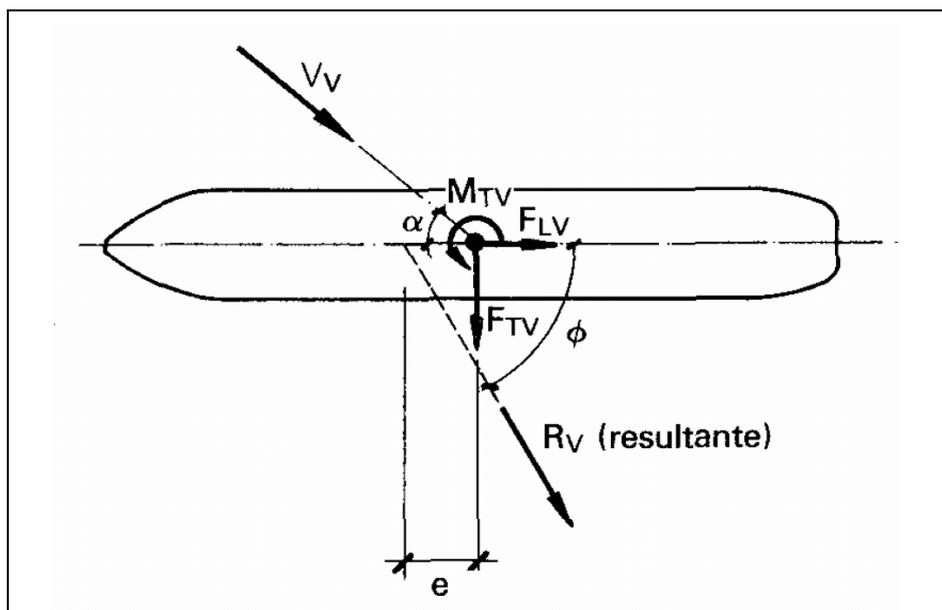


Fig. 26: Esfuerzos resultants de las presiones del viento sobre el buque.



Los valores de C_{vx} y C_{vy} son muy variables en función de las características y forma del buque por encima del nivel del agua y su estado de carga. Como primera aproximación para buques aislados, se pueden tomar los siguientes valores medios:

- $C_{vx} = 0.8$ para viento de proa
- $C_{vx} = 1.0$ para viento de popa
- $C_{vy} = 1.25$ para viento transversal

Las áreas expuestas al viento de los buques tipo A_{ex} y A_{ey} se aproximan mediante las siguientes expresiones:

$$A_{ex} = B \cdot (G + h_T)$$

$$A_{ey} = L_{pp} \cdot (G + h_L)$$

siendo B = manga del buque; L_{pp} = eslora entre perpendiculares; G = Francobordo del buque; h_T = altura media de la superficie de la superestructura del buque por encima de la cubierta, proyectada sobre un plano normal al eje longitudinal del buque; h_L = altura media de la superficie de la superestructura del buque por encima de la cubierta, proyectada sobre un plano normal al eje transversal del buque. En la Tabla 5 se exponen los valores considerados para estimar A_{ex} y A_{ey} de los buques tipo considerados:

Tabla 5: Dimensiones características de los buques tipo considerados.

Buque	B [m]	G [m]	L_{pp} [m]	h_T [m]	h_L [m]	A_{ex} [m ²]	A_{ey} [m ²]
Portacontenedores	35	9	290	20	8.5	1015	5075
Portacontenedores	30	7.8	200	13.5	8.5	639	3260

Para estimar la alineación óptima de atraque de un buque con respecto al viento, se puede calcular la suma del valor absoluto de la fuerza total de arrastre asociada a una velocidad y dirección del viento, $|R_{vt}|$ multiplicada por la probabilidad de ocurrencia en el año medio asociada al valor de la velocidad y dirección del viento, $P(V_v, \alpha)$. Es decir,

$$E_T = \sum_{\alpha} |R_{vt}| \cdot P(V_v, \alpha)$$



Así obtenemos E_T para cada una de las alineaciones de atraque. En las siguientes figuras, Fig. 27 y Fig. 28, se muestra el valor E_T en función del ángulo del buque con respecto al N (proa hacia el N = 0°; proa hacia el E = 90°) para los 2 buques considerados. Obviamente, la forma de la curva es la misma para los 2 buques pero no los valores, siendo el empuje mayor para el buque de mayores dimensiones. Se puede ver en las gráficas que el mínimo valor de E_T corresponde a un ángulo de 264°, es decir, con la proa prácticamente hacia el W, mientras que el valor máximo de E_T corresponde a un ángulo de 170°, es decir, con la proa prácticamente hacia el S.

La orientación de las líneas de atraque para el Prediseño 3 es la misma que la del dique de Levante existente, es decir, aproximadamente N12°W. Por lo tanto, el buque atracado con la misma alineación que el dique de Levante formaría un ángulo de 168° con el Norte, ángulo muy cercano a la alineación pésima de atraque con respecto a la acción del viento sobre el buque atracado. La alineación de las líneas de atraque para los prediseños 1 y 2, es aproximadamente N22°W, es decir el buque atracado formaría un ángulo de 158°. De esta manera se reduce sensiblemente (del orden del 5%) los esfuerzos resultantes sobre el buque atracado.

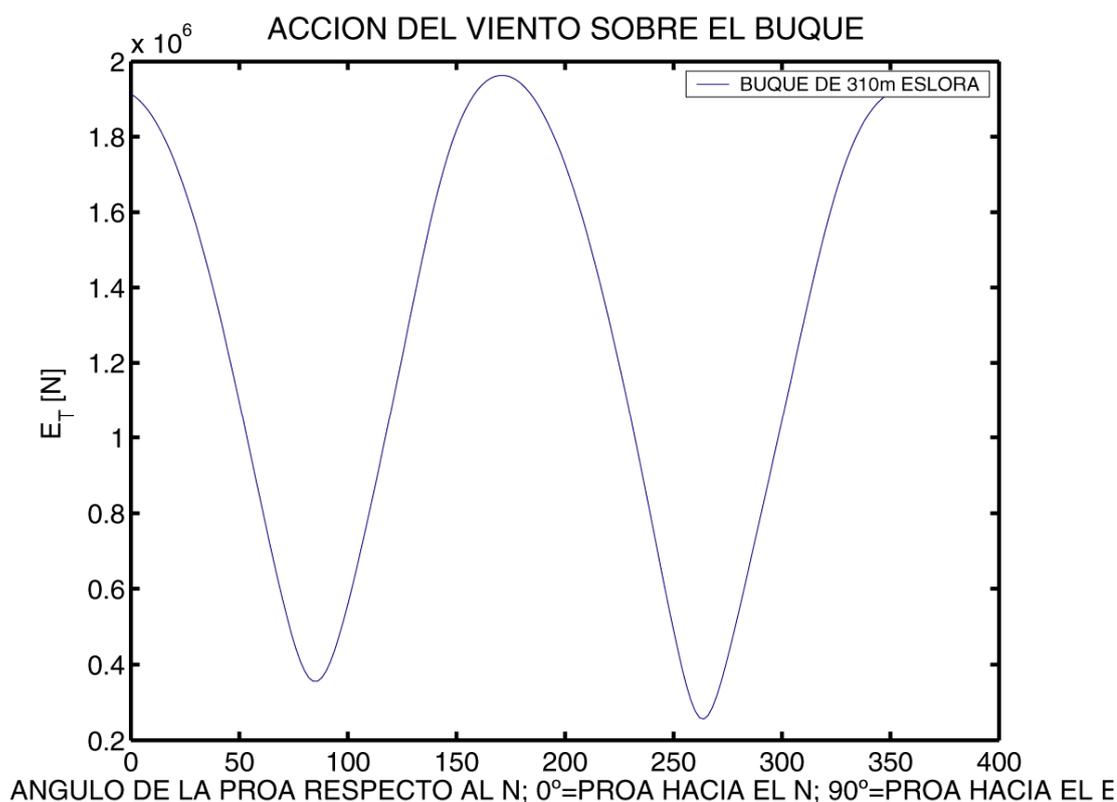


Fig. 27: Resultante anual de empujes debidos al viento sobre el buque tipo de 310 m de eslora en función del ángulo de atraque.

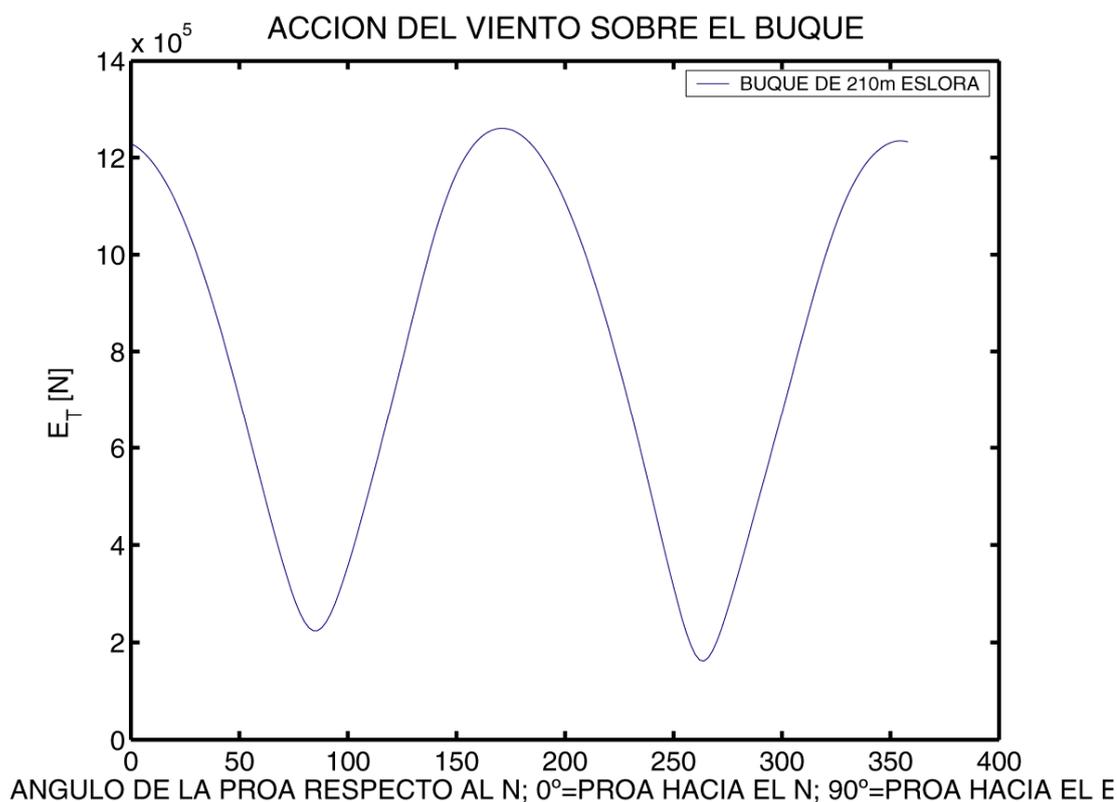


Fig. 28: Resultante anual de empujes debidos al viento sobre el buque tipo de 210 m de eslora en función del ángulo de ataque.

En las siguientes figuras, Fig. 30, Fig. 31, Fig. 32 y Fig. 33, se representan las rosas de empujes medios anuales debidos al viento para los dos buques considerados y las dos alineaciones de atraque; N12°W, correspondiente a la alineación de las líneas de atraque del Prediseño 3, y N22°W, correspondiente a la alineación de atraque de los prediseños 1 y 2. Como conclusión, se puede observar que hay una ligera reducción de los esfuerzos debidos a la acción del viento cuando la línea de atraque gira hacia el W (Prediseños 1 y 2), con respecto a la alineación actual del dique de Levante (Prediseño 3).

En la actualidad se ha instalado un sistema SODAR (Remtech PA0 Phased Doppler Sodar) que permite la medida de velocidad de viento en vertical hasta 500m de altura a partir de la emisión y recepción de haces de ondas acústicas, así como una estación meteorológica completa, Fig. 29.

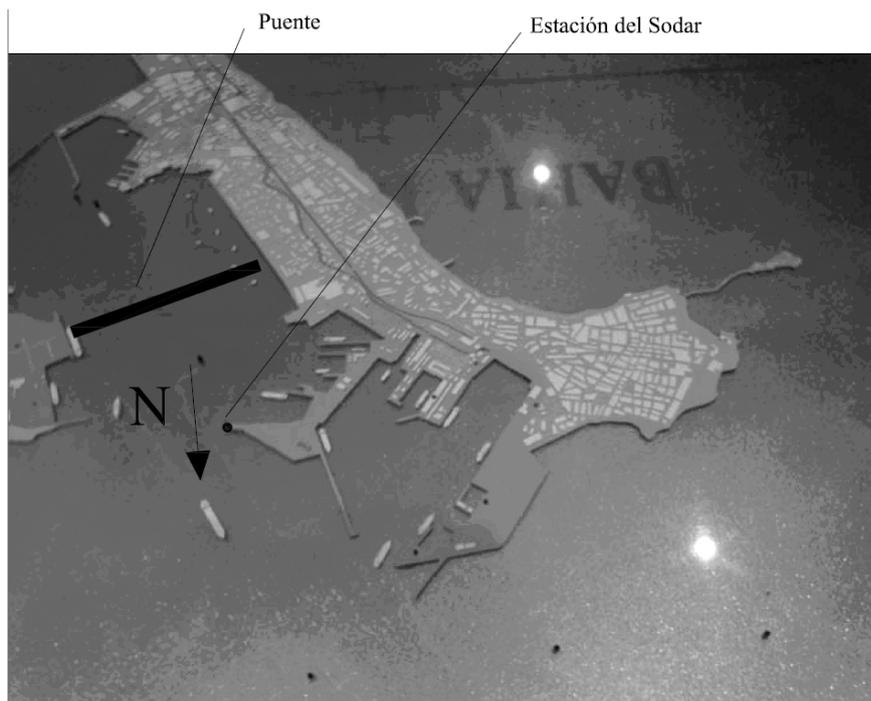
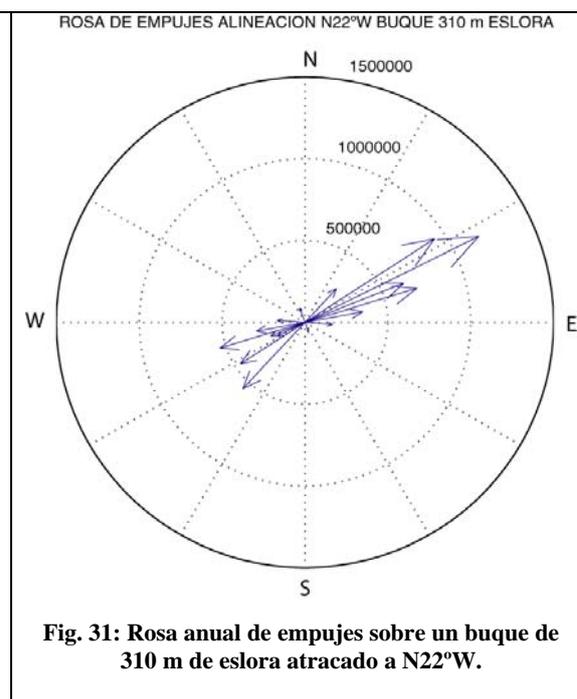
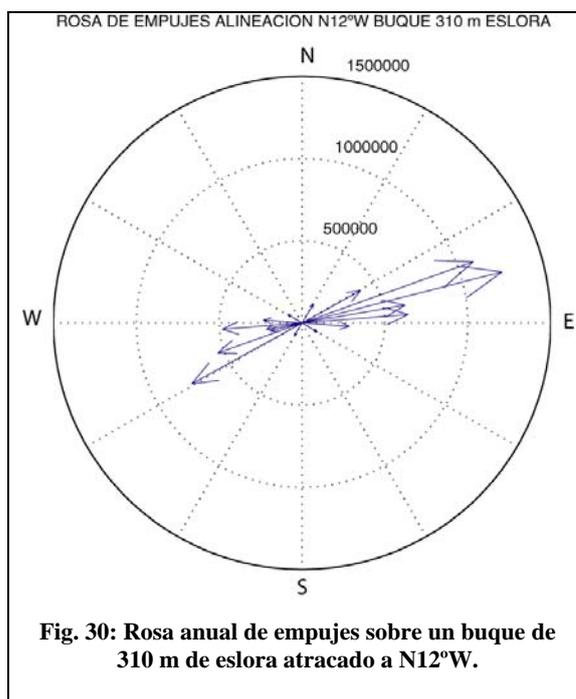
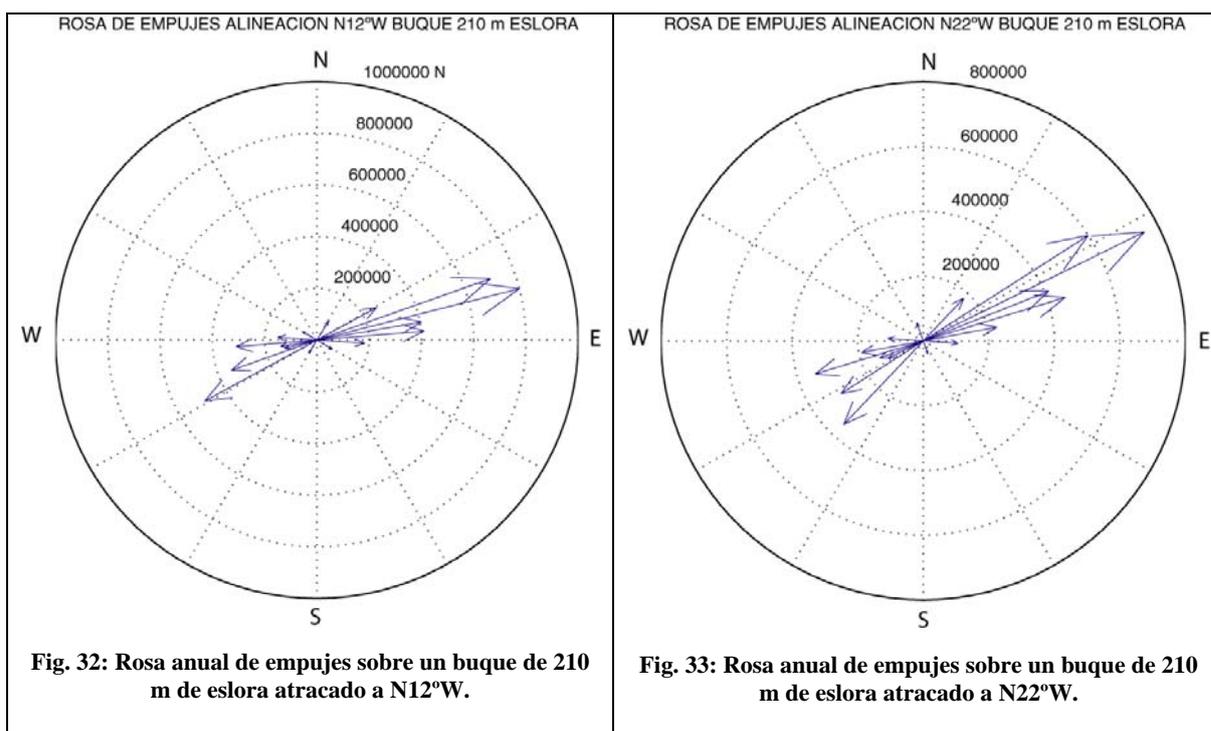


Fig. 29: Ubicación de la estación SODAR en el Puerto de Cádiz.





1.8. Conclusiones

Tras haber realizado un análisis preliminar del comportamiento frente a onda corta, onda larga y de la acción del viento sobre buques atracados de los tres prediseños planteados, se puede concluir que el prediseño 1 es el que presenta un mejor desempeño en su conjunto. No sólo asegura unos bajos coeficientes de agitación de los muelles de nueva construcción (muelles interior y exterior), sino que mejora las condiciones de agitación en el resto de zonas analizadas pertenecientes a la dársena comercial de Cádiz y disminuye los empujes debidos a viento en los buques atracados. Sin embargo, las diferencias entre los tres prediseños no son grandes, por lo que el diseño final de la planta de la Terminal permite ligeras modificaciones, si se requiriera por condicionantes de operatividad en tierra de la misma.

En este análisis preliminar no se ha incluido el efecto que tiene el oleaje de corto periodo generado por viento local en la Bahía en la operatividad de la Terminal. Esto es debido a que el fetch es relativamente reducido, por lo que el oleaje generado se supone de corto periodo y con contenido energético bajo. Para los buques portacontenedores, este efecto se puede despreciar, aunque habría que analizar con mayor cuidado el efecto que tiene la apertura de la bocana (Prediseños 1 y 3), en las condiciones de agitación en la dársena existente, frente a los oleajes generados por viento local de componente norte en los buques de pequeña eslora.



Otro aspecto no analizado en este anejo ha sido la calidad de aguas en la dársena. De forma intuitiva se puede decir que los prediseños 1 y 3, al tener una anchura de bocana mayor, aumentan la calidad de las aguas de la dársena con respecto a la situación actual y el prediseño 2, al mejorar la renovación de aguas de la dársena actual.

Es de destacar, que en la batimetría usada en las propagaciones de oleaje no se han considerado las operaciones de dragado y la batimetría final resultante, por lo que los resultados expresados en este anejo podrían verse alterados ligeramente.



ANEXO III

CLIMA MARÍTIMO.

ÍNDICE

ÍNDICE	2
1.OLEAJE	1
1.1. Fuentes de datos	1
1.2. Descripción general del oleaje en el punto WANA	3
1.3. Régimen medio escalar y direccional de altura de ola significativa en mar abierto	11
1.4. Régimen extremal escalar y direccional de altura de ola significativa en mar abierto	16
2.NIVEL DEL MAR	27
2.1. Fuentes de datos	27
2.2. Régimen Medio del Nivel del Mar Total.....	28
2.3. Régimen Extremal de Nivel del Mar Total.....	29
2.4. Régimen Medio de Carrera de Marea Astronómica en Cádiz.....	30
2.5. Régimen Extremal de Carrera de Marea Astronómica en Cádiz.....	32
2.6. Marea Meteorológica.....	33
3.VIENTO: REGISTRO WANA	35
3.1. Fuentes de datos	35
3.2. Descripción general.....	35
3.3. Regímenes medios direccionales y escalar	40
3.4. Regímenes extremales direccionales y escalar	41
4.VIENTO: ESTACIÓN METEOROLÓGICA	44



1. OLEAJE

1.1. Fuentes de datos

La información sobre oleaje disponible en el área próxima al puerto de Cádiz procede de tres fuentes distintas:

1. Datos visuales aportados por barcos en ruta.
2. Datos obtenidos a partir modelos numéricos de generación de oleaje (Proyectos WASA y WANA).
3. Datos instrumentales aportados por boyas de medida en esta zona.

Los datos visuales presentan como inconveniente la fiabilidad de las medidas y el no disponer de información bajo condiciones de temporal. Los datos instrumentales son de gran fiabilidad, aunque las series temporales suelen tener “blancos” (huecos sin datos o con medidas erróneas) debido al fallo de la instrumentación. Además, parte de los datos instrumentales de la zona no tienen información direccional. Por ello, en esta fase del estudio se va a analizar el oleaje utilizando la base de datos del proyecto WANA, cuyos datos han sido suministrados y calibrados por Puertos del Estado.

La base de datos WANA es el resultado de un modelo numérico espectral de propagación de oleaje de tercera generación que incluye generación de oleaje por viento, refracción, disipación por fricción con el fondo y por rotura del oleaje, e interacciones no lineales. Los datos de entrada del modelo de oleaje son campos de viento a 10 m de altura procedentes del modelo numérico HIRLAM. En la ejecución de los modelos se asimilan datos reales de viento.

Para este estudio se ha solicitado al Programa de Clima Marítimo de Puertos del Estado la información correspondiente al punto WANA 1054046 (Figura 1), de coordenadas 36.5° N, 6.5° W, situado a una profundidad de aproximadamente 50 m, en el exterior de la Bahía de Cádiz. Se



han analizado los datos entre las 15:00 horas del 22 de Octubre de 1995 y las 00:00 horas del 28 de Noviembre de 2006. La información se divide en estados de mar de tres horas de duración. La información utilizada de cada estado de mar es la siguiente:

- Altura de ola significativa espectral (H_{m0})
- Período de pico espectral (T_p)
- Dirección media de procedencia del oleaje ($DirM$; $0=N$, $90=E$)
- Velocidad media del viento ($VelV$)
- Dirección media de procedencia del viento ($DirV$)

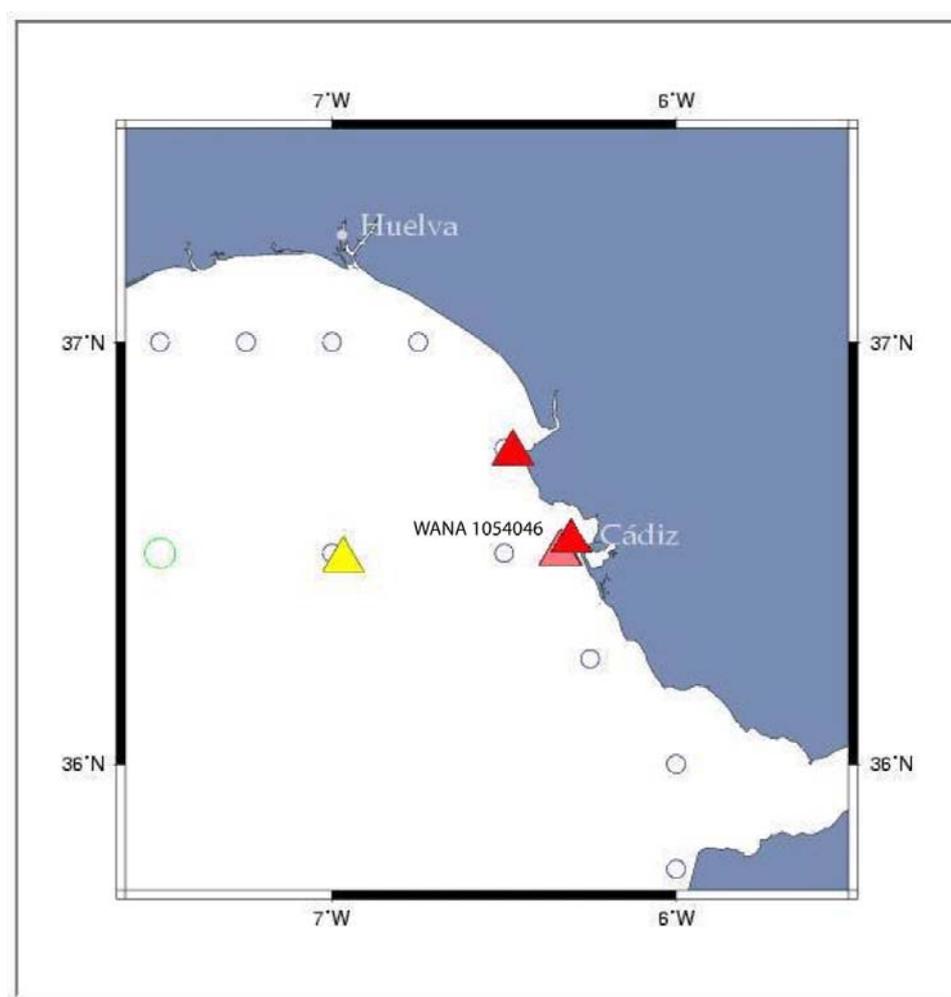


Figura 1: Ubicación punto WANA 1054046.

Los datos son secuenciales en el tiempo, por lo que pueden utilizarse para estudios de persistencia. El total de estados de mar analizados es de 30784. El método de punteo usado es $m_i/(N+1)$, siendo N el número total de datos y m_i el número de datos perteneciente a la clase i .



Los datos de altura de ola se han clasificado en clases de intervalo 0.5 m, para el análisis del régimen medio de esta variable.

1.2. Descripción general del oleaje en el punto WANA

A continuación se muestran una serie de tablas y gráficos que pretenden dar una descripción general de las características del oleaje en la zona de estudio. Posteriormente se elaborarán los regímenes medios y extremales.

La Figura 2 muestra los gráficos de dispersión de los datos de oleaje del punto WANA. La Figura 2.a. representa T_p frente a H_{m0} , la Figura 2.b. representa $DirM$ (medida desde el Norte en el sentido de las agujas del reloj; Norte= 0° , E= 90°) frente a H_{m0} y Figura 2.c. T_p frente a $DirM$. Se aprecia que las alturas de ola inferiores a 2 m se pueden presentar bajo un amplio rango de periodos, mientras que al incrementarse la altura los periodos bajos dejan de estar presentes. La Figura 2.b. muestra el predominio de los oleajes procedentes de W-WSW para valores moderados y altos de altura de ola, aunque para valores bajos las direcciones probables se incrementan. Finalmente, la Figura 2.c. muestra la variabilidad en los periodos debido a la presencia de oleajes de largo periodo y los oleajes generados localmente.

La Tabla 1 muestra los valores de los porcentajes de presentación de los oleajes bajo los diferentes escalones de altura de ola y periodo de pico. Posteriormente se muestran los histogramas de altura de ola en función del periodo de pico y de la dirección media de incidencia.

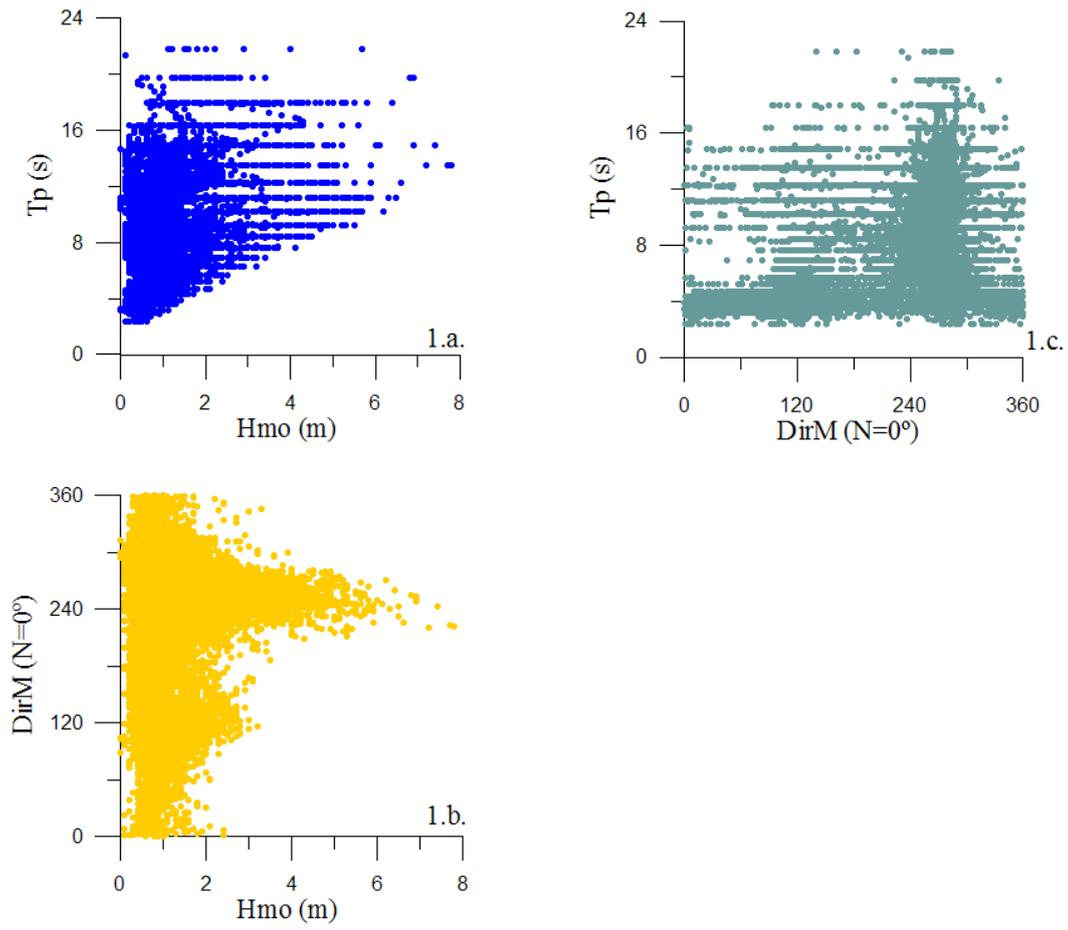


Figura 2. Gráficos de dispersión de oleaje correspondiente a los datos del punto WANA1054046.



ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - PERIODO DE PICO (%)												
Hmo(m)	Tp(s)											TOTAL
	0-2.0	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	10.0-12.0	12.0-14.0	14.0-16.0	16.0-18.0	18.0-20.0	20.0-22.0	
0.0-0.5	-	1.637	2.007	1.787	3.758	2.141	0.646	0.214	0.023	0.006	0.003	12.223
0.5-1.0	-	4.291	11.087	3.687	6.812	7.854	4.307	0.809	0.253	0.062	-	39.162
1.0-1.5	-	0.263	8.637	2.868	2.576	4.142	5.197	1.312	0.400	0.175	0.010	25.581
1.5-2.0	-	-	2.566	2.465	1.091	1.147	2.686	1.199	0.465	0.328	0.016	11.964
2.0-2.5	-	-	0.296	1.533	0.822	0.588	0.864	0.516	0.276	0.182	0.010	5.087
2.5-3.0	-	-	0.003	0.695	0.542	0.377	0.354	0.276	0.214	0.201	0.003	2.667
3.0-3.5	-	-	-	0.231	0.341	0.270	0.208	0.127	0.120	0.094	-	1.390
3.5-4.0	-	-	-	0.032	0.227	0.237	0.120	0.068	0.078	0.029	-	0.793
4.0-4.5	-	-	-	0.003	0.130	0.172	0.088	0.042	0.052	0.029	0.003	0.520
4.5-5.0	-	-	-	-	0.058	0.143	0.068	0.010	0.003	0.010	-	0.292
5.0-5.5	-	-	-	-	0.013	0.097	0.042	0.010	0.003	0.010	-	0.175
5.5-6.0	-	-	-	-	0.006	0.065	0.010	-	0.003	0.006	0.003	0.094
6.0-6.5	-	-	-	-	-	0.006	-	0.006	-	0.003	-	0.016
6.5-7.0	-	-	-	-	-	0.006	0.003	0.003	-	0.010	-	0.023
7.0-7.5	-	-	-	-	-	-	0.003	0.003	-	-	-	0.006
7.5-8.0	-	-	-	-	-	-	0.006	-	-	-	-	0.006
TOTAL	0	6.191	24.596	13.302	16.378	17.245	14.605	4.596	1.891	1.147	0.049	100

Tabla 1. Periodo de pico (Tp) - altura de ola significativa Hmo (%)

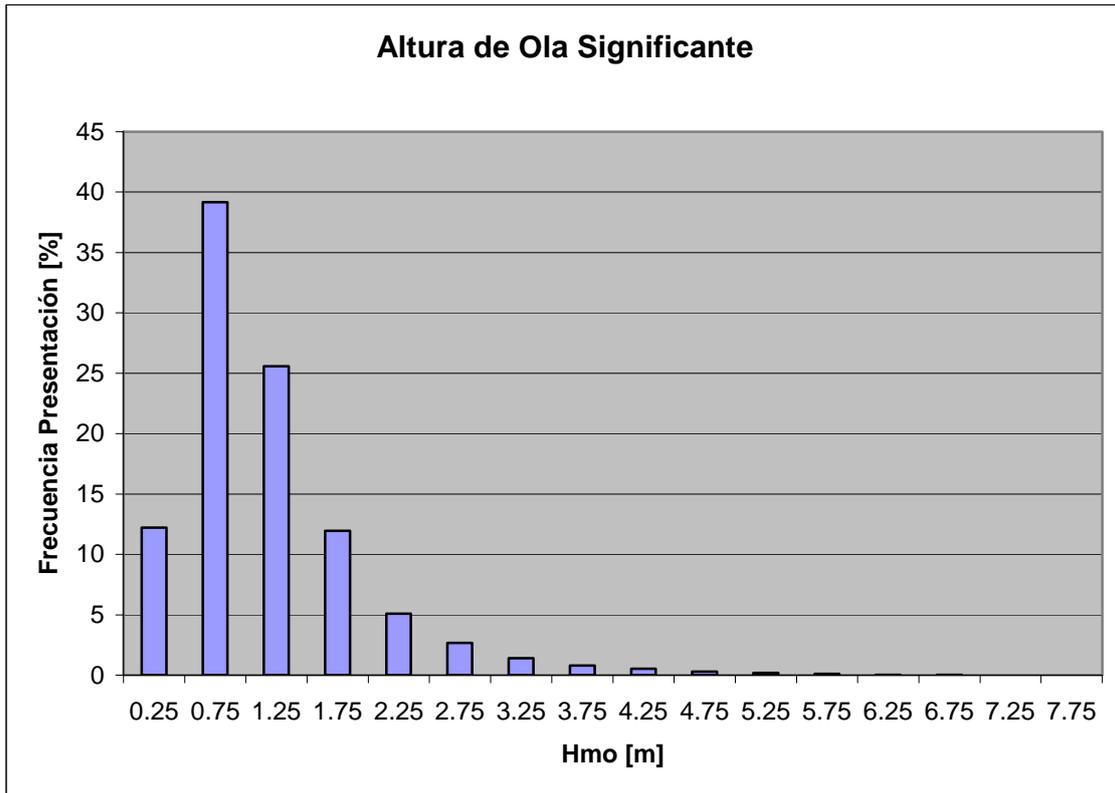


Figura 3. Histograma de altura de ola significativa espectral H_{mo} .

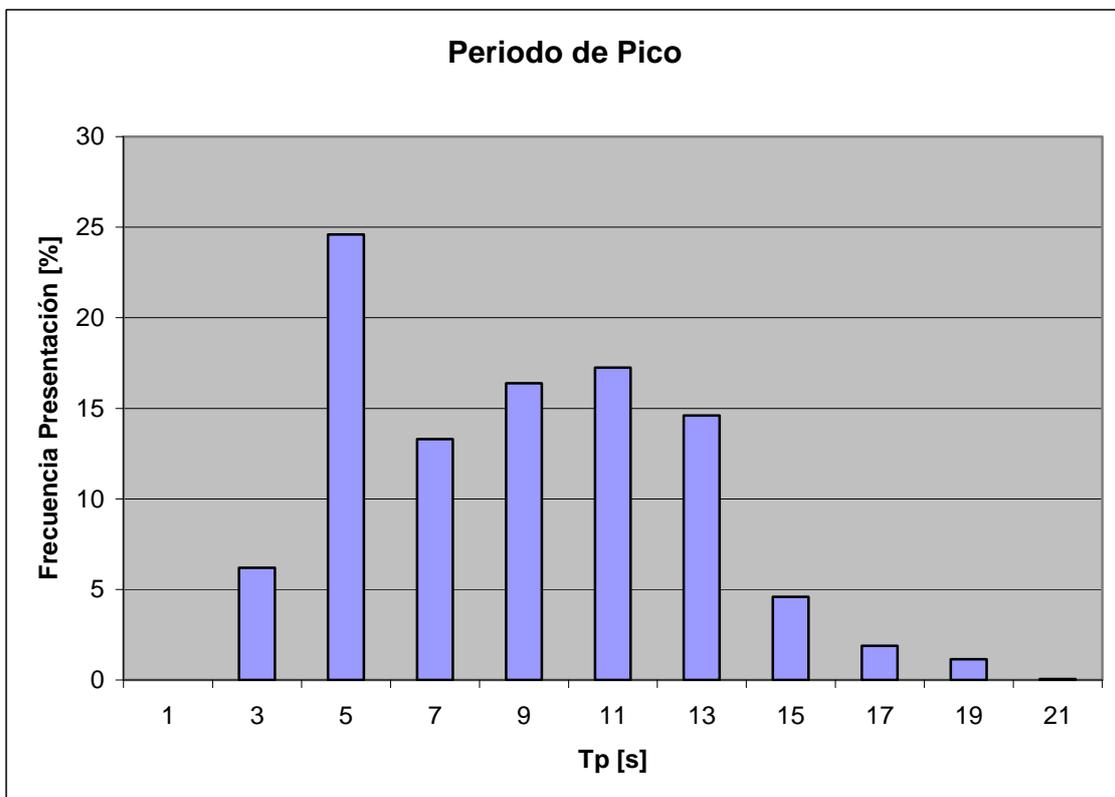


Figura 4. Histograma de periodo de pico espectral T_p .



De los datos anteriores se deduce que (1) en el 75% del tiempo en el año medio, las alturas de ola significante son inferiores a los 2 m y (2) los periodos más probables son los concentrados entre 5 y 13 segundos.

En la Tabla 2 se resumen los porcentajes de tiempo en que el oleaje procede de las diferentes direcciones, observándose claramente que los sectores direccionales más probables son los del WSW, W y WNW, concentrando más del 75% de los datos. En la Tabla 3 se resumen los porcentajes de presentación para los diferentes escalones de altura de ola y dirección de incidencia, mientras que en la Tabla 4, se representan los distintos periodos de pico en función para los diferentes sectores direccionales. Posteriormente, en las siguientes figuras se muestran el histograma de direcciones y la rosa de oleaje para el conjunto de los datos del punto WANA.

Dirección	Sector	Porcentaje del tiempo %
N	$348.75^\circ < \theta \leq 11.25^\circ$	0.61
NNE	$11.25^\circ < \theta \leq 33.75^\circ$	0.49
NE	$33.75^\circ < \theta \leq 56.25^\circ$	0.54
ENE	$56.25^\circ < \theta \leq 78.75^\circ$	0.83
E	$78.75^\circ < \theta \leq 101.25^\circ$	1.91
ESE	$101.25^\circ < \theta \leq 123.75^\circ$	4.28
SE	$123.75^\circ < \theta \leq 146.25^\circ$	3.40
SSE	$146.25^\circ < \theta \leq 168.75^\circ$	1.52
S	$168.75^\circ < \theta \leq 191.25^\circ$	1.11
SSW	$191.25^\circ < \theta \leq 213.75^\circ$	1.25
SW	$213.75^\circ < \theta \leq 236.25^\circ$	3.95
WSW	$236.25^\circ < \theta \leq 258.75^\circ$	10.45
W	$258.75^\circ < \theta \leq 281.25^\circ$	46.71
WNW	$281.25^\circ < \theta \leq 303.75^\circ$	19.64
NW	$303.75^\circ < \theta \leq 326.25^\circ$	2.46
NNW	$326.25^\circ < \theta \leq 348.75^\circ$	0.83

Tabla 2. Sector direccional – tiempo (%).



ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - DIRECCIÓN MEDIA DE INCIDENCIA																	
Hmo (m)	DirM																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0.0-0.5	0.058	0.049	0.023	0.032	0.127	0.231	0.318	0.192	0.159	0.182	0.250	0.468	5.477	4.330	0.234	0.094	12.223
0.5-1.0	0.403	0.312	0.328	0.403	0.685	1.566	1.130	0.666	0.432	0.322	1.007	2.439	19.305	8.459	1.195	0.510	39.162
1.0-1.5	0.091	0.101	0.182	0.328	0.734	1.358	1.176	0.331	0.292	0.289	1.004	2.423	11.684	4.691	0.724	0.172	25.581
1.5-2.0	0.042	0.026	0.010	0.058	0.305	0.728	0.526	0.211	0.162	0.250	0.627	1.640	5.428	1.666	0.253	0.029	11.964
2.0-2.5	0.019	0.003	-	0.010	0.062	0.322	0.185	0.091	0.052	0.127	0.380	1.137	2.261	0.387	0.036	0.016	5.087
2.5-3.0	-	-	-	-	-	0.068	0.068	0.019	0.010	0.039	0.214	0.845	1.312	0.068	0.016	0.006	2.667
3.0-3.5	-	-	-	-	-	0.010	-	0.010	-	0.026	0.153	0.568	0.591	0.023	0.003	0.006	1.390
3.5-4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	-	0.140	0.335	0.302	0.013	-	-	0.793
4.0-4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.010	0.078	0.244	0.185	0.003	-	-	0.520
4.5-5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.026	0.175	0.091	-	-	-	0.292
5.0-5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	0.036	0.084	0.052	-	-	-	0.175
5.5-6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.016	0.065	0.013	-	-	-	0.094
6.0-6.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.010	0.006	-	-	-	0.016
6.5-7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.006	0.016	-	-	-	-	0.023
7.0-7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.003	0.003	-	-	-	-	0.006
7.5-8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.006	-	-	-	-	-	0.006
TOTAL	0.614	0.490	0.542	0.832	1.913	4.281	3.404	1.520	1.111	1.247	3.947	10.453	46.708	19.639	2.462	0.835	100

Tabla 3. Sector direccional – altura de ola significativa espectral (%).



Tabla 4: Sector direccional – periodo de pico espectral (%).

Tp (s)	PERIODO DE PICO - DIRECCIÓN MEDIA DE INCIDENCIA																TOTAL
	DirM																
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
2-4	0.305	0.299	0.250	0.318	0.526	0.679	0.494	0.244	0.166	0.088	0.120	0.162	1.426	0.614	0.211	0.289	6.191
4-6	0.120	0.091	0.172	0.374	1.065	2.300	1.865	0.594	0.270	0.179	0.594	1.059	8.676	5.922	1.111	0.205	24.596
6-8	0.019	-	0.003	0.003	0.039	0.754	0.387	0.097	0.071	0.270	1.072	2.264	5.434	2.579	0.247	0.062	13.302
8-10	0.029	0.016	0.013	0.029	0.026	0.081	0.123	0.149	0.156	0.279	1.127	2.959	8.605	2.602	0.153	0.029	16.378
10-12	0.068	0.036	0.049	0.058	0.097	0.179	0.218	0.195	0.214	0.175	0.646	2.336	9.332	3.125	0.400	0.117	17.245
12-14	0.049	0.039	0.045	0.036	0.133	0.214	0.224	0.182	0.198	0.211	0.309	1.225	8.384	3.037	0.221	0.097	14.605
14-16	0.013	0.010	0.010	0.013	0.013	0.062	0.062	0.045	0.013	0.026	0.058	0.283	2.872	1.013	0.088	0.016	4.596
16-18	0.010	-	-	-	0.006	0.003	0.023	0.003	0.013	0.013	0.010	0.107	1.273	0.393	0.019	0.016	1.891
18-20	-	-	-	-	0.006	0.010	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.052	0.679	0.351	0.013	0.003	1.147
20-22	-	-	-	-	-	-	0.003	0.003	0.003	-	0.003	0.006	0.026	0.003	-	-	0.049
TOTAL	0.614	0.490	0.542	0.832	1.913	4.281	3.404	1.520	1.111	1.247	3.947	10.453	46.708	19.639	2.462	0.835	100

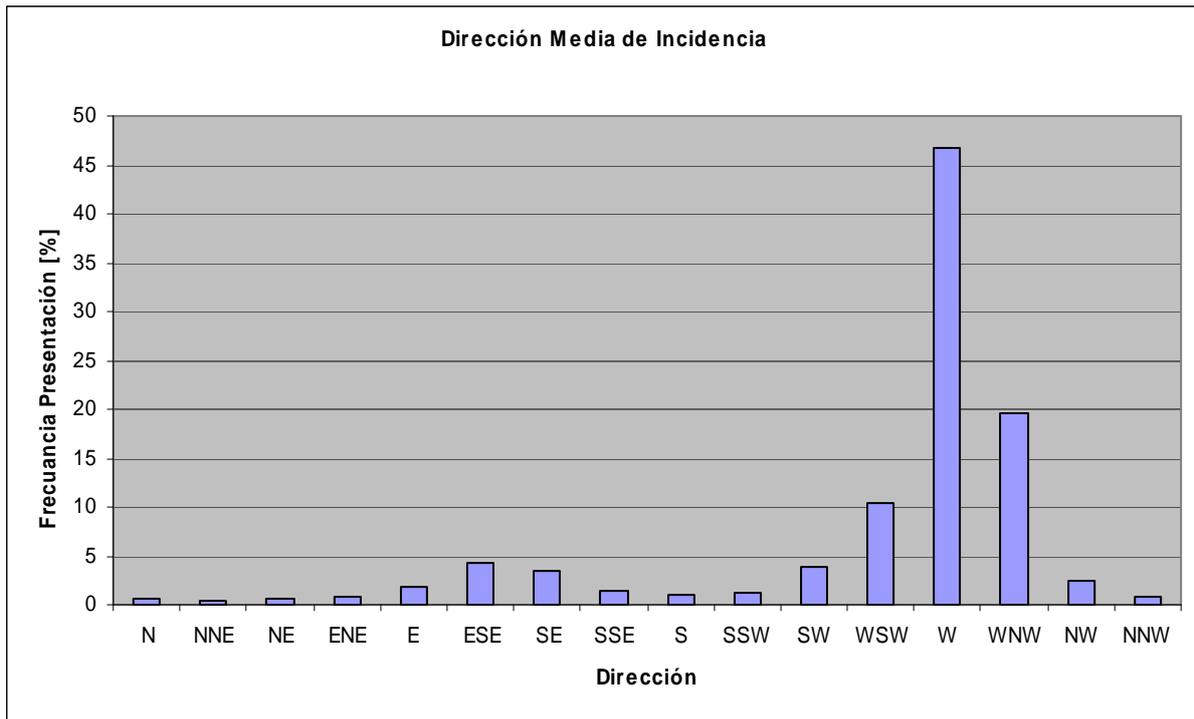


Figura 5. Histograma de dirección media de incidencia del oleaje.

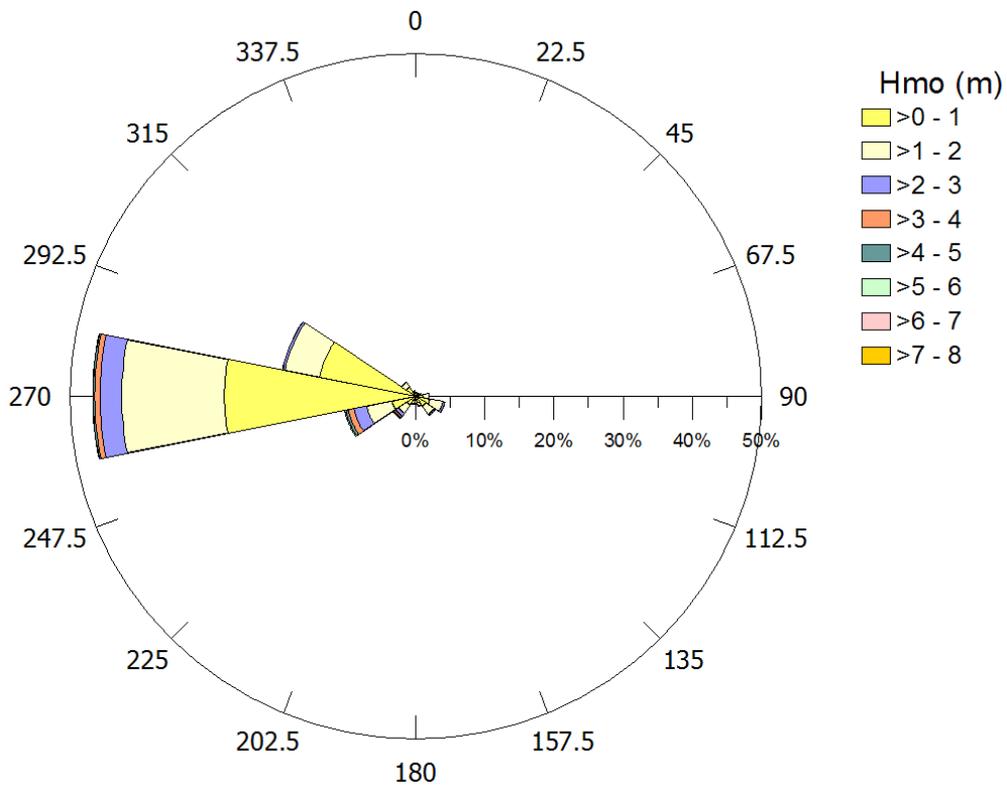


Figura 6. Rosa de Oleaje. 0=Norte, 90=Este.



De toda la información anterior se puede concluir que predominan los oleajes que proceden de los sectores WSW, W y WNW. En la siguiente sección se presentan los resultados más significativos del régimen medio escalar y direccional de oleaje.

1.3. Régimen medio escalar y direccional de altura de ola significativa en mar abierto

En este apartado se obtienen los regímenes medios anuales de oleaje en mar abierto, definidos como la distribución en el año medio de un parámetro de estado de mar en el punto WANA analizado.

Los regímenes medios que se presentan son los direccionales y escalares del parámetro de estado de mar altura de ola significativa espectral, H_{mo} .

Para la obtención de estos regímenes se ha utilizado la base de datos del punto WANA 1054046. Los regímenes direccionales se han organizado en sectores de 22.5° y se han analizado sólo los oleajes más probables (SW, WSW, W y WNW) por carecer el resto de los sectores de importancia para este estudio al ser su probabilidad de presentación inferior al 3%. Los sectores considerados son los descritos en la Tabla 5.

Dirección	Sector	Porcentaje del tiempo %
SW	$213.75^\circ < \theta \leq 236.25^\circ$	3.95
WSW	$236.25^\circ < \theta \leq 258.75^\circ$	10.45
W	$258.75^\circ < \theta \leq 281.25^\circ$	46.71
WNW	$281.25^\circ < \theta \leq 303.75^\circ$	19.64

Tabla 5. Sector direccional – porcentaje de tiempo (%) considerado para la elaboración de los regímenes medios.

En principio, no existe ninguna base teórica para la selección de una determinada distribución estadística para la representación de los regímenes medios de oleaje. Las funciones de distribución más extendidas son la Weibull Biparamétrica y la Lognormal, cuya expresión general viene dada por:



$$\text{Lognormal} \quad F(x) = P(X \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma \cdot x} \int_0^x \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2\right) dx$$

$$\text{Weibull Biparamétrica} \quad F(x) = P(X \leq x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\delta}\right)^\beta\right)$$

Se ha realizado el ajuste de los datos por mínimos cuadrados a ambas distribuciones y se ha elegido el mejor ajuste, caracterizado por el mayor coeficiente de correlación. En el caso que nos ocupa, tanto el régimen medio escalar como los direccionales se ajustan a una distribución Weibull Biparamétrica.

En la Tabla 6 se presentan los parámetros de ajuste de los regímenes medios direccionales y escalar de altura de ola, obtenidos por ajuste de mínimos cuadrados.

Dirección	β	δ
SW	1.31	1.62
WSW	1.44	1.79
W	1.27	1.04
WNW	1.31	0.70
Escalar	1.20	1.06

Tabla 6. Parámetros de ajuste de los regímenes medios direccionales y escalar.

En la Tabla 7 se muestran los valores de la altura de ola significativa asociados a las probabilidades de no excedencia en el año medio, extraídos del ajuste al régimen medio escalar, correspondientes a las probabilidades de no excedencia de 0.25, 0.50, 0.75, 0.90, 0.95 y 0.99. A modo de ejemplo esto significa que en el año medio existe una probabilidad del 50% de que la altura de ola significativa en el punto de análisis no exceda 0.8 m, o que en el año medio existe una probabilidad del 95% de que la altura de ola significativa en el punto de análisis no exceda 2.6 m. Dicho de otra manera, la altura de ola significativa sería superior a 2.6 m, el 5% del año, en un año medio. Si se quiere elaborar una tabla parecida usando los regímenes medios direccionales, no hay que olvidar que son probabilidades condicionadas a un determinado sector, y por lo tanto se debe tener en cuenta la probabilidad de presentación del sector direccional a analizar.



Tabla 7: Altura de Ola – Probabilidad Acumulada para Régimen Medio Escalar.

Probabilidad de No Excedencia en el Año Medio. Régimen Medio Escalar	Altura de Ola Significante [m] Asociada en el Punto WANA 1054046.
0.25	0.4
0.50	0.8
0.75	1.4
0.90	2.1
0.95	2.6
0.99	3.8

En las siguientes figuras se presentan los ajustes de los regímenes medios escalares y direccionales de altura de ola, así como los datos en papel probabilístico Weibull Biparamétrico.

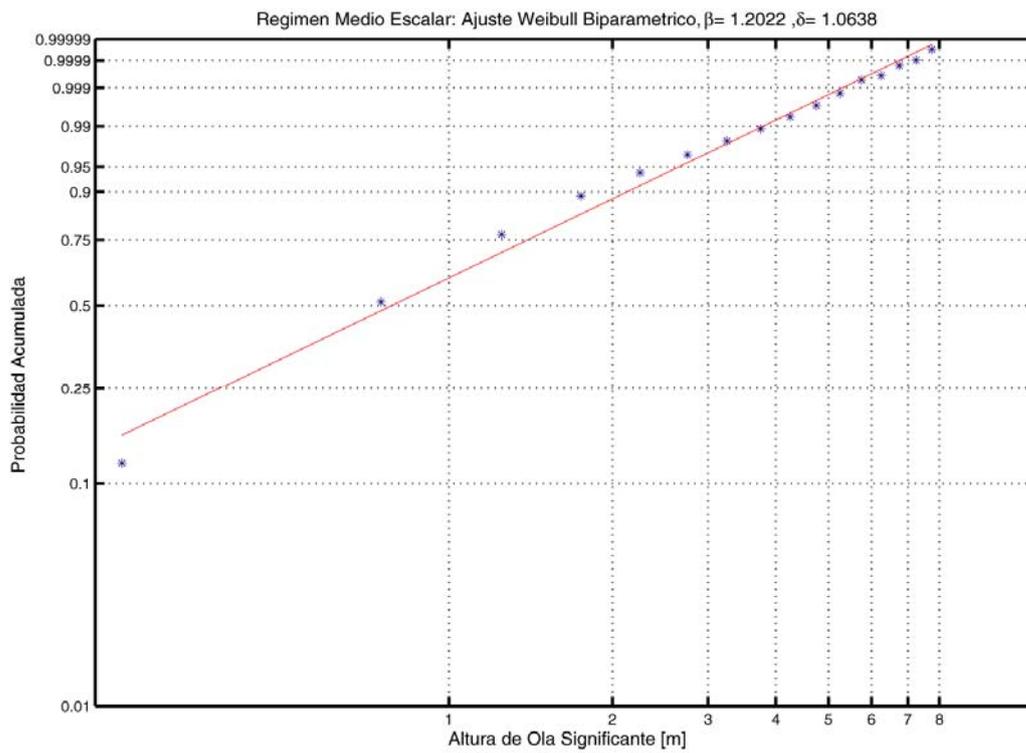


Figura 7. Régimen medio escalar de altura de ola significativa en mar abierto.

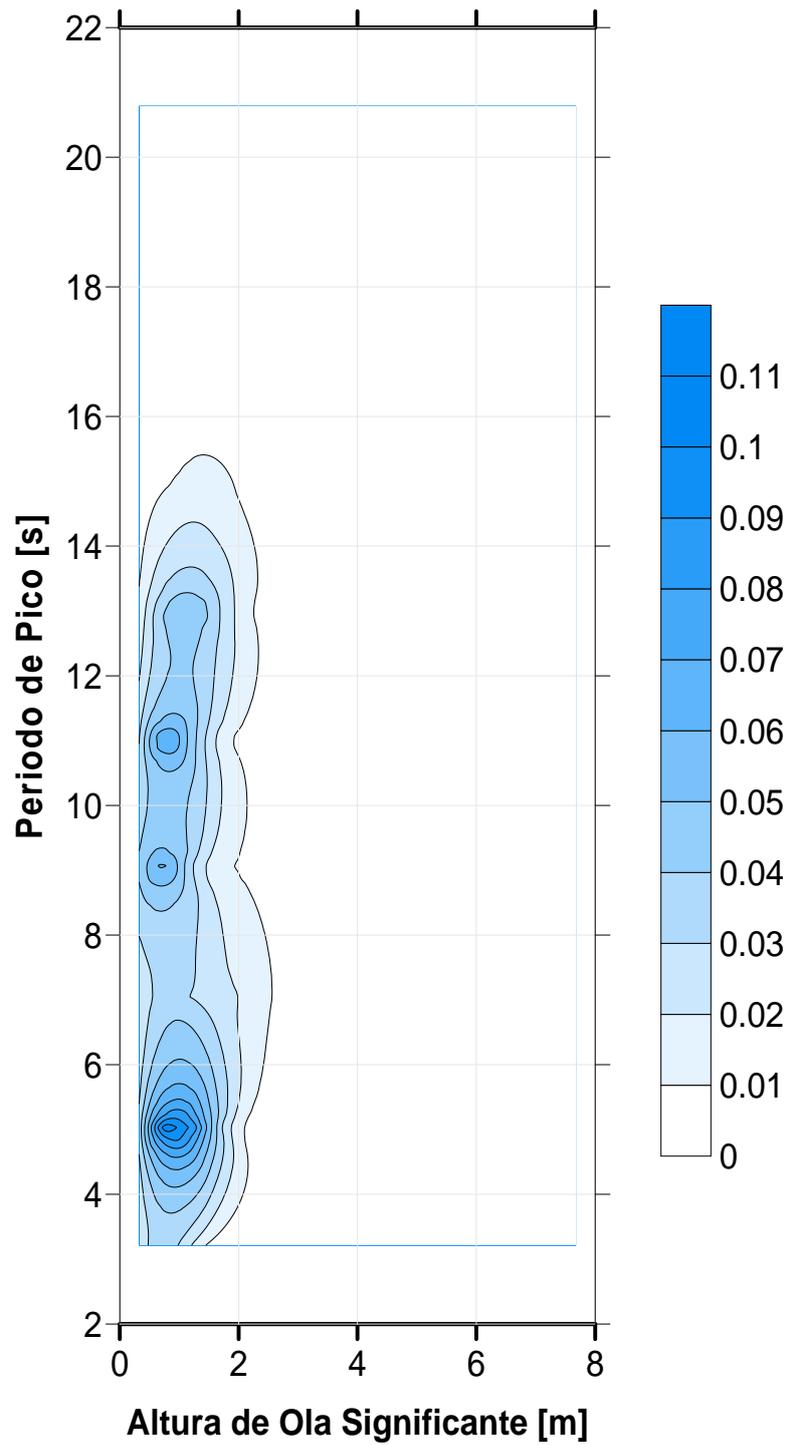


Figura 8. Función de densidad conjunta H_{mo} - T_p en profundidades indefinidas para el Régimen Medio.

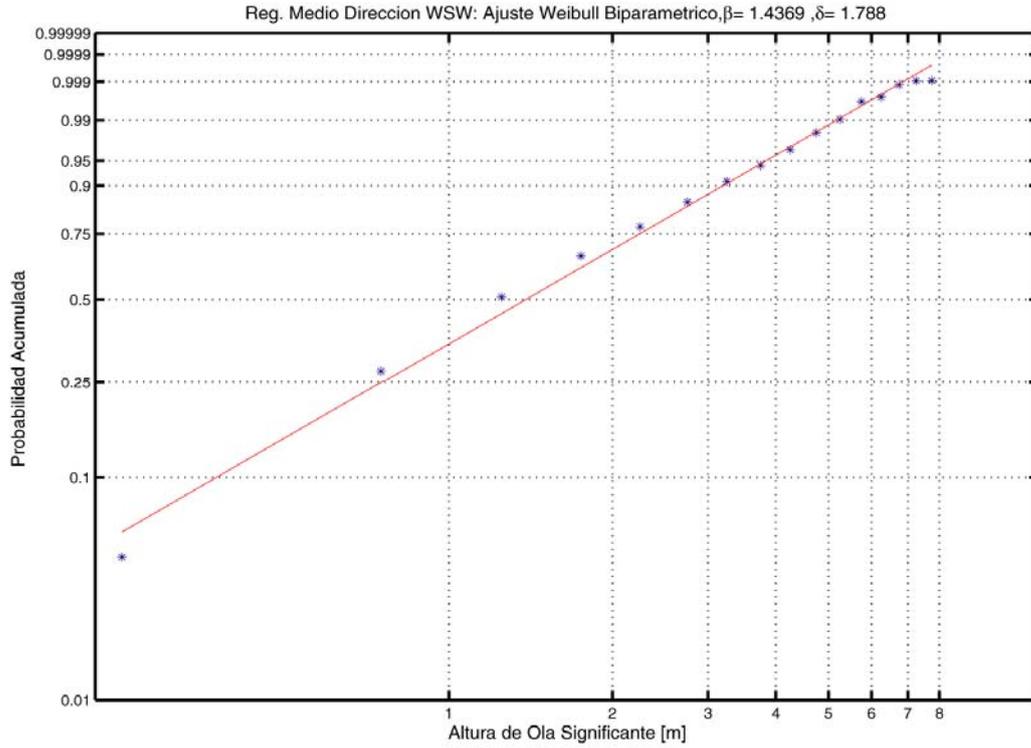


Figura 9. Régimen medio direccional de altura de ola significativa en profundidades indefinidas para el sector WSW.

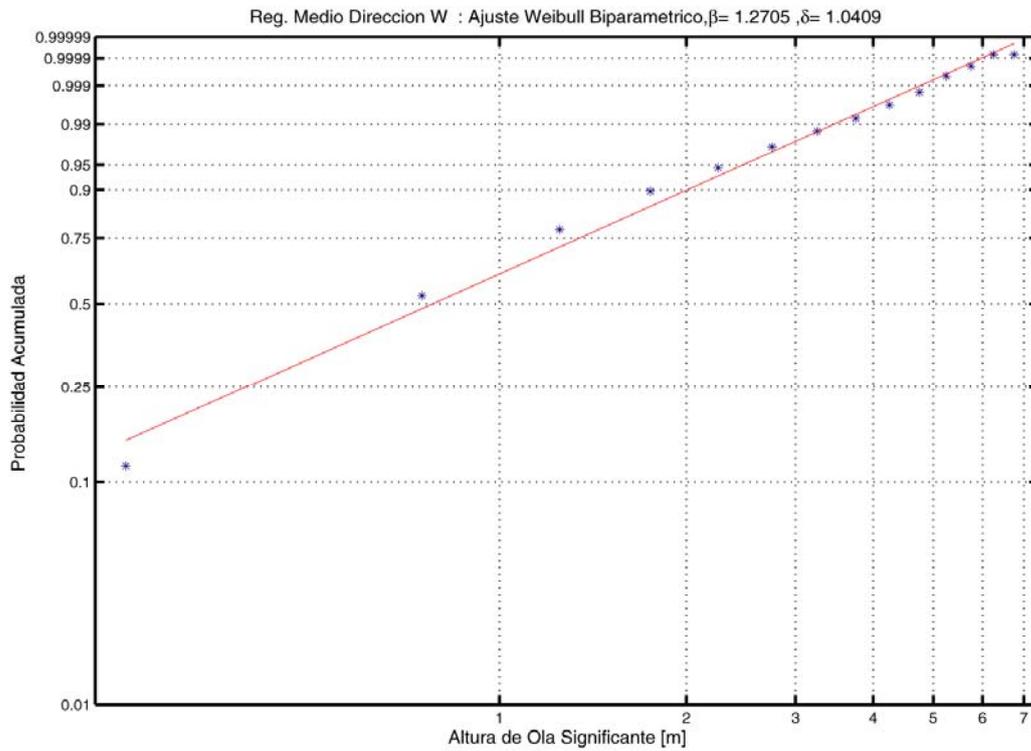


Figura 10. Régimen medio direccional de altura de ola significativa en profundidades indefinidas para el sector W.

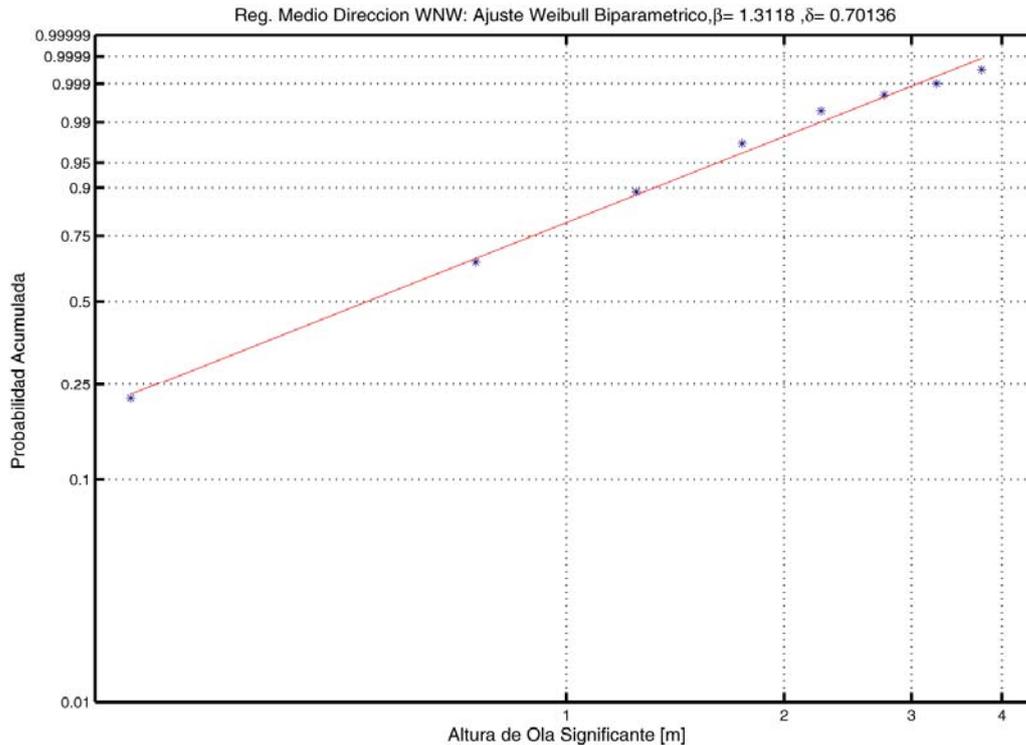


Figura 11. Régimen medio direccional de altura de ola significativa en profundidades indefinidas para el sector WNW.

1.4. Régimen extremal escalar y direccional de altura de ola significativa en mar abierto

En este apartado se describe la metodología seguida para la obtención de los regímenes extremales escalar y direccionales de altura de ola significativa en profundidades indefinidas, definidos como la distribución de valores máximos locales o los picos de temporal que superan un determinado umbral de una variable de estado de mar en mar abierto frente a la Bahía de Cádiz. En realidad, deberíamos nombrarlo como régimen de picos sobre umbral en vez de extremal, ya que históricamente se ha denominado régimen extremal a la distribución de valores máximos anuales. Sin embargo, en este estudio se le denomina régimen extremal a la distribución de valores máximos locales o los picos de temporal que superan un determinado umbral de una variable de estado de mar.

Los regímenes extremales que se presentan son los direccionales y escalares de la variable de estado de mar, altura de ola significativa espectral, H_{mo} .



Para la obtención de estos regímenes se han utilizado los datos del punto WANA 1054046. Debido a que la serie temporal de la que se dispone tiene una duración de 10 años meteorológicos, se ha preferido usar el método de Picos Sobre Umbral (POT) al del Máximo Anual. La altura de ola umbral se ha fijado en 2.5 m, que corresponde al valor que es superado el 6% del tiempo en el año medio. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales debe ser superior a 96 horas. De esta manera se han seleccionado 56 eventos extremos (temporales).

En la Tabla 8 se presentan las frecuencias de presentación en tantos por ciento para las combinaciones de periodo de pico – altura de ola significativa de los temporales seleccionados, mientras que en la Tabla 9 se presentan las combinaciones dirección media de procedencia – altura de ola significativa de los mismos. En ellas se observa que el 96% de los temporales proceden de los sectores direccionales SW, WSW y W, procediendo el 50% del total de la muestra de los valores extremos, del sector WSW.

El número medio de temporales por año es de 5.6 habiendo sido analizados 10 años meteorológicos (de Octubre a Octubre).



Tabla 8: Tabla de doble entrada Periodo de pico (Tp) - altura de ola significativa Hmo para el régimen extremal (%)

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - PERIODO DE PICO (%)												
Hmo(m)	Tp(s)											TOTAL
	0-2.0	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	10.0-12.0	12.0-14.0	14.0-16.0	16.0-18.0	18.0-20.0	20.0-22.0	
2.5-3.0	-	-	-	3.571	-	3.571	-	-	-	7.143	-	14.286
3.0-3.5	-	-	-	3.571	12.500	5.357	3.571	3.571	1.786	3.571	-	33.929
3.5-4.0	-	-	-	-	5.357	-	-	1.786	-	-	-	7.143
4.0-4.5	-	-	-	-	3.571	3.571	1.786	-	3.571	-	-	12.500
4.5-5.0	-	-	-	-	3.571	1.786	-	-	-	-	-	5.357
5.0-5.5	-	-	-	-	1.786	-	-	-	-	-	-	1.786
5.5-6.0	-	-	-	-	-	12.500	1.786	-	-	-	-	14.286
6.0-6.5	-	-	-	-	-	1.786	-	-	-	-	-	1.786
6.5-7.0	-	-	-	-	-	3.571	-	-	-	1.786	-	5.357
7.0-7.5	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	-	-	1.786
7.5-8.0	-	-	-	-	-	-	1.786	-	-	-	-	1.786
TOTAL	-	-	-	7.143	26.786	32.143	8.929	7.143	5.357	12.500	-	100



Tabla 9: Tabla de doble entrada Dirección Media de Procedencia - Altura de Ola Significante Hmo para el régimen extremal (%)

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - DIRECCIÓN MEDIA DE INCIDENCIA																	
Hmo (m)	DirM															TOTAL	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
2.5-3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	5.357	7.143	-	-	-	14.286
3.0-3.5	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	-	5.357	16.071	10.714	-	-	-	33.929
3.5-4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.571	1.786	1.786	-	-	-	7.143
4.0-4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	5.357	5.357	-	-	-	12.500
4.5-5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.357	-	-	-	-	5.357
5.0-5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	-	-	-	-	1.786
5.5-6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	10.714	1.786	-	-	-	14.286
6.0-6.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	-	-	1.786
6.5-7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	3.571	-	-	-	-	5.357
7.0-7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	-	-	-	1.786
7.5-8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	-	-	-	-	1.786
TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	1.786	17.857	50.000	28.571	-	-	-	100

Tabla 10: Tabla de doble entrada Dirección Media de Procedencia – Periodo de pico Tp para el régimen extremal (%)

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE - DIRECCIÓN MEDIA DE INCIDENCIA																	
 Tp (s)	DirM															TOTAL	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
6-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	1.786	1.786	1.786	-	-	-	7.143
8-10	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	-	7.143	14.286	3.571	-	-	-	26.786
10-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.143	21.429	3.571	-	-	-	32.143
12-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	5.357	1.786	-	-	-	8.929
14-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.357	1.786	-	-	-	7.143
16-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.357	-	-	-	5.357
18-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.786	10.714	-	-	-	12.500
TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	1.786	-	1.786	17.857	50.000	28.571	-	-	-	100

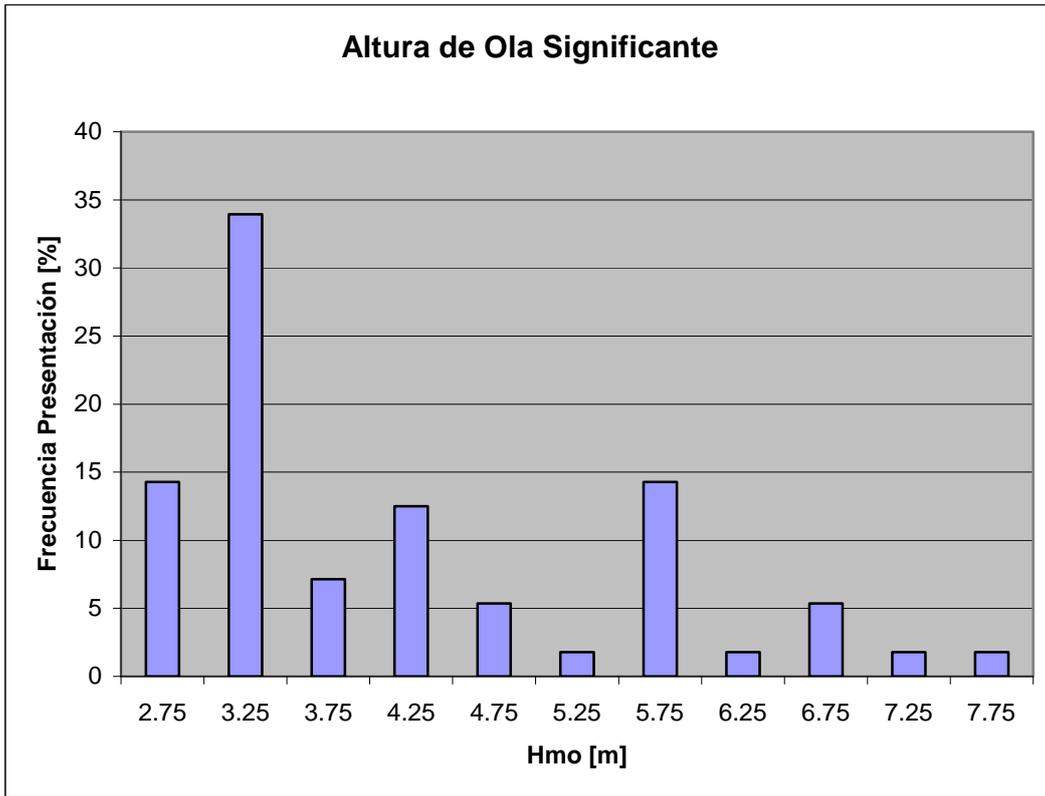


Figura 12: Histograma de altura de ola significativa para el régimen extremal.

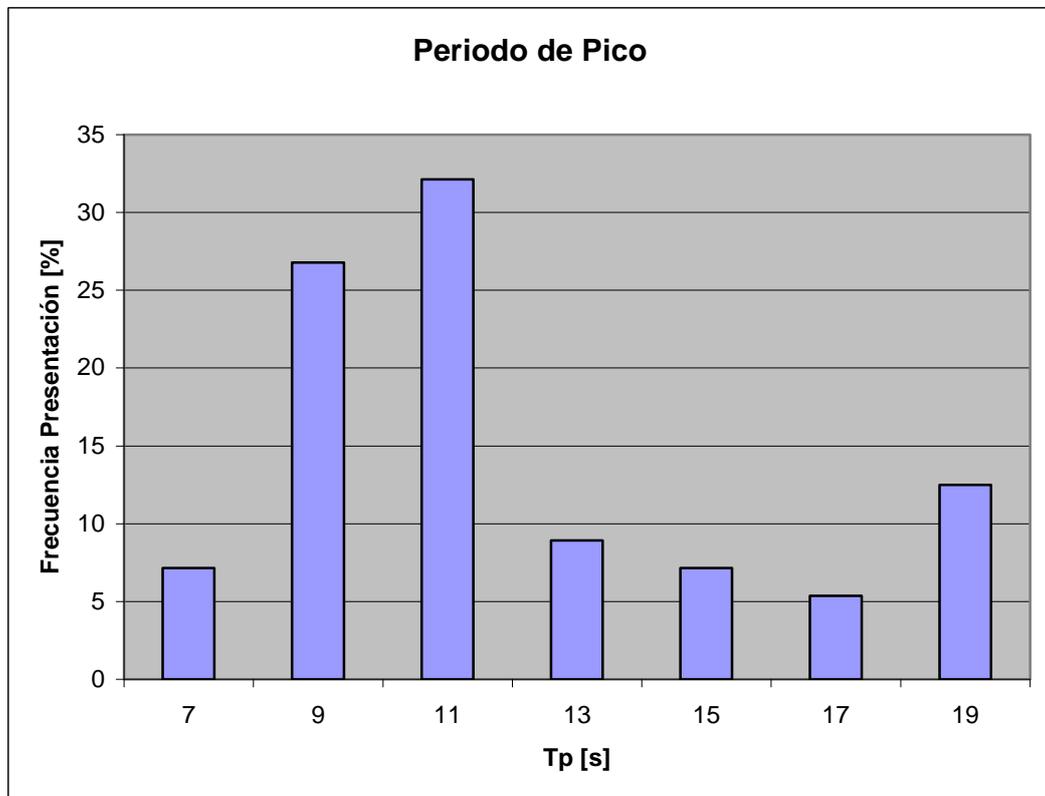


Figura 13: Histograma de periodo de pico para el régimen extremal.

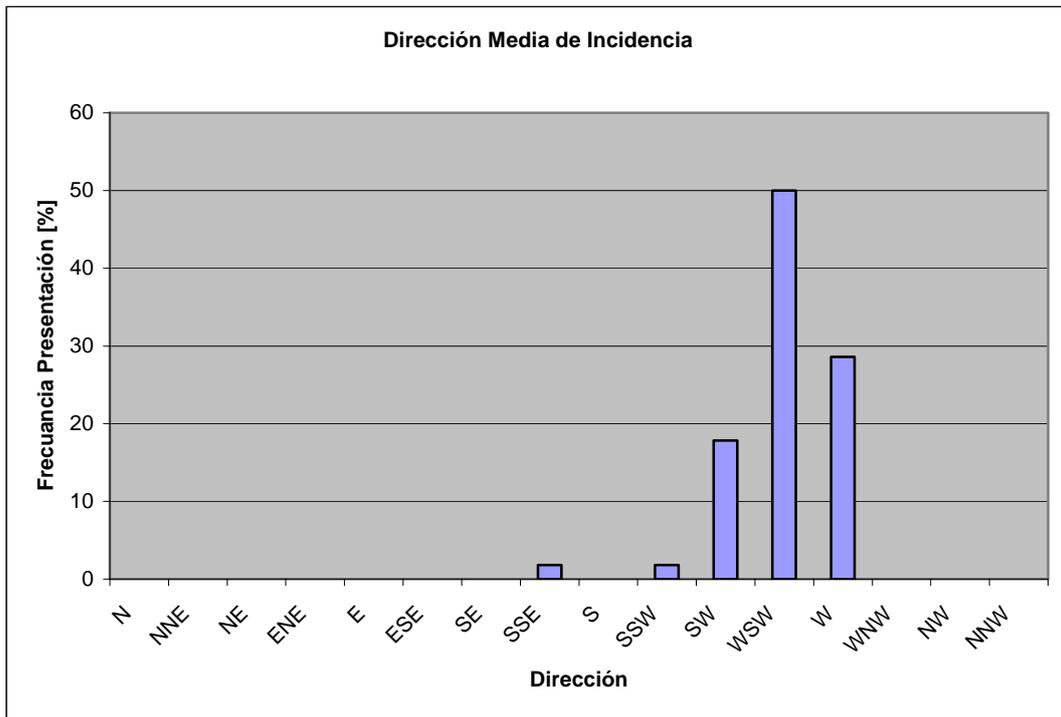


Figura 14: Histograma de dirección medio de procedencia de los eventos extremales.

Para la obtención de los regímenes extremales escalar y direccionales de altura de ola significativa se ha ordenado la muestra de valores extremos asignándole frecuencia de presentación a cada valor. Se ha ajustado por el método de mínimos cuadrados la muestra de valores a funciones de distribución típicas de valores extremos, siendo éstas la Weibull de Máximos, Frechet de Máximos y Gumbel de Máximos, dadas por las siguientes expresiones:

$$\text{Frechet de Máximos} \quad F(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^\beta\right)$$

$$\text{Gumbel de Máximos} \quad F(x) = P(X \leq x) = \exp\left[-\exp\left(-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right)\right]$$

$$\text{Weibull de Máximos} \quad F(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\left(\frac{\lambda-x}{\delta}\right)^\beta\right)$$

Para cada caso se ha elegido la función de distribución de mejor ajuste, caracterizado éste por el mayor coeficiente de correlación. En la Tabla 11 se muestran los valores de los parámetros de la distribución de mejor ajuste obtenida para el régimen extremal escalar de altura de ola significativa.

**Tabla 11: Valores de los parámetros de ajuste del Régimen Extremal.**

Dirección	Distribución	Nº Temporales	Frecuencia [%]	β	δ	λ
SW		10	17.86			
WSW		28	50			
W		16	28.57			
Escalar	Weibull de Máximos	56	100	6.10	9.1	12.8

El número de años que en promedio transcurren entre temporales que superan un cierto valor de altura de ola significativa H_r , se denomina periodo de retorno, Tr , asociado a la altura de ola de retorno H_r . Teniendo en cuenta que el número medio de temporales por año, $NT=5.6$, y que se ha usado el método POT, la relación que existe entre Tr y la probabilidad acumulada (probabilidad acumulada=1-Probabilidad de excedencia) de los eventos extremos seleccionados, es la siguiente:

$$Tr = \frac{1}{NT(1 - F(H_r))}$$

Según las distribuciones ajustadas, se puede hacer una extrapolación para determinar los valores de altura de ola asociadas a distintos periodos de retorno. Es de destacar que la serie de datos usada es de 10 años meteorológicos, por lo que las extrapolaciones están sujetas a la incertidumbre asociada al número de datos de la muestra. Ya que en la práctica de la Ingeniería es común usar el concepto de altura de ola asociada a un determinado periodo de retorno, en la Tabla 12 se exponen los valores de altura de ola significativa asociados a distintos periodos de retorno en el punto WANA analizado, tanto para el régimen escalar, como para las tres direcciones representativas del régimen extremal, obtenidas por medio de una extrapolación de la función de distribución ajustada. Debido a que la muestra de valores extremos condicionada a cada una de las direcciones no es muy extensa, las alturas de ola significantes asociadas a cada periodo de retorno y dirección han sido estimadas usando la función de ajuste del régimen extremal escalar y la probabilidad de presentación del sector direccional en la muestra de valores extremos. Es decir,

$$Tr_{\theta_i} = \frac{1}{NT \cdot P(\theta_i) \cdot (1 - F(H_r))}$$



donde Tr_{θ_i} = periodo de retorno asociado a la altura de ola condicionado a la dirección de procedencia θ_i ; $P(\theta_i)$ = probabilidad de presentación del sector direccional θ_i en la muestra de valores extremos ($P(SW) = 0.1786$; $P(WSW) = 0.5$; $P(\theta_i) = 0.2857$). Es de destacar, que los valores obtenidos en la Tabla 12 están derivados de una extrapolación estadística y deberían ser comparados con los límites físicos reales asociados a cada dirección, fetch, velocidad y dirección de procedencia del viento.

Tabla 12: Altura de ola significativa espectral asociada a un periodo de retorno determinado en el punto WANA 1054046.

Periodo de Retorno [años]	Altura de Ola Significante [m] Asociada en el Punto WANA 1054046.			
	Espectral	Sector SW	Sector WSW	Sector W
5	7.5	5.7	6.9	6.3
10	8.1	6.5	7.5	7.0
25	8.7	7.4	8.3	7.8
50	9.2	8	8.7	8.4
100	9.6	8.5	9.2	8.8
150	9.8	8.8	9.4	9.1
225	10	9.1	9.6	9.3
500	10.3	9.5	10	9.6

En la Figura 15 se representan los datos y el ajuste obtenido para el régimen extremal espectral de altura de ola significativa espectral en el punto WANA analizado. En la Figura 16 se representa la función de densidad conjunta altura de ola significativa-periodo de pico para los eventos extremos seleccionados.

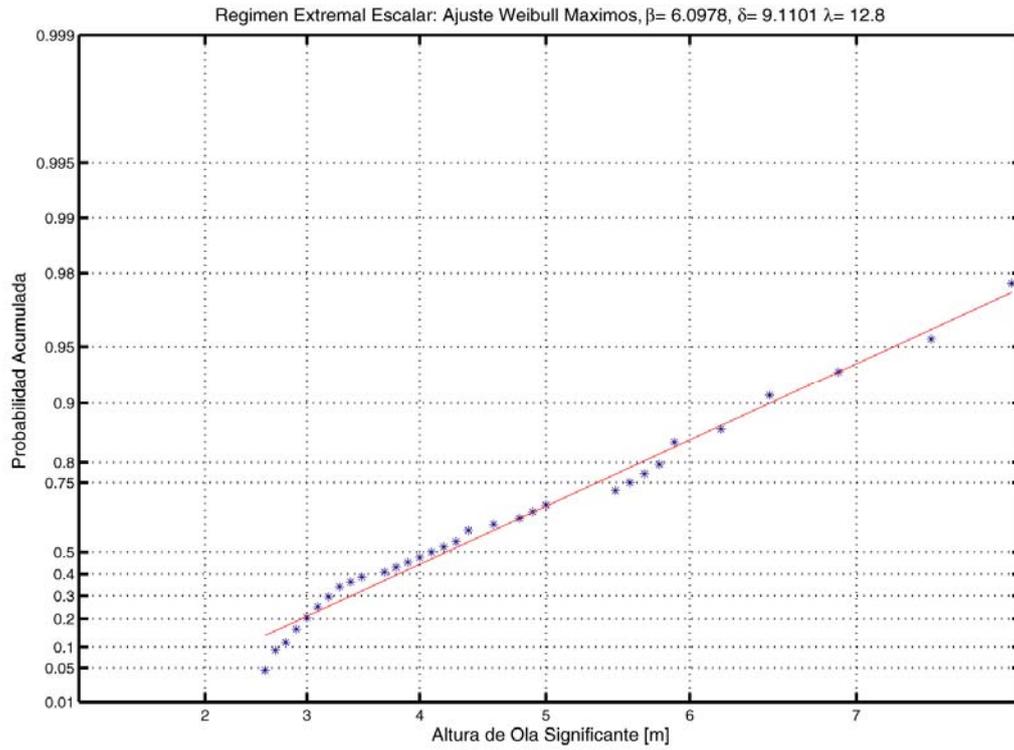


Figura 15. Probabilidad acumulada para el régimen extremal escalar del oleaje.

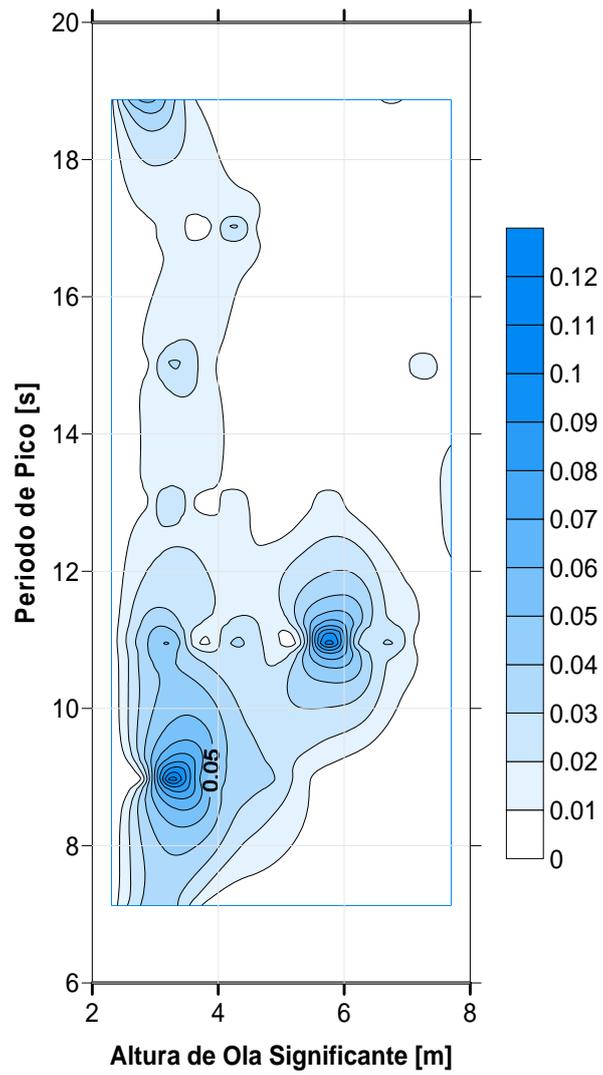


Figura 16: Función de densidad conjunta Altura de Ola Significante Espectral – Periodo de Pico para los eventos extremales.





2. NIVEL DEL MAR

2.1. Fuentes de datos

Para el estudio del nivel del mar se ha utilizado el Atlas de Inundación del Litoral Español proporcionado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria y el Ministerio de Medio Ambiente. Este atlas emplea el banco de datos de la red de mareógrafos REDMAR de Puertos del Estado y de la red del Instituto Español de Oceanografía, y permite obtener tanto el régimen medio como el régimen extremal de la variable nivel del mar.

En la siguiente figura se presentan las relaciones entre el Nivel Medio del Mar en Alicante y otros niveles de referencia en la zona de estudio como son el Cero del Puerto (CP), el Nivel Medio del Mar (NMM) en Cádiz y los niveles de la Pleamar Media Viva Equinoccial (PMVE) y de la Bajamar Media Viva Equinoccial (BMVE). El cero del puerto está situado 1,887 metros por debajo del nivel medio del mar en Alicante.

Adicionalmente, el diseño de la nueva Terminal de Contenedores requiere de la caracterización de la carrera de marea que se presenta en la zona. En este anejo se detalla la metodología utilizada para determinar el régimen medio y el régimen extremal de la carrera de marea. Para ello se utiliza el programa Tide Preview desarrollado por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) de la Universidad Técnica de Lisboa. El programa pertenece al modelo hidrodinámico 3D MOHID y se puede descargar de la página de Internet www.mohid.com.

El programa Tide Preview crea series temporales de elevación de la superficie libre a partir de las componentes armónicas de la zona, para un periodo de tiempo especificado por el usuario. En este caso de estudio se genera una serie temporal de la variación del nivel del mar debido a la marea astronómica para un periodo de 50 años. Con el análisis de esta serie se obtienen las funciones de distribución, media y extremal de la variable carrera (o altura) de marea.

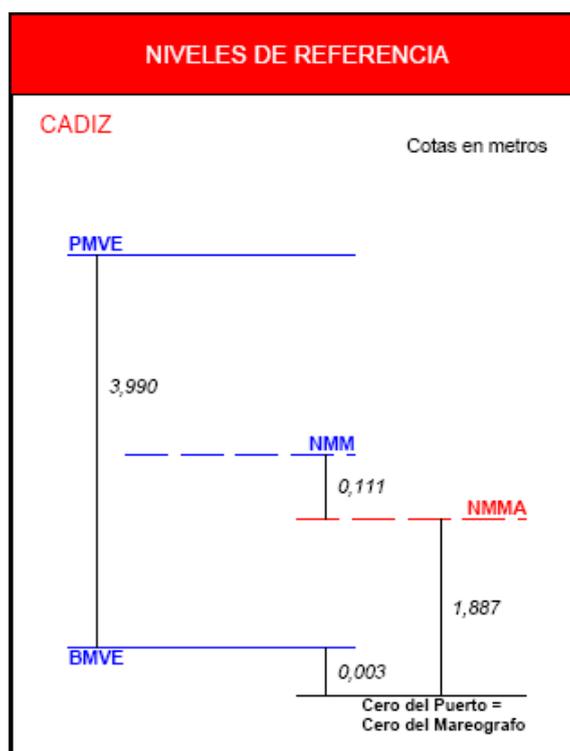


Figura 17: Niveles de referencia para el mareógrafo de Cádiz.

2.2. Régimen Medio del Nivel del Mar Total

El nivel del mar total con respecto al cero del puerto está compuesto por la suma del nivel del mar debido a la marea astronómica y el de la marea meteorológica. Las siguientes figuras representan la función de distribución del nivel del mar total con respecto al NMMA y el número de horas al año que se supera un cierto valor, respectivamente.

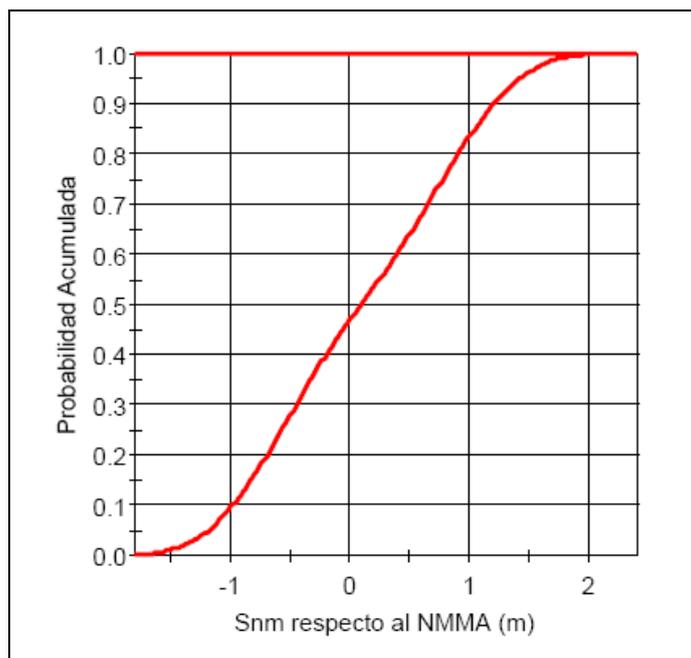


Figura 18: Régimen medio del nivel del mar total. Probabilidad acumulada.

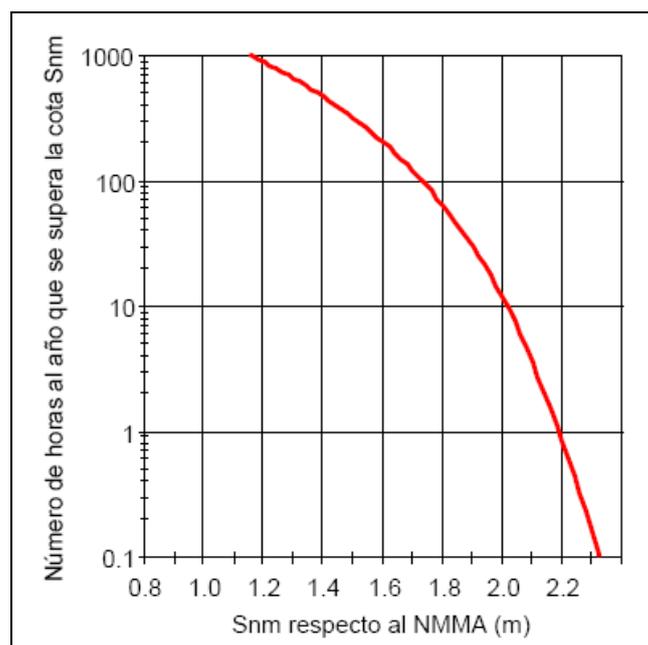


Figura 19: Régimen medio del nivel del mar total. Número de horas que se supera.

2.3. Régimen Extremal de Nivel del Mar Total

En la siguiente figura se representa el régimen extremal del nivel del mar total en Cádiz con respecto al Nivel Medio del Mar en Alicante.

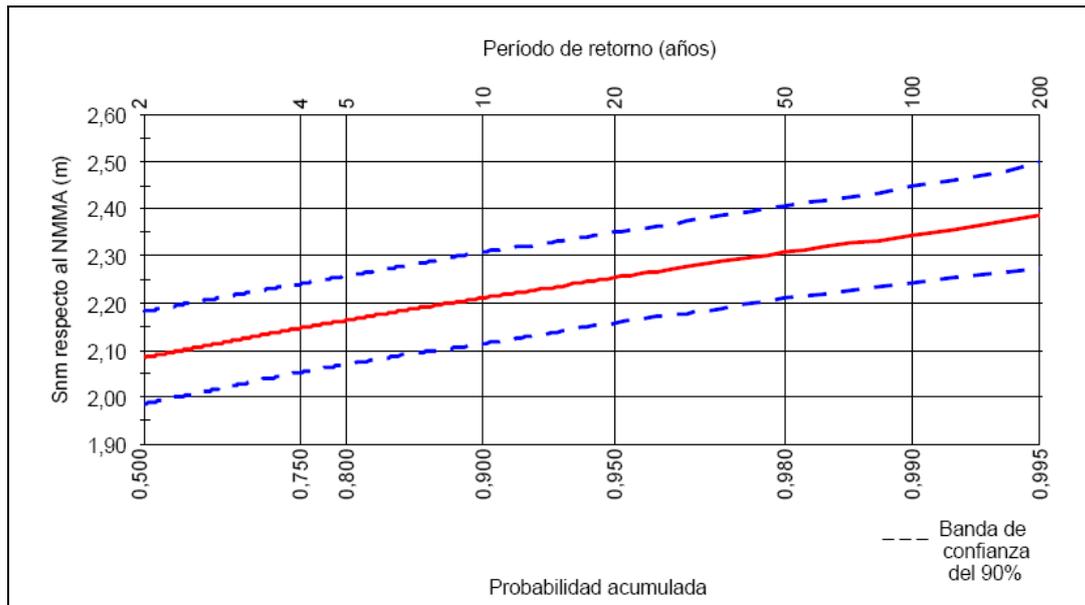


Figura 20: Régimen extremal del nivel del mar total en Cádiz. Probabilidad de no excedencia.

2.4. Régimen Medio de Carrera de Marea Astronómica en Cádiz

La función de distribución de probabilidad de carrera de marea en régimen medio se obtiene como sigue:

- A partir de las componentes armónicas de Cádiz y el programa TidePreview se genera una serie temporal de marea para un periodo de 50 años. En la Figura 21 se muestra, como ejemplo, la serie temporal para 2 años y en la Tabla 13 se presentan las componentes armónicas utilizadas.

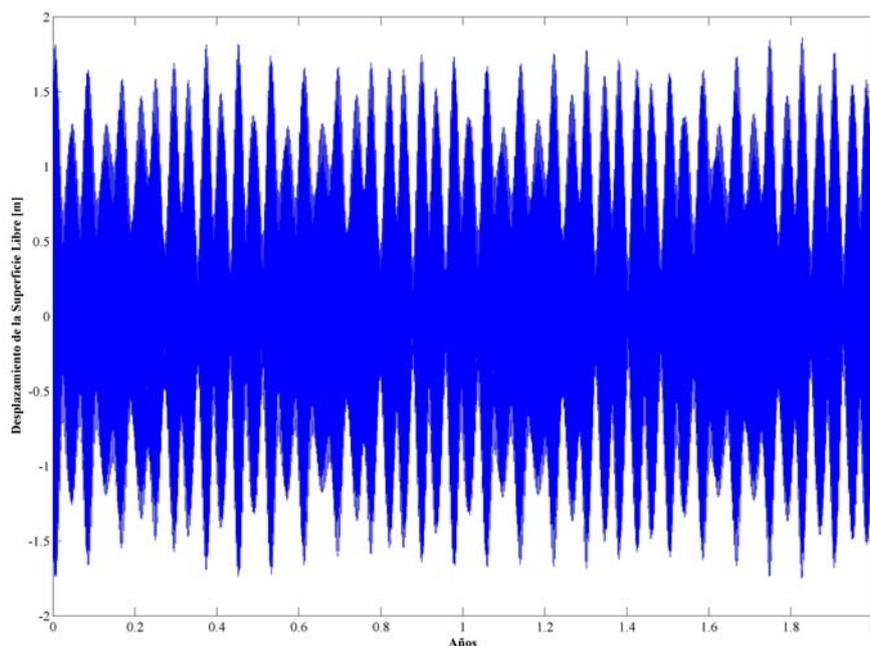


Figura 21. Serie temporal de la elevación de la superficie libre obtenida con el programa Tide Preview para 2 años



Tabla 13. Listado de armónicos de marea utilizados para la predicción con el programa Tide Preview

ARMONICOS DE MAREA					
Situación 36°32'N 06°17'W					
Código del Armónico	Frecuencia (ciclos/hora)	Amplitud (m)	Fase (°)	Frec ang (°/h)	Periodo (h)
Z0	0.000	2.0015	0	0	-
MSF	0.003	0.0217	78.51	1.015896	354.3669824
Q1	0.037	0.018	237.97	13.39866	26.86835848
RHO1	0.037	0.0045	258.55	13.47151	26.72306223
O1	0.039	0.0675	301.96	13.94304	25.81933352
P1	0.042	0.0204	43.78	14.95893	24.06589241
K1	0.042	0.0688	43.08	15.04107	23.93446743
2N2	0.077	0.0294	17.33	27.89536	12.90537208
MU2	0.078	0.0384	24.86	27.96821	12.8717569
N2	0.079	0.2212	42.08	28.43973	12.65834802
NU2	0.079	0.0401	60.45	28.51258	12.62600578
M2	0.081	1.0563	60.22	28.9841	12.42060302
LDA2	0.082	0.0113	47.71	29.45563	12.2217722
L2	0.082	0.0114	85.12	29.52848	12.19161975
S2	0.083	0.3839	88.01	30	12
K2	0.084	0.0985	84.54	30.08214	11.96723371
MSN2	0.085	0.0027	288.72	30.54437	11.78613276
MO3	0.119	0.0004	187.57	42.92714	8.386302931
M3	0.121	0.0038	258.75	43.47616	8.280400109
MK3	0.122	0.003	128.1	44.02517	8.177140486
SK3	0.125	0.0022	19.22	45.04107	7.992705324
MN4	0.160	0.0078	116.92	57.42383	6.269174313
M4	0.161	0.0203	163.13	57.96821	6.210300439
SN4	0.162	0.0023	259.86	58.43973	6.160192732
MS4	0.164	0.0079	337.06	58.9841	6.103339714
MK4	0.164	0.0034	63.35	59.06624	6.094852152
S4	0.167	0.0044	40.03	60	6
SK4	0.167	0.0043	51.63	60.08214	5.99179723
2MN6	0.240	0.0036	91.33	86.40794	4.166283793
M6	0.242	0.005	110.31	86.95232	4.140200054
2MS6	0.244	0.0053	168.57	87.96821	4.092387466
2MK6	0.245	0.0035	232.41	88.05035	4.088569779
2SM6	0.247	0.0028	16.71	88.98411	4.045666131
MSK6	0.247	0.0023	253.06	89.06624	4.04193553

- Para el análisis de la serie temporal se hacen las siguientes consideraciones:
 - Se determinan alturas individuales, H_i , de las ondas de marea del registro aplicando el método de pasos ascendentes por cero.
 - La altura de marea corresponde al doble de la amplitud, es decir $H_i = 2a_i$, donde a es la amplitud de la marea. Así, se obtiene una serie de alturas de marea H_i para el registro de 50 años.



- La serie de alturas de marea obtenida se ordena y se agrupa en rangos determinando su probabilidad de ocurrencia. La función de distribución de probabilidad correspondiente al régimen medio se muestra en la Figura 22.

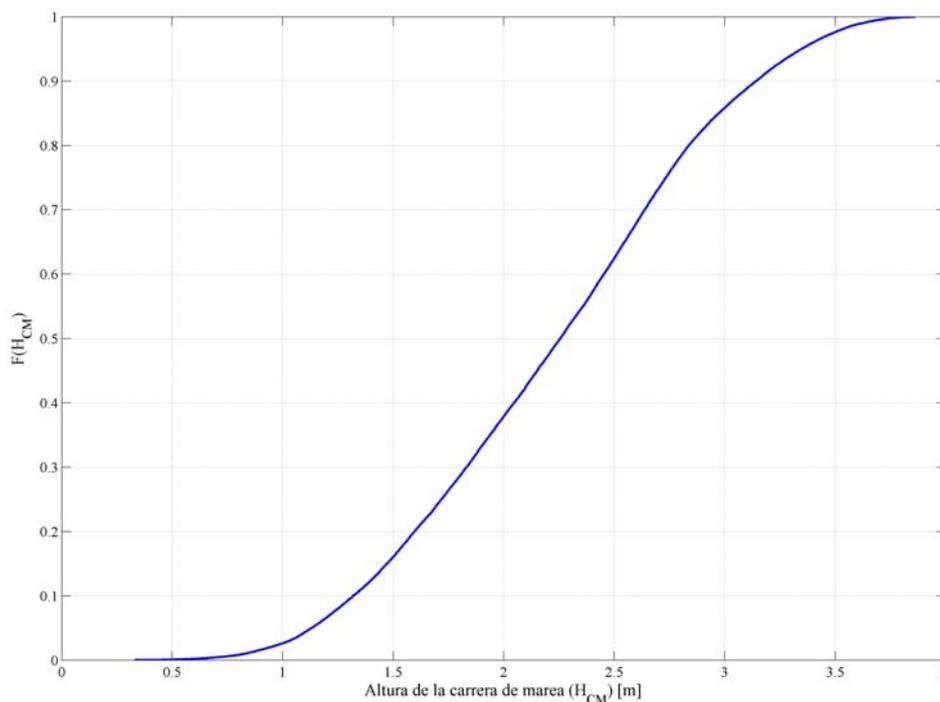


Figura 22. Función de distribución de probabilidad de alturas de carrera de marea en el Puerto de Cádiz, régimen medio.

2.5. Régimen Extremal de Carrera de Marea Astronómica en Cádiz

El régimen extremal de carrera de marea se obtiene como sigue:

- De la serie temporal de 50 años generada con el programa Tide Preview se elige, de cada año, la máxima altura de carrera de marea.
- Las alturas máximas se ordenan y se le aplica la técnica de punteo definida como

$$F(i) = \frac{i}{N+1}$$

donde i corresponde a la posición del dato y N es el número total de datos.

- La función de distribución para el régimen extremal de las alturas de marea en el Puerto de Cádiz se muestra en la Figura 23.

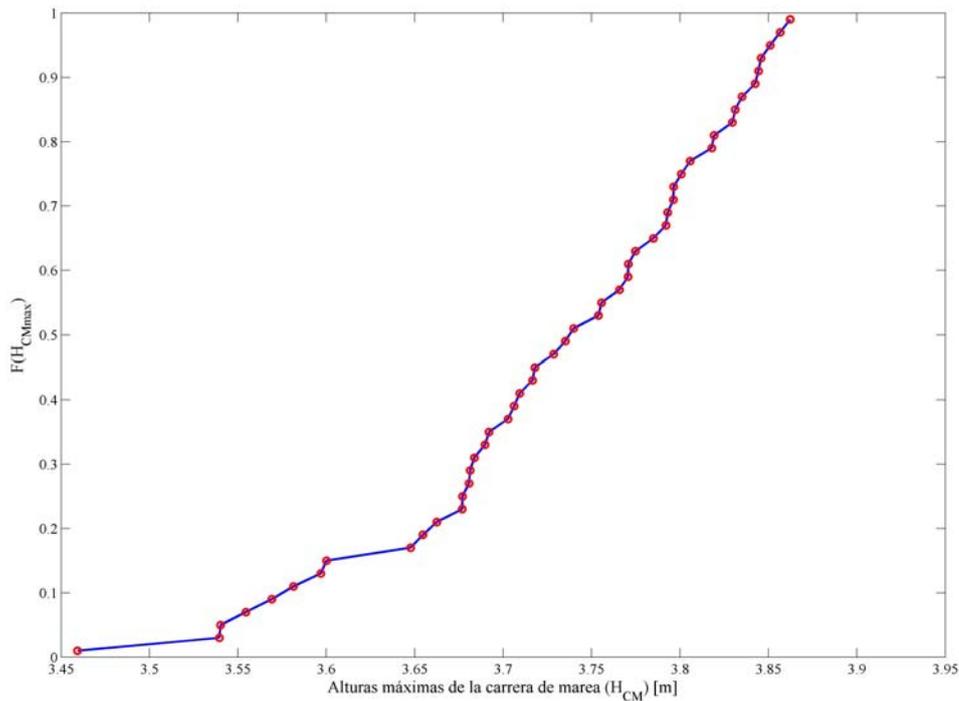


Figura 23. Régimen extremal de carrera de marea en el Puerto de Cádiz.

2.6. Marea Meteorológica

A continuación se adjuntan dos figuras en las que aparecen las relaciones de dependencia de marea meteorológica (mareógrafo de Huelva)-altura de ola significativa (boya de Cádiz) y altura de ola significativa (boya de Cádiz)-periodo de pico (boya de Cádiz). En ambos casos, se asume que la marea meteorológica (o el periodo de pico) condicionados a un determinado valor de altura de ola significativa son variables normales cuyas medias y desviaciones típicas aparecen en las figuras y son función del valor de altura de ola significativa. En ambos casos, se han ajustado los datos a polinomios de grado 2 (las medias) y de grado 3 (las desviaciones típicas).

En la Figura 24 se observa que no cuando se obtuvo la relación entre la marea meteorológica y la altura de ola significativa no existían datos para alturas de ola superiores a 5 m. Por este motivo, la aplicación de esta relación para alturas de ola superiores a este valor suministra datos de marea meteorológica más elevados de lo esperado. Se ha solicitado a Puertos del Estado datos adicionales para realizar un nuevo análisis de los mismos y obtener una nueva relación que suministre datos más fiables para alturas de ola esperables bajo condiciones de trabajo extremas.

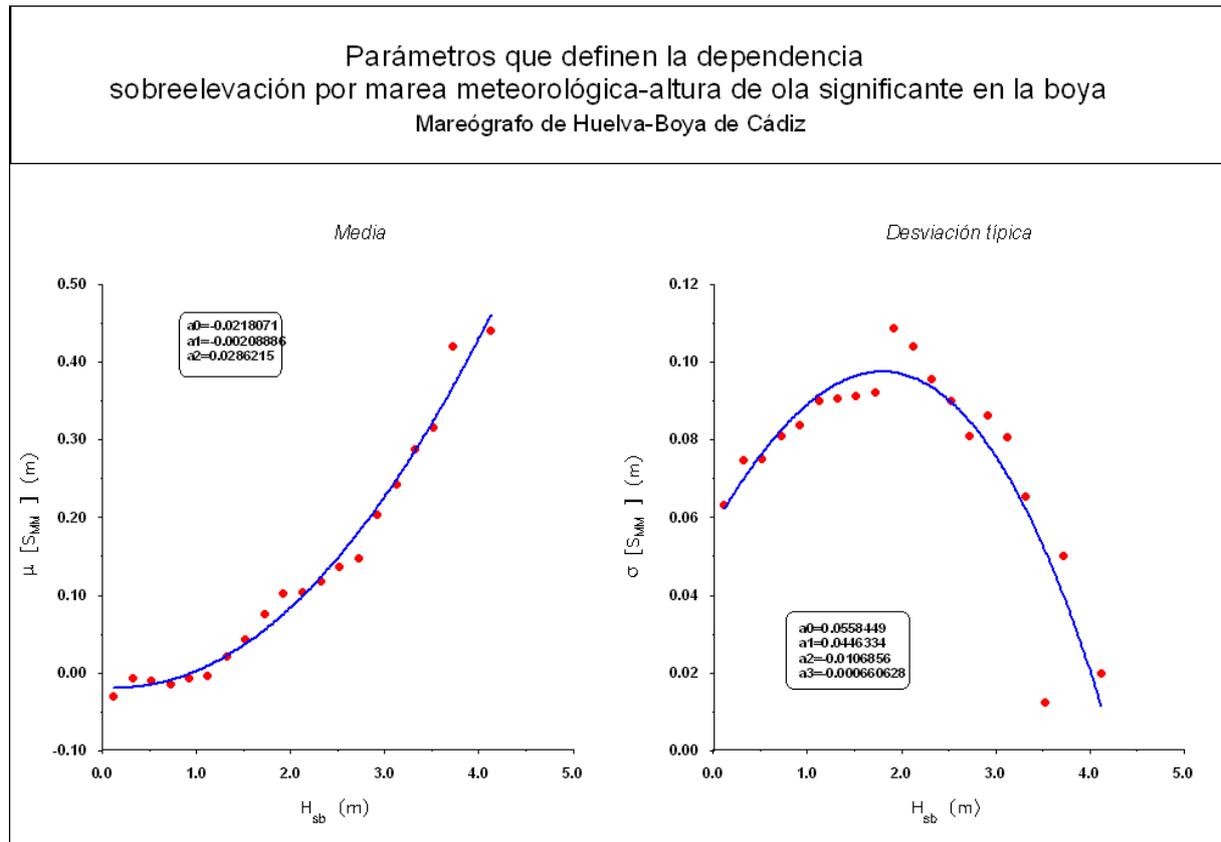


Figura 24: Dependencia entre marea meteorológica y altura de ola significativa.

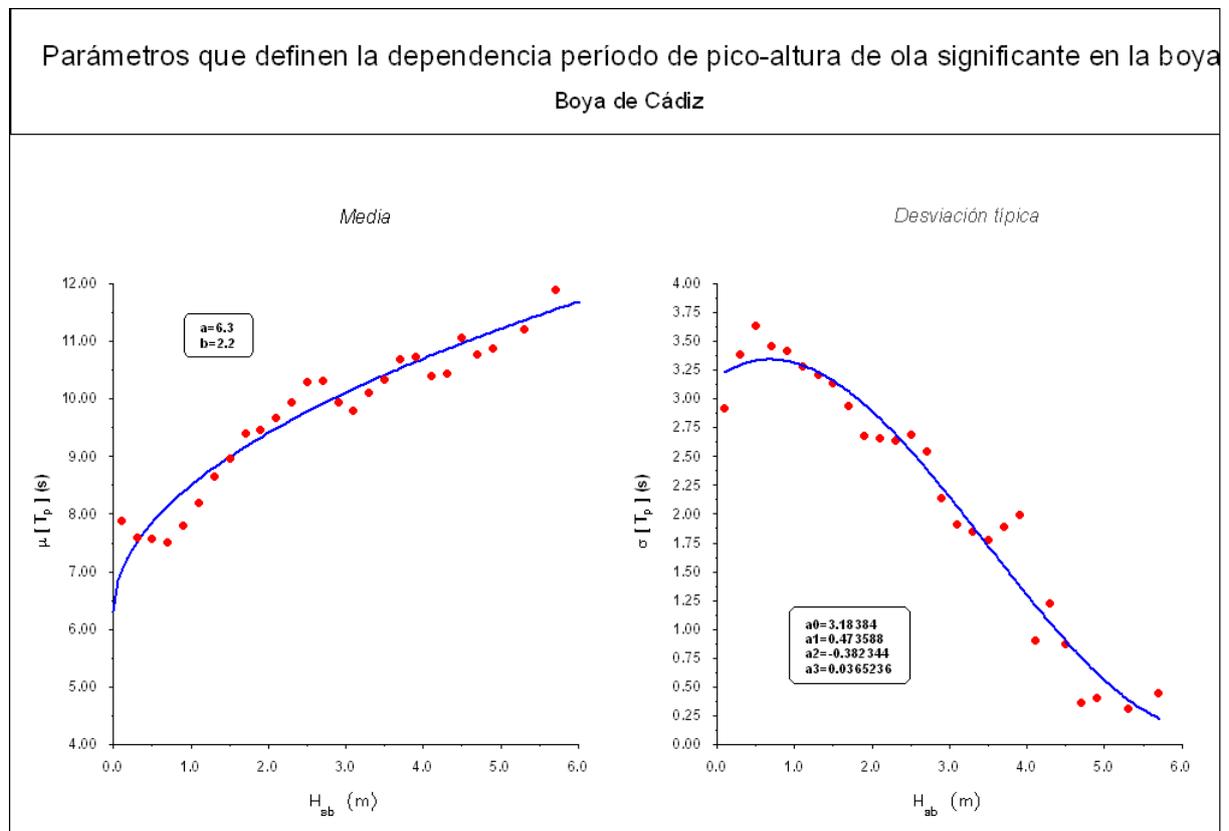


Figura 25: Dependencia entre el periodo de pico y altura de ola significativa.



3. VIENTO: REGISTRO WANA

3.1. Fuentes de datos

En esta sección se analizan los datos de velocidad y dirección de viento correspondientes al punto WANA 1054046, de coordenadas 36.5° N, 3.5° W, suministrados por Puertos del Estado, siendo éstos el resultado de un modelo numérico. Se ha analizado la misma serie temporal usada para la elaboración de los regímenes de oleaje, es decir, se han analizado los datos entre las 15:00 horas del 22 de Octubre de 1995 y las 00:00 horas del 28 de Noviembre de 2006. La información suministrada consiste en la velocidad y dirección media del viento en intervalos de 3 horas.

3.2. Descripción general

A continuación se muestran una serie de tablas y gráficos que pretenden dar una descripción general de las características del viento en la zona de estudio. Posteriormente se elaborarán los regímenes medios y extremales.

Se observa que los vientos reinantes son los procedentes de los sectores E y W con persistencias superiores al 15%. Las velocidades medias máximas no superan los 20 m/s en el periodo de tiempo analizado y proceden de las direcciones reinantes E y W.

En el siguiente gráfico se muestra la dispersión de los datos durante el periodo de análisis considerado.

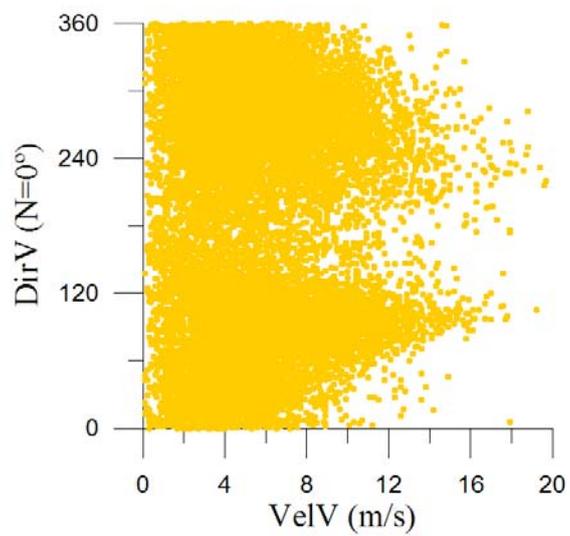


Figura 26. Gráfico de dispersión velocidad del viento – dirección del viento.



VELOCIDAD DEL VIENTO - DIRECCIÓN DEL VIENTO																	
VelV (m/s)	DirV																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0-1.0	0.188	0.120	0.143	0.104	0.114	0.162	0.084	0.175	0.123	0.068	0.114	0.117	0.104	0.162	0.211	0.133	2.124
1.0-2.0	0.383	0.435	0.465	0.348	0.393	0.341	0.416	0.279	0.198	0.263	0.253	0.383	0.500	0.497	0.465	0.429	6.048
2.0-3.0	0.689	0.633	0.578	0.685	0.601	0.611	0.497	0.260	0.305	0.283	0.494	0.637	0.848	0.903	0.880	0.825	9.729
3.0-4.0	0.754	0.529	0.776	0.945	0.867	0.799	0.315	0.263	0.315	0.328	0.575	0.884	1.254	1.355	1.225	0.796	11.980
4.0-5.0	0.659	0.526	0.682	0.926	1.338	1.059	0.461	0.315	0.208	0.335	0.565	0.962	1.647	1.579	1.228	0.887	13.377
5.0-6.0	0.546	0.552	0.555	0.893	1.397	0.994	0.374	0.244	0.253	0.247	0.497	1.095	1.900	1.549	1.147	0.734	12.977
6.0-7.0	0.478	0.328	0.546	0.711	1.286	0.841	0.273	0.188	0.175	0.224	0.452	0.793	1.338	1.559	1.000	0.672	10.866
7.0-8.0	0.234	0.234	0.377	0.698	1.481	0.893	0.260	0.156	0.140	0.257	0.416	0.718	1.436	1.095	0.871	0.393	9.657
8.0-9.0	0.214	0.156	0.273	0.656	1.296	0.676	0.231	0.107	0.143	0.175	0.377	0.390	0.893	0.841	0.679	0.244	7.351
9.0-10.0	0.052	0.071	0.153	0.435	1.072	0.575	0.114	0.088	0.081	0.172	0.250	0.335	0.607	0.562	0.367	0.133	5.067
10.0-11.0	0.052	-	0.091	0.416	0.809	0.510	0.182	0.101	0.094	0.094	0.195	0.400	0.484	0.403	0.198	0.117	4.145
11.0-12.0	0.006	0.019	0.026	0.237	0.539	0.286	0.091	0.049	0.058	0.094	0.166	0.244	0.305	0.214	0.143	0.052	2.530
12.0-13.0	0.006	0.019	0.026	0.117	0.416	0.253	0.045	0.013	0.019	0.058	0.156	0.156	0.214	0.084	0.071	0.013	1.670
13.0-14.0	0.006	0.006	0.013	0.052	0.286	0.136	0.071	0.049	0.006	0.081	0.088	0.169	0.110	0.058	0.013	0.006	1.153
14.0-15.0	0.013	0.006	0.006	-	0.123	0.088	0.026	0.013	0.006	0.081	0.065	0.078	0.071	0.026	0.013	0.013	0.630
15.0-16.0	-	-	-	-	0.071	0.071	0.013	-	0.019	0.013	0.032	0.019	0.026	0.026	0.006	-	0.299
16.0-17.0	-	-	-	-	0.026	0.026	-	-	0.013	0.026	0.026	0.026	0.026	0.006	-	-	0.175
17.0-18.0	0.006	-	-	-	0.019	0.019	0.006	-	0.019	0.013	0.052	0.013	0.006	-	-	-	0.156
18.0-19.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.013	0.019	-	0.006	-	-	0.039
19.0-20.0	-	-	-	-	-	0.006	-	-	-	-	0.019	-	-	-	-	-	0.026
TOTAL	4.288	3.638	4.710	7.224	12.136	8.348	3.459	2.300	2.180	2.813	4.804	7.435	11.772	10.927	8.517	5.447	100.000

Tabla 14. Velocidad media del viento – dirección de incidencia (%).

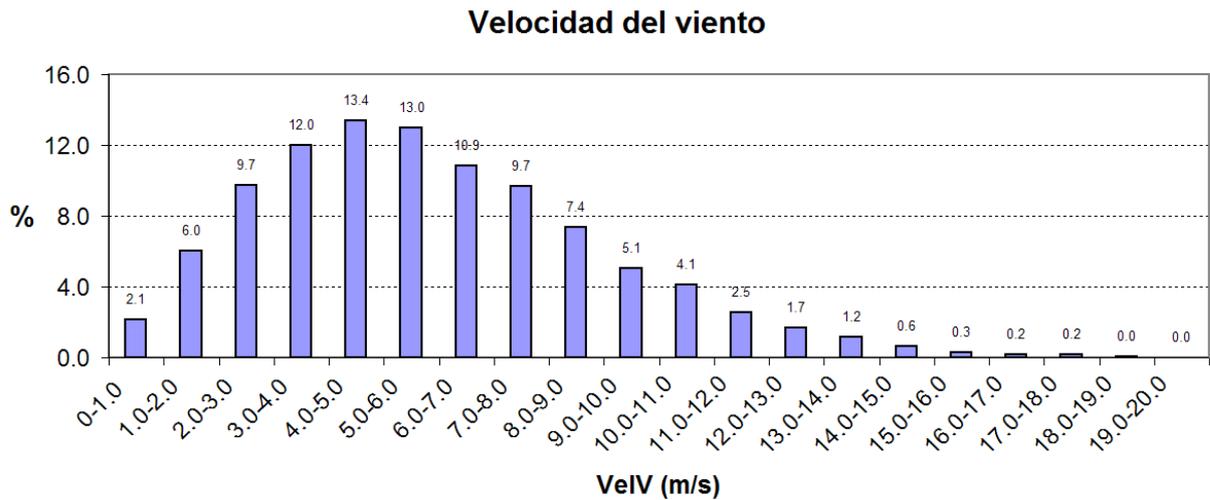


Figura 27. Histograma velocidad media del viento.

Las direcciones y sectores en las que se han dividido los datos para el análisis direccional se indican en la siguiente tabla.

Dirección	Sector	Porcentaje del tiempo %
N	$348.75^\circ < \theta \leq 11.25^\circ$	4.29
NNE	$11.25^\circ < \theta \leq 33.75^\circ$	3.64
NE	$33.75^\circ < \theta \leq 56.25^\circ$	4.71
ENE	$56.25^\circ < \theta \leq 78.75^\circ$	7.22
E	$78.75^\circ < \theta \leq 101.25^\circ$	12.14
ESE	$101.25^\circ < \theta \leq 123.75^\circ$	8.35
SE	$123.75^\circ < \theta \leq 146.25^\circ$	3.46
SSE	$146.25^\circ < \theta \leq 168.75^\circ$	2.30
S	$168.75^\circ < \theta \leq 191.25^\circ$	2.18
SSW	$191.25^\circ < \theta \leq 213.75^\circ$	2.81
SW	$213.75^\circ < \theta \leq 236.25^\circ$	4.80
WSW	$236.25^\circ < \theta \leq 258.75^\circ$	7.44
W	$258.75^\circ < \theta \leq 281.25^\circ$	11.77
WNW	$281.25^\circ < \theta \leq 303.75^\circ$	10.93
NW	$303.75^\circ < \theta \leq 326.25^\circ$	8.52
NNW	$326.25^\circ < \theta \leq 348.75^\circ$	5.45

Tabla 15. Sector direccional del viento – porcentaje de tiempo (%) considerado para la elaboración de los regímenes medios.



Figura 28. Histograma dirección media del viento.

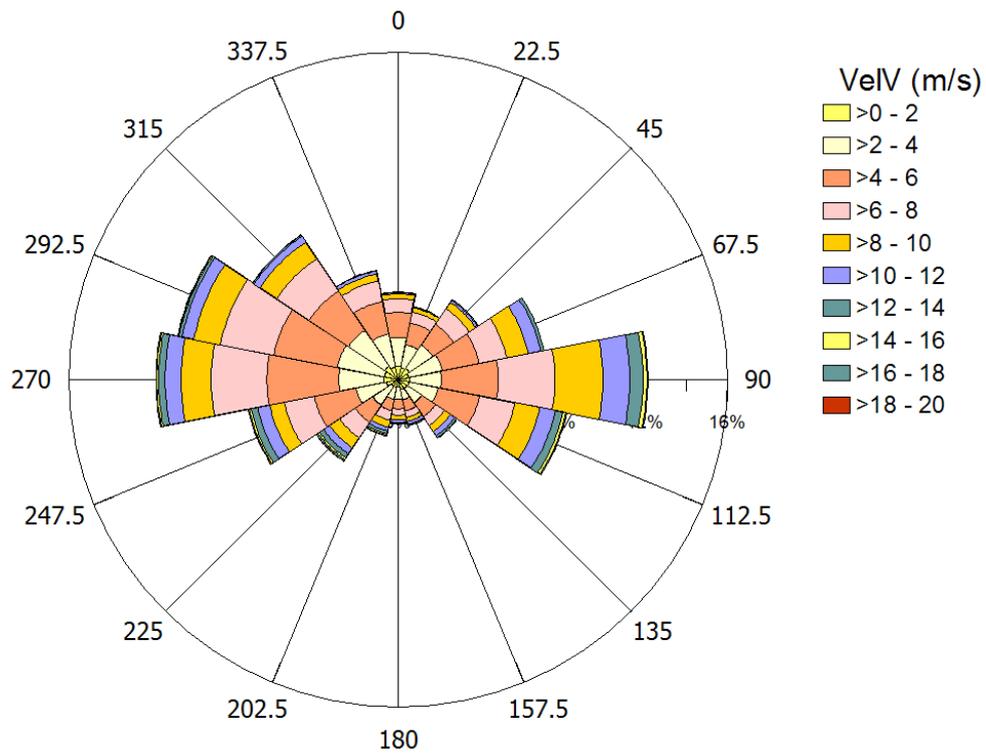


Figura 29. Rosa de viento. 0 = Norte, 90 = Este.



3.3. Regímenes medios direccionales y escalar

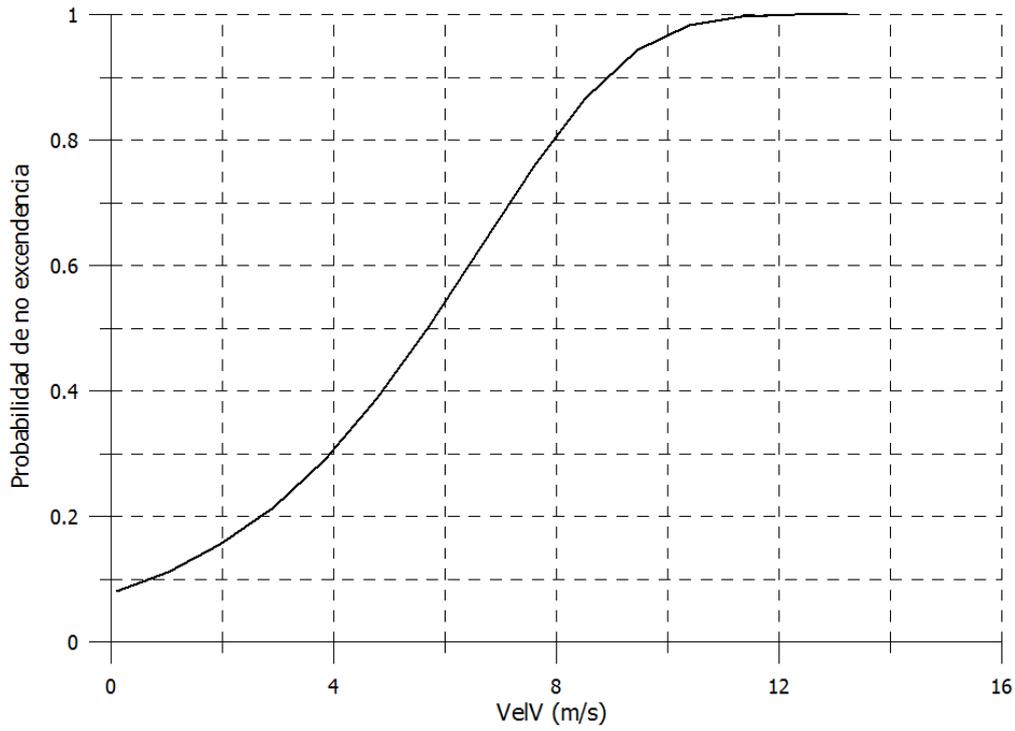


Figura 30. Probabilidad de no excedencia para el régimen medio escalar de viento.

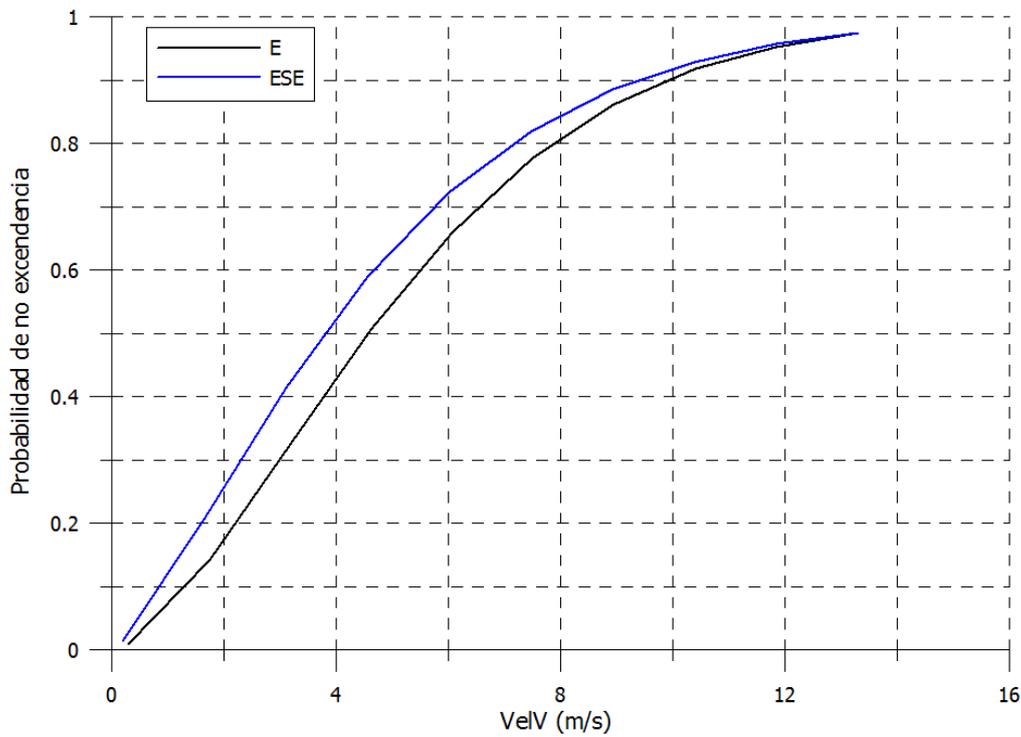


Figura 31. Probabilidad de no excedencia para el régimen medio de viento considerando las direcciones E y ESE.

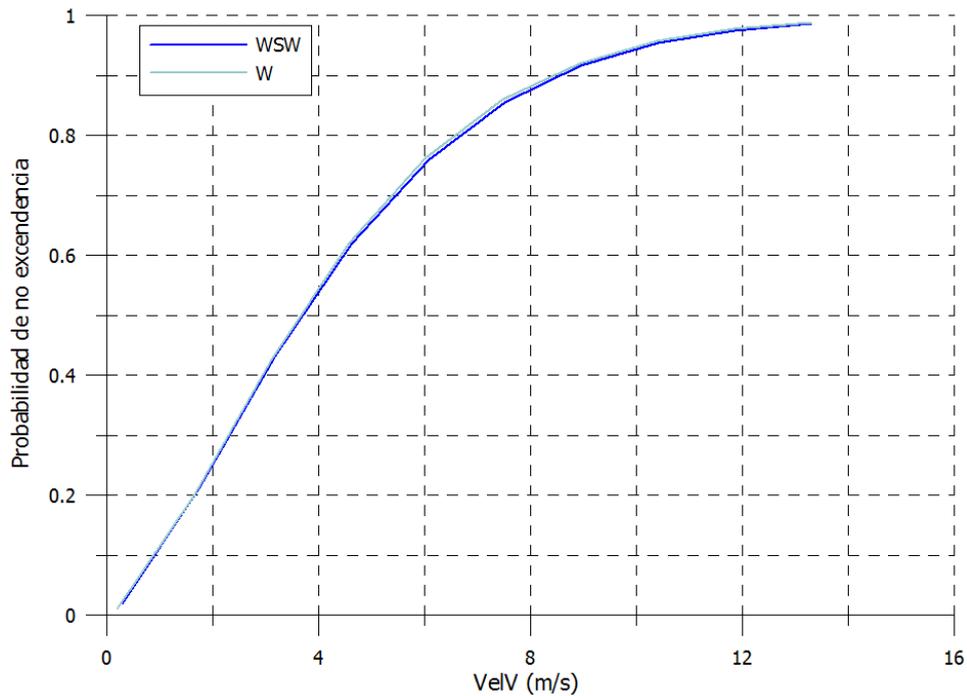


Figura 32. Probabilidad de no excedencia para el régimen medio de viento considerando las direcciones W y WSW.

3.4. Regímenes extremos direccionales y escalar

Los regímenes extremos se han elaborado utilizando el valor de la máxima velocidad de viento anual para cada una de las direcciones analizadas, en el caso de los regímenes direccionales, y de todos los datos en el caso del régimen escalar.

Los datos han sido ajustados por el método de mínimos cuadrados a varias distribuciones teóricas de valores extremos, eligiéndose para cada caso la que presentaba el mejor ajuste. A continuación se presenta una tabla con el tipo de distribución y los parámetros de ajuste para cada caso.

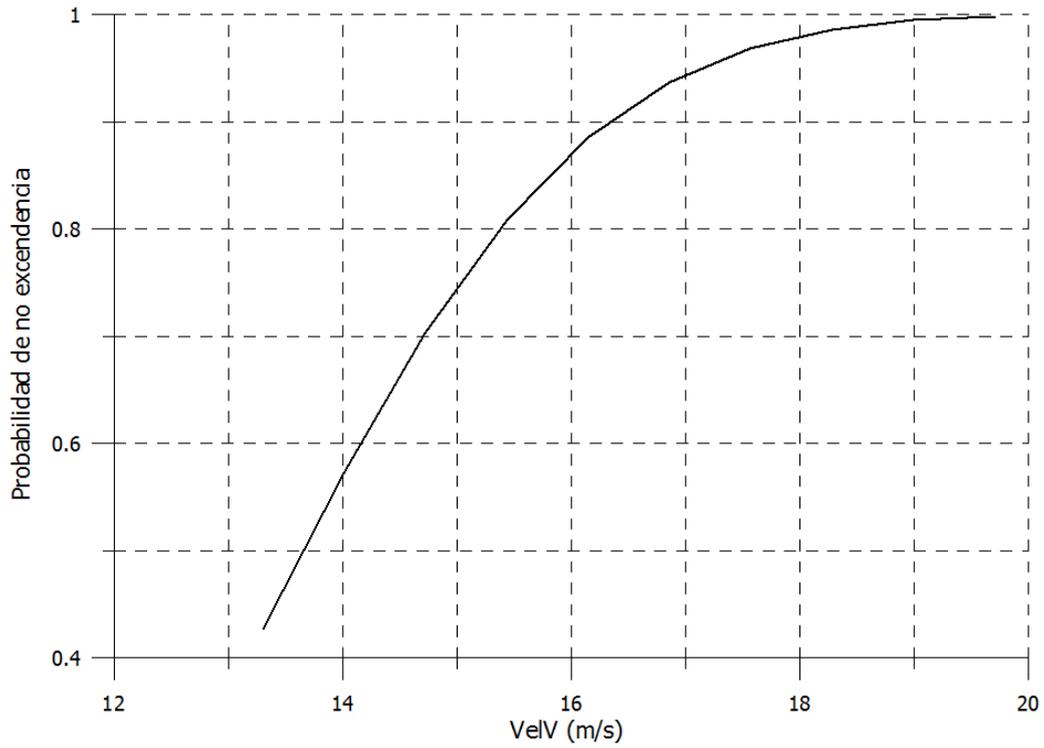


Figura 33. Probabilidad de no excedencia para el régimen extremal escalar de viento

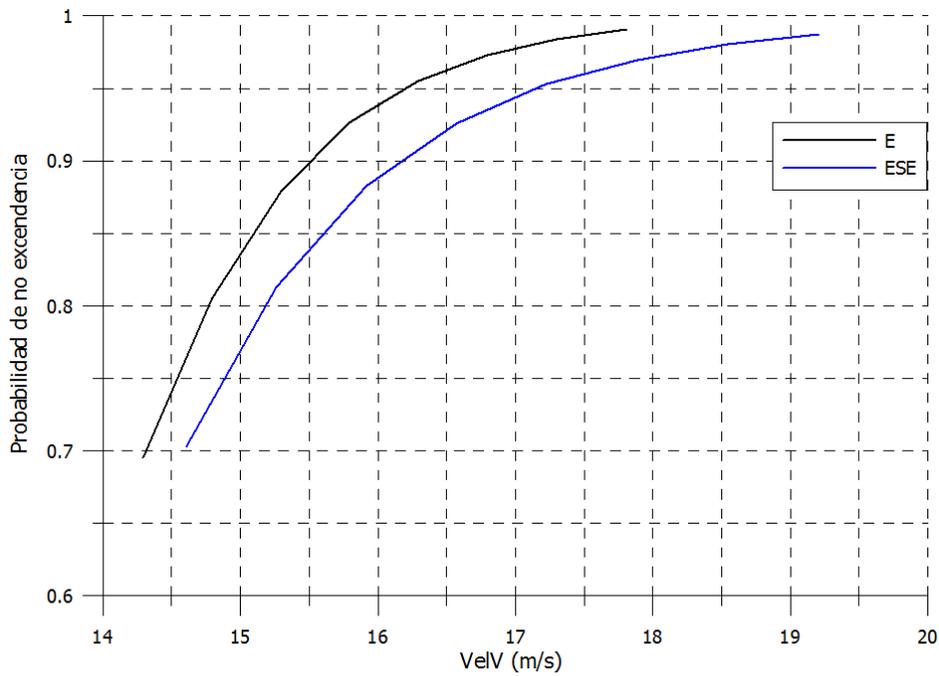


Figura 34. Probabilidad de no excedencia para el régimen extremal de viento considerando las direcciones E y ESE.

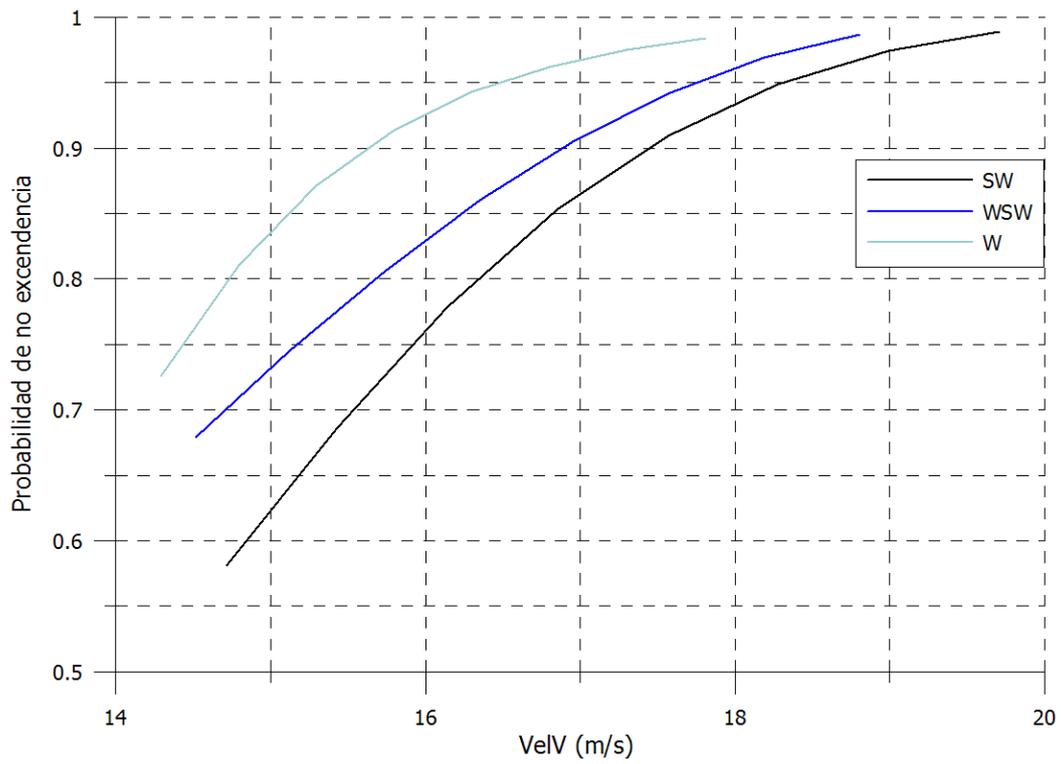


Figura 35. Probabilidad de no excedencia para el régimen extremo de viento considerando las direcciones SW, WSW y W.

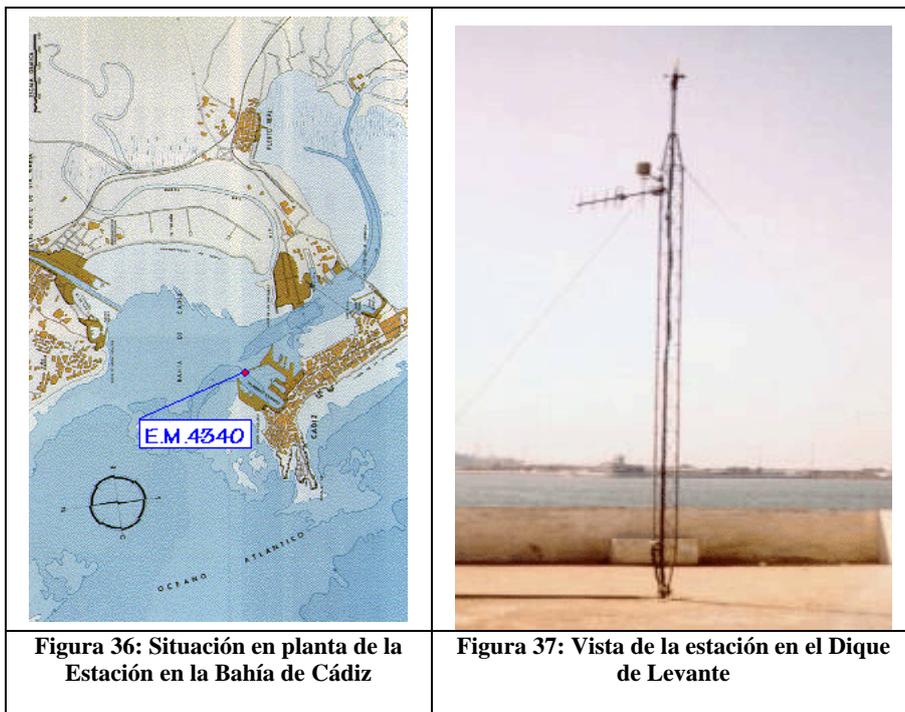


4. VIENTO: ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Los datos de viento analizados en esta sección han sido los proporcionados por Puertos del Estado y obtenidos por la Estación Meteorológica 4340, en la Bahía de Cádiz, de coordenadas (36°32' N, 6°16' W). Esta estación está ubicada en el morro del Dique de Levante del Puerto de Cádiz. El anemómetro se encuentra situado a una altura de 13.5 m.

La instalación de esta estación se produjo en Enero de 1998, por lo que la cobertura de los datos comprende el periodo 1998-2006. De estos años se ha empleado para este estudio la información correspondiente a velocidad media y dirección media anuales.

A partir de los datos disponibles de velocidad media de viento y dirección media de procedencia, se han obtenido las probabilidades de ocurrencia para cada sector direccional de 22.5°, Tabla 16.



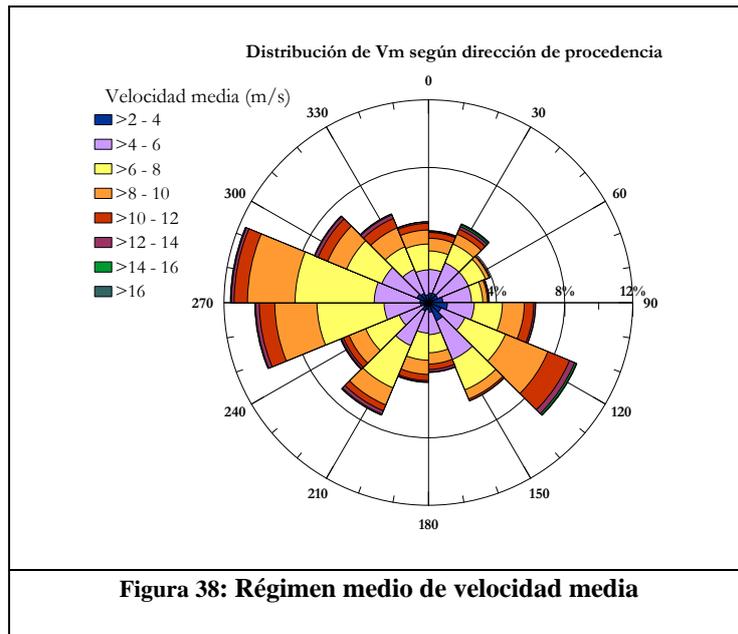


Dirección	Sector	Probabilidad
N	$348.75 < \theta \leq 11^{\circ}25$	0,045
NNE	$11^{\circ}25 < \theta \leq 33^{\circ}75$	0,040
NE	$33^{\circ}75 < \theta \leq 56^{\circ}25$	0,048
ENE	$56^{\circ}25 < \theta \leq 78^{\circ}75$	0,037
E	$78^{\circ}75 < \theta \leq 101^{\circ}25$	0,034
ESE	$101^{\circ}25 < \theta \leq 123^{\circ}75$	0,059
SE	$123^{\circ}75 < \theta \leq 146^{\circ}25$	0,089
SSE	$146^{\circ}25 < \theta \leq 168^{\circ}75$	0,059
S	$168^{\circ}75 < \theta \leq 191^{\circ}25$	0,039
SSW	$191^{\circ}25 < \theta \leq 213^{\circ}75$	0,045
SW	$213^{\circ}75 < \theta \leq 236^{\circ}25$	0,068
WSW	$236^{\circ}25 < \theta \leq 258^{\circ}75$	0,053
W	$258^{\circ}75 < \theta \leq 281^{\circ}25$	0,096
WNW	$281^{\circ}25 < \theta \leq 303^{\circ}75$	0,110
NW	$303^{\circ}75 < \theta \leq 326^{\circ}25$	0,069
NNW	$326^{\circ}25 < \theta \leq 348^{\circ}75$	0,054
Calmas	-	0,055

Tabla 16. Probabilidad de ocurrencia de velocidad media del viento para cada sector direccional.

A continuación se adjunta la rosa de viento del parámetro velocidad media de viento y la función de densidad de probabilidad conjunta de los parámetros velocidad media y dirección media de procedencia.

La Tabla 17 recoge la probabilidad conjunta de velocidad media del viento y dirección de procedencia como resultado de los datos de viento del periodo 1998-2005 proporcionados por Puertos del Estado.

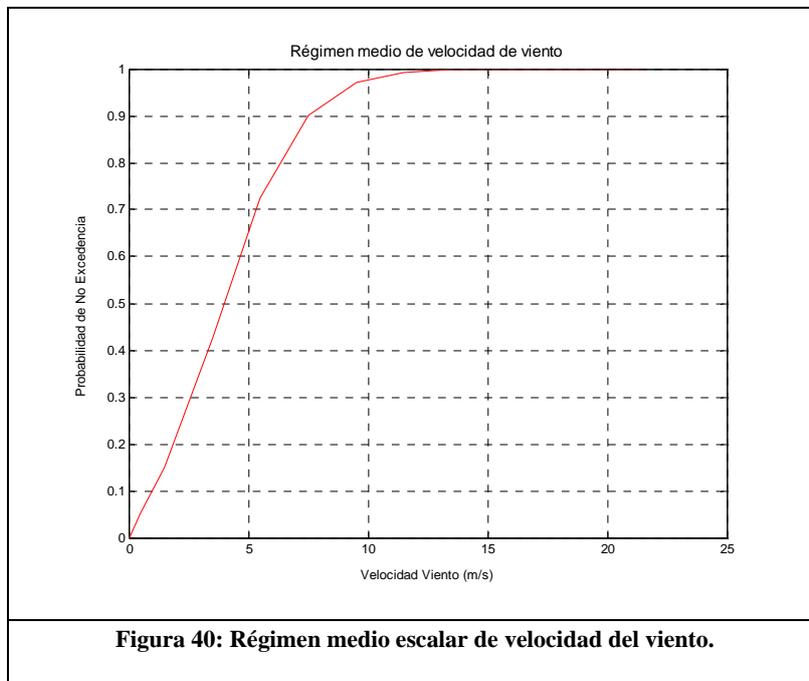
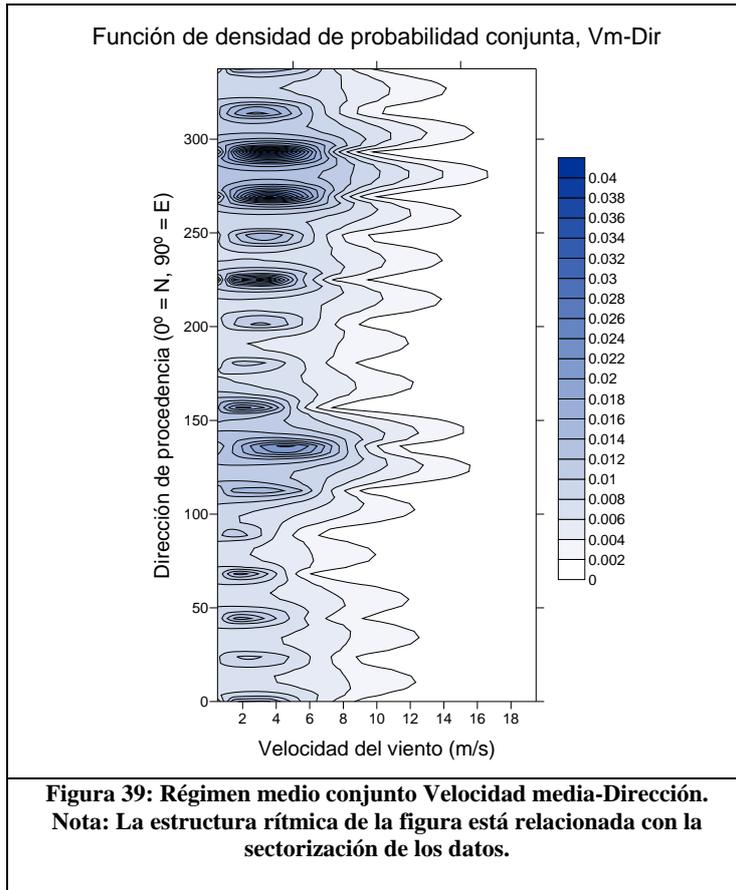




Dirección	Velocidad media (m/s)									
	1-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
0	0.44	1.39	1.45	0.78	0.38	0.08	0.01	0.003	0.00	0.00
22°5	0.54	1.32	1.03	0.72	0.32	0.05	0.03	0.013	0.001	0.00
45°	0.58	1.82	1.14	0.61	0.30	0.16	0.12	0.052	0.01	0.001
67°5	0.57	1.84	1.03	0.21	0.02	0.01	0.00	0.001	0.001	0.00
90°	0.79	1.60	0.62	0.26	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
112°5	1.05	1.49	1.57	1.22	0.52	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00
135°	0.76	1.43	2.45	2.56	1.29	0.30	0.11	0.031	0.003	0.00
157°5	1.10	2.30	1.85	0.55	0.10	0.025	0.00	0.00	0.00	0.00
180°	0.54	1.25	1.02	0.62	0.30	0.127	0.026	0.003	0.005	0.00
202°5	0.39	1.31	1.52	0.79	0.34	0.075	0.028	0.005	0.00	0.00
225°	0.49	2.10	2.57	1.03	0.36	0.197	0.061	0.002	0.00	0.00
247.5	0.39	1.47	2.02	1.00	0.34	0.112	0.043	0.012	0.002	0.00
270	0.452	2.01	3.73	2.35	0.86	0.195	0.047	0.001	0.00	0.00
292.5	0.472	2.54	4.41	2.65	0.74	0.149	0.045	0.006	0.00	0.00
315	0.68	2.12	2.12	1.14	0.58	0.186	0.038	0.005	0.001	0.001
337.5	0.58	1.44	1.38	1.15	0.57	0.216	0.052	0.007	0.00	0.00

Tabla 17. Probabilidad conjunta Velocidad viento – Dirección (en %)





ANEXO IV

PROPAGACIONES DE OLEAJE

ÍNDICE

ÍNDICE	2
1.INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2.METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	2
2.1. Descripción del modelo Oluca-SP.....	2
2.2. Descripción de la batimetría	2
2.3. Características de las mallas.....	3
2.4. Procedimiento de propagación – Tabla de casos	5
3.RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN.....	7
3.1. Salidas gráficas	7
3.2. Coeficientes de propagación.....	15
3.3. Regímenes medios de oleaje	17
3.4. Regímenes extremos de oleaje	25
4.ANEJO 1 – MODELO OLUCA-SP.....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	54



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El oleaje sufre distintas transformaciones en su proceso de propagación desde profundidades indefinidas hacia la costa. Estas transformaciones pueden afectar tanto la altura de la ola como su dirección, por lo que los regímenes de ola calculados en profundidades indefinidas difieren, en general, de aquellos calculados en profundidades intermedias y reducidas.

Dado que tanto los muelles del Puerto de Cádiz como su canal de acceso se encuentran a profundidades intermedias (entre 10 y 15 m de profundidad) y que los datos de oleaje de que se dispone son asimilables a profundidades indefinidas, se plantea la necesidad de propagar el oleaje de modo de tener en cuenta las transformaciones que sufre el mismo.

Los objetivos específicos de la propagación son la obtención de los regímenes medio y extremal de altura de ola en aguas de profundidad intermedia, en la zona de entrada al canal de acceso al puerto, y la obtención de condiciones de contorno que permitan el posterior cálculo de la agitación portuaria generada por ondas cortas.

Es de destacar, que en la batimetría usada en las propagaciones de oleaje no se han considerado las operaciones de dragado y la batimetría final resultante, por lo que los resultados expresados en este anejo podrían verse alterados ligeramente.



2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. Descripción del modelo Oluca-SP

Para la propagación del oleaje se ha utilizado el modelo Oluca-SP, incluido en el Sistema de Modelado Costero (SMC) desarrollado por la Universidad de Cantabria en conjunto con el Ministerio de Medio Ambiente.

Este modelo es una adaptación para oleaje espectral del modelo REF-DIF, desarrollado inicialmente en la Universidad de Delaware, U.S.A. El modelo resuelve la forma parabólica de la ecuación de la pendiente suave e incorpora términos no lineales, simulación de la capa límite turbulenta o laminar y rugosidad por fondo, entre otros. Una descripción detallada del mismo puede encontrarse en el Anejo 1.

2.2. Descripción de la batimetría

La batimetría general interpolada de la zona de estudio se muestra en la Fig. 1. Los datos batimétricos fueron obtenidos de las cartas náuticas 443, 443A y 443B editadas por el Instituto Hidrográfico de la Marina y de información batimétrica suministrada por la Autoridad Portuaria Bahía de Cádiz.

Se observa que para profundidades mayores a 20 m la batimetría presenta una pendiente general en dirección SW-NE. En lo que respecta a la zona de la Bahía de Cádiz las profundidades son menores a 20 m y la forma general de la batimetría está dominada por la presencia del Bajo del Diamante y la Galera y el canal de acceso al puerto.

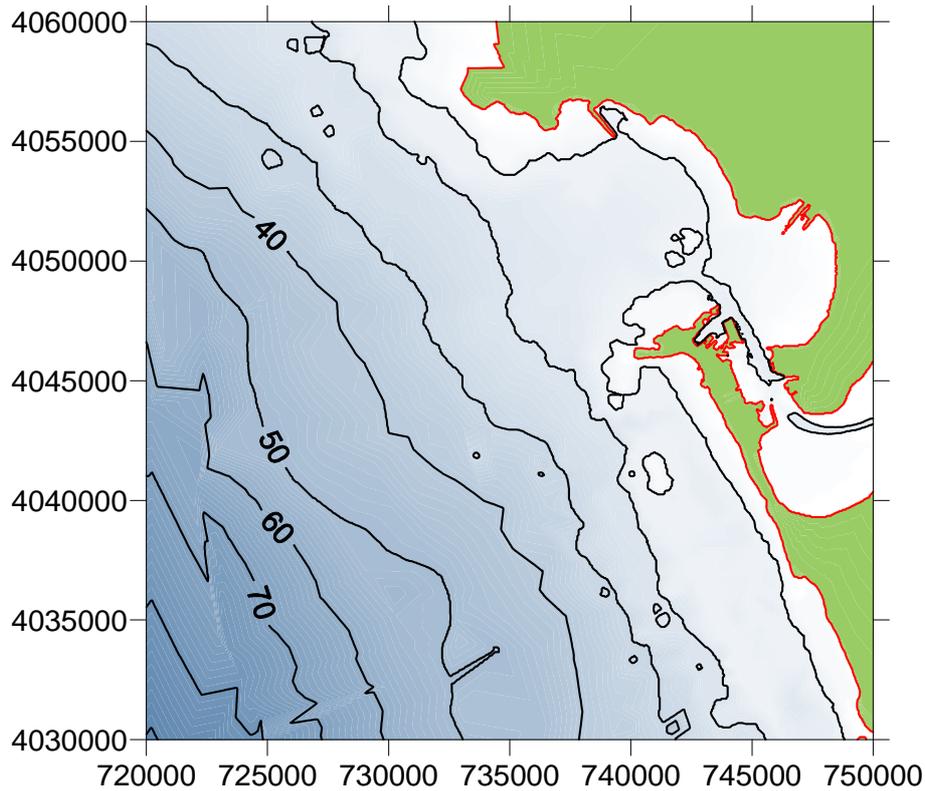


Fig. 1: Batimetría general del área de estudio.

2.3. Características de las mallas

En la propagación se utilizaron dos mallas anidadas, ambas con dirección general W-E. Las características de las mallas se muestran en la Tabla 1, mientras que en la Fig. 2 y la Fig. 3 se presenta una representación gráfica de las mismas.

Tabla 1: Características de las mallas usadas en la propagación.

Malla	Coordenadas origen (UTM)		Dirección	Dimensiones		Discretización n $\Delta X = \Delta Y$
	X	Y		X	Y	
A1	721.000	4.035.000	W-E	20.000 m	25.000 m	100 m
A2	741.000	4.046.200	W-E	8.000 m	10.300 m	25 m



Fig. 2: Mallas usadas en la propagación.

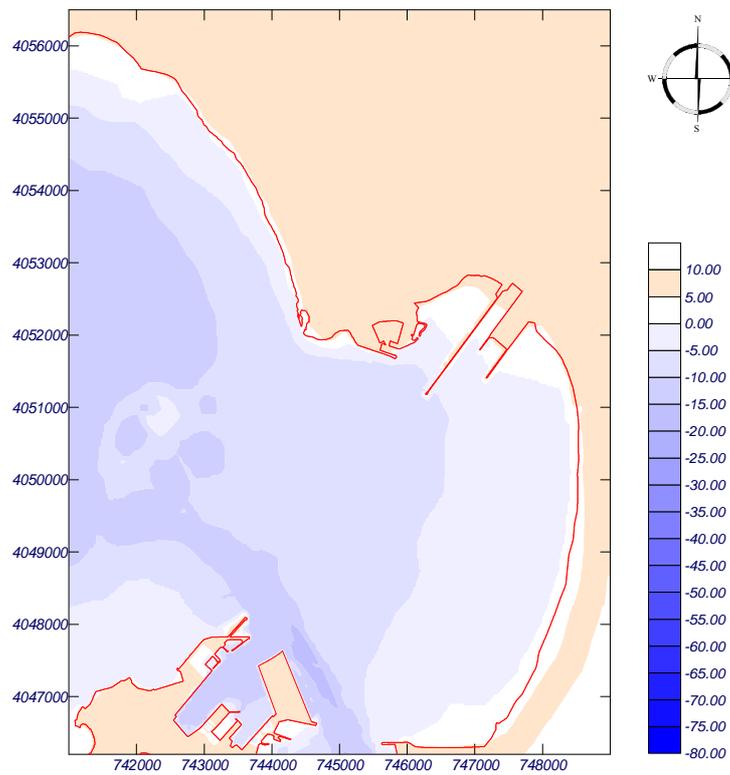


Fig. 3: Batimetría de la malla A2.



2.4. Procedimiento de propagación – Tabla de casos

El procedimiento seguido para obtener el oleaje en la zona de profundidades intermedias se puede resumir en dos grandes pasos. En primera instancia, partiendo de los regímenes medio y extremal obtenidos para el punto WANA 1054046 se seleccionaron algunos casos de oleaje representativos del clima marítimo de la zona (Tabla 2). Estos casos se propagaron numéricamente utilizando el modelo Oluca-SP. Luego, a partir de los resultados obtenidos con la propagación numérica se realiza una interpolación que permite transformar todos los datos de oleaje registrados en el punto WANA 1054046 a profundidades intermedias.

A su vez, los datos obtenidos de la propagación son usados en etapas posteriores de este estudio como condiciones de contorno de un modelo elíptico para el cálculo de la agitación portuaria por onda corta.

Tabla 2: Oleaje propagado con Oluca-SP.

Caso	Dirección	Altura de ola significante (m)	Período pico (s)
00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07	NW	1	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15	NW	2	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23	WNW	1	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31	WNW	2	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
32, 33	WNW	3	7, 11
34, 35	WNW	4	7, 11
36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43	W	1	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51	W	2	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
52, 53, 54, 55, 56, 57, 58	W	3	7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
59, 60, 61, 62, 63, 64, 65	W	4	7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
66, 67, 68	W	5	11, 15, 19
69, 70	W	6	11, 19
71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78	WSW	1	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86	WSW	2	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
87, 88, 89, 90, 91, 92	WSW	3	7, 9, 11, 13, 15, 19
93, 94, 95, 96, 97, 98	WSW	4	7, 9, 11, 13, 15, 19
99, A0, A1, A2	WSW	5	9, 11, 13, 15
A3, A4, A5, A6	WSW	6	9, 11, 13, 15
A7, A8, A9	WSW	7	11, 13, 19
B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7	SW	1	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
B8, B9, C0, C1, C2, C3, C4, C5	SW	2	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
C6, C7, C8, C9, D0, D1	SW	3	7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
D2, D3, D4, D5, D6, D7	SW	4	7, 9, 11, 13, 15, 17, 19
D8, D9, E0, E1	SW	5	9, 11, 13, 15
E2, E3, E4, E5	SW	6	9, 11, 13, 15
E76, E7, E8	SW	7	11, 13, 19



Todas las propagaciones se hicieron con parámetro de dispersión angular $\Theta=15^\circ$, con coeficiente de pico espectral $\gamma=3,3$ y con una discretización del espectro direccional de ocho componentes de dirección por ocho componentes de frecuencia.

Adicionalmente, se han propagado 3 casos representativos de estados de mar correspondientes a eventos extremales, con alturas de ola significativa con periodo de retorno de 150 años, Tabla 3.

Tabla 3: Características de los estados de mar extremales.

Caso	Dirección	Hmo [m]	Tp [s]	Nivel del Mar [m]
X1	225	8.8	19	6.8
X2	247.5	9.4	19	6.8
X3	270	9.1	19	6.8



3. RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN

3.1. Salidas gráficas

A continuación se presentan (Fig. 4 - Fig. 17) los gráficos de altura de ola significativa y dirección en la malla A2 para los siguientes casos representativos seleccionados:

- Caso 12: Dirección NW con altura de ola significativa 2 m y período de pico 13 s.
- Caso 28: Dirección WNW con altura de ola significativa 2 m y período de pico 13 s.
- Caso 31: Dirección WNW con altura de ola significativa 2 m y período de pico 19 s.
- Caso 48: Dirección W con altura de ola significativa 2 m y período de pico 13 s.
- Caso 58: Dirección W con altura de ola significativa 3 m y período de pico 19 s.
- Caso 83: Dirección WSW con altura de ola significativa 2 m y período de pico 13 s.
- Caso C2: Dirección SW con altura de ola significativa 2 m y período de pico 13 s.

A fin de no sobrecargar la presentación de resultados y dado que el efecto de la propagación se hace notar mayormente a profundidades menores, los resultados que se presentan se restringen a la malla A2.

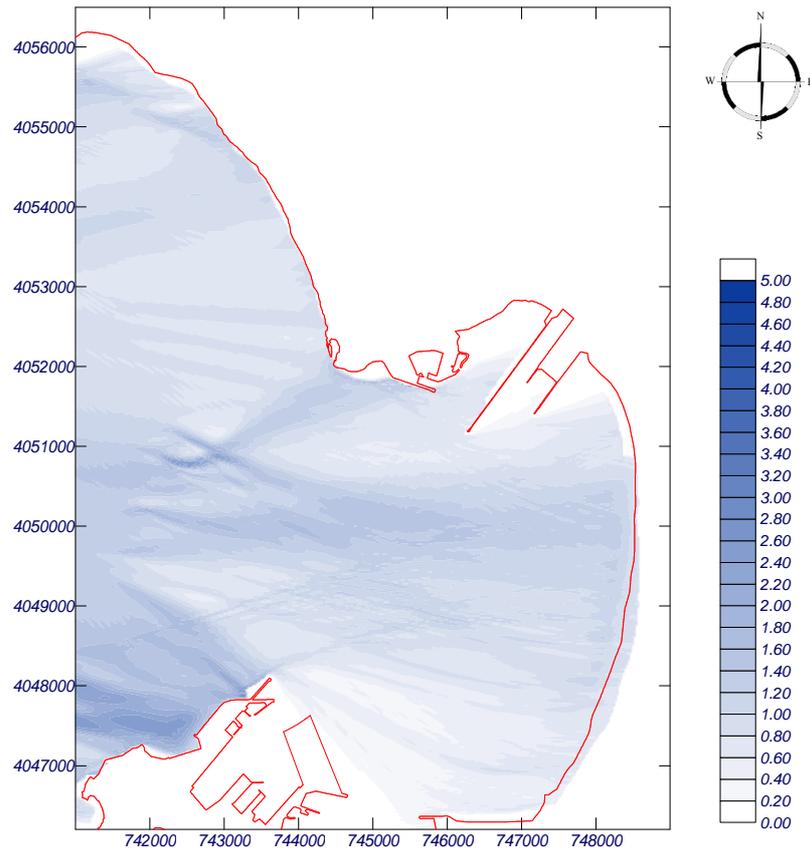


Fig. 4: Altura de ola (caso 12).

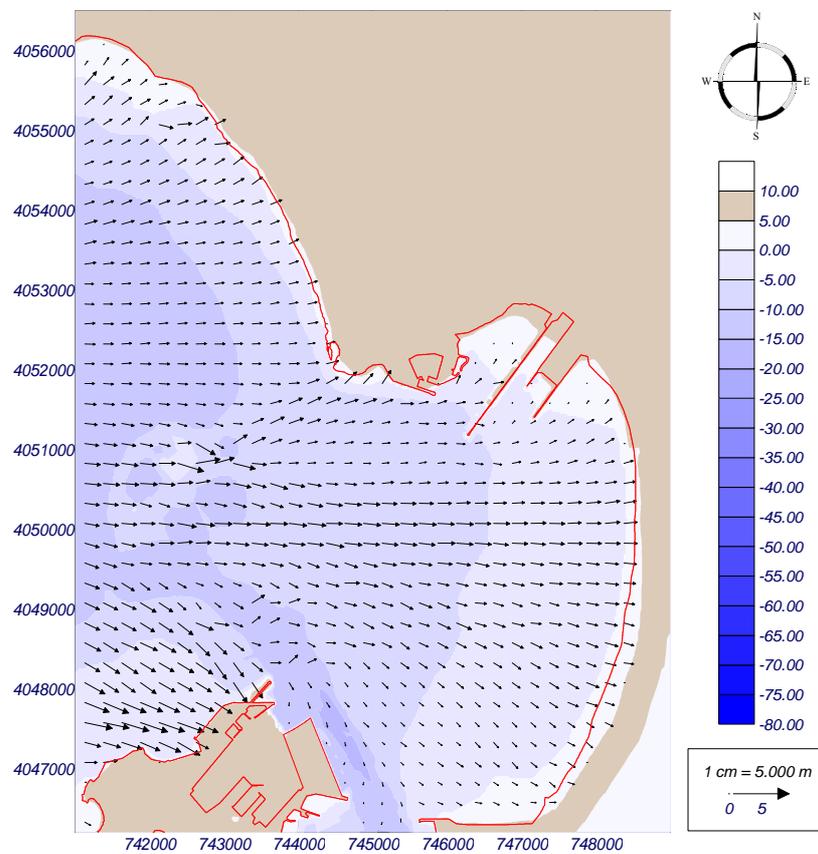


Fig. 5: Batimetría, dirección y altura de ola (caso 12).

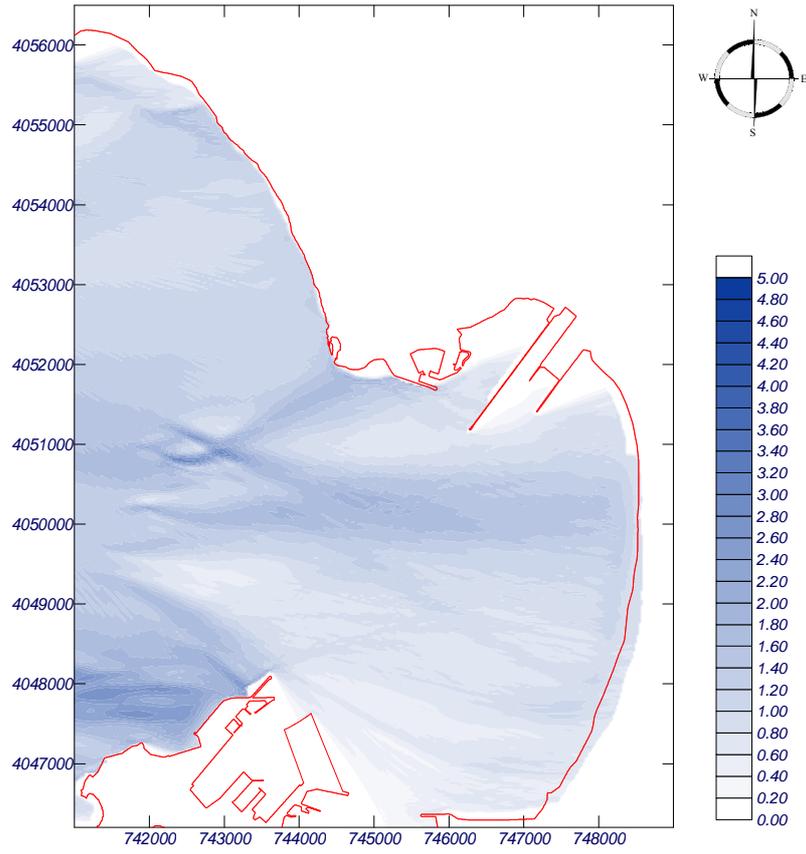


Fig. 6: Altura de ola (caso 28).

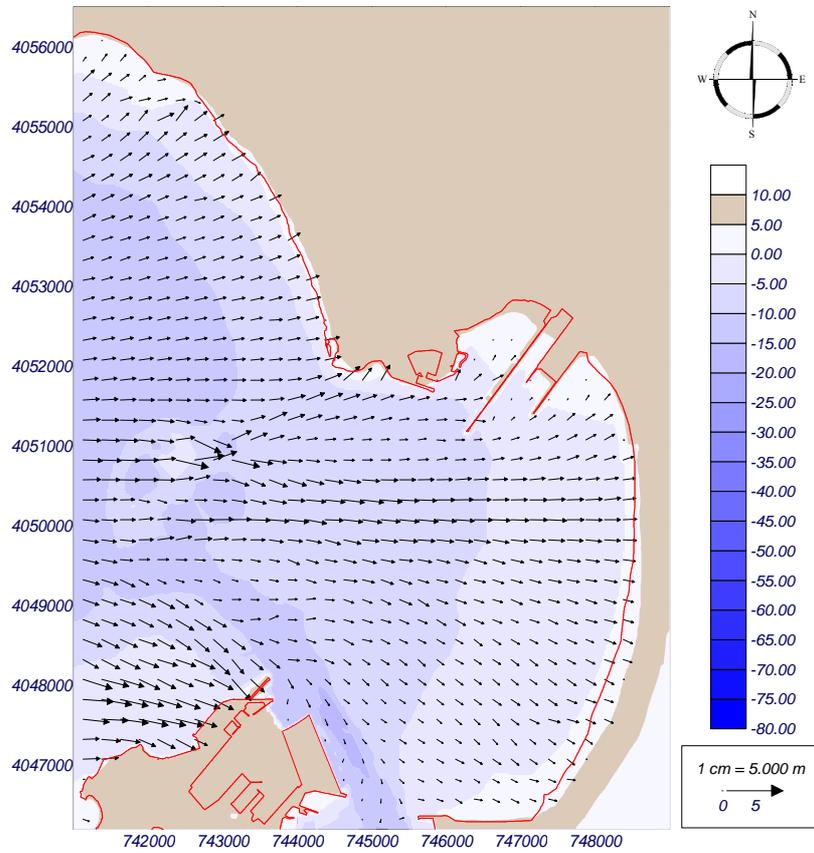


Fig. 7: Batimetría, dirección y altura de ola (caso 28).

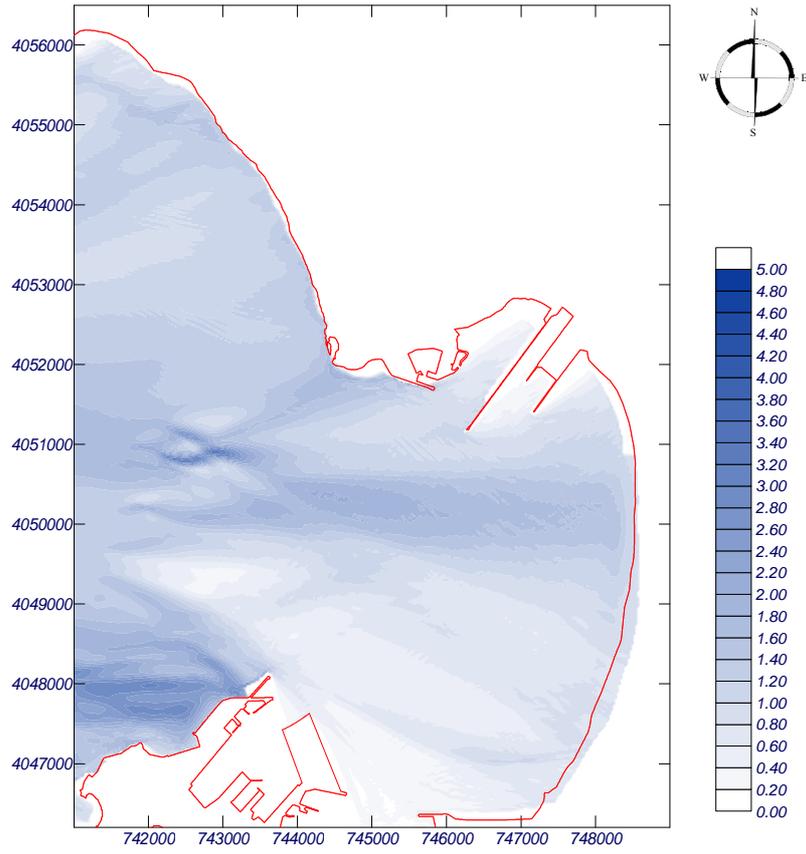


Fig. 8: Altura de ola (caso 31).

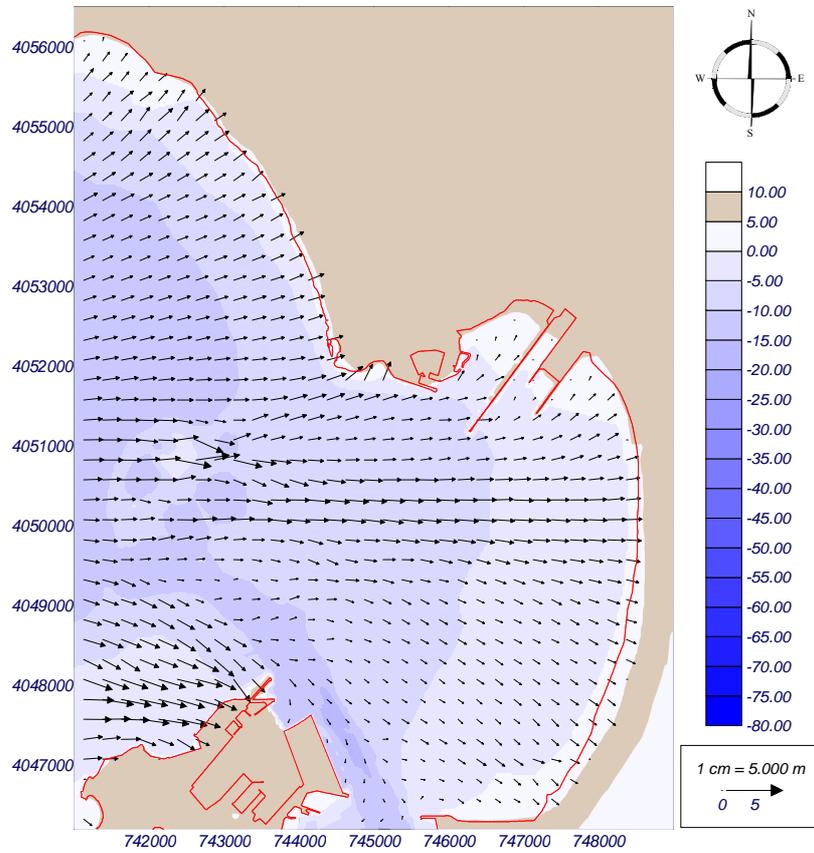


Fig. 9: Batimetría, dirección y altura de ola (caso 31).

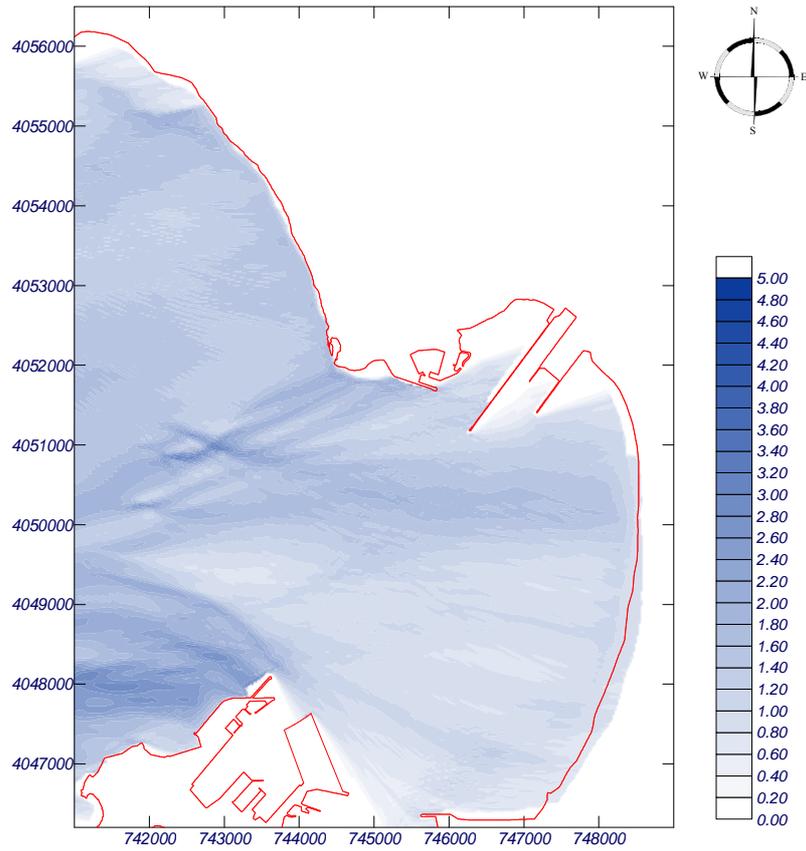


Fig. 10: Altura de ola (caso 48).

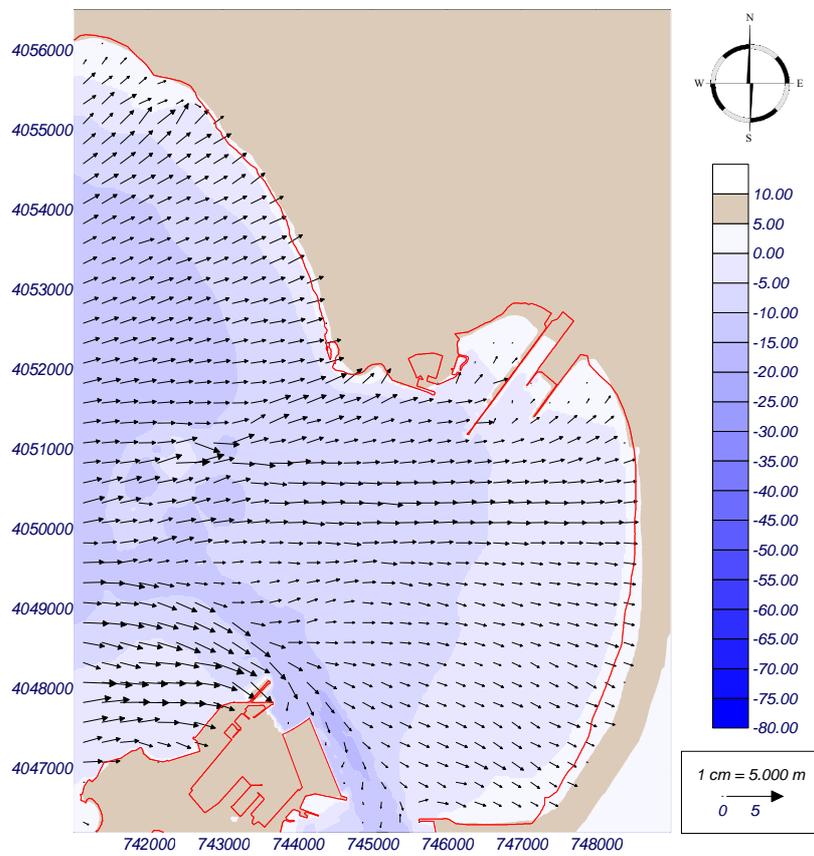


Fig. 11: Batimetría, dirección y altura de ola (caso 48).

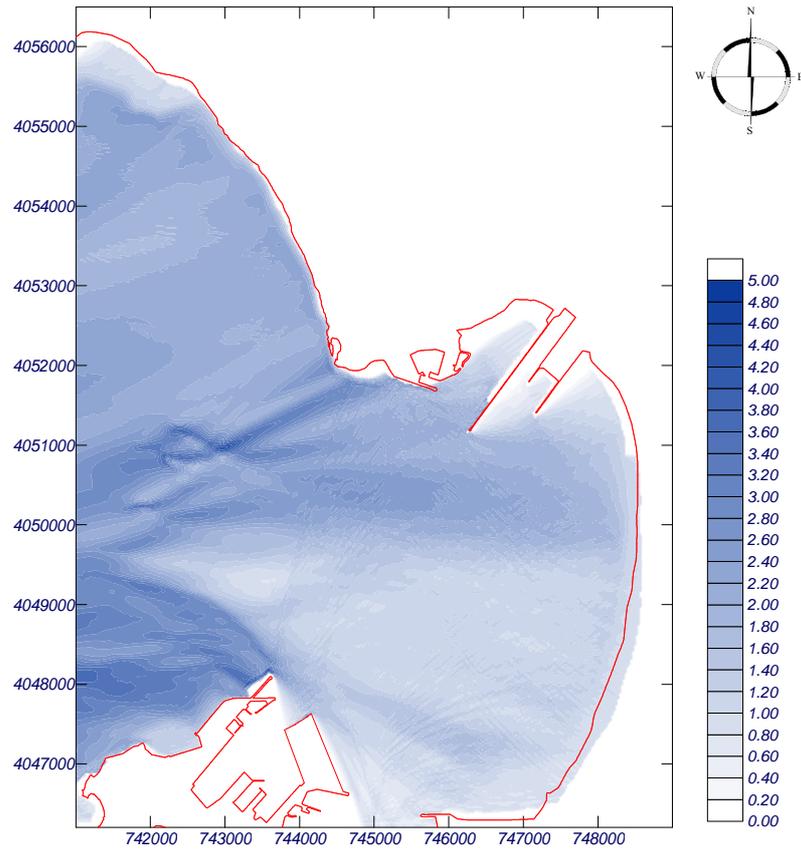


Fig. 12: Altura de ola (caso 58).

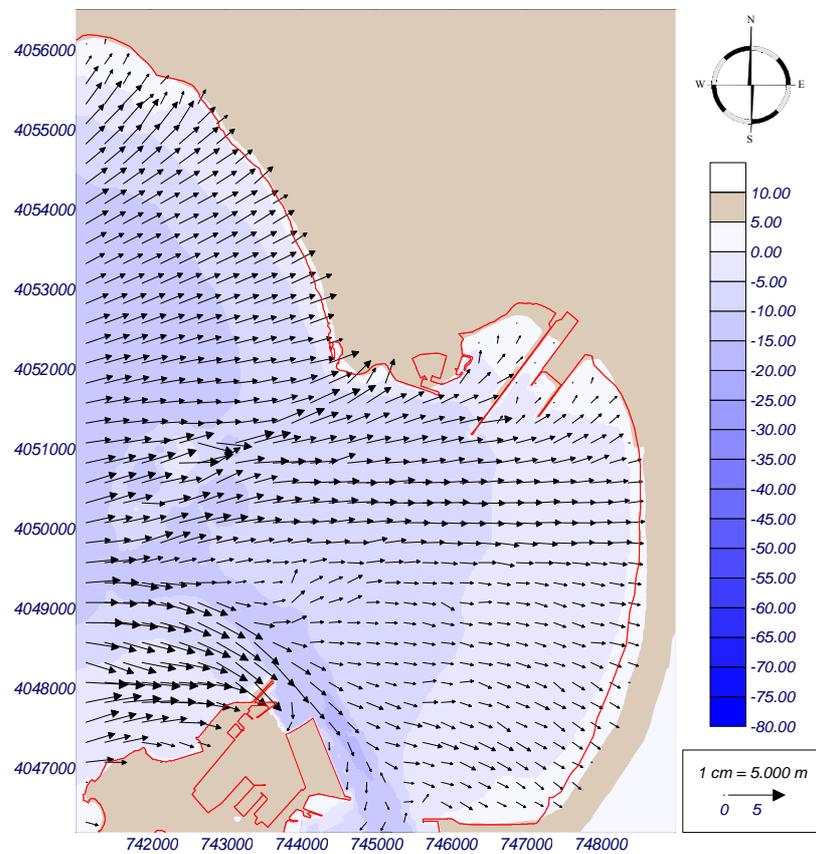


Fig. 13: Batimetría, dirección y altura de ola (caso 58).

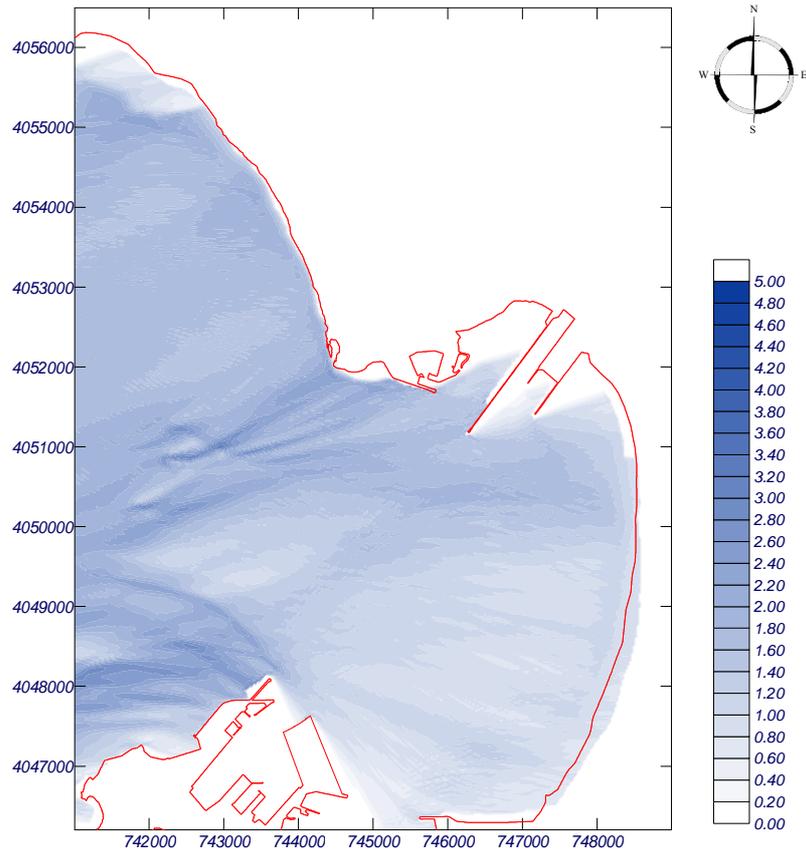


Fig. 14: Altura de ola (caso 83).

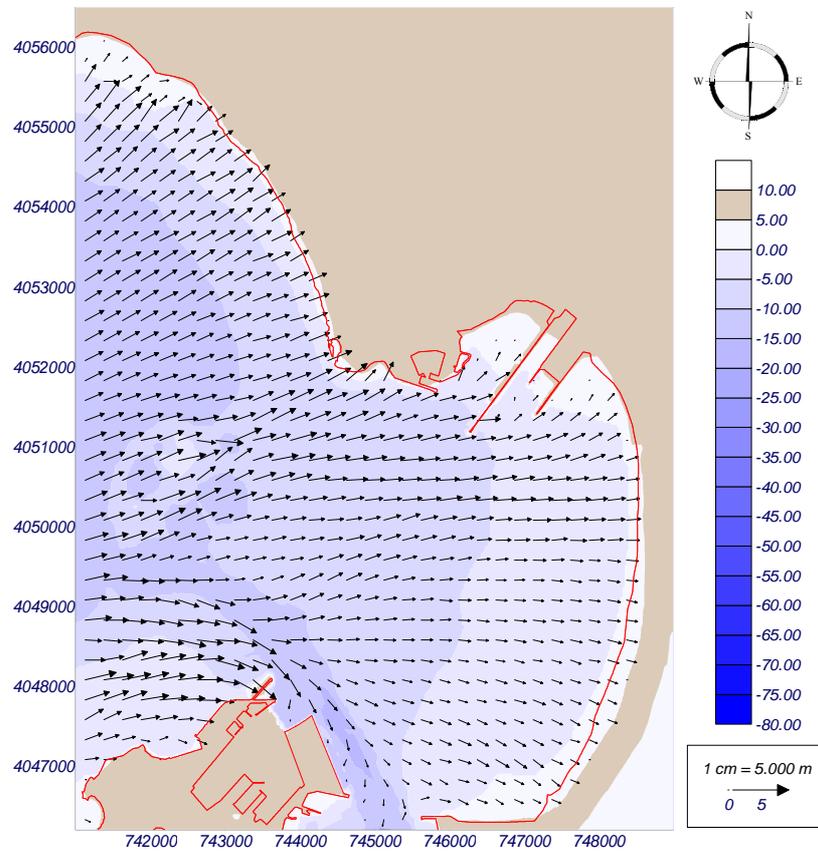


Fig. 15: Batimetría, dirección y altura de ola (caso 83).

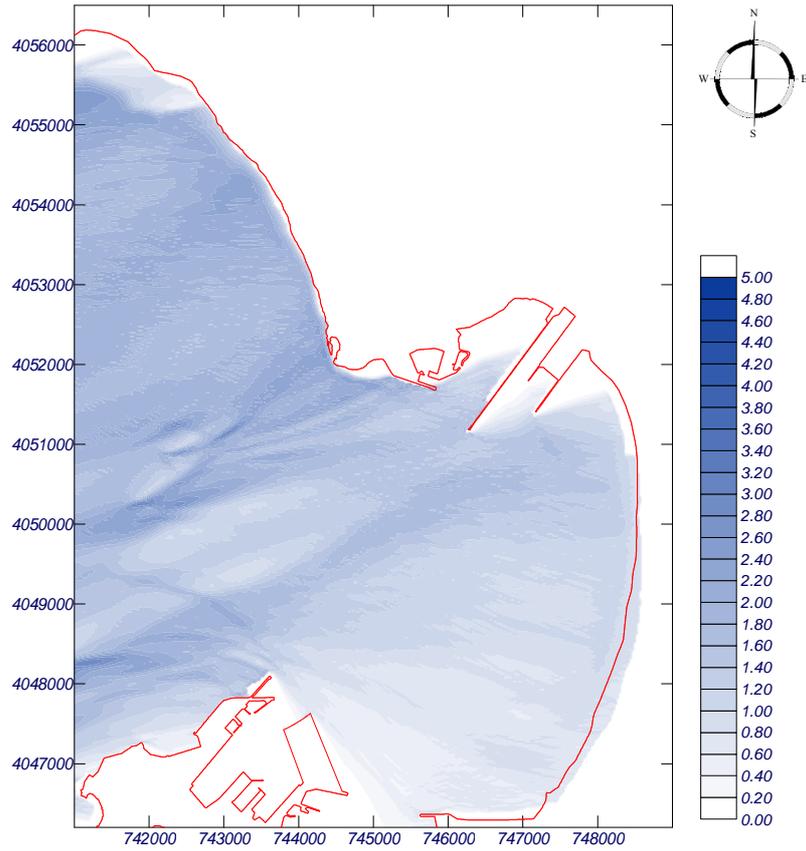


Fig. 16: Altura de ola (caso C2).

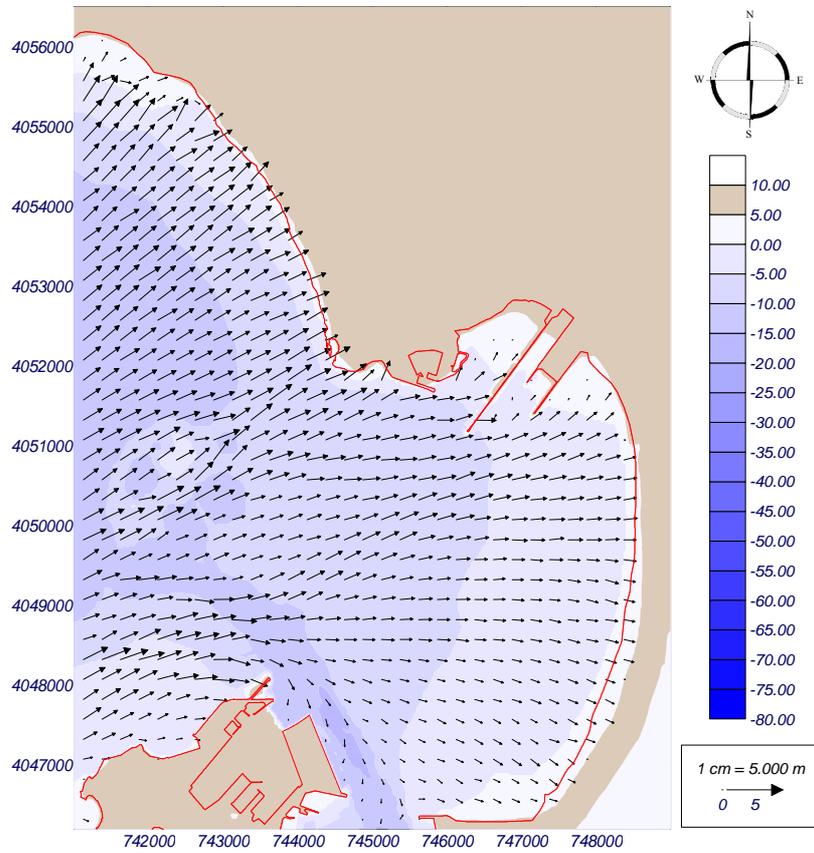


Fig. 17: Batimetría, dirección y altura de ola (caso C2).

3.2. Coeficientes de propagación

Una vez realizada la propagación numérica de todos los casos seleccionados se extrajeron los datos de oleaje en las coordenadas UTM (737700,4049700), denominado de aquí en adelante como punto A1, Fig. 18.

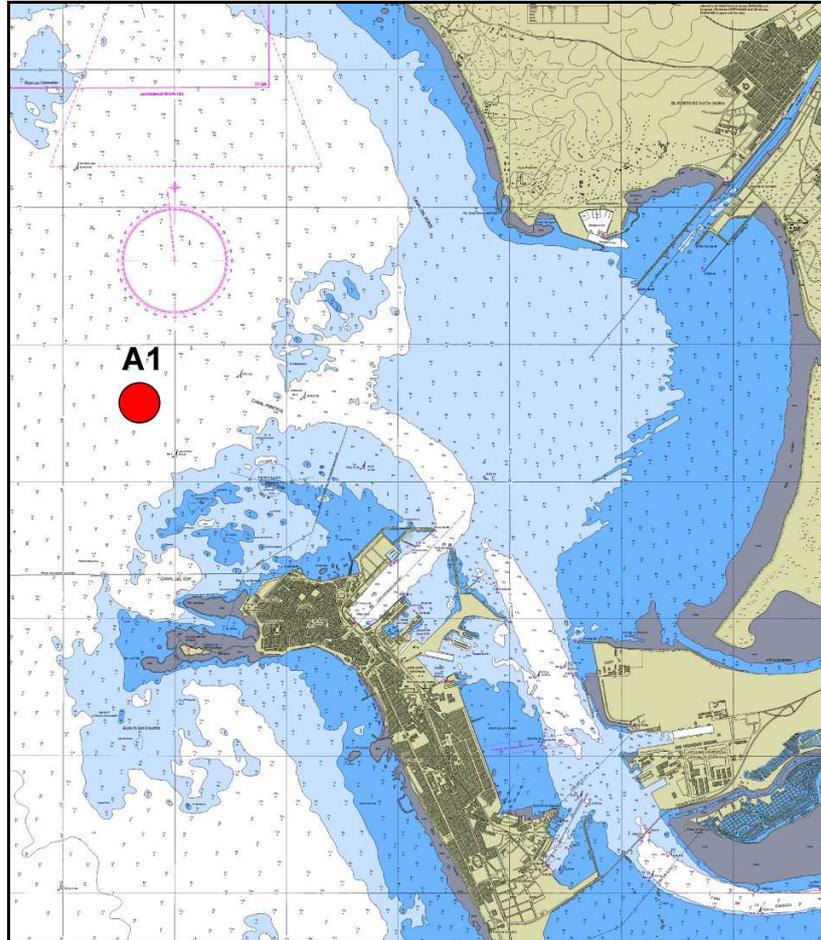


Fig. 18: Posición del punto A1.

La Tabla 4 presenta los coeficientes de propagación obtenidos para el punto A1. En ella se denomina con Dir , T_p y H_s a la dirección de propagación, la altura significativa y el período pico del oleaje original en profundidades indefinidas y con Dir_{A1} y K_1 a la dirección del oleaje en el punto A1 y al coeficiente de propagación del oleaje ($K_h = H_{A1}/H_{orig}$).



Tabla 4: Dirección, período y altura significativa del oleaje en el punto WANA1054046 y su correspondiente dirección y coeficiente de propagación en el punto A1.

Dir	Tp	Hs	Dir _{A1}	K _h		Dir	Tp	Hs	Dir _{A1}	K _h		Dir	Tp	Hs	Dir _{A1}	K _h
315	5	1	307	0.86		270	17	2	265	0.72		247.5	11	5	247	0.90
315	7	1	299	0.74		270	19	2	263	0.71		247.5	13	5	247	0.95
315	9	1	293	0.79		270	7	3	268	0.89		247.5	15	5	246	0.97
315	11	1	288	0.81		270	9	3	267	0.82		247.5	9	6	248	0.79
315	13	1	283	0.76		270	11	3	266	0.78		247.5	11	6	248	0.85
315	15	1	282	0.81		270	13	3	266	0.75		247.5	13	6	247	0.90
315	17	1	281	0.84		270	15	3	265	0.73		247.5	15	6	247	0.92
315	19	1	280	0.83		270	17	3	265	0.74		247.5	11	7	248	0.78
315	5	2	307	0.85		270	19	3	263	0.73		247.5	13	7	247	0.83
315	7	2	299	0.74		270	7	4	268	0.86		247.5	19	7	246	0.89
315	9	2	293	0.78		270	9	4	267	0.81		225	5	1	228	0.98
315	11	2	289	0.81		270	11	4	266	0.77		225	7	1	229	0.94
315	13	2	284	0.75		270	13	4	266	0.75		225	9	1	231	0.92
315	15	2	282	0.81		270	15	4	265	0.74		225	11	1	233	0.97
315	17	2	281	0.83		270	17	4	264	0.75		225	13	1	236	1.06
315	19	2	280	0.82		270	19	4	263	0.75		225	15	1	237	1.11
292.5	5	1	291	0.96		270	11	5	266	0.76		225	17	1	237	1.16
292.5	7	1	285	0.86		270	15	5	265	0.74		225	19	1	237	1.14
292.5	9	1	281	0.82		270	19	5	263	0.76		225	5	2	228	0.97
292.5	11	1	277	0.80		270	11	6	266	0.73		225	7	2	229	0.94
292.5	13	1	276	0.80		270	19	6	263	0.76		225	9	2	231	0.92
292.5	15	1	275	0.82		247.5	5	1	248	0.98		225	11	2	233	0.97
292.5	17	1	274	0.84		247.5	7	1	248	0.93		225	13	2	236	1.06
292.5	19	1	273	0.82		247.5	9	1	248	0.91		225	15	2	237	1.10
292.5	5	2	291	0.96		247.5	11	1	248	0.96		225	17	2	237	1.15
292.5	7	2	285	0.86		247.5	13	1	247	1.01		225	19	2	237	1.13
292.5	9	2	281	0.82		247.5	15	1	247	1.03		225	7	3	229	0.93
292.5	11	2	278	0.80		247.5	17	1	247	1.05		225	9	3	231	0.92
292.5	13	2	276	0.80		247.5	19	1	247	1.05		225	11	3	233	0.97
292.5	15	2	275	0.82		247.5	5	2	248	0.97		225	13	3	236	1.05
292.5	17	2	274	0.84		247.5	7	2	248	0.93		225	15	3	236	1.09
292.5	19	2	273	0.83		247.5	9	2	248	0.91		225	19	3	236	1.12
292.5	7	3	285	0.85		247.5	11	2	248	0.96		225	7	4	229	0.90
292.5	11	3	278	0.80		247.5	13	2	247	1.01		225	9	4	231	0.90
292.5	7	4	285	0.81		247.5	15	2	247	1.03		225	11	4	233	0.95
292.5	11	4	278	0.80		247.5	17	2	246	1.05		225	13	4	236	1.03
270	5	1	270	0.97		247.5	19	2	246	1.05		225	15	4	236	1.07
270	7	1	268	0.90		247.5	7	3	248	0.92		225	19	4	236	1.10
270	9	1	267	0.81		247.5	9	3	248	0.91		225	9	5	231	0.86
270	11	1	266	0.77		247.5	11	3	247	0.95		225	11	5	233	0.92
270	13	1	266	0.74		247.5	13	3	247	1.00		225	13	5	235	1.00
270	15	1	265	0.71		247.5	15	3	246	1.02		225	15	5	236	1.04
270	17	1	265	0.71		247.5	19	3	246	1.04		225	9	6	231	0.80
270	19	1	264	0.69		247.5	7	4	248	0.88		225	11	6	233	0.87
270	5	2	270	0.97		247.5	9	4	248	0.89		225	13	6	235	0.94
270	7	2	268	0.90		247.5	11	4	247	0.94		225	15	6	236	0.98
270	9	2	267	0.82		247.5	13	4	247	0.98		225	11	7	232	0.81
270	11	2	266	0.77		247.5	15	4	246	1.00		225	13	7	235	0.87
270	13	2	266	0.74		247.5	19	4	246	1.03		225	19	7	235	0.94
270	15	2	265	0.72		247.5	9	5	248	0.85						



Tabla 5: Dirección, período y altura significativa del oleaje en el punto WANA1054046 y su correspondiente dirección y coeficiente de propagación en el punto A1 para los casos X1, X2 y X3.

Caso	Dir	Tp	Hs	DirA1	Kh
X1	225	19	8.8	234	0.89
X2	247.5	19	9.4	247	0.82
X3	270	19	9.1	263	0.74

3.3. Regímenes medios de oleaje

Los regímenes medios y extremal de altura de ola significativa se obtienen de propagar toda la base de datos de oleaje desde profundidades indefinidas al punto A1 mediante interpolación de los datos obtenidos con las propagaciones numéricas. El total de datos que se pueden propagar mediante esta interpolación corresponde al 81.33% del total (todos aquellos cuya dirección en el punto WANA1054046 está entre 225° y 315°). En lo que sigue se trabaja bajo el supuesto de que el 18.67% restante de los datos corresponden a condiciones de calma en la zona de proyecto.

En la Tabla 6 se presenta la distribución direccional del oleaje en el punto A1.

Tabla 6: Distribución direccional del oleaje en el punto A1 (el 100% corresponde al 81,33% del total del tiempo)

Dirección	Probabilidad
SW	1.9%
WSW	16.4%
W	70.4%
WNW	11.0%
NW	0.3%

Se presentan a continuación las tablas cruzadas altura de ola significativa – período de pico para el régimen medio escalar y para los regímenes medios direccionales calculados en A1 así como las gráficas de los ajustes obtenidos. La Tabla 7 presenta los parámetros de los ajustes obtenidos.



Tabla 7: Parámetros de los ajustes obtenidos para los regímenes medios en el punto A1.

Dirección	Distribución	Parámetro m	Parámetro s	Parámetro b	Parámetro d
Escarlar	Weibull Bipar.	---	---	1.0758	0.7754
NW	LogNormal	-0.51744	1.0882	---	---
WNW	LogNormal	-0.83311	0.66302	---	---
W	Weibull Bipar.	---	---	1.1428	0.63796
WSW	Weibull Bipar.	---	---	1.4016	1.4742
SW	Weibull Bipar.	---	---	1.2627	1.3334

Tabla 8: Régimen medio escalar. Corresponde al 81,33% del total del tiempo.

	Período pico, Tp (s)									
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
0.25	1.5%	3.8%	3.0%	6.9%	5.8%	1.8%	0.5%	0.1%	0.0%	0.0%
0.75	1.4%	10.8%	4.3%	6.8%	8.5%	7.7%	1.6%	0.5%	0.2%	0.0%
1.25	0.0%	5.1%	3.3%	1.8%	2.1%	4.2%	1.8%	0.7%	0.5%	0.0%
1.75	...	1.1%	2.0%	1.2%	0.8%	1.1%	0.7%	0.4%	0.3%	0.0%
2.25	...	0.0%	0.9%	0.9%	0.5%	0.4%	0.3%	0.3%	0.2%	0.0%
2.75	...	...	0.3%	0.5%	0.4%	0.3%	0.1%	0.1%	0.1%	...
3.25	...	...	0.1%	0.4%	0.4%	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%
3.75	...	...	0.0%	0.1%	0.3%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	...
4.25	...	...	...	0.0%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	...
4.75	...	...	...	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	...	0.0%	0.0%
5.25	...	...	...	...	0.0%	0.0%	...	...	0.0%	...
5.75	...	...	...	...	...	0.0%	0.0%	...	0.0%	...
6.25	...	...	...	...	...	...	0.0%	...	0.0%	...
6.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

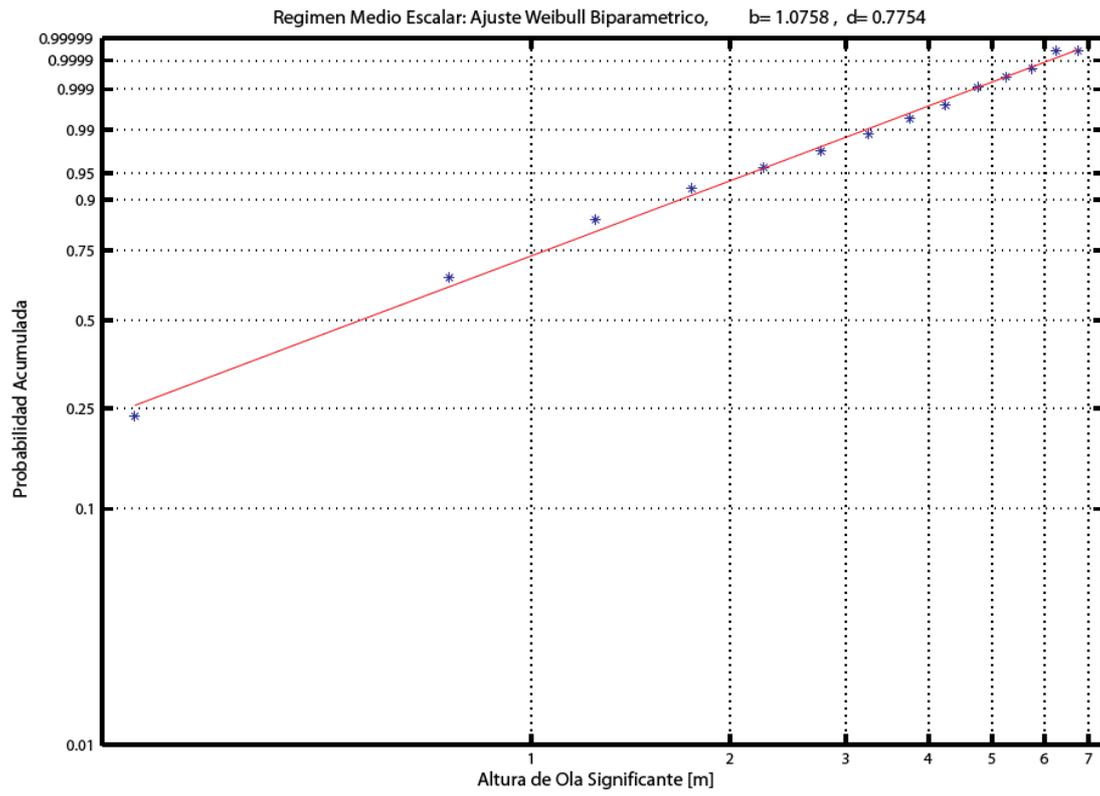


Fig. 19: Ajuste obtenido para el régimen medio escalar.



Tabla 9: Régimen medio direccional (NW). Corresponde al 0,3% del total del tiempo.

NW		Período pico, T_p (s)									
		4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Altura de ola significativa, H_s (m)	0.25	16.7%	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	0.75	56.9%	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	1.25	4.2%	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	1.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	2.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	3.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	3.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	4.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	4.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	5.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	5.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	6.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	6.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

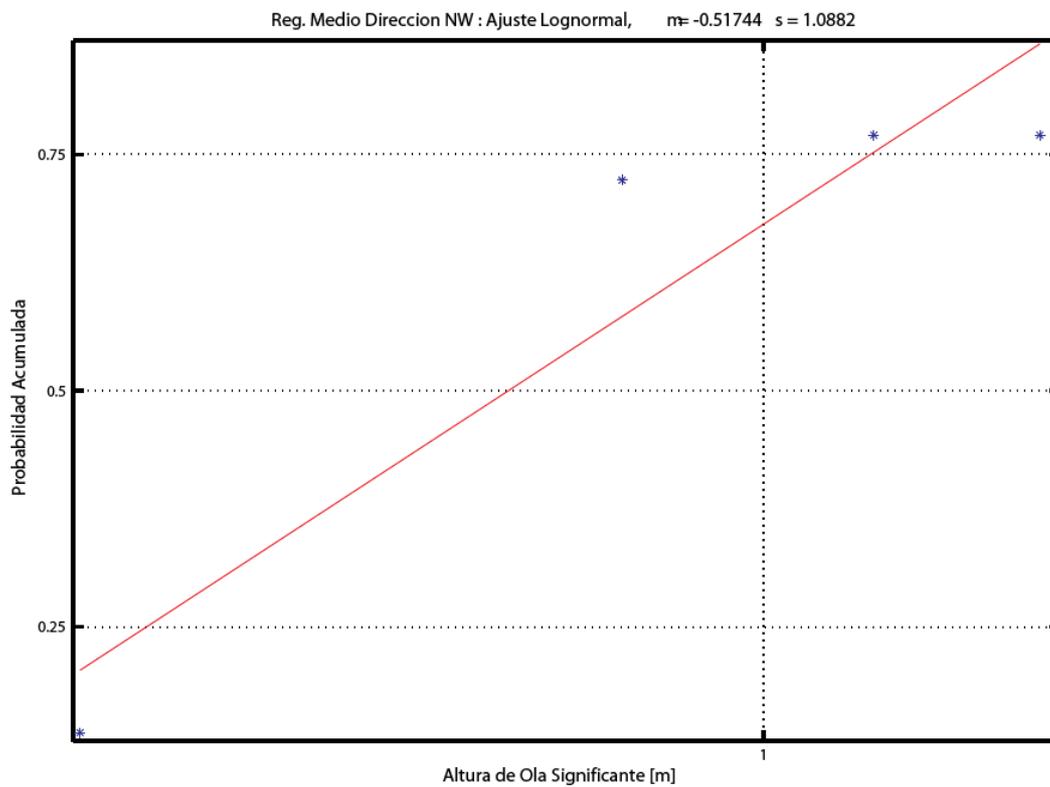


Fig. 20: Ajuste obtenido para el régimen medio en la dirección NW.



Tabla 10: Régimen medio direccional (WNW). Corresponde al 11,0% del total del tiempo.

WNW	Altura de ola significativa, Hs (m)	Período pico, Tp (s)									
		3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
	0.25	3.1%	11.5%	3.2%	2.0%	1.9%	0.3%	...	...	...	...
	0.75	4.0%	36.5%	3.9%	1.8%	2.4%	0.5%	...	...	...	...
	1.25	0.0%	16.6%	5.1%	0.3%	0.4%	0.3%	...	...	...	...
	1.75	...	2.0%	3.2%	0.1%	...	...	...	...	...	...
	2.25	...	0.1%	0.5%	0.1%	...	...	...	...	...	...
	2.75	...	...	0.0%	0.1%	...	...	...	...	...	...
	3.25	...	...	...	0.0%	...	...	...	...	...	...
	3.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	4.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	4.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	5.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	5.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	6.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	6.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

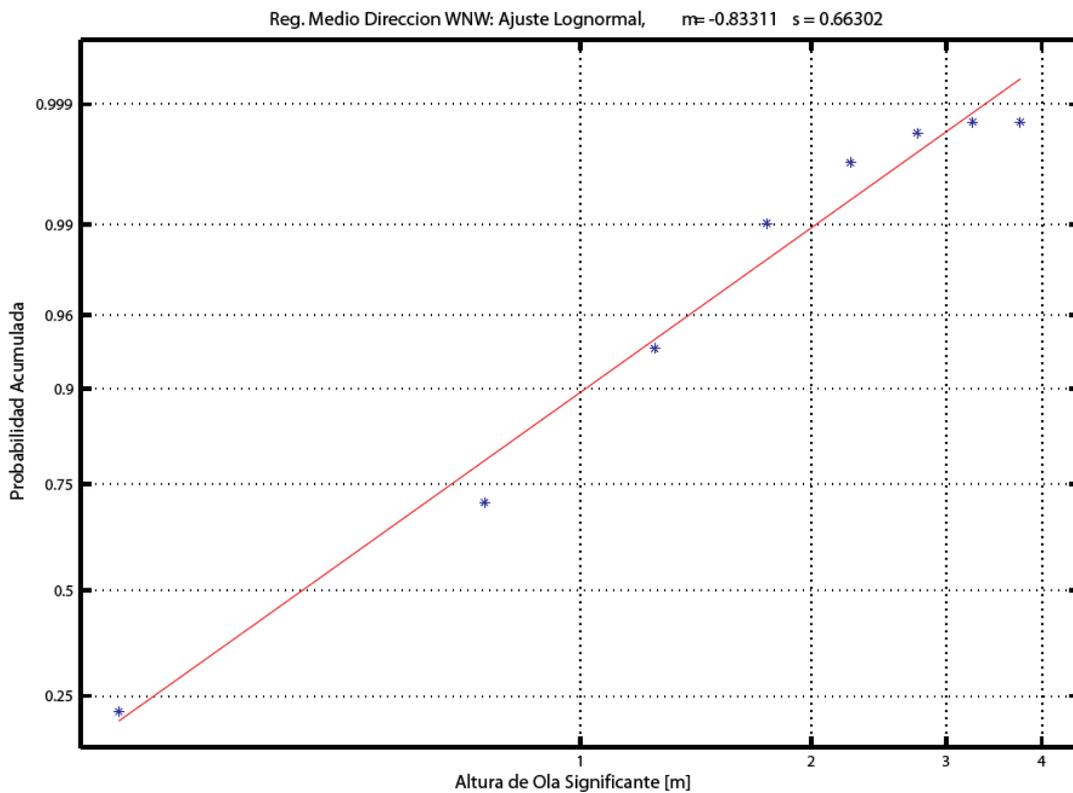


Fig. 21: Ajuste obtenido para el régimen medio en la dirección WNW.



Tabla 11: Régimen medio direccional (W). Corresponde al 70,4% del total del tiempo.

W	Altura de ola significativa, Hs (m)	Período pico, Tp (s)									
		3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
	0.25	1.4%	3.2%	3.3%	8.9%	7.6%	2.4%	0.7%	0.1%	0.0%	...
	0.75	1.2%	8.3%	3.9%	7.5%	10.3%	10.0%	2.2%	0.7%	0.2%	0.0%
	1.25	0.0%	3.8%	2.0%	1.1%	2.1%	5.3%	2.5%	0.9%	0.6%	0.0%
	1.75	...	0.9%	1.5%	0.4%	0.4%	1.0%	0.8%	0.5%	0.4%	0.0%
	2.25	...	0.0%	0.8%	0.3%	0.1%	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%	...
	2.75	...	...	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	...
	3.25	...	...	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	...
	3.75	...	...	...	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	...
	4.25	...	...	...	0.0%	0.0%	...	...	0.0%	...	...
	4.75	...	...	...	...	0.0%	...	...	...	...	...
	5.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	5.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	6.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	6.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

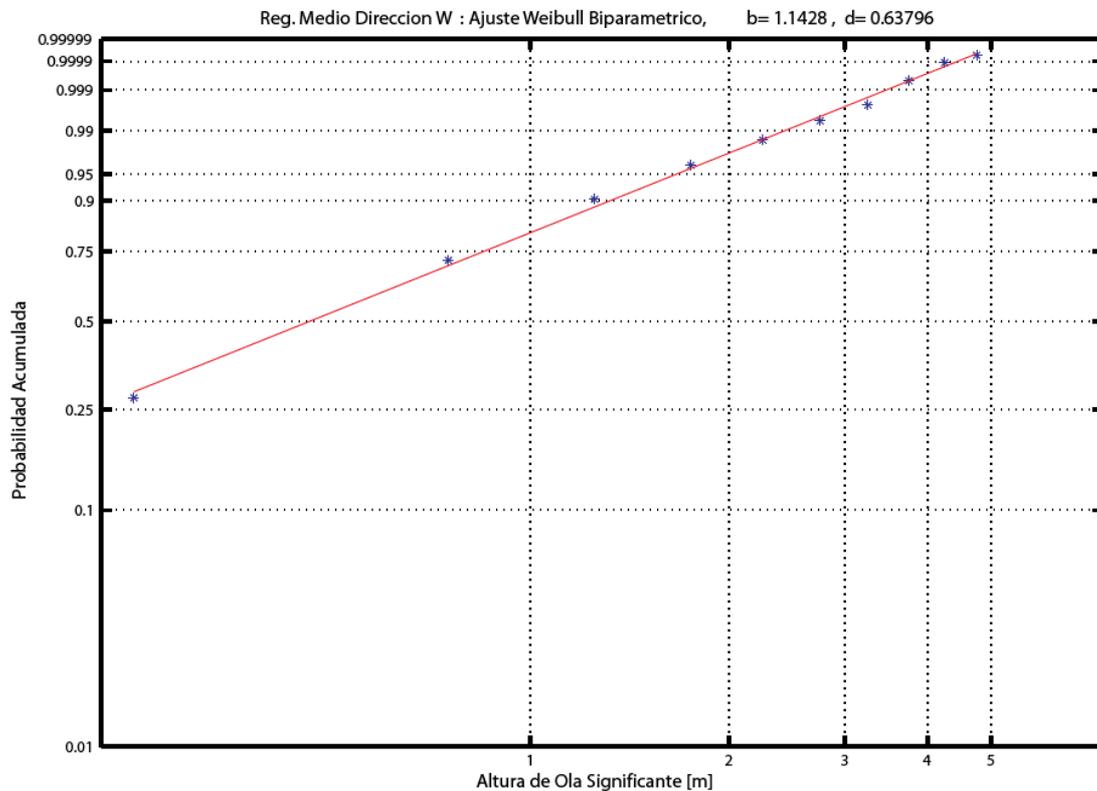


Fig. 22: Ajuste obtenido para el régimen medio en la dirección W.



Tabla 12: Régimen medio direccional (WSW). Corresponde al 16,4% del total del tiempo.

WSW	Altura de ola significante, Hs (m)	Período pico, Tp (s)									
		3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
	0.25	0.8%	1.1%	1.8%	2.0%	1.2%	0.4%	0.1%	...	0.0%	0.0%
	0.75	0.5%	3.6%	5.9%	7.3%	5.8%	3.5%	0.7%	0.2%	0.0%	...
	1.25	0.0%	2.9%	6.8%	5.9%	3.3%	2.8%	0.3%	0.1%	0.0%	...
	1.75	...	1.1%	2.9%	5.0%	3.3%	2.1%	0.7%	0.3%	0.1%	...
	2.25	...	0.0%	1.7%	3.5%	2.5%	1.3%	0.5%	0.1%	0.2%	0.0%
	2.75	...	...	1.0%	1.6%	2.0%	1.3%	0.4%	0.2%	0.0%	...
	3.25	...	...	0.2%	1.2%	1.8%	1.0%	0.3%	0.3%	0.0%	0.0%
	3.75	...	...	0.0%	0.6%	1.2%	0.6%	0.3%	0.1%	0.1%	...
	4.25	...	...	...	0.2%	0.9%	0.4%	0.0%	...	0.1%	...
	4.75	...	...	...	0.0%	0.6%	0.3%	0.0%	...	0.0%	0.0%
	5.25	...	...	...	...	0.2%	0.1%	...	...	0.0%	...
	5.75	...	...	...	...	...	...	0.0%	...	0.0%	...
	6.25	...	...	...	...	...	...	0.0%	...	0.0%	...
	6.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

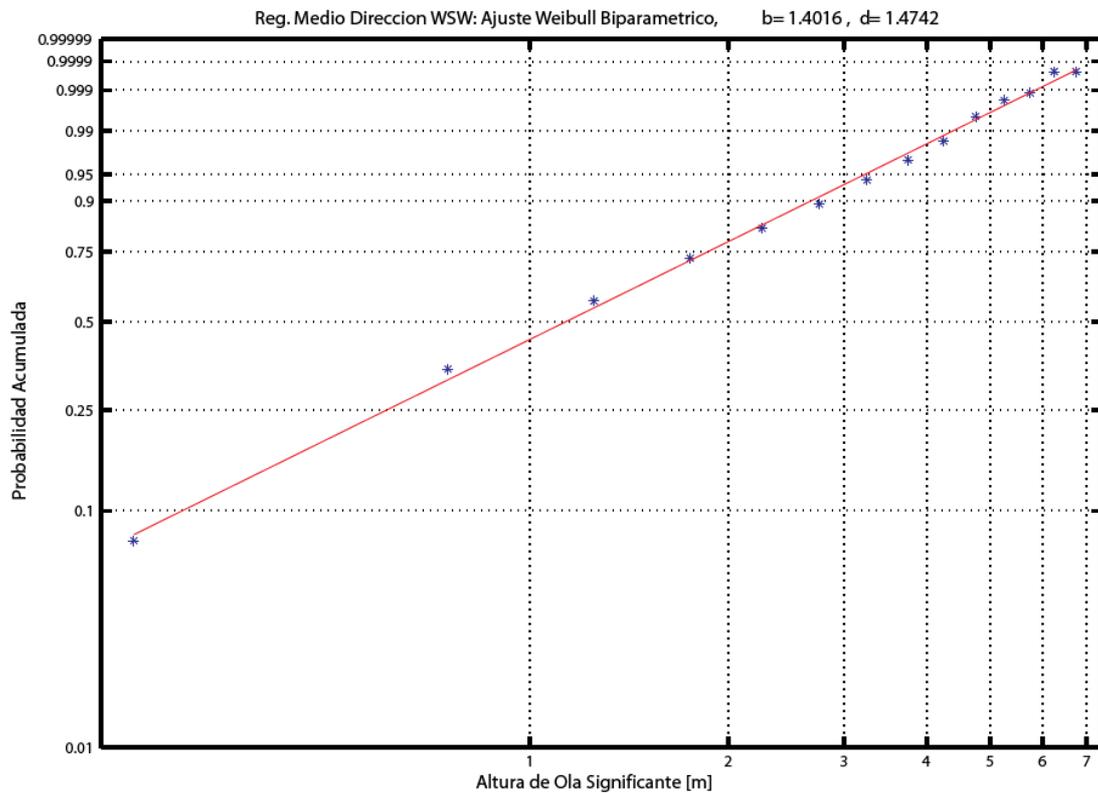


Fig. 23: Ajuste obtenido para el régimen medio en la dirección WSW.



Tabla 13: Régimen medio direccional (SW). Corresponde al 1,9% del total del tiempo.

SW	Período pico, T_p (s)									
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
0.25	1.5%	2.3%	2.3%	3.6%	0.6%	...	...	...	...	...
0.75	2.3%	10.1%	7.2%	6.8%	3.8%	0.8%	...	...	...	...
1.25	0.2%	5.3%	11.2%	3.2%	2.7%	0.4%	...	...	...	...
1.75	...	1.3%	5.5%	4.4%	0.6%	...	...	...	...	...
2.25	...	0.2%	3.0%	5.1%	0.6%	...	...	...	...	...
2.75	...	...	2.1%	1.9%	0.4%	...	...	...	...	...
3.25	...	...	1.5%	3.6%	1.5%	...	...	...	...	...
3.75	...	...	...	1.3%	1.3%	...	...	...	...	...
4.25	...	...	...	...	0.4%	...	...	...	...	...
4.75	...	...	...	...	0.6%	...	...	...	...	...
5.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5.75	...	...	...	...	...	0.4%	...	...	...	...
6.25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
6.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

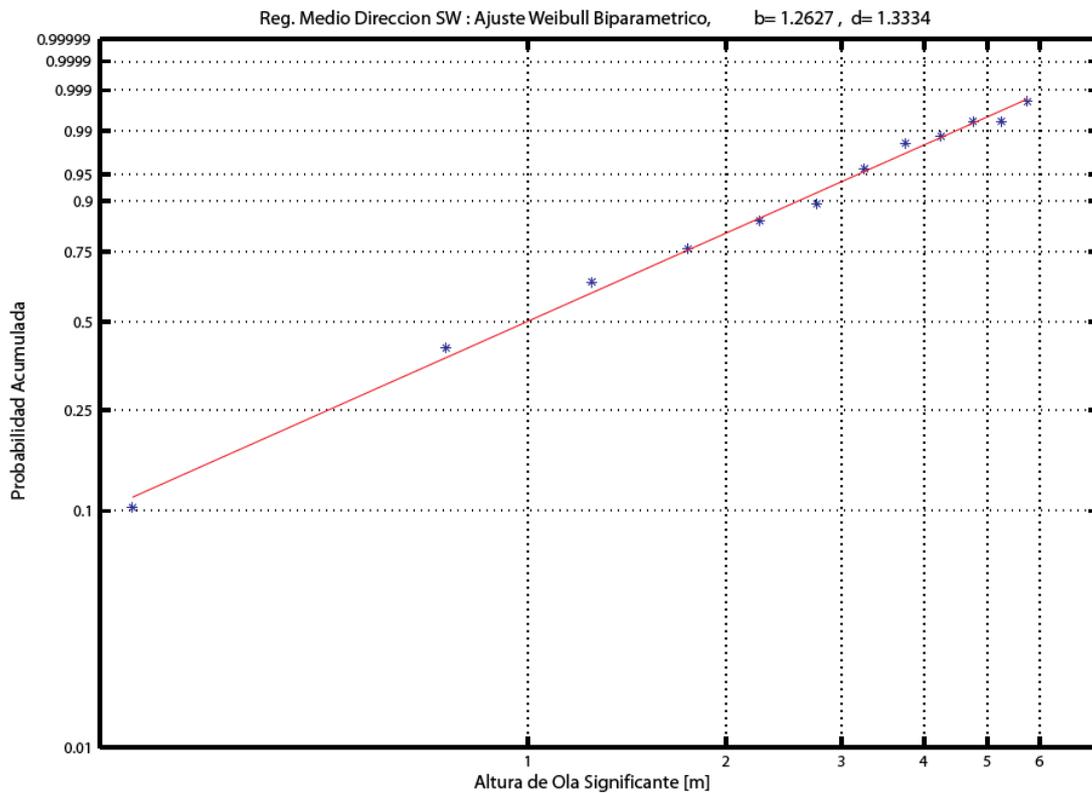


Fig. 24: Ajuste obtenido para el régimen medio en la dirección SW.



3.4. Regímenes extremales de oleaje

Se presentan a continuación los ajustes obtenidos para el régimen extremal escalar de altura de ola significativa en el punto A1. Se realizaron ajustes mediante el método de mínimos cuadrados usando las funciones de distribución Gumbel, Frechet y Weibull triparamétrica. Se optó por el ajuste de mayor coeficiente de correlación R^2 .

El umbral de altura de ola significativa tomado para usar el método de “Picos Sobre Umbral” ha sido 2 m, con lo cual quedan 6 temporales por año medio, similar al número de temporales en profundidades indefinidas. El número de temporales por dirección se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14: Número de temporales por dirección.

Dirección	Nº de temporales	Porcentaje del total	Número medio de temporales por año
W	13	22 %	1,3
WSW	41	68 %	4,1
SW	6	10 %	0,6

Las parámetros de ajuste de la distribución de probabilidad obtenidos para el régimen extremal escalar se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Ajustes obtenidos para el régimen extremal escalar y para los regímenes extremales direccionales.

Dirección	Distribución	Parámetro b	Parámetro d	Parámetro l
Escalar	Gumbel	---	0.94491	2.9664

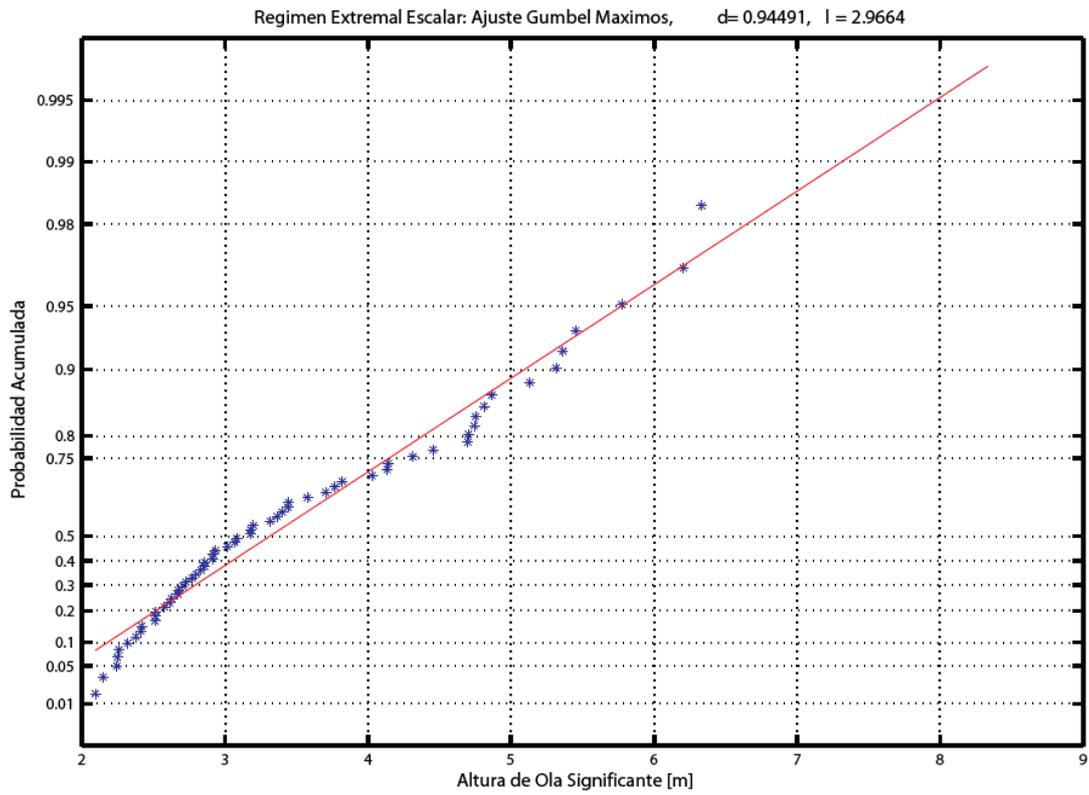


Fig. 25: Ajuste obtenido para el régimen extremal escalar.



4. ANEJO 1 – MODELO OLUCA-SP

INTRODUCCIÓN

Conocer el oleaje en una zona costera es de vital importancia para los ingenieros de costas. Las características del oleaje (celeridad, longitud, dirección de propagación y altura de ola) que se propaga desde profundidades indefinidas hasta zonas costeras de poca profundidad se modifican a causa de los cambios de la batimetría del fondo. Refracción, asomeramiento, disipación de energía y difracción entre otras, son manifestaciones de dicha interacción. El conocimiento sobre estos procesos físicos, alcanzado en los últimos años ha permitido simular dichos procesos en los modelos numéricos de propagación de oleaje.

Desde el punto de vista práctico de la Ingeniería de Costas, podríamos hablar de dos tipos de modelos: (1) aquellos que propagan oleaje monocromático (propagación de un tren de ondas de una única frecuencia y amplitud); y (2) los que propagan un espectro de energía asociado a un oleaje irregular aleatorio. El primer tipo de modelos generalmente se utiliza para caracterizar el patrón de oleaje en una zona de estudio, su bajo costo computacional permite propagar un alto número de trenes de ondas monocromáticas, las cuales se obtienen a partir de los regímenes medios direccionales del oleaje en el área. Estos modelos representan bastante bien el patrón de oleaje, no obstante, tienden a sobreestimar las alturas de ola en profundidades reducidas, con lo cual, deben ser aplicados con cautela a la hora de diseñar estructuras costeras. Dentro de este grupo se ubica el modelo numérico OLUCA-RD, el cual es un modelo de propagación de oleaje monocromático débilmente no lineal.

El segundo tipo de modelos permite conocer en una zona de estudio la altura de ola estadísticamente representativa de un estado de mar (oleaje irregular aleatorio). Este tipo de modelos son bastante precisos en el cálculo de las alturas de ola, requiriendo un alto coste



computacional; razones por las cuales generalmente se aplican en la propagación de casos extraordinarios o en aquellos casos en los cuales se requiere obtener con una gran precisión los regímenes de oleaje en una zona de la costa, como es el caso del diseño de estructuras marinas. Dentro de este grupo se encuentra el modelo OLUCA-SP, el cual es un modelo espectral no dispersivo que resuelve la fase.

Estos modelos han sido contrastados mediante casos con solución analítica, ensayos de laboratorio y mediciones de campo. Han sido aplicados en más de 80 proyectos de la costa española y americana, como también en numerosos proyectos de investigación y con fines docentes en la Universidad de Cantabria; experiencia que ha permitido comprobar el buen funcionamiento de los programas.

Con el fin de hacer del OLUCA-RD y el OLUCA-SP aplicaciones ingenierilmente amigables, se han incluido los modelos dentro del programa denominado MORfodinámica de PLAyas a corto plazo (MOPLA), el cual incluye:

- Una interfaz flexible e interactiva por sistemas de menús, que facilita al usuario generar y manejar los archivos, tanto de entrada como de salida, la generación automática de mallas, y la visualización e impresión de gráficos de resultados.
- Modelos de corrientes en playas (COPLARD-2DH, COPLASP-2DH).
- Modelo de transporte de sedimentos y evolución del fondo marino (MOPLA-2DH).
- Interfaz de interacción entre modelos.

El OLUCA-RD y OLUCA-SP se han desarrollado con base en los modelos REF/DIF1 (Kirby et al. 1986b) y REF/DIF S (Kirby et al. 1994) del Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, Newark, Delaware (USA), desarrollados inicialmente para ser aplicados en casos analíticos con fines de investigación y/o docentes. El Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria ha modificado estos modelos incluyendo mejoras en el método numérico de resolución y condiciones de contorno, ampliando su aplicación a proyectos de ingeniería de costas.

En este documento se describen las características de los modelos teniendo en cuenta el planteamiento teórico del problema, condiciones iniciales y de contorno, hipótesis y limitaciones en su aplicación, y finalmente el esquema numérico. Para mayores detalles



acerca del contenido de este documento, consultar como referencia los documentos G.I.O.C. (1999, 2000).

INTERACCIÓN CON OTROS MODELOS

Los programas de propagación de oleaje han sido diseñados para que sus archivos de salida puedan ser compatibles con otras aplicaciones desarrolladas por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, dentro de la cuales tenemos:

- ***MODELO DE CORRIENTES EN PLAYAS (COPLA-2DH):***

Los programas COPLARD-2DH y COPLASP-2DH resuelven numéricamente las ecuaciones del movimiento promediadas en el período de la onda e integradas en vertical. Calculan las variaciones de los tensores de radiación como agentes impulsores de las corrientes a partir de los resultados de los programas OLUCA-RD y OLUCA-SP, permitiendo también incorporar el viento o la marea como agentes impulsores.

- ***MODELOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS DE MAREA (H2D, H3D):***

Son modelos numéricos 2D y 3D que propagan una onda de marea en un estuario, bahía o zonas costeras, obteniéndose velocidades U , V , W (caso 3D) y sobreelevación de la superficie libre η . Estas corrientes unidas con las corrientes del COPLARD/SP, permiten obtener el campo de flujo en una zona costera.

- ***MODELO DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN (AD2D):***

Modelo numérico bidimensional que simula el transporte por advección y dispersión de sustancias en bahías, estuarios y zonas costeras.

- ***MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR OLEAJE-CORRIENTE (MOPLA-2DH):***

Este modelo evalúa en una zona de la costa y/o un estuario, el transporte de sedimentos por fondo y suspensión teniendo en cuenta las formas de lecho, permitiendo la evolución del fondo marino a lo largo del tiempo. Estos procesos son simulados con base en los resultados de los modelos OLUCA-RD/SP, COPLA-RD/SP, H2D y H3D.

- ***SISTEMA DE MODELADO COSTERO (SMC)***



Interfaz gráfica que permite determinar la forma en planta y perfil de equilibrio de una playa a largo plazo, como también la regeneración de su batimetría actual con la nueva playa en equilibrio.

PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL PROBLEMA

Los modelos de propagación de oleaje monocromático (OLUCA-RD) y de propagación de oleaje espectral (OLUCA-SP), han sido desarrollados con base en la formulación no-lineal de la aproximación parabólica de la refracción-difracción, con interacción oleaje-corriente, formulación propuesta por Kirby (1986a).

Estos modelos se clasifican dentro de los modelos no dispersivos en amplitud que resuelven la fase y son aplicables sobre batimetrías complejas en dirección a la costa. La batimetría puede incluir la formación de bajos en las desembocaduras de entradas costeras o estuarios, donde la refracción, difracción, asomeramiento, rotura por fondo e interacción ola-corriente son de forma simultánea importantes.

El modelo OLUCA-RD requiere como condición inicial en el contorno exterior (mar adentro), un oleaje definido por una onda (altura de ola, período y dirección), la cual es propagada mediante el modelo parabólico en una malla rectangular sobre la batimetría. De manera análoga, el modelo OLUCA-SP requiere como condición inicial del oleaje en el contorno exterior, un estado de mar direccional, el cual se representa mediante un espectro bidimensional discretizado en componentes de energía frecuenciales y direccionales, las cuales se propagan de manera simultánea mediante el modelo parabólico.

Dado que los dos modelos se basan en la misma aproximación parabólica, a continuación se presentan diferentes formulaciones de propagación de oleaje y el modelo parabólico. Posteriormente, se hablará acerca de las diferencias de su aplicación tanto para el caso de oleaje monocromático, como el caso espectral.

- *MODELOS DE REFRACCIÓN Y DIFRACCIÓN*



La refracción del oleaje determinada mediante las técnicas del trazado de los rayos, utilizando el principio de Fermat y la ecuación de la conservación de la energía a lo largo de cada rayo no incluye la difracción de las ondas y, por lo tanto, resulta inadecuada cuando los efectos de la difracción son importantes. En efecto, frecuentemente, debido a las complejidades de la batimetría, los diagramas de rayos presentan múltiples intersecciones, lo que lleva a dificultades en la interpretación, dado que la teoría predice amplitud de onda infinita en los puntos de intersección.

La difracción del oleaje alrededor de estructuras simples tales como rompeolas se ha resuelto analíticamente para fondo de profundidad constante, Sommerfeld (1886). En el caso de estructuras cilíndricas, McCamy y Fuchs (1954) presentaron la solución para fondo plano horizontal. Estas soluciones no dan sólo la altura de onda en el área abrigada por la estructura, sino que con ellas se obtiene también el oleaje reflejado por ella. Versiones generalizadas de estos problemas de difracción, utilizando técnicas numéricas como el método de la función de Green, han dado lugar a potentes procedimientos de cálculo de fuerzas del oleaje sobre estructuras en aquellos casos en los que la fuerza de arrastre es mucho menor que la de inercia.

Una práctica generalizada para incorporar los efectos de la difracción ha sido el suspender los de la refracción en aquellas áreas donde la difracción es dominante y utilizar la solución analítica de Sommerfeld para fondo plano horizontal. Fuera del área de difracción predominante, se desprecian los efectos difractivos y sólo se considera la refracción. Esta metodología es claramente inexacta, pero permite la inclusión de la difracción de una manera aproximada.

Los modelos combinados de refracción/difracción incluyen ambos efectos explícitamente y, por lo tanto, permiten el modelado del oleaje en aquellas regiones donde la batimetría es irregular y/o donde los efectos de la difracción son importantes. Las situaciones en las que los rayos se cruzan debido a concentraciones locales, provocando cáusticos, se tratan adecuadamente por medio de estos modelos sin que se predigan amplitudes infinitas.

Los modelos de refracción/difracción combinada son apropiados para el cálculo de las alturas de ola y su dirección en aquellas áreas donde están presentes ambos fenómenos.



Como ejemplos, se puede indicar los casos del cálculo del oleaje que penetra en una bahía, o el abrigo producido por una isla cercana a la costa.

El modelo parabólico de refracción/difracción débilmente no lineal que se presenta en este apartado se basa en un desarrollo de Stokes de las ecuaciones que definen el problema de las ondas en el agua, se obtiene a partir de las formulaciones de pendiente suave e incluye una aproximación hasta el tercer orden de la velocidad de fase de la onda o celeridad. La amplitud de la onda se aproxima hasta el segundo orden (Liu and Tsay; 1984). Es necesario indicar que el modelo no contiene todos los términos de tercer orden de un desarrollo de Stokes. Además, el modelo permite determinar el efecto de corrientes dadas sobre la propagación del oleaje.

La aplicación del modelo teórico a situaciones prácticas incluye el uso de una aproximación parabólica, lo que restringe el uso del modelo a los casos donde la dirección de propagación del oleaje está dentro de $\pm 55^\circ$ alrededor de una dirección de propagación dominante. Los modelos desarrollados en forma de una ecuación parabólica no tienen en cuenta el oleaje reflejado por las estructuras, lo que quiere decir que el fenómeno de la reflexión del oleaje no se reproduce correctamente. La aproximación parabólica se resuelve por medio de una técnica de diferencias finitas para la amplitud de la onda, resultando un sistema en matrices tridiagonales que son, desde el punto de vista de la computación, muy rápidas de invertir.

- *ECUACIÓN DE LA PENDIENTE SUAVE*

El problema de la propagación de ondas sobre batimetría irregular es tridimensional e involucra complicadas condiciones de contorno no lineales. Por este motivo, existen muy pocas soluciones al problema tridimensional y todas ellas lo son para fondo plano horizontal. En dos dimensiones, los sofisticados modelos de Chu and Mei (1970) y Djordjevic and Redekopp (1978) predicen el comportamiento de ondas de Stokes sobre batimetría con variación suave. Para la simplificación del problema tridimensional, Berkhoff (1972), entre otros, hizo notar que la mayor parte de las propiedades de las ondas progresivas lineales podrían ser predichas mediante un modelo ponderado integrado verticalmente.

La ecuación a la que llegó Berkhoff (1972) se conoce con el nombre de "mild slope equation" es decir, ecuación de pendiente suave. La ecuación puede escribirse en función



del desplazamiento de la superficie libre, $\eta(x, y)$, mediante la utilización de un operador de gradiente horizontal como:

$$\nabla \left(c c_g \nabla \eta \right) + \sigma^2 \frac{c_g}{c} \eta = 0 \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned} \nabla &= \frac{\partial}{\partial x_j} \quad j = 1, 2 \\ c &= \sqrt{\left(\frac{g}{k} \right) \tan h kh} = \text{Celeridad de la onda} \\ c_g &= c \frac{\left(1 + \frac{2kh}{\sin h 2kh} \right)}{2} = \text{Celeridad de grupo} \end{aligned}$$

Donde $h(x, y)$ es la profundidad local de agua, y g la aceleración de la gravedad. El número de onda local $k(x, y)$, está relacionado con la frecuencia angular, σ , y la profundidad, h , mediante la relación de dispersión lineal:

$$\sigma^2 = g k \tan h kh \quad (2)$$

El perfil de la onda viene dado por:

$$\eta = A(x, y) e^{i\sigma t} \quad (3)$$

Donde, $A(x, y)$ es la amplitud compleja con información sobre la fase y la amplitud real de la onda.

Berkhoff (1972) fue el primero en obtener una ecuación de propagación para ondas de pequeña amplitud en zonas con profundidad suavemente variable. Posteriormente, dicha ecuación se amplió para incluir también los efectos de corrientes por Booij (1981) y Kirby (1983). Se han utilizado diferentes métodos matemáticos para obtener las ecuaciones para pendientes suaves. Mientras que Luke (1967), Booij (1981) y Kirby (1983) utilizaron un principio variacional, otros autores han aplicado métodos basados en perturbaciones.



Numerosos autores han aplicado la ecuación de la pendiente suave a diversos casos, principalmente utilizando técnicas de diferencias finitas, ver como ejemplos Jonsson and Skovgaard (1979), Bettes and Zienkiewicz (1977) y Houston (1981).

Radder (1979) desarrolló para la ecuación de la pendiente suave una aproximación parabólica que tiene varias ventajas sobre la forma elíptica presentada por Berkhoff (1972). Primero, no son necesarias las condiciones de contorno en el extremo inferior del recinto de integración y, segundo, permite técnicas de resolución muy eficientes por medio de un modelo en diferencias finitas. Radder (1979) utilizó una técnica de partición de matrices, que implica la separación del campo de ondas en una onda propagándose hacia adelante y otra hacia atrás, despreciándose posteriormente esta segunda (lo que se justifica porqué en la mayoría de las aplicaciones sólo tiene interés la onda que se propaga hacia adelante). La aproximación de Radder (1979) para las derivadas transversales en la dirección normal a la de propagación, impone una restricción a su modelo parabólico: las ondas deben propagarse dentro de los $\pm 45^\circ$ alrededor de la dirección principal de propagación. Booij (1981) desarrolló también un método para la partición de la matriz de la ecuación elíptica, pero su procedimiento incluye más términos en la aproximación de las derivadas transversales y, por lo tanto, su método permite al modelo parabólico manejar ondas dentro del rango de $\pm 55^\circ$ alrededor de la dirección supuesta. Este procedimiento de Booij es el que se utiliza en el modelo de oleaje monocromático OLUCA-RD y el modelo espectral OLUCA-SP.

La aproximación parabólica débilmente no lineal a la ecuación de pendiente suave viene dada por:

$$c_g \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k) c_g A + \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_g}{\sigma} \right) A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[p \frac{\partial A}{\partial y} \right] - i\sigma k^2 D |A|^2 \frac{A}{2} = 0 \quad (4)$$

Donde:

$$p = c c_g$$



\bar{k} = Número de onda de referencia, tomado como la media a lo largo del eje y .

D = Forma parte del término no lineal, y se define como:

$$D = \frac{(\cosh 4 kh + 8 - 2 \tan h^2 kh)}{8 \operatorname{sen} h^4 (kh)} \quad (5)$$

- **MODELOS COMBINADOS DE REFRACCIÓN/DIFRACCIÓN.**

Los predecesores del OLUCA-RD y el OLUCA-SP fueron desarrollados por Kirby (1983) y Kirby and Dalrymple (1983a), el primero mediante una aproximación Lagrangiana y los segundos mediante una técnica de escalas múltiples.

Estos modelos rellenan el hueco entre los modelos no lineales de difracción y la ecuación lineal de la pendiente suave. Este modelo se puede escribir de diferentes maneras dependiendo de la aplicación. Para aplicaciones dependientes del tiempo se utiliza la forma hiperbólica y para problemas estacionarios, la forma elíptica. Ambas requieren del uso de condiciones de contorno en todos los laterales del dominio del modelo.

Estas condiciones son difíciles de establecer, puesto que la reflexión no es conocida a priori. Estos modelos tienen, sin embargo, la ventaja de que no presentan restricciones para la dirección del oleaje.

Kirby and Dalrymple (1984a) muestran una comparación entre su modelo débilmente no lineal de (1983a) y datos de laboratorio. Los ensayos de laboratorio, realizados en el Delft Hydraulics Laboratory por Berkhoff, Booij and Radder (1982), consistieron en la determinación de la amplitud de las ondas sobre un bajo en un fondo con pendiente. Mientras los resultados predichos por Berkhoff, Booij and Radder (1982) mediante el trazado de los rayos resultaron ser una muy pobre aproximación a los ensayos, la predicción obtenida con el modelo de Kirby and Dalrymple (1984a) fue excelente.

Las comparaciones entre los modelos parabólicos lineales y no lineales demostraron la importancia de los términos no lineales dispersivos en las ecuaciones.



- **MODELOS DE INTERACCIÓN OLEAJE/CORRIENTES.**

Utilizando una aproximación Lagrangiana, Booij (1981) desarrolló una versión de la ecuación de la pendiente suave que incluye los efectos de una corriente. En este modelo las corrientes se suponían débiles y cualquier producto entre velocidades de corriente era despreciado. Kirby (1984a) presentó la forma corregida de su modelo de la ecuación de pendiente suave para incluir corrientes. El término no lineal fue añadido por Kirby and Dalrymple (1983b) y en este artículo presentaron los resultados de modificación de las ondas al atravesar un chorro de corriente. La ecuación de pendiente suave modificada para una corriente débil que presentaron es:

$$(c_g + U) A_x + V A_y + i(\bar{k} - k)(c_g + U) A + \frac{\sigma}{2} \left[\left(\frac{c_g + U}{\sigma} \right)_x + \left(\frac{V}{\sigma} \right)_y \right] A - \frac{i}{2\sigma} (p - V^2) A_y - i\sigma \frac{k^2}{2} D |A|^2 A = 0 \quad (6)$$

Donde $p = c_g$ y \bar{k} = número de onda de referencia, tomando como el promedio del número de onda a lo largo del eje y , U es la velocidad media de corriente en la dirección de la coordenada x y V en la dirección y . El término no lineal incluye D , que es:

$$D = \frac{(\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh)}{8 \operatorname{sen}^4(kh)}$$

Por último, Kirby and Dalrymple (1985) han desarrollado una versión no lineal del modelo parabólico que incluye corrientes fuertes, con base en una formulación Lagrangiana (principio variacional) descrita por Luke (1967), para un fluido no viscoso e irrotacional con una superficie libre. Operando el modelo descrito en Kirby & Dalrymple (1983a,b) se llega a la siguiente ecuación parabólica para la amplitud compleja A :

$$(c_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k)(c_g + U) A + \frac{\sigma}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_g + U}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V}{\sigma} \right) \right] A$$



$$\begin{aligned}
& -\frac{i}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[UV \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[UV \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\
& + \frac{l}{4k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + 2i \frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\
& - \frac{\beta}{4} \left\{ 2i \omega U \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) + 2i \sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) - 2UV \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} \\
& - \frac{\beta}{4} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c c_g - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{4k} \left[\frac{\partial}{\partial y} (\omega V) + 3 \frac{\partial}{\partial x} (\omega U) \right] \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \\
& + \alpha A + \frac{\gamma A}{2} + \frac{i \sigma}{2} G(|A|, kh) A = 0 \tag{7}
\end{aligned}$$

siendo:

$$\beta = \frac{l}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{l}{2k^2 (c c_g - U^2)} \frac{\partial}{\partial x} [k (c c_g - U^2)]$$

y donde $A = A(x, y)$ es la función compleja de la amplitud de la onda, α la disipación por rotura del oleaje, γ la disipación por fricción en el fondo, $G(|A|, kh)$ es una función no lineal con la amplitud, $\vec{U} = (U, V)$ es el vector velocidad de la corriente, ω es la frecuencia angular absoluta, σ es la frecuencia angular intrínseca, c es la celeridad de fase o de la onda,



c_g es la celeridad de grupo, k es el número de onda y \bar{k} es el número de onda de referencia medio a lo largo del eje y .

Esta ecuación es la discretizada en el modelo monocromático OLUCA-RD, la cual permite propagar una onda definida por su amplitud, frecuencia y dirección como condición inicial. El desarrollo y las operaciones que se requieren para llegar hasta esta ecuación son muy extensos y no se ha creído apropiado describirlos detalladamente. Dicho desarrollo puede encontrarse en las referencias: Kirby and Dalrymple (1985), y Kirby (1986a).

Aplicando el principio “Mínimax”, la ecuación (7) ha sido extendida por Kirby (1986c), permitiendo ángulos de propagación mayores con respecto al eje x . La ecuación oleaje-corriente extendida que gobierna la refracción, difracción, asomeramiento y disipación de una componente discreta con frecuencia j y dirección l , es la siguiente:

$$\begin{aligned}
& (C_{gj} + U)(A_{jl})_x - 2\Delta_1 V(A_{jl})_y + i(\bar{k}_j - a_0 k_j)(C_{gj} + U)A_{jl} \\
& + \left\{ \frac{\sigma_j}{2} \left(\frac{C_{gj} + U}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_1 \sigma_j \left(\frac{V}{\sigma_j} \right)_y \right\} A_{jl} \\
& + i\Delta'_j \left[\left((CC_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_y \\
& - i\Delta_l \left\{ \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_x + \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x \right]_y \right\} \\
& + \frac{-b_1}{k_j} \left\{ \left[\left((CC_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_{yx} + 2i \left(\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right)_x \right\} \\
& + b_l \beta_j \left\{ 2i\omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + 2i\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y - 2UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{xy} + \left[\left((CC_g)_j - V^2 \right) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_y \right\}
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& -\frac{i}{k_j} b_l \left\{ (\omega_j V)_y + 3(\omega_j U)_x \right\} \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x \\
& -\Delta_2 \left\{ \omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + \frac{1}{2} \omega_j U_x \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right\} + ik_j \omega_j U (a_0 - 1) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \\
& + \alpha A_{jl} + \frac{\gamma_j}{2} A_{jl} + \frac{i\sigma_j}{2} G_{jl} (|A_{jl}|, k_j h) A_{jl} = 0 \tag{8}
\end{aligned}$$

Donde α y γ son los coeficientes de disipación de energía por rotura del oleaje y fricción por fondo respectivamente, las demás variables se definen como:

- $A_{jl} = A(x, y)$, función compleja de la amplitud, para una componente frecuencial j y direccional l
- $h = h(x, y)$, profundidad
- $\vec{U} = (U, V)$, vector velocidad de la corriente en el eje x e y respectivamente
- ω_j , frecuencia angular absoluta de la componente j
- σ_j , frecuencia angular intrínseca de la componente j
- c_j , celeridad de fase o de la ola de la componente j
- c_{gj} , celeridad de grupo de la componente j
- k_j , número de onda local de la componente j
- \bar{k}_j , número de onda medio en y de la componente j

$$\sigma_j = \omega_j - k_j U$$

$$\beta_j = \frac{1}{k_j^2} \frac{\partial k_j}{\partial x} + \frac{1}{2k_j^2 (c_j c_{gj} - U^2)} \frac{\partial}{\partial x} [k_j (c_j c_{gj} - U^2)]$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1; \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1; \quad \Delta_j = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}_j}{k_j}$$



$$D_j = \frac{\cosh(4k_j h) + 8 - 2 \tanh^2(k_j h)}{8 \sinh^4(k_j h)} \quad (9)$$

Los coeficiente a_0 , a_1 y b_1 se escogen con base en el criterio de mínimo error aplicando el principio “Minimax”. Siguiendo Greene (1984), Kirby (1986c) describe la aplicación del principio de “Minimax” en problemas de superficie de ondas, las tablas con resultados de los coeficientes pueden ser consultados en dicha referencia. Los coeficientes dependen de un ancho de apertura permitido dependiendo de la dirección de las olas. Algunos de estos coeficientes se definen como:

Tabla 1. Rango de coeficientes a_0 , a_1 y b_1 de acuerdo con aproximaciones parabólicas.

Aproximaciones parabólicas	a_0	a_1	b_1
Simple: Radder (1979)	1	-0.50	0.00
Padde (1,1): Booij (1981), Kirby (1986c)	1	-0.75	-0.25
Minimax 70: Kirby (1986c)	0.994733030	-0.890064831	-0.451640568

Kirby (1986c) encontró que para rangos máximos (Minimax 70°) se obtienen resultados razonables dentro de los ángulos que típicamente se utilizan, pero mantiene reservas en cuanto a su aplicación en modelos numéricos, dado que todavía esta aproximación no ha sido suficientemente comprobada. Kirby (1994), recomienda el uso de Padde (1,1) el cual se ha implementado en el modelo espectral OLUCA-SP, obteniéndose resultados razonables dentro de los $\pm 55^\circ$ con el eje x .

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARABÓLICO EN EL OLUCA-RD

A continuación se describe brevemente como se ha implementado dentro del modelo de propagación de oleaje monocromático OLUCA-RD, el modelo parabólico de la ecuación (7).

- **DISPERSIÓN DEL OLAJE DEBIDO A LA ALTURA DE ONDA**

Desde que se presentaron los primeros modelos de la refracción y la difracción combinadas, se sigue investigando el desarrollo de estos modelos originales, basados en



teoría lineal, para que den respuesta a varios fenómenos físicos reales no cubiertos todavía por dicha teoría. Entre los fenómenos que son de particular importancia destaca la no linealidad de las ondas, que provoca un aumento de la celeridad por efecto de la dispersión debida a la amplitud, y no sólo debida a la frecuencia, como ocurre en ondas lineales. Se ha demostrado, Kirby and Dalrymple (1983a), (1984a) que la consideración de fenómenos no lineales puede provocar una clara distorsión de los resultados a partir de unas pocas longitudes de onda.

Estrictamente hablando, el modelo OLUCA-RD se basa en un desarrollo de Stokes y, por lo tanto, está restringido a aquellas aplicaciones donde son válidas las ondas de Stokes. Una medida de la no linealidad es el parámetro de Ursell que viene dado por:

$$U = HL^2 / b^3 \quad (10)$$

Cuando este parámetro excede de 40, la solución de Stokes deja de ser válida. Para lograr que el modelo sea válido en profundidades mucho menores, se le implementa como opción una relación de dispersión empírica del tipo de la dada por Hedges (1976). Esta relación entre la frecuencia y la profundidad del agua es:

$$\sigma^2 = g k \tanh [kh + k|A|] \quad (11)$$

En profundidades reducidas, esta ecuación converge con la de la onda solitaria, mientras que en profundidades indefinidas se aproxima asintóticamente a los resultados de la onda lineal, despreciando los efectos dispersivos. Por esta razón, se utiliza un modelo, con una relación de dispersión que da una transición suave entre la forma de Hedges (válida en profundidades reducidas) y la de Stokes (válida en profundidades indefinidas). El siguiente es el modelo híbrido propuesto por Kirby and Dalrymple (1986b):

$$\sigma^2 = gk(1 - f_1 k^2 |A|^2 D) \tanh(kh + f_2 k |A|) \quad (12)$$

donde f_1 y f_2 dependen de (kh) y $|A|$ es la amplitud de la onda.

Como resultado de las diferentes relaciones de dispersión posibles, se dispone de tres opciones en el OLUCA-RD: (1) modelo lineal, (2) modelo híbrido Stokes-Hedges no lineal, y (3) modelo de Stokes. De estas opciones, la (2) cubre un rango mayor de profundidades de agua y alturas de ola que las otras.



- **MODELADO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA**

En muchos casos, la simulación realista de la propagación de oleaje requiere la inclusión de efectos de disipación de energía, que introducen una ligera no linealidad. La presencia localizada de disipación de energía en el fondo o en algún punto de la columna de agua provoca la difracción del oleaje, así como su atenuación.

La inclusión de un término de disipación de energía en una ecuación de propagación fue estudiada por Skovgaard, Jonsson & Bertelsen (1975), quienes presentaron un modelo de disipación por fricción de fondo. Siguiendo esta idea, Booij (1981) y posteriormente Dalrymple, Kirby & Hwang (1984) desarrollaron modelos parabólicos incluyendo dicho término de disipación.

Dalrymple, Kirby & Hwang (1984), siguiendo el método empleado por Booij (1981), introdujeron un factor de disipación γ en la ecuación de Berkhoff (1972):

$$\nabla_{\perp} (c c_g \nabla_{\perp} \phi) + (k^2 c c_g + i\sigma\gamma)\phi = 0 \quad (13)$$

Disipación por fricción en el fondo

Siguiendo el razonamiento para la obtención de la ecuación parabólica de Radder (1979), separando las componentes incidente y reflejada, se llega a una ecuación parabólica con el término de disipación que se muestra en la ecuación (7):

$$+ \frac{\gamma}{2} A \quad (14)$$

donde γ , es la disipación de la energía, dividida por la energía (sus unidades son tiempo⁻¹), la cual adopta diferentes expresiones dependiendo del origen de la disipación de energía. El modelo OLUCA-RD permite tres opciones de disipación por fondo: (1) capa límite laminar en superficie y fondo (ver Phillips, 1966); (2) capa límite turbulenta (ver Dean y Dalrymple, 1984); y (3) fondos porosos de arena (ver Liu y Dalrymple, 1984).



En el campo, las condiciones de oleaje son tales que la capa límite en el fondo es siempre turbulenta. En este caso, la disipación de energía se puede obtener utilizando el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, f . Dean and Dalrymple (1984) demostraron que la disipación de energía para esta capa límite, viene dada por la expresión:

$$\gamma = \frac{2\sigma f k |A| (1-i)}{3\pi \sinh(2kh) \sinh(kh)} \quad (15)$$

con $f = 4 f_\omega$, donde $f_\omega = 0.01$ (f_ω es el coeficiente de Darcy-Weisbach para olas).

Disipación por rotura del oleaje

En la ecuación (7) el término de disipación por rotura del oleaje se presenta mediante la relación:

$$+ \alpha A \quad (16)$$

Donde α es un coeficiente de disipación. Dally et al. (1985) demostraron que la razón de pérdida de flujo de energía del oleaje dependía del exceso de flujo de energía sobre un valor determinado. Este modelo ha sido probado en laboratorio para un determinado número de diferentes valores de la pendiente del fondo y predice muy bien la altura de ola en la zona de rotura. Kirby and Dalrymple (1985) demostraron que la disipación debida a la rotura del oleaje se puede expresar mediante:

$$\alpha = (KC_g(1-(\gamma b/H^2)))/b \quad (17)$$

donde $K = 0.15$ y $\gamma = 0.4$ son constantes empíricas determinadas por Dally et al. (1985). Aquí, la altura de ola viene dada por $H = 2\sqrt{A}$. Utilizando este modelo de disipación y un índice de rotura ($H > 0.78b$) para determinar el inicio de la rotura, el OLUCA-RD es capaz de determinar el oleaje tanto fuera como dentro del área de rotura. El algoritmo de rotura del oleaje siempre es activo en el modelo.

- **MODELADO DEL OLAJE MONOCROMÁTICO**

Condiciones iniciales

A pesar de que el OLUCA-RD se aplica típicamente con trenes de ondas monocromáticos, no existe una restricción intrínseca a este caso. Como condición inicial se da una onda



monocromática, la cual define a partir de un período (T_0), una dirección (θ_0) y una altura de ola inicial (H_0), la cual es impuesta sobre la línea de mar abierto de la malla (correspondiente a $x = 0$). Como esta línea es paralela al eje y , la onda se define generalmente por:

$$A(0,y) = \frac{H_0}{2} e^{iy} \quad (18)$$

donde H_0 es la altura de ola inicial y l es el número de onda en la dirección y . La l está relacionada con el número de onda k por la relación $l = k \text{ sen}(\theta_0)$, donde θ_0 es el ángulo que forma la onda con el eje x .

El contorno del fondo se define a partir de la batimetría inicial y un nivel de marea, con los cuales se genera una malla regular de cálculo.

Superficie libre y altura de ola en el dominio

Asumiendo que la superficie libre del agua es periódica en el tiempo y que la dependencia espacial se puede dividir en una fase que varía rápidamente y en una amplitud que varía lentamente, la elevación de la superficie libre del agua, η , puede ser representada como:

$$\begin{aligned} \eta(x,y) &= \text{Re}\{A(x,y)e^{\psi}\} \\ \psi &= i\bar{K}x - \sigma \\ \bar{K}(x) &= \frac{1}{B} \int_0^B k(x,y)dy \end{aligned} \quad (19)$$

donde:

x, y = sistema de coordenadas, tal que el eje x va en la dirección principal de propagación y el eje y perpendicular a éste.

$\text{Re}(\bar{z})$ = parte real de un número complejo \bar{z} .

$A(x,y)$ = amplitud compleja, definida en un punto x, y del dominio.

$k(x,y)$ = número de onda en un punto x, y .

$\bar{K}(x)$ = número de onda medio, representativo de una fila en y .

B = ancho del dominio (en el eje y).

Cuando el campo de oleaje consiste de ondas planas, $A(x,y)$ puede ser representada en términos de la amplitud constante (a) y una dirección (θ) como:



$$A(x, y) = ae^{i[(k \cos \theta - \bar{K})x + k \sin \theta y]} \quad (20)$$

La altura de ola en cada punto del dominio se define como:

$$H(x, y) = 2|A(x, y)| = 2a \quad (21)$$

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARABÓLICO EN EL OLUCA-SP

La ecuación (8) del modelo parabólico se ha implementado dentro del modelo espectral de propagación OLUCA-SP, teniendo en cuenta los aspectos que se explican a continuación:

- **DISPERSIÓN DEL OLEAJE DEBIDO A LA ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE**

Con el fin de incluir efectos no lineales en la propagación de componentes de energía de un estado de mar, Kirby et al. (1994) propone modificar las relaciones de dispersión aplicadas en ondas monocromáticas (Hedges, ecuación (11) y modelo híbrido, ecuación (12)). Esta modificación se fundamenta en que los efectos no lineales incrementan su importancia cuando la rotura del oleaje es fuerte. Dado que la altura de ola significativa H_s , es importante dentro de los modelos de rotura como se verá más adelante, ésta ha sido incluida en las modificaciones en las relaciones de dispersión.

El modelo OLUCA-SP permite las siguientes opciones de ecuaciones de dispersión, para una frecuencia dada j :

$$\sigma_j^2 = gk_j(1 + \varepsilon_j^2 D_j) \tanh(k_j h) \quad \text{Stokes sin modificar} \quad (22)$$

$$\sigma_j^2 = gk_j \tanh(k_j h + \varepsilon_s) \quad \text{Hedges modificado} \quad (23)$$

$$\sigma_j^2 = gk_j(1 + f_{1j} \varepsilon_j^2 D_j) \tanh(k_j h + f_{2j} \varepsilon_s) \quad \text{Modelo híbrido modificado, Kirby} \quad (24)$$

donde:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j &= k_j |A|_{jl} \\ \varepsilon_s &= k_j H_s / 2 \end{aligned} \quad (25)$$



siendo h la profundidad en un punto dado del dominio, y D_p , f_{1j} y f_{2j} los mismos definidos anteriormente, para una frecuencia j . De estas opciones la (24) cubre un mayor rango de profundidades de agua.

- **MODELADO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA**

Disipación por fricción en el fondo

De manera similar al modelo de propagación de oleaje monocromático, la disipación por fondo aparece en la ecuación parabólica (8), mediante el término:

$$+ \frac{\gamma_{jl}}{2} A_{jl} \quad (26)$$

Donde γ_{jl} se define para cada componente frecuencial i y direccional l . Al igual que el modelo monocromático se tienen tres posibilidades: (1) capa límite laminar en superficie y fondo; (2) capa límite turbulenta; y (3) fondo poroso de arena. La más utilizada y por defecto en el modelo es la segunda, expresada como:

$$\gamma_{jl} = \frac{2\sigma_j f k_j |A_{jl}| (1-i)}{3\pi \sinh(2k_j h) \sinh(k_j h)} \quad (27)$$

Disipación por rotura del oleaje

En general, los modelos de disipación del oleaje en rotura pueden clasificarse en dos categorías:

- modelos de disipación asociado a la propagación de bores; y
- modelos que determinan la variación espacial de la energía de las olas o de la "wave action".

El modelo OLUCA-SP permite seleccionar entre tres modelos, dos de la primera categoría (Battjes y Janssen, 1978 y Thornton y Guza, 1983) y otro de la segunda categoría (Winyu y Tomoya, 1998).

Cuando el oleaje se aproxima a profundidades reducidas cercanas a la zona de rotura, domina fundamentalmente el asomeramiento y la refracción debido al contorno del fondo. Se incrementan las velocidades y se genera disipación debido principalmente a la fricción



del fondo y percolación. Dadas las características aleatorias del oleaje en un estado de mar (diferentes amplitudes, períodos y fases), no existe un punto de rotura, sino una zona de rotura donde en cada punto existen olas rotas y no rotas, siendo la turbulencia el principal mecanismo de disipación. Con lo cual, el proceso de disipación de energía del oleaje asociado a un porcentaje de olas rompiendo en una profundidad dada, se encuentra ligado a las propiedades estadísticas del estado de mar en dicho punto (altura de ola significativa, H_s o altura de ola cuadrática media H_{rms}).

El OLUCA-SP resuelve numéricamente el sistema mediante avances espaciales en el dominio, en cada paso, propaga todas las componentes de energía, las cuales recompone linealmente para obtener H_s o H_{rms} (asociadas a un estado de mar). Siendo esta información estadística, la que se emplea como entrada al modelo de disipación de energía debido a la rotura. El OLUCA-SP aplica una aproximación espectral al proceso de rotura del oleaje sin considerar la rotura individual de las componentes propagadas.

La disipación por rotura en la ecuación parabólica (8), se incluye mediante el término:

$$+ \alpha A_{jl} \quad (28)$$

donde:

$$\alpha = \frac{4\bar{D}}{\rho g H_{rms}^2} \quad (29)$$

siendo H_{rms} la altura de ola media cuadrática y \bar{D} la tasa media temporal de disipación de energía por unidad de área, debida a la rotura del oleaje. El OLUCA-SP presenta como alternativas los siguientes modelos de \bar{D} :

$$\bar{D} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\alpha_1}{4} \rho g f_p H_{rms}^2 \left(\frac{-\ln Q_b}{1-Q_b} \right) Q_b \quad \text{Battjes y Janssen (1978)} \\ \frac{3\sqrt{\pi}}{16} \rho g \frac{B^3 f_p}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^7 \quad \text{Thornton y Guza (1983)} \\ \frac{k_5}{8h} \rho g Q_b C_p H_{rms}^2 \left[1 - \frac{(\Gamma_e h)^2}{H_{rms}^2} \right] \quad \text{Winyu y Tomoya (1998)} \end{array} \right\} \quad (30)$$

con:



α_1	=	constante asociada al tipo de rotura ($\alpha_1 \sim 1$)
f_p	=	frecuencia pico
H_{rms}	=	$H_{rms}(x, y)$ altura de ola media cuadrática
Q_b	=	$Q_b(x, y)$ fracción de olas rotas en una profundidad del agua
B	=	constante asociada al tipo de rotura ($B \sim 1$)
k_s	=	constante proporcional ($k_s = 0.1$)
C_p	=	velocidad de fase asociada a la frecuencia pico
Γ_e	=	factor de estabilidad de la ola

Una calibración de los distintos parámetros de ajuste de estas expresiones en casos de laboratorio y playas reales, pueden ser consultados en G.I.O.C. (2000). Estos parámetros ya calibrados han sido fijados por defecto dentro del OLUCA-SP.

- **MODELADO DEL OLEAJE ESPECTRAL**

Condiciones iniciales

El oleaje asociado a un estado de mar se define a partir de un espectro bidimensional (S), el cual se localiza en el contorno exterior del dominio (mar adentro), dicho espectro se compone de un espectro frecuencial (E) y una función de dispersión dirección (D), tal como se muestra a continuación:

$$S(f, \theta) = E(f, h) \cdot D(\theta) \quad (31)$$

El modelo OLUCA-SP permite dos maneras de definir el espectro frecuencial, una mediante la lectura de un archivo externo, y otra a partir de un espectro TMA (Texel Marsen Arsloe) propuesto por Bouws et al. 1985. El espectro TMA (E_{TMA}) se aplica en zonas cercanas a la costa donde las profundidades son relativamente poco profundas y las olas son afectadas por el fondo, se define a partir de un espectro JONSWAP (E_{JON}), el cual es modificado por una función adimensional de la profundidad Φ_k (Hughes, 1984), siendo su expresión como se muestra a continuación:

$$E(f, h) = E_{TMA}(f, h) = E_{JON}(f) \cdot \Phi_k(\omega_h) \quad (32)$$



El espectro frecuencial de entrada queda definido a partir de cuatro parámetros: la profundidad del agua (h); la altura de ola significativa (H_s); la frecuencia pico (f_p); y el factor de ensanchamiento del pico (γ : $\gamma = 8-10$ oleajes tipo Swell, $\gamma = 2-4$ oleajes tipo Sea).

La distribución angular de ondas individuales de un espectro en el OLUCA-SP, se describe a partir de la siguiente función direccional normalizada, $D(\theta)$, propuesta por Borgman (1984):

$$D(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^J \left\{ \exp \left[-\frac{(j\sigma_m)^2}{2} \right] \cos j(\theta - \theta_m) \right\} \quad (33)$$

La función de dispersión direccional queda definida a partir de dos parámetros: (1) θ_m es la dirección media del oleaje; y (2) el parámetro σ_m que determina el ancho de la dispersión direccional ($\sigma_m = 5$ espectro estrecho y $\sigma_m = 30$ espectro ancho). J un número arbitrario de armónicos para representar la serie de Fourier (valor seleccionado en el OLUCA-SP $J = 100$). Esta expresión que ha sido aplicada con buenos resultados por diferentes autores (Vicent et al., 1989; Panchang et al., 1990, Pae et al., 1992; Chawla et al., 1998).

A partir del espectro bidimensional definido por la ecuación (31), éste se divide en componentes de igual energía: (N_f componentes frecuenciales) x (N_θ componentes direccionales), las cuales son propagadas simultáneamente aplicando el modelo parabólico de la ecuación (8), sobre una malla de la batimetría.

Superficie libre

De manera similar a la superficie libre monocromática, la superficie libre del oleaje espectral se puede expresar como:

$$\eta = \sum_j \sum_l \eta_{jl} = R_e \left\{ \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} A_{jl}(x, y) e^{\psi_j} \right\}$$

$$\psi_j = i\bar{K}_j x - \sigma_j \quad (34)$$

$$\bar{K}_j = \frac{1}{B} \int_0^B k_j(x, y) dy$$

donde:



x, y = Sistema de coordenadas, tal que el eje x va en la dirección principal de propagación y el eje y perpendicular a éste.

j, l = Índice que representan la frecuencia y dirección respectivamente.

$R_r(\xi)$ = Parte real de un número complejo ξ .

$A_{jl}(x, y)$ = Amplitud de onda compleja para una componente frecuencial, j y direccional, l . Definida en un punto (x, y) del dominio.

N_f, N_θ = Número de discretizaciones en frecuencia y dirección, respectivamente.

$k_j(x, y)$ = Número de onda para una componente con frecuencia angular, j .

σ_j = Frecuencia angular para la componente j .

$\bar{K}_j(x)$ = Valor representativo del número de onda asociado a una frecuencia angular j , en una coordenada x .

B = ancho del dominio (en el eje y).

$A_{jl}(x, y)$ puede ser representada para cada componente espectral, en términos de una amplitud constante a_{jl} y una dirección θ_{jl} como:

$$A_{jl}(x, y) = a_{jl} e^{i[(k_j \cos \theta_{jl} - \bar{K}_j)x + k_j \sin \theta_{jl} y]} \quad (35)$$

Clima de oleaje

El proceso de discretización del espectro bidimensional, permite definir componentes de energía a las cuales se les asocia una amplitud compleja $A_{j\theta}$ con una frecuencia f_j y un ángulo de incidencia θ_j . Para determinar las pérdidas de energía asociadas a la rotura del oleaje, ecuación (30), es necesario definir en cada punto del dominio una altura de ola estadística (altura de ola significativa, H_s o altura media cuadrática H_{rms}). Asumiendo una distribución de alturas de ola de Rayleigh y utilizando la información de las componentes espectrales en cada punto (x, y) del dominio, la altura de ola significativa se puede estimar como:

$$H_s(x, y) = \left(8 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)|^2 \right)^{1/2} \quad (36)$$

y la altura de ola media cuadrática H_{rms} , como:



$$H_{rms}(x, y) = \sqrt{2}H_s(x, y) \quad (37)$$

También en cada punto (x, y) del dominio se puede definir el espectro frecuencial $E(f)$, como:

$$E(f_j) = \frac{\sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)|^2}{2(\Delta f_j)} \quad (38)$$

Donde $j = 1, \dots, N_f$ y $\Delta f_j =$ ancho de incremento frecuencial para f_j .

Al objeto de definir el espectro bidimensional en un punto (x, y) del dominio, el espectro direccional se define dividiendo en 37 rangos de 5° entre $[\theta = -92.5^\circ$ y $\theta = 92.5^\circ]$. Para cada frecuencia, las componentes propagadas poseen un ángulo el cual se ubica en alguno de los 37 rangos direccionales. Posteriormente, se suma la energía para cada uno de los rangos. El espectro direccional se obtiene como:

$$S(f_j, \theta_k) = \frac{\sum_{l=1}^{z_{jk}} |A_{jl}(x, y)|^2}{2\Delta f_j \Delta \theta} \quad (39)$$

Donde $k = 1, \dots, 37$; $\Delta \theta = 5^\circ$; $z_{jk} =$ número de componentes en la frecuencia j que se encuentran en el rango k de dirección.

HIPÓTESIS DEL MODELO PARABÓLICO DE PROPAGACIÓN

1. **Fluido:** No viscoso, incompresible y densidad constante.
2. **Flujo:** Irrotacional y estacionario.
3. **Dinámicas:** Presión constante en la superficie libre; no se considera la acción del viento y no se considera la acción de Coriolis.
4. **Contornos:** se asume que la variación del fondo con las coordenadas horizontales, son pequeñas en comparación con la longitud de onda.
5. **Propagación**
 - No linealidad débil:



Dependencia de la ecuación de dispersión con la amplitud (Modelo OLUCA-RD), y con la altura de ola significativa (Modelo OLUCA-SP); modelo híbrido no lineal Stokes-Hedges.

- Aproximación parabólica:

Las componentes se propagan principalmente en una dirección (x). Con lo cual se desprecian términos $\left(\frac{\partial^2(\)}{\partial x^2}\right)$. La solución es tanto más aproximada cuanto menor variación haya en la dirección x .

Esta aproximación parabólica implica varias ventajas y desventajas:

Ventajas: (1) se ha mostrado como una ecuación de gobierno correcta para la propagación de componentes lineales sobre fondos de pendientes suaves, en presencia de corrientes; (2) es una ecuación de tipo parabólico y, como tal, no necesita condiciones en todo el contorno, sino que basta con una condición inicial en el contorno desde el que se va a propagar y condiciones en los contornos laterales; y (3) es una herramienta muy útil para reducir el esfuerzo y el tiempo de computación, pues pueden utilizarse esquemas implícitos de seis puntos como el de Crank-Nicholson y obtener soluciones rápidas y estables.

Desventajas: (1) limitación del ángulo de propagación del oleaje a $\pm 55^\circ$ con respecto al eje principal, (x); (2) se desprecia el efecto de las ondas reflejadas; y (3) las soluciones son tanto más aproximadas cuanto menor variación haya respecto a esa dirección principal.

MÉTODO DE RESOLUCIÓN

- *TÉCNICA DE CRANK-NICOLSON*

El modelo parabólico se resuelve adecuadamente mediante la técnica de diferencias finitas. Para lograrlo, la batimetría del área de estudio debe ser introducida en los nodos de una malla (x,y) rectangular, con incrementos en metros entre nodos de: D_x, D_y . Las coordenadas de un nodo se definen mediante los índices i, j de manera que $x = (i-1)D_x$ e $y = (j-1)D_y$. Los valores de la amplitud compleja $A(i,j)$ se determinan de manera que satisfagan la ecuación parabólica para todo i entre 1 y M y para todo j entre 1 y N . El procedimiento incluye expresar todas las derivadas en las direcciones (x,y) en términos de la amplitud compleja en varios puntos de la malla.

Debido a la no-linealidad de la ecuación en diferencias finitas, los términos no lineales se aproximan en un primer barrido utilizando los valores $A_{i,j}$. Una vez se han calculado los términos $A_{i+1,j}$ la ecuación se resuelve de nuevo para $A_{i+1,j}$ utilizando ahora los valores bien



calculados de los términos no lineales. Este proceso iterativo de doble barrido asegura que las no-linealidades del modelo se traten con exactitud (Kirby and Dalrymple (1983a)).

La solución progresa moviendo una fila de la malla en la dirección x (incrementando i en uno) y utilizando la técnica implícita-implícita de doble barrido se determina la amplitud compleja $A_{i+1,j}$ para todos los valores j de esa fila. En el caso monocromático solo se propaga una componente, en el caso espectral se propagan $(N_x * N_\theta)$ componentes simultáneamente entre la fila i y la fila $i+1$. Progresando en la dirección del oleaje, se repiten los cálculos hasta determinar los A_{ij} en todos los puntos ij . Aunque parezca que el método de Crank-Nicolson pueda ser costoso en tiempo de computador, debido a que se realiza una inversión de matriz para cada fila de la malla, las matrices son $3 \times N$ y el procedimiento de inversión es, de hecho, muy rápido. El procedimiento es económico en requerimientos de memoria, dado que sólo son necesarios los valores en las filas i e $i+1$ en cada cálculo.

- **CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO**

La condición inicial es vital para el modelo parabólico. En la primera fila del lado del mar, correspondiente a $i=1$, se define el oleaje incidente (monocromático o espectral). Estos oleajes se propagan entonces sobre la batimetría del modelo. En la sección de Oleaje se ha descrito las diferentes condiciones iniciales que se pueden implementar tanto para el OLUCA-RD como el OLUCA-SP.

Como en la solución de cualquier ecuación diferencial, las condiciones de contorno laterales son importantes. Existen varias maneras de tratar los contornos; sin embargo, ninguna de las condiciones de contorno existentes hasta el presente logran la transmisión total del oleaje radiado. Por lo tanto, en los dos modelos se utiliza generalmente una condición lateral de contorno totalmente reflejante en cada lado $j=1$ y $j=N$. Esto requiere que la especificación de la malla del modelo se realice con cuidado, debido a que la reflexión en los laterales de la onda incidente se puede propagar rápidamente hacia el área de interés, dando resultados erróneos. En general, la anchura del modelo debería ser tal que las reflexiones en los laterales no alcancen el área de interés.



BIBLIOGRAFÍA

- Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen (1978). "Energy loss and set-up due to breaking of random waves", Proc. 16th Coastal Engineering Conf., ASCE, 569-587.
- Berkhoff, J.C.W. (1972). "Computation of combined refraction-diffraction", Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Vancouver, 471-490.
- Berkhoff, J.C.W., N. Booij and A. C. Radder (1982). "Verification computations with linear wave propagation models for simple harmonic linear waves", Coastal Engineering, 1, 1271-1290.
- Bettes, P. and O.C. Zienkiewicz (1977). "Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements," Int. J. for Numerical Methods in Engrg., 1, 1271-1290.
- Booij, N. (1981). "Gravity waves on water with non-uniform depth and currents," Report n^o 81-1, Delft University of Technology, 131.
- Borgman, L.E. (1984). "Directional spectrum estimation for the S_y gages". Tech. Rep., Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Miss.
- Bouws, E., H. Gunther, W. Rosenthal and C. Vincent (1985). "Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water", J. Geophys. Res., 90, 975-986.
- Chawla, A., H.T. Özkan and J.T. Kirby (1998). "Spectral model for wave transformation and breaking over irregular bathymetry", Journal of Water., Port, Coastal and Ocean Eng., 189-198.
- Chu, V.C. and C.C. Mei (1970). "On slowly varying Stokes waves," J. Fluid Mech., 41, 873-887.
- Dally, W.R., R.G. Dean and R.A. Dalrymple (1985). "Wave height variation across beaches of arbitrary profile," Journal of Geophysical Research, 90, C6, 11917-11927.
- Dalrymple, R.A., J.T. Kirby and P.A. Hwang (1984). "Wave diffraction due to areas of energy dissipation," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, vol. 110, n^o 1, 67-79.
- Dean, R.G. and R.A. Dalrymple (1984). "Water wave mechanics for engineers and scientists," Englewood Cliffs: Prentice-Hall.



- Djordjevic, V.D. and L.G. Redekopp, (1978). "On the development of packets of surface gravity waves moving over and uneven bottom," *Z. Angew. Math. and Phys.*, 29, 950-962.
- G.I.O.C. (1999). "OLUCA-RD, Modelo integral de propagación de oleaje y corrientes en playas". Manual de referencia I, Universidad de Cantabria-Ministerio Medio Ambiente. Santander (España).
- G.I.O.C. (2000). "OLUCA-SP, Modelo espectral de propagación de oleaje y corrientes en playas". Manual de referencia, Universidad de Cantabria – Ministerio de Medio Ambiente. Santander (España).
- Greene, R.R. (1984). "The rational approximation to the acoustic wave equation with bottom interaction", *J. Acoust. Soc. Am.*, 76, 1764-1773.
- Hedges, T.S. (1976). "An empirical modification to linear wave theory", *Proc. Institute of Civil Engineering*, 61, 575-579.
- Houston, J.R. (1981). "Combined refraction-diffraction of short waves using the finite element method," *Applied Ocean Res.*, 3, 163-170.
- Hughes, S.A. (1984). "The TMA shallow-water spectrum description and applications". Tech. Report CERC-84-7, Coast. Eng. Res. Center, Waterways experiment station. Vicksburg, Miss.
- Jonsson, I.G. and O. Skovgaard (1979). "A mild-slope wave equation and its application to tsunami calculations," *Mar. Geodesy*, 2, 41-58.
- Kirby, J.T. (1983). "Propagation of weakly-nonlinear surface water waves in regions with varying depth and current", ONR Tech. Rept. 14, Res. Rept. CE-83-37, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
- Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple (1983a). "A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography," *J. Fluid Mech.*, 136, 543-566.
- Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple, (1983b), "The propagation of weakly nonlinear waves in the presence of varying depth and currents," *Proc. XXth Congress I.A.H.R.*, Moscow.
- Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple (1984a). "Verification of a parabolic equation for propagation of weakly non-linear waves," *Coastal Engineering*, 219-232.
- Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple (1985). "Modifications to a propagation model for the combined refraction-diffraction of Stokes waves; shallow water, large angle and breaking wave effects," Report UFL/COEL-85/001, Coastal and Oceanographical Engineering Department, University of Florida, Gainesville.
- Kirby, J.T. (1986a). "Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves," *Journal of Geophysical Research*, 91, C1, 933-952.
- Kirby, J.T. (1986b). "Open boundary condition in parabolic equation method," *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, vol. 112, n° 3, 460-465.
- Kirby, J.T. (1986c). "Rational approximations in the parabolic equation method for water waves," *Coastal Engineering*, 10, 355-378.



- Kirby, J.T. and H.T. Özkan (1994). "Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions. Ref/Dif's version 1.1. Documentation and user's manual, report No. CACR-94-04", Center Applied Coastal Research, University of Delaware.
- Liu, P.L.F. and R.A. Dalrymple (1984). "The damping of gravity water waves due to percolation", Coastal Engineering.
- Liu, P.L.F. and T.K. Tsay (1984). "On weak reflection of water waves," Journal Fluid Mech., 131, 59-71.
- Luke, J.C. (1967). "A variational principle for a fluid with a free surface," Journal of Fluid Mechanics, vol. 27 (2), 395-397.
- MacCamy, R.D. and R.A. Fuchs (1954). "Wave Forces on Piles: a Diffraction Theory". Tech. Memo, 69, Beach Erosion Board.
- Madsen, P.A., R. Murray and O.R. Sørensen (1991). "A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics". Coastal Eng. 15, 371-388.
- Pae, W., H. Mase and T. Sakai (1992). "Probabilistic calculation model of directional random waves", Proc. 23rd Int. Conf. On Coastal Engrg., Orlando, 540-550.
- Panchang, V.G., G. Wei, B. R. Pearce and M.J. Briggs (1990). "Numerical simulation of irregular wave propagation over shoal". J. Wtrwy. Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE, 116(3), 324-340.
- Phillips, O.M. (1966). "The dynamics of the upper ocean," Cambridge University, 261
- Radder, A.C. (1979). "On the parabolic equation method for water-wave propagation," Journal of Fluid Mechanics, vol. 95, part 1, 159-176.
- Skovgaard, O., I.G. Jonsson and J.A. Bertelsen (1975). "Computation of wave heights due to refraction and friction," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, 101, WW1, 15-31.
- Sommerfeld, A. (1886). *Mathematische theorie der diffraction*. Math. Annalen, 47, pp. 317-374.
- Thornton, E.B. and R.T. Guza (1983). "Transformation of wave height distribution", J. Geophys. Res., 88, c10, 5925-5938.
- Vincent, C.L. and M.J. Briggs (1989). "Refraction-diffraction of irregular waves over a mound". J. Wtrwy. Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE, 115(2), 269-284.
- Winyu, R. and S. Tomoya (1998). "Energy dissipation model for regular and irregular breaking waves", Coastal Eng. Journal, Vol. 40, n° 4, 327-346.

ANEXO V

ESTUDIO DE AGITACIÓN DE ONDAS CORTAS.

ÍNDICE

ÍNDICE	2
1.INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2.METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	2
2.1. Metodología general.....	2
2.2. Detalles de la propagación	2
2.2.1. Descripción del modelo MSP-UGR	2
2.2.2. Dominio, batimetría y condiciones de contorno	3
2.2.3. Casos propagados	4
2.2.4. Tratamiento de los resultados. Coeficientes de agitación en las zonas de interés....	4
2.3. Interpolación de los resultados para toda la base de datos	6
3.RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN.....	7
3.1. Salidas gráficas	7
3.2. Coeficientes de agitación para los casos propagados	10
3.3. Regímenes medios de oleaje	10
4.AGITACIÓN DEBIDA AL OLEAJE LOCAL	15
4.1. Oleaje local en el exterior de la bocana	15
4.2. Agitación en la dársena debido al oleaje local	19



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El objetivo concreto de este anejo es realizar un análisis detallado de la agitación debida al oleaje en la dársena del Puerto de Cádiz, una vez construida la Terminal de Contenedores según la Alternativa de Proyecto, para conocer la operatividad de sus muelles. La probabilidad de parada operativa se ha calculado por excedencia del umbral de operación de la variable altura de ola significativa.

Es de destacar, que en la batimetría usada en las propagaciones de oleaje no se han considerado las operaciones de dragado y la batimetría final resultante, por lo que los resultados expresados en este anejo podrían verse alterados ligeramente una vez determinada la batimetría definitiva.



2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. Metodología general

A partir de las características del oleaje en el punto A1, situado enfrente de la Bahía de Cádiz, en la batimétrica de 17 m (véase ANEJO IV), se ha propagado el oleaje hasta las distintas zonas de ataque de la dársena portuaria de Cádiz y el canal de navegación con el fin de calcular el régimen escalar de alturas de ola en cada zona.

Para ello, se han seleccionado algunos casos de oleaje representativos, y se han propagado numéricamente utilizando el modelo MSP-UGR hasta el interior del Puerto de Cádiz., donde se han obtenido los coeficientes de agitación en las distintas zonas de muelles para cada caso propagado. A partir de estos resultados, se han interpolado los coeficientes de agitación para toda la base de datos de oleaje, y se han calculado los regímenes escalares de altura de ola en cada zona analizada.

A continuación se describen con mayor detalle el modelo numérico utilizado y los pasos seguidos en cada una de las etapas.

2.2. Detalles de la propagación

2.2.1. Descripción del modelo MSP-UGR

El modelo numérico MSP (Mild Slope Potential) resuelve la ecuación de la pendiente suave en un dominio cerrado, mediante el método de los elementos finitos. Este modelo es capaz de modelar, además de la refracción, asomeramiento y la difracción, el proceso de reflexión, pero presenta como desventaja que, dado que la ecuación que resuelve es de tipo elíptico, es necesario imponer condiciones de contorno en todos los límites del dominio.

$$\nabla_h [c \cdot Cg \cdot \nabla_h \phi] + k^2 \cdot c \cdot Cg \cdot \phi = 0$$



2.2.2. Dominio, batimetría y condiciones de contorno

En la propagación numérica, se ha empleado el dominio que se presenta en la Fig. 1. Se ha definido el arco de entrada del oleaje en la zona exterior de la bahía, con una profundidad aproximada de 17 m, con el objetivo de incluir en el dominio el banco el Diamante y el canal de acceso al puerto, dos elementos de fundamental importancia en la transformación del oleaje a su entrada en la bahía. Se ha empleado una malla de 240802 elementos finitos triangulares de 20 m de lado en el centro del dominio y más pequeños en los contornos.

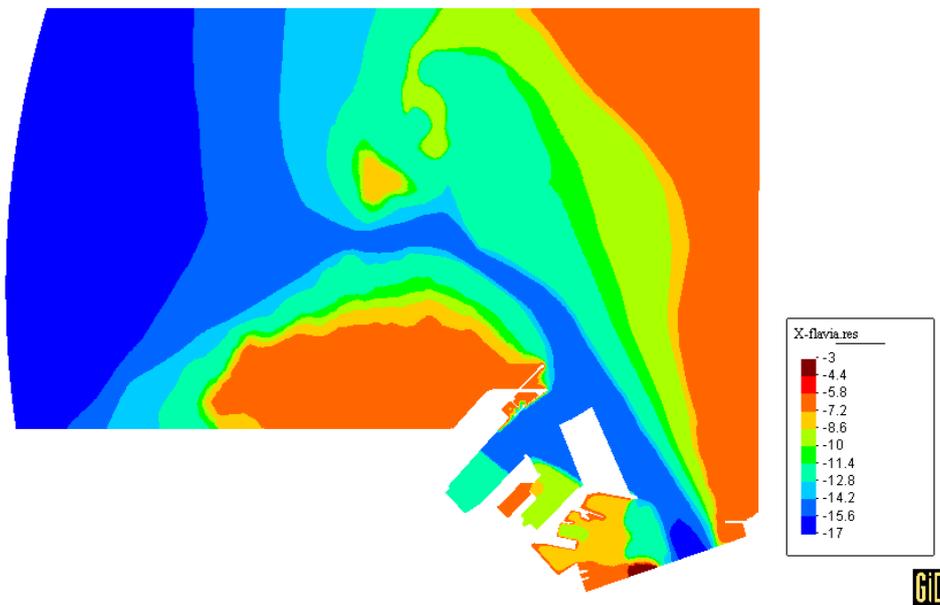


Fig. 1: Dominio de cálculo. Batimetría general del área de estudio.

El modelo requiere se especifiquen unas condiciones de contorno en todos los límites del dominio. Estas condiciones de contorno son de dos tipos:

- **Condiciones de radiación.** Esta condición se aplica en un contorno en forma de arco en el que se genera el oleaje. El oleaje viene definido por su periodo y dirección de incidencia. En la Fig. 2, esta condición se representa en color magenta.
- **Condiciones de absorción.** Esta condición se aplica en el resto de los contornos, donde se fija el valor del coeficiente de absorción, α , que indica el tanto por uno de la energía incidente sobre el contorno que es absorbida por éste. El coeficiente de absorción se relaciona con el coeficiente de reflexión, R , de la siguiente manera: $\alpha = 1 - R$. Se han empleado los siguientes valores de α :
 - i. Estructuras verticales: Reflexión total, $\alpha = 0$ (Fig. 2, color azul)
 - ii. Diques en talud: Reflexión parcial, $\alpha = 0,6$ (Fig. 2, color verde)



- iii. Contornos ficticios en el mar: Absorción total, $\alpha = 1$ (Fig. 2, color amarillo)

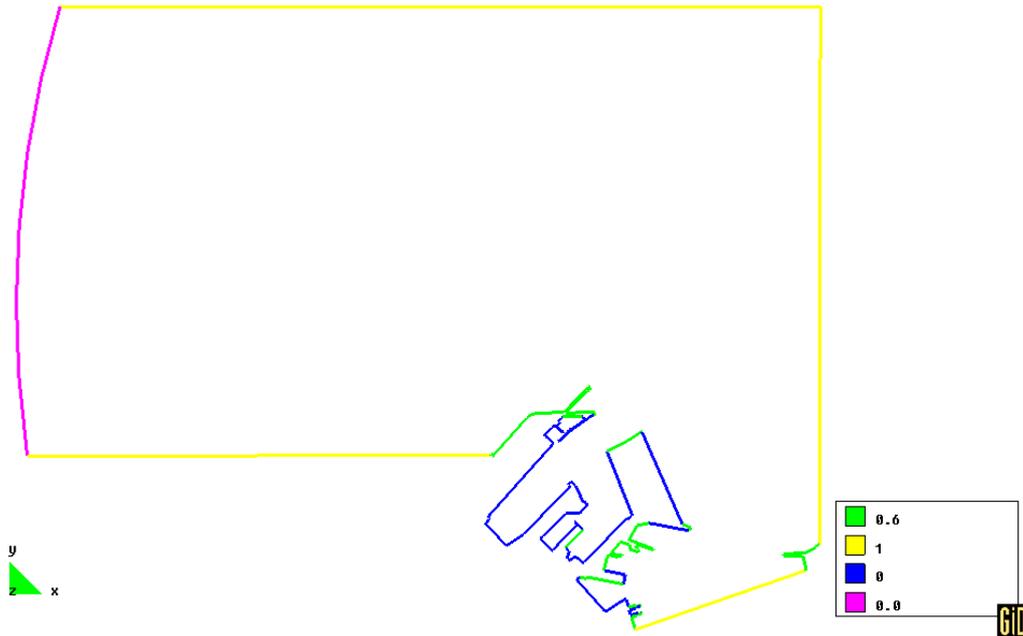


Fig. 2: Condiciones de contorno.

2.2.3. Casos propagados

Se ha procedido a propagar numéricamente con el modelo MSP-UGR algunos casos de oleaje característicos, desde la zona de entrada a la bahía de Cádiz (profundidades intermedias) hasta el puerto de Cádiz. Los casos propagados se indican a continuación:

- Casos 1 a 3: Dirección WNW, períodos 7, 11 y 15 s.
- Casos 4 a 7: Dirección W, períodos 7, 11, 15 y 21 s.
- Casos 8 a 11: Dirección WSW, períodos 7, 11, 15 y 21 s.

Dado que el modelo MSP-UGR es lineal, todas las propagaciones se han realizado con altura de ola 1 m, y se ha obtenido el coeficiente de agitación (K_d) en distintos puntos del puerto para cada uno de los casos propagados.

2.2.4. Tratamiento de los resultados. Coeficientes de agitación en las zonas de interés

Para analizar la operatividad de la dársena de Cádiz, se han definido cinco zonas de interés (véase Fig. 3), correspondientes a la bocana (zona 1), el Muelle Alfonso XIII (zona 2), el Muelle de la Terminal Ro-Ro de la ampliación (zona 3), y los muelles interior y exterior de la nueva Terminal de Contenedores (zonas 4 y 5 respectivamente).



En cada una de estas zonas se ha obtenido, para cada caso de oleaje, el promedio de los coeficientes de agitación en una serie de puntos (véanse Fig. 3 y Tabla 1).

Tabla 1: Coordenadas UTM de los puntos de control usados

Punto	Coord X UTM	Coord Y UTM
A	-4476,39	-1082,63
B	-4372,16	-1197,59
C	-4646,4	-1187,97
D	-4542,18	-1302,93
E	-5266,12	-1573,5
F	-5349,18	-1666,75
G	-5431,77	-1759,31
H	-4957,01	-1847,26
I	-4903,47	-1947,06
J	-4702,19	-1565,39
K	-4636,06	-1732,8
L	-4569,93	-1900,22
M	-4503,8	-2067,63
N	-4206,09	-1420,97
O	-4138,18	-1576,81
P	-4070,27	-1732,65
Q	-4002,37	-1888,5
R	-3934,46	-2044,34

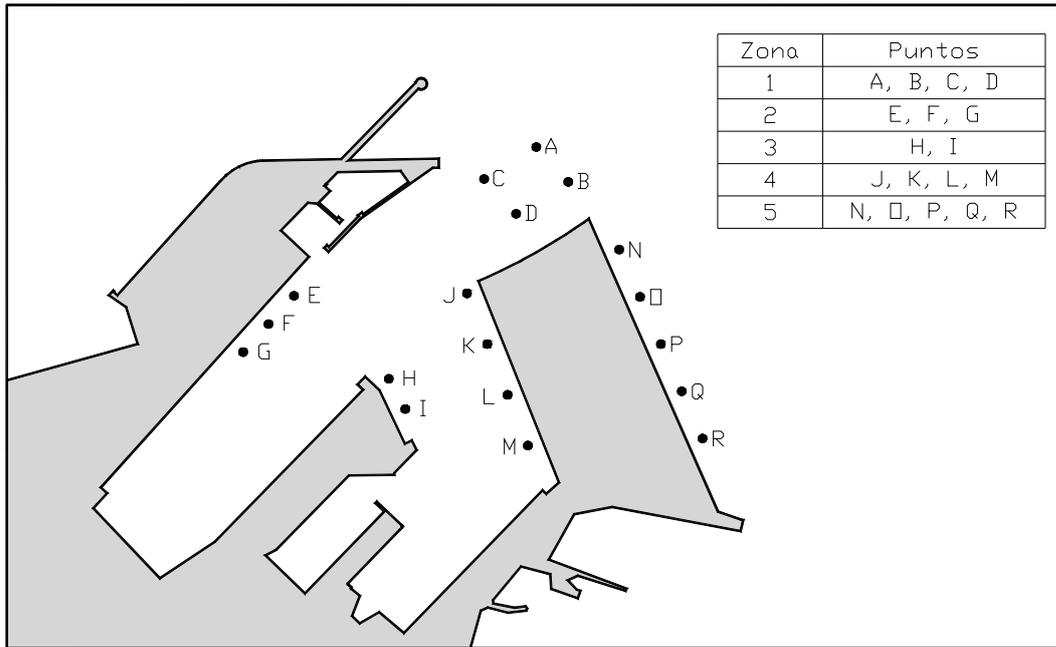


Fig. 3: Zonas estudiadas.

2.3. Interpolación de los resultados para toda la base de datos

Una vez obtenidos los coeficientes de agitación en cada zona para los casos seleccionados, se han interpolado los coeficientes de agitación para todos los casos de la base de datos de oleaje. Los criterios seguidos para realizar la interpolación han sido los siguientes:

- Sólo se han interpolado aquellos casos cuya dirección en la entrada de la bahía (punto A1) está comprendida entre 236.25° y 303.75° .
- Los periodos menores que 7 s o mayores que 21 s se han supuesto iguales a 7 s o 21 s, respectivamente.
- Análogamente, los casos de dirección mayor que 292.5° se han supuesto como 292.5° y los de dirección menor a 247.5° se han supuesto igual a 247.5° .
- Para tener bien definido el espacio de interpolación es necesario estimar los coeficientes de agitación (K_d) del caso de oleaje de 21 s y dirección WNW. Esto se ha realizado promediando los K_d de los casos 3, 6 y 7. Este caso no ha sido incluido en la propagación numérica debido a su baja frecuencia de presentación.
- Los coeficientes de agitación se han interpolado linealmente.



3. RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN

3.1. Salidas gráficas

A continuación se presentan (Fig. 4 a Fig. 9) los mapas de agitación y superficie libre para sólo algunos casos representativos seleccionados:

- Caso 2: Dirección WNW con período 11 s.
- Caso 5: Dirección W con período 11 s.
- Caso 9: Dirección WSW con período 11 s.

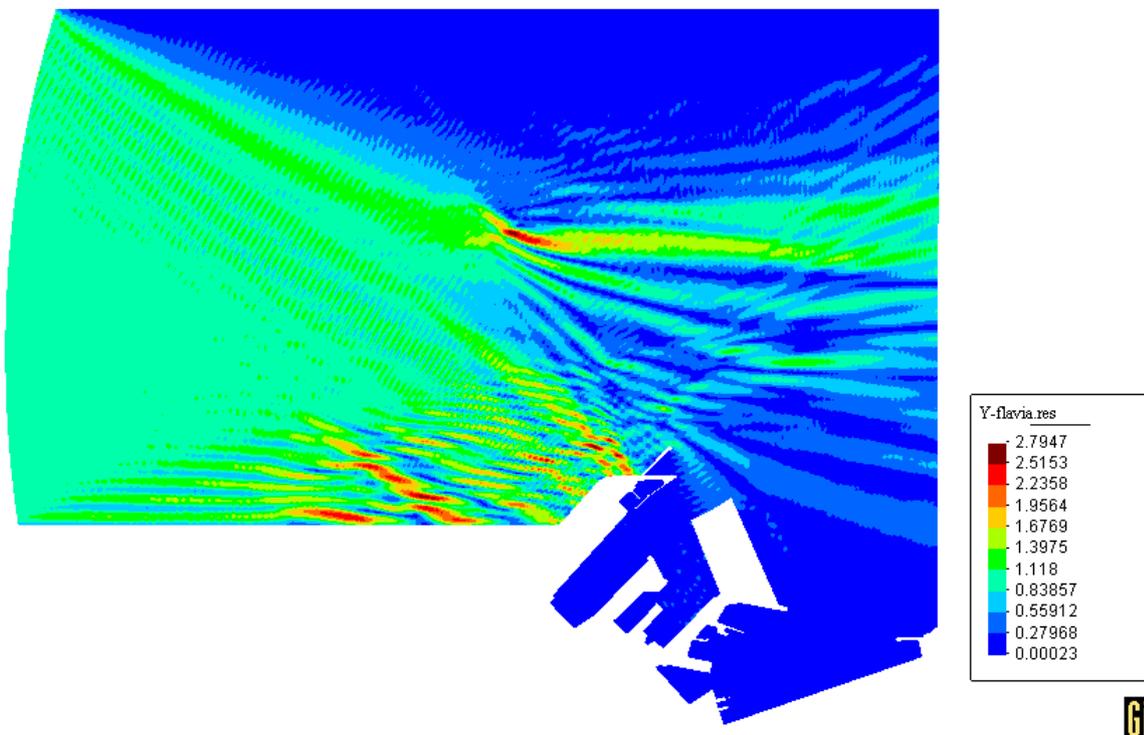


Fig. 4: Coeficientes de agitación del caso 2. Dirección WNW, período 11 s.

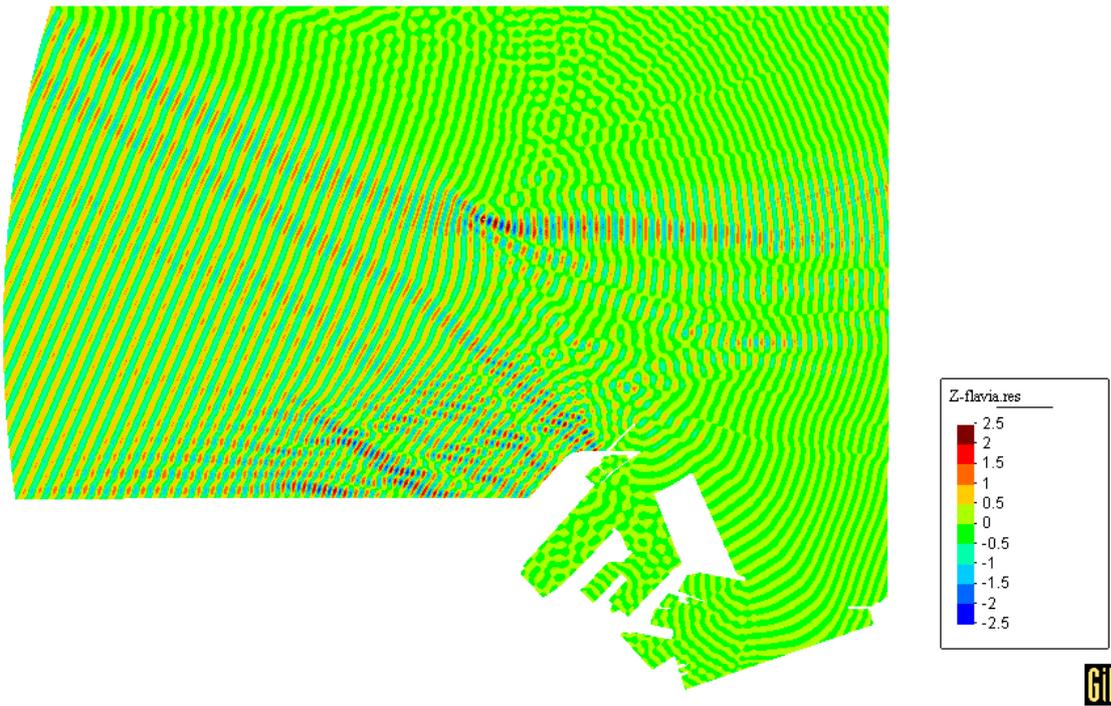


Fig. 5: Superficie libre en un instante correspondiente al caso 2. Dirección WNW, período 11 s.

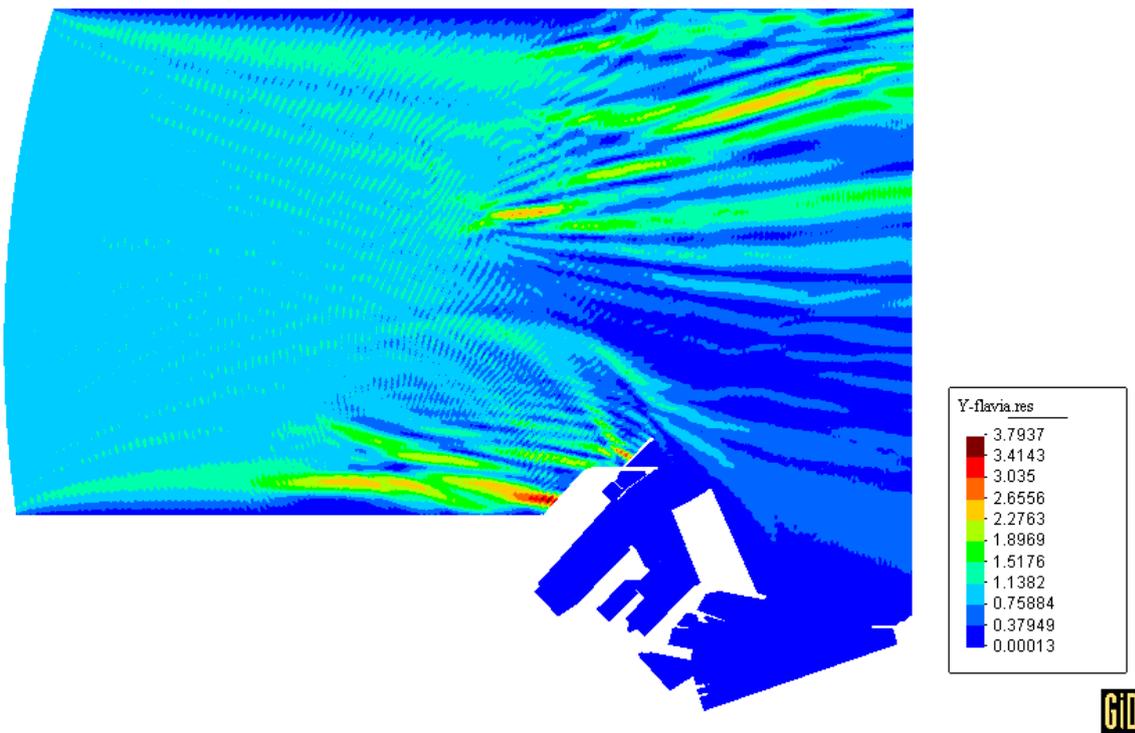


Fig. 6: Coeficientes de agitación del caso 5. Dirección W, período 11 s.

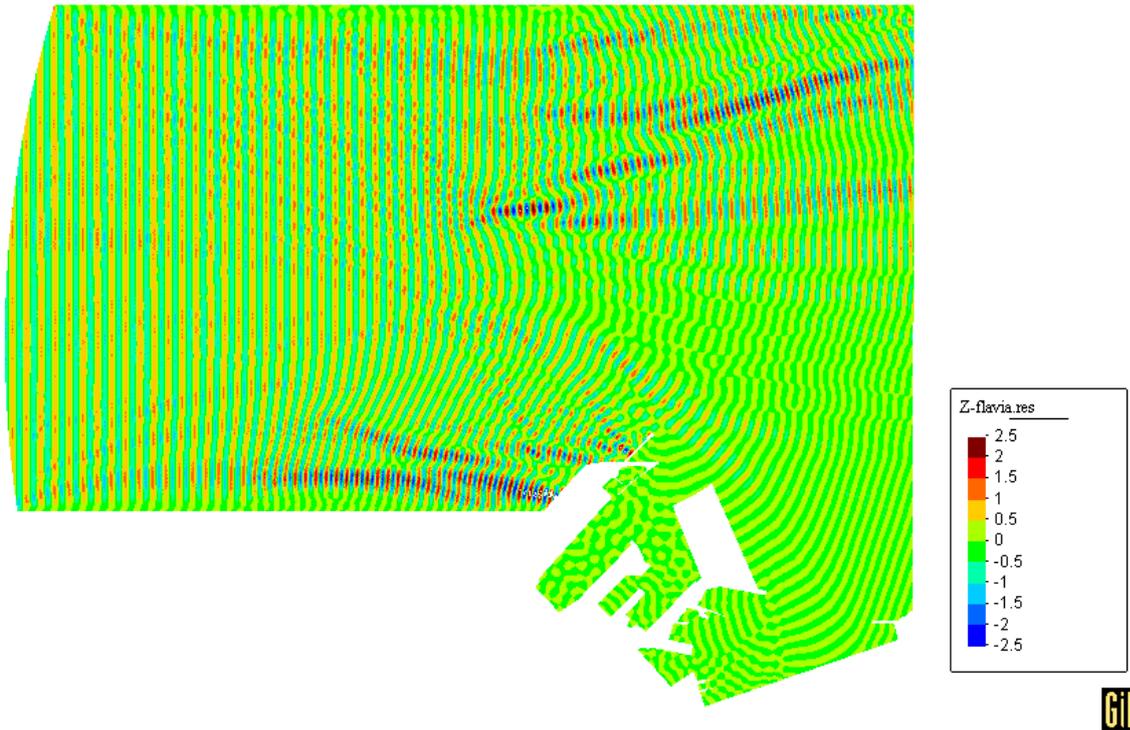


Fig. 7: Superficie libre en un instante correspondiente al caso 5. Dirección W, período 11 s

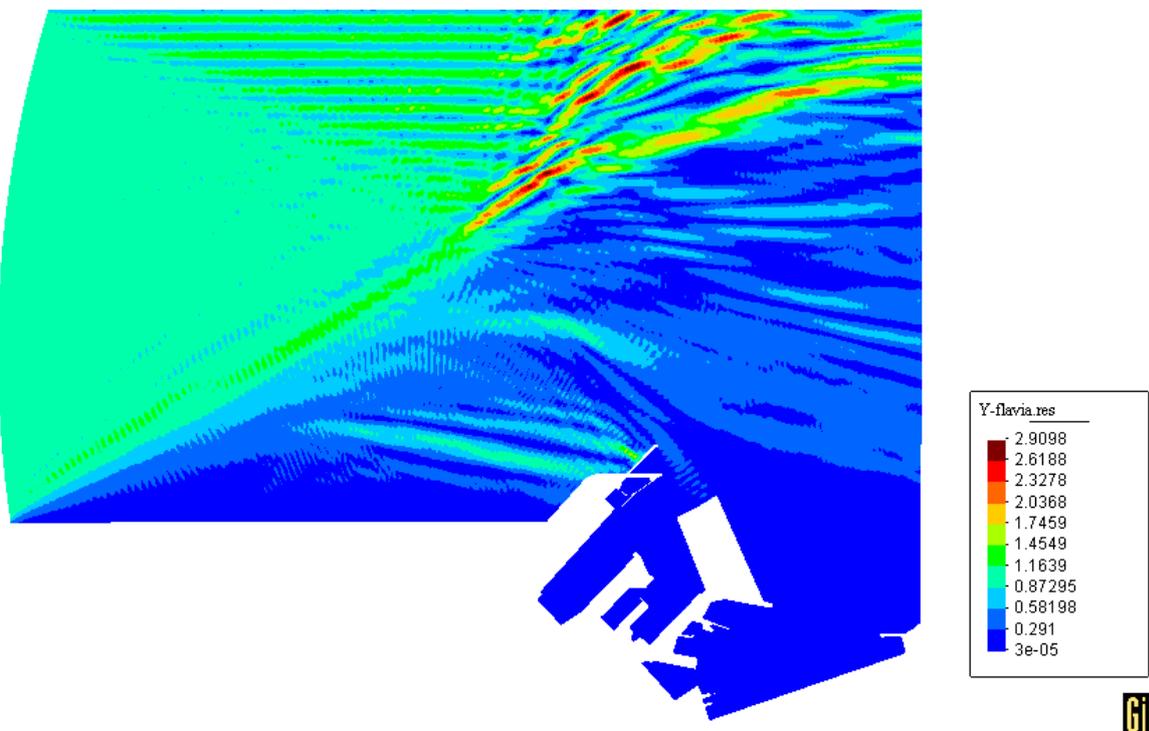


Fig. 8: Coeficientes de agitación del caso 9. Dirección WSW, período 11 s.

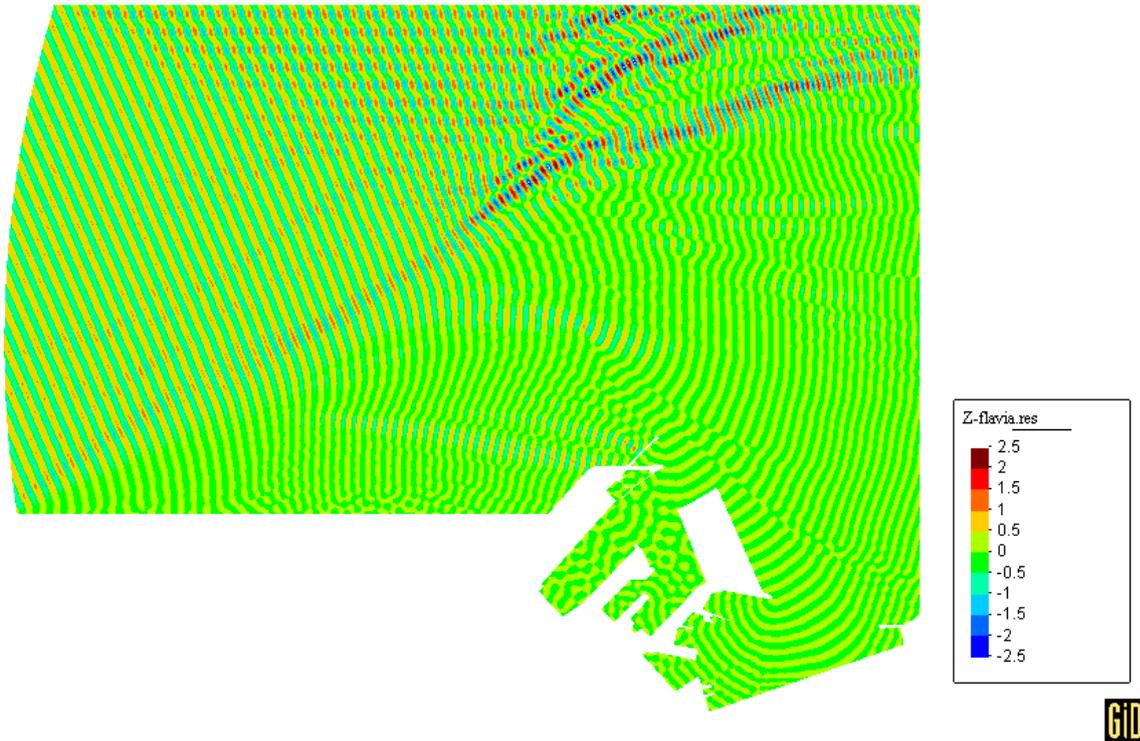


Fig. 9: Superficie libre en un instante correspondiente al caso 9. Dirección WSW, período 11 s

3.2. Coeficientes de agitación para los casos propagados

En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de agitación obtenidos en cada zona de interés para cada uno de los casos propagados.

Tabla 2: Coeficientes medios de agitación obtenidos para cada una de las zonas del puerto.

	caso1	caso2	caso3	caso4	caso5	caso6	caso7	caso8	caso9	caso10	caso11
Zona 1	0,18	0,36	0,33	0,26	0,26	0,37	0,53	0,14	0,21	0,07	0,31
Zona 2	0,11	0,13	0,13	0,18	0,15	0,15	0,17	0,11	0,13	0,07	0,11
Zona 3	0,03	0,19	0,05	0,27	0,19	0,06	0,15	0,12	0,14	0,02	0,09
Zona 4	0,07	0,19	0,15	0,20	0,17	0,18	0,14	0,11	0,13	0,07	0,09
Zona 5	0,10	0,20	0,27	0,13	0,17	0,29	0,34	0,08	0,08	0,02	0,22

3.3. Regímenes medios de oleaje

Se han interpolado los coeficientes de agitación para 24490 casos de oleaje, correspondientes al 97.82% de los datos disponibles en el punto A1 y al 79.55% del total de datos disponibles en el punto WANA.



En la Tabla 3 se presenta la distribución direccional del oleaje en el punto A1, y en la Tabla 4 los resultados obtenidos en cada zona de interés se han agrupado en función de la altura de ola.

Las figuras Fig. 10 a Fig. 14 presentan las distribuciones escalares de la altura de ola obtenidas empíricamente para cada zona de interés de la Dársena de Cádiz, y en la Tabla 5 se han extraído los valores más significativos de dichas distribuciones.

Tabla 3: Distribución direccional del oleaje en el punto A1.

***Los porcentajes están referidos a los datos empleados, que corresponden al 81,33% del tiempo total.**

Dirección	Probabilidad*
SW	1.9%
WSW	16.4%
W	70.4%
WNW	11.0%
NW	0.3%



Tabla 4: Número de estados de mar obtenidos para cada zona en cada intervalo de altura de ola.

	Zona				
	1	2	3	4	5
0,00 $\leq H_s < 0,25$	16610	22202	21643	21754	21728
0,25 $\leq H_s < 0,50$	6285	2138	2475	2536	2458
0,50 $\leq H_s < 0,75$	1200	150	364	199	272
0,75 $\leq H_s < 1,00$	325	0	8	1	27
1,00 $\leq H_s < 1,25$	57	0	0	0	5
1,25 $\leq H_s < 1,50$	9	0	0	0	0
1,50 $\leq H_s < 1,75$	1	0	0	0	0
1,75 $\leq H_s < 2,00$	3	0	0	0	0
2,00 $\leq H_s$	0	0	0	0	0

Tabla 5: Altura de ola significativa en cada zona para diferentes valores de la probabilidad de ocurrencia acumulada.

P. acum.	Altura de ola significativa (m)				
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
50%	0.15	0.09	0.10	0.10	0.09
85%	0.33	0.19	0.20	0.20	0.20
95%	0.51	0.29	0.33	0.30	0.32
99%	0.79	0.44	0.52	0.46	0.49

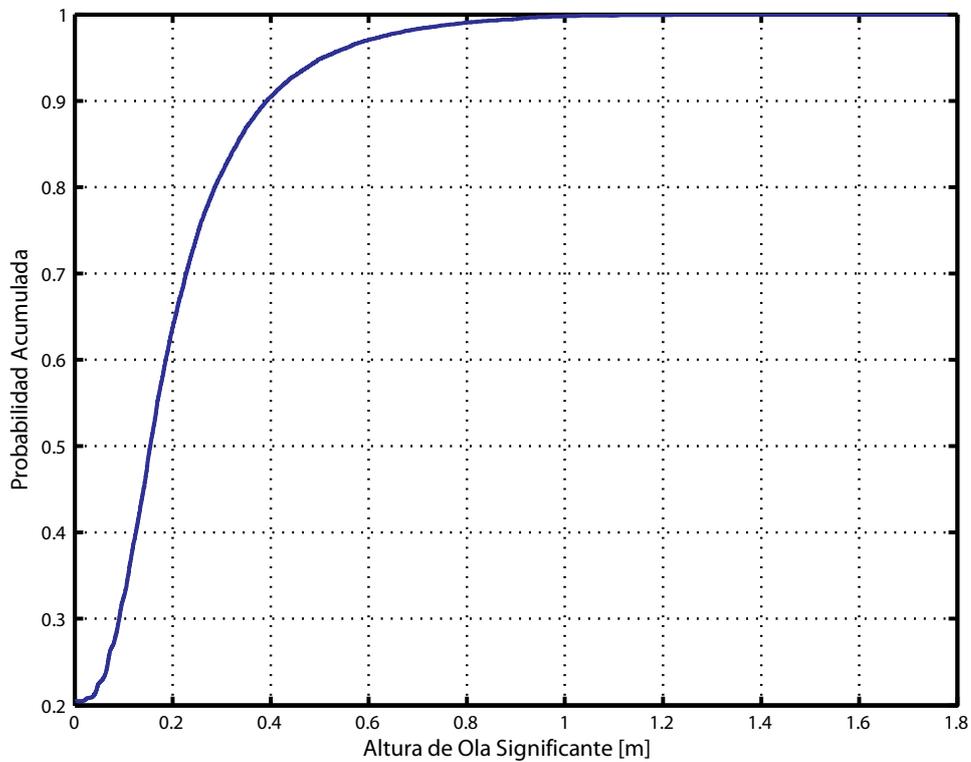


Fig. 10: Distribución de probabilidad de la altura de ola significativa en la zona 1.

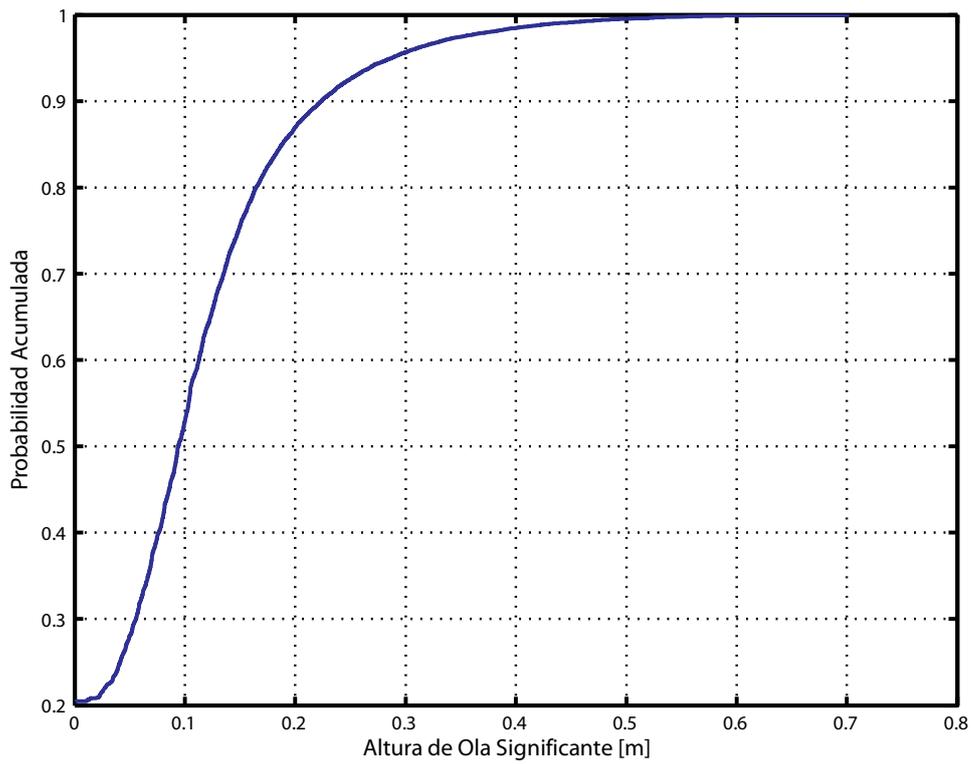


Fig. 11: Distribución de probabilidad de la altura de ola significativa en la zona 2.

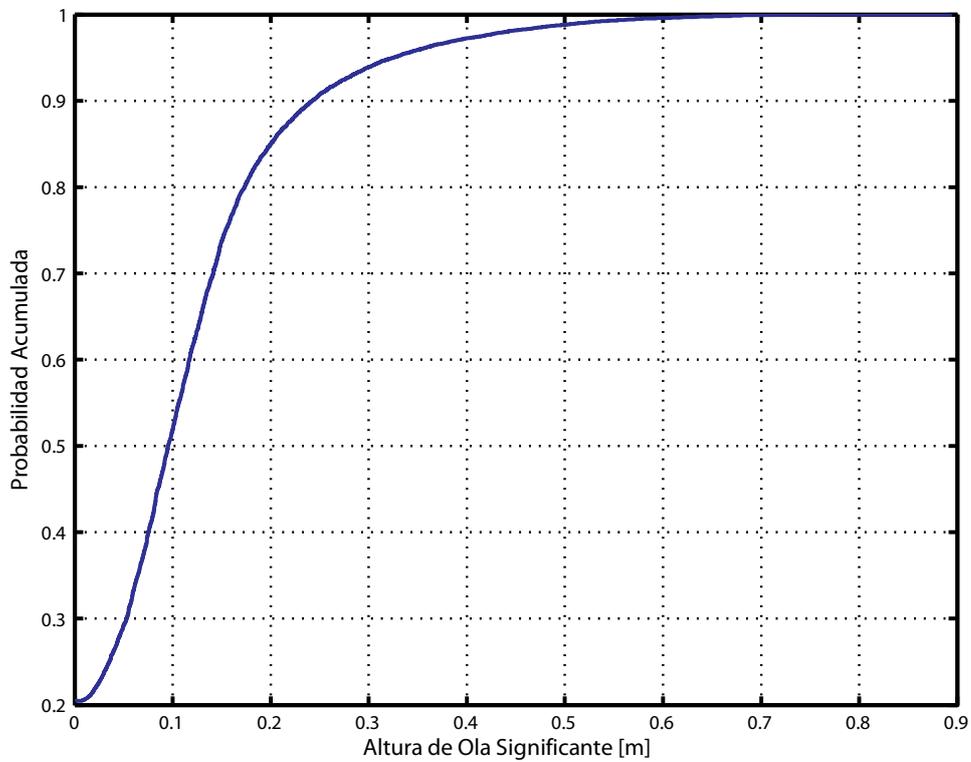


Fig. 12: Distribución de probabilidad de la altura de ola significativa en la zona 3.

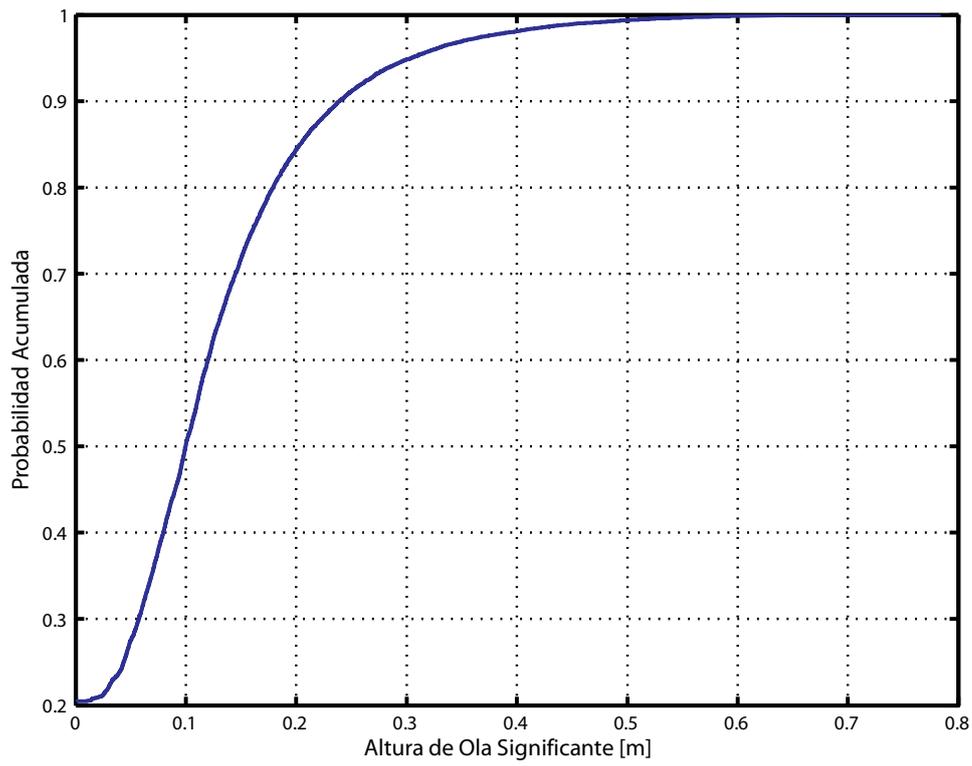


Fig. 13: Distribución de probabilidad de la altura de ola significativa en la zona 4.

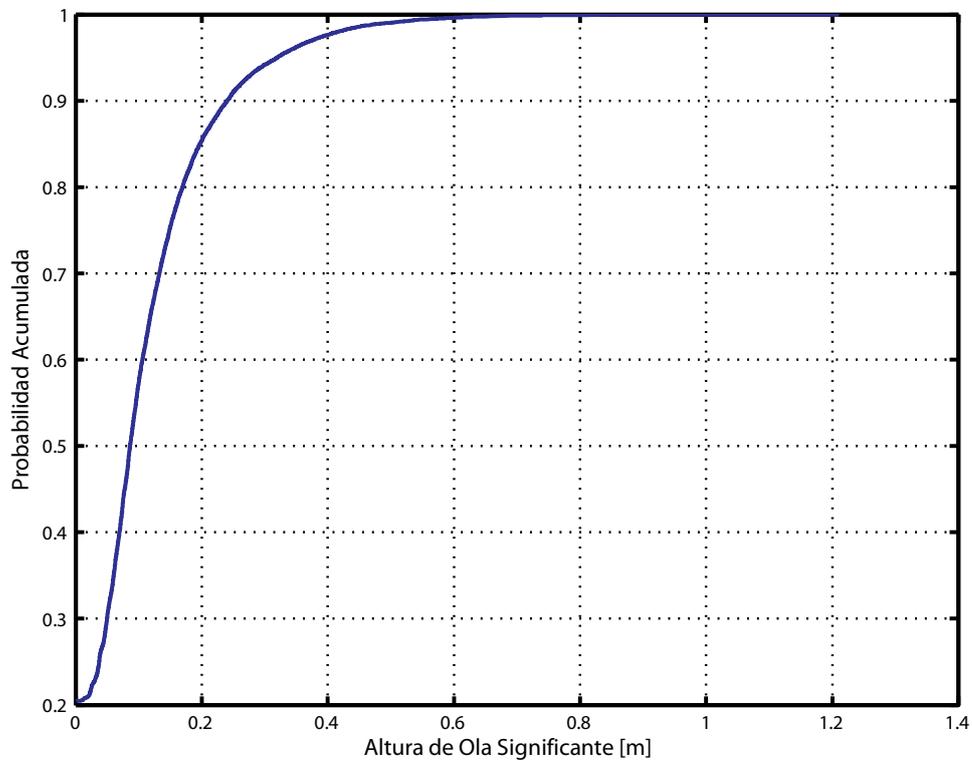


Fig. 14: Distribución de probabilidad de la altura de ola significativa en la zona 5.



4. AGITACIÓN DEBIDA AL OLEAJE LOCAL

Hasta aquí se han analizado los regímenes asociados a la dinámica oscilatoria del mar de fondo (oleaje tipo swell) por ser el de mayor contenido energético. En este apartado se ha analizado el oleaje local generado por viento en la Bahía de Cádiz (oleaje tipo sea), cuyo contenido energético es mucho menor que en el caso del mar de fondo, pero cuyos periodos de pico asociados están comprendidos entre 0,5 y 3 segundos, similares a los periodos naturales de oscilación de los buques de pequeña eslora. Dado que la ampliación de la bocana disminuye el abrigo frente a estos periodos de oleaje, este oleaje generado localmente puede influir negativamente en la operatividad de los muelles existentes. Por lo tanto, en este apartado se van a obtener, en primer lugar, los regímenes de oleaje local en la bocana, y en segundo lugar, la agitación dentro de la dársena debido a dicho oleaje, en dos casos: una anchura de bocana de 300 metros (como la actual), y una bocana de 400 metros (como la propuesta en este documento).

4.1. Oleaje local en el exterior de la bocana

Para la obtención del régimen de oleaje en la bocana del Puerto de Cádiz, se ha empleado el método paramétrico simplificado de previsión de oleaje de viento en profundidades reducidas descrito en la ROM 0.4-95. Este método fue desarrollado por Bretschneider y Reid (1953) y modificado por Ijima y Tang (1966), y está basado en el balance entre la energía cedida por el viento al oleaje y la disipada por fricción con el fondo y por percolación, suponiendo que la profundidad es constante.

Este método estima la altura de ola significativa H_s y el periodo de pico asociado T_p mediante las siguientes expresiones:



$$H_s = 0.283 \cdot \frac{U_A^2}{g} \tanh \left[0.530 \left(\frac{g \cdot d}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \cdot \tanh \left[\frac{0.00565 \left(\frac{g \cdot L_F}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0.530 \left(\frac{g \cdot d}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right]$$

$$T_p = 7.54 \cdot \frac{U_A}{g} \tanh \left[0.833 \left(\frac{g \cdot d}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \cdot \tanh \left[\frac{0.0379 \left(\frac{g \cdot L_F}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0.833 \left(\frac{g \cdot d}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right]$$

donde d es la profundidad, que se supone constante, L_F es la distancia de fetch, que toma diferentes valores según la dirección del viento considerada (véase Tabla 6 y Fig. 15), y U_A es la velocidad del viento corregida para tener en cuenta su capacidad de arrastre. Se ha tomado $U_A = 0.71 \cdot V_V^{1.23}$, donde V_V es la velocidad media del viento a 10 m de altura sobre la superficie del mar.

Se pretende analizar el oleaje local en un punto cercano a la bocana de la dársena de Cádiz (véase Fig. 15). Dada la configuración en planta de la dársena y la ubicación de la bocana se han analizado 5 direcciones de procedencia del viento, y por consiguiente del oleaje local. La siguiente tabla muestra estas direcciones y la longitud del fetch considerada.

Tabla 6: Distancia de fetch (L_F) y profundidad media (d) empleada para cada dirección de procedencia del viento.

Dir. viento	L_F [m]	d [m]
N	4597	8,5
NNE	3770	8,0
NE	5305	7,5
ENE	4575	7,5

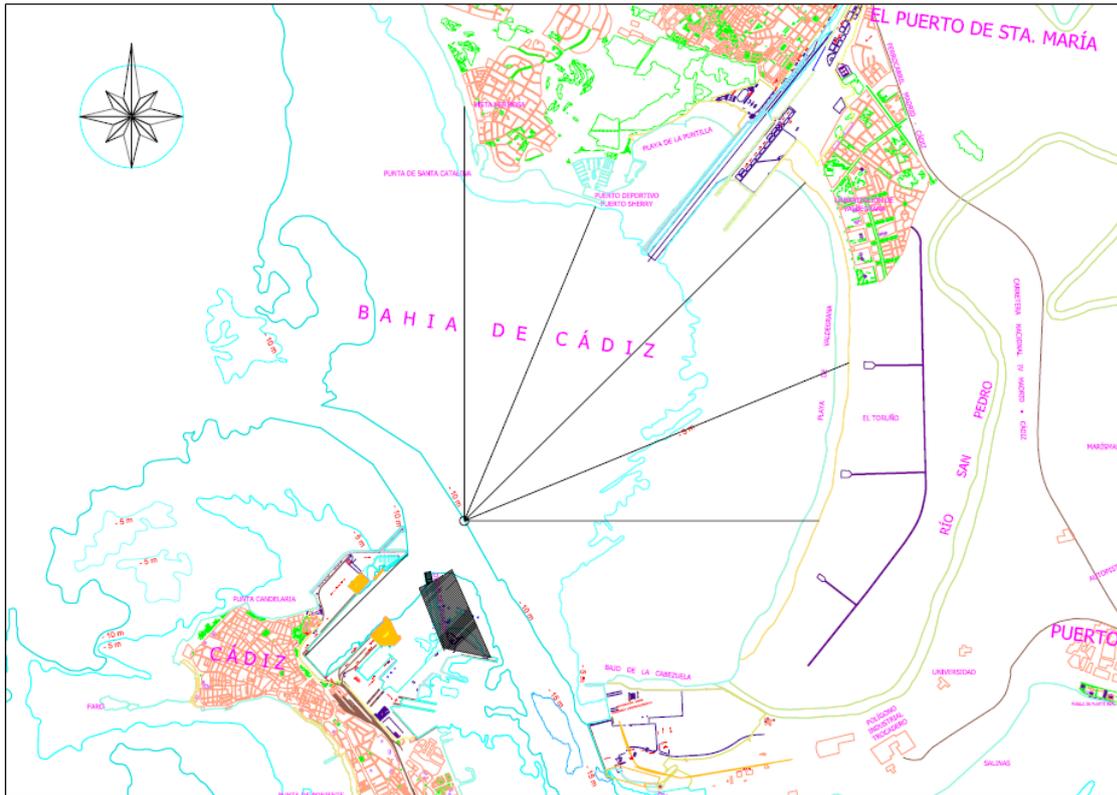


Fig. 15: Distancias de fetch para las diferentes direcciones de procedencia del viento consideradas.

A partir del régimen medio direccional de la velocidad media del viento medida en la estación meteorológica ubicada en el morro del dique de Levante del Puerto de Cádiz (tabla 17 del *Anejo III: Estudio de Clima Marítimo*), se han obtenido los regímenes medios direccionales de H_s y T_p correspondientes al oleaje local. A continuación se muestran las tablas de probabilidad conjunta de H_s y T_p (Tabla 7), de H_s y Dir (Tabla 8) y de T_p y Dir (Tabla 9); el régimen escalar de altura de ola significativa en la bocana (Fig. 16) y los valores más significativos de dicho régimen (Tabla 10).

Tabla 7: Probabilidad de presentación, en tanto por ciento, de los estados de oleaje local, en función de su altura de ola significativa, H_s , y su periodo de pico, T_p .

		H_s (m)			
		0,125	0,375	0,625	0,875
T_p (s)	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,75	2,93	0,00	0,00	0,00
	1,25	7,98	0,00	0,00	0,00
	1,75	6,26	1,60	0,00	0,00
	2,25	0,00	1,41	0,06	0,00
	2,75	0,00	0,00	0,17	0,01



Tabla 8: Probabilidad de presentación, en tanto por ciento, de los estados de oleaje local, en función de su altura de ola signficante, H_s , y su dirección de procedencia.

		H_s (m)			
		0,125	0,375	0,625	0,875
Dir	N	3,29	1,24	0,01	0,00
	NNE	3,62	0,37	0,05	0,00
	NE	3,55	1,07	0,16	0,01
	ENE	3,44	0,25	0,00	0,00
	E	3,28	0,09	0,00	0,00

Tabla 9: Probabilidad de presentación, en tanto por ciento, de los estados de oleaje local, en función de su periodo de pico, T_p , y su dirección de procedencia.

		T_p (m)					
		0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
Dir	N	0,00	0,44	1,39	2,23	0,46	0,00
	NNE	0,00	0,54	1,32	1,75	0,42	0,00
	NE	0,00	0,58	1,82	1,74	0,47	0,17
	ENE	0,00	0,57	1,84	1,24	0,04	0,00
	E	0,00	0,79	1,60	0,88	0,09	0,00

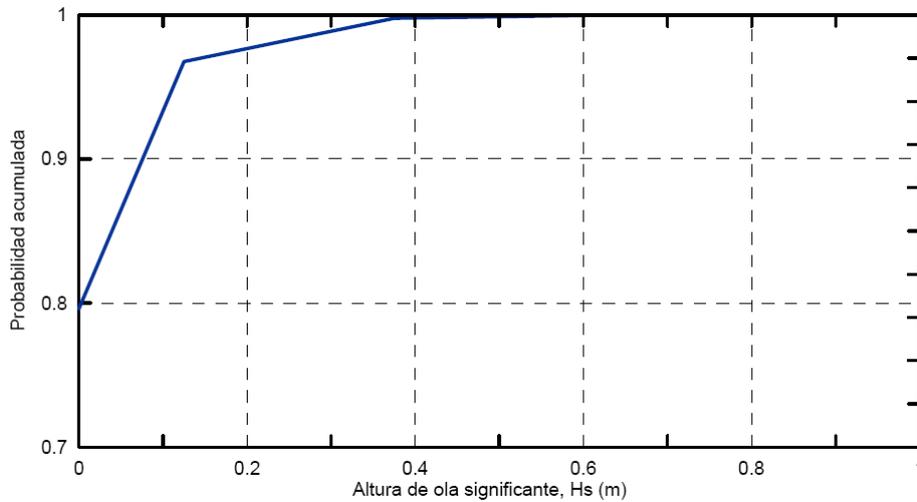


Fig. 16: Régimen escalar de H_s asociado al oleaje local.

Tabla 10: Altura de ola signficante en la bocana para diferentes valores de la probabilidad de no excedencia.

P. acum.	H_s (m)
50%	--
85%	0.04
95%	0.11
99%	0.31



4.2. Agitación en la dársena debido al oleaje local

Una vez obtenido el régimen de oleaje local en el exterior de la dársena, se pretende estudiar la agitación en el interior de la misma.

A su entrada en la dársena, el oleaje local sufrirá difracción en la bocana y reflexión en los contornos de la misma, por lo tanto, el modelo numérico MSP sería ideal para este análisis. Sin embargo, dada la extensión del dominio relativa a la longitud de onda del oleaje, el empleo de este modelo resulta inviable. Por lo tanto, y teniendo en cuenta que los coeficientes de reflexión para el oleaje local (oleaje de tipo *sea*, con periodos de 1-3 segundos) van a ser mucho menores que los supuestos para el mar de fondo (oleaje de tipo *swell*), se ha realizado un análisis comparativo del flujo medio de energía entrante en la dársena para la Alternativa de Proyecto y la Situación Actual. Dicho flujo medio de energía del oleaje a través de una bocana, FE , tiene la siguiente expresión:

$$FE = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 C_g B_{ef},$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, g es la aceleración de la gravedad, H_{rms} es la altura de ola cuadrática media, C_g es la celeridad de grupo del oleaje, y B_{ef} es la anchura efectiva de la bocana, medida en la dirección perpendicular a la de incidencia del oleaje (véase Fig. 17).

El flujo medio anual de energía a través de la bocana será:

$$FE_{anual} = \sum_{ijk} FE_{ijk} p_{ijk},$$

donde p_{ijk} es la probabilidad de ocurrencia del estado de mar caracterizado por

$(Dir_i, H_{s,j}, T_{p,k})$, y $FE_{ijk} = \frac{1}{8} \rho g H_{rms,j}^2 C_{g,jk} B_{ef,i}$ su flujo medio de energía asociado.

Por lo tanto, el flujo de energía entrante en la dársena depende de las características del oleaje y de la anchura efectiva de la bocana. Dado que ni la profundidad ni las características del oleaje local en el exterior de la dársena se verían afectadas por la obra, la única diferencia entre los flujos de energía en la *Situación Actual* (S.A.) y en la *Alternativa de Proyecto* (A.P.) reside en la anchura efectiva de la bocana. Así, se puede escribir que:



$$\begin{aligned} (FE_{anual})_{Sit} &= \sum_{ijk} (FE_{ijk})_{Sit} p_{ijk} = \sum_{ijk} \frac{1}{8} \rho g H_{rms,j}^2 C_{g,jk} (B_{ef,i})_{Sit} p_{ijk} = \\ &= \sum_i \left[(B_{ef,i})_{Sit} \sum_j \sum_k \frac{1}{8} \rho g H_{rms,j}^2 C_{g,jk} p_{ijk} \right] \end{aligned}$$

con $Sit = S.A., A.P..$

En la Fig. 17 se muestra la anchura efectiva de la bocana para las cinco posibles direcciones del oleaje generado por el viento local en la bahía (N, NNE, NE, ENE y E), en la Situación Actual y en la Alternativa de Proyecto, y en la Tabla 11 se presenta, para cada dirección, los flujos medios anuales de energía entrante en la dársena en ambas situaciones.

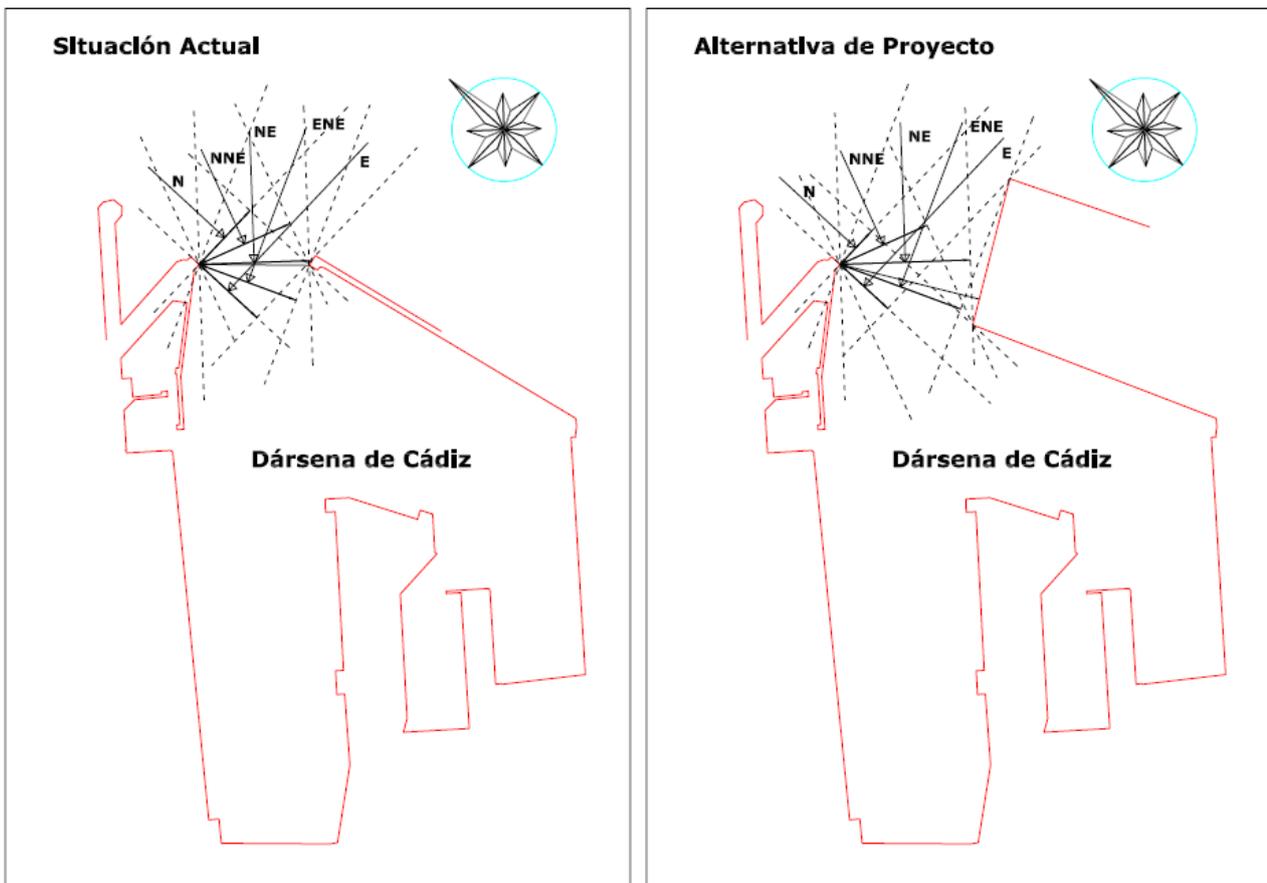


Fig. 17: Anchura efectiva de la bocana para diferentes direcciones del oleaje incidente en la Situación actual y en la Alternativa de Proyecto.



Tabla 11: Relación entre el flujo de energía entrante en la dársena en la Situación Actual y en la Alternativa de Proyecto según la dirección de incidencia del oleaje

<i>Dir</i>	$(B_{ef})_{S.A.}$ [m]	$(B_{ef})_{A.P.}$ [m]	$(FE_i)_{S.A.}$ [Jl/s]	$(FE_i)_{A.P.}$ [Jl/s]
<i>N</i>	201.95	124.65	0.4138	0.2554
<i>NNE</i>	270.87	259.41	0.3146	0.3013
<i>NE</i>	298.37	354.68	0.8106	0.9636
<i>ENE</i>	280.78	350.01	0.1926	0.2401
<i>E</i>	213.90	177.23	0.0986	0.0817
$FE_{anual} =$			1.83 Jl/s	1.84 Jl/s

A la luz de estos resultados, se puede concluir que:

- 1- El flujo medio anual de energía que entra en la dársena aumenta ligeramente (en un 0.65 %) con la nueva configuración de la bocana.

$$R = \frac{(FE_{anual})_{A.P.} - (FE_{anual})_{S.A.}}{(FE_{anual})_{S.A.}} = 0.65\%$$

- 2- A pesar de haber aumentado en gran medida la anchura de la bocana a efectos de navegabilidad, el aumento de la agitación interior debido al oleaje local no es significativo. Esto se debe a que, se ha sustituido una estructura lineal (el Dique de Levante) por una gran superficie (la nueva Terminal de contenedores), que proporciona más abrigo a la dársena frente a ciertas direcciones de incidencia del oleaje (véase la Fig. 17). Así, la energía del oleaje local dentro de la dársena va a disminuir para algunas direcciones de incidencia del oleaje local (p.e. los oleajes procedentes del N, NNE y E, véase Tabla 11)
- 3- En cualquier caso, el flujo medio anual de energía asociado al oleaje de tipo *sea* en el interior de la dársena es mucho menor que el asociado al oleaje de tipo *swell*.

ANEXO VI

ESTUDIO DE AGITACIÓN DE ONDAS LARGAS

ÍNDICE

1.ANÁLISIS DE AGITACIÓN FRENTE A ONDAS LARGAS	2
1.1. Descripción de la Situación “Actual” y la Alternativa de Proyecto	2
1.1.1. Situación “Actual”	2
1.1.2. Alternativa de Proyecto	3
1.2. Metodología de análisis	5
1.2.1. Detalles de la propagación	5
1.3. Resultados	8
1.4. Conclusiones.....	11
1.5. Mapas de agitación.....	13
1.5.1. Bajamar Viva Equinoccial	13
1.5.2. Pleamar Viva Equinoccial	18

1. ANÁLISIS DE AGITACIÓN FRENTE A ONDAS LARGAS

El objetivo de este apartado es comparar la respuesta del puerto a las ondas largas en la situación actual y en la alternativa de proyecto. La situación actual incluye la Terminal Ro-Ro en el Muelle Marqués de Comillas, actualmente en construcción, y consta de una bocana de 300 m; mientras que en la alternativa de proyecto, que incluye la nueva Terminal de Contenedores, se propone ampliar la bocana hasta unos 400 m.

1.1. Descripción de la Situación “Actual” y la Alternativa de Proyecto

1.1.1. Situación “Actual”

Se ha considerado como Situación “Actual” de la dársena del Puerto de Cádiz la correspondiente al final de las obras de la Terminal Ro-Ro en el Muelle Marqués de Comillas, que se encuentran aún en ejecución. En este caso la bocana tiene una anchura de 300 m (véase Figura 1).

Parte de la información relativa a la Situación Actual ha sido extraída del informe “Estudio de Implantación de Terminal Ro-Ro en el Puerto de Cádiz” de Octubre de 2004 realizado por el Grupo de Puertos y Costas de la Universidad de Granada.

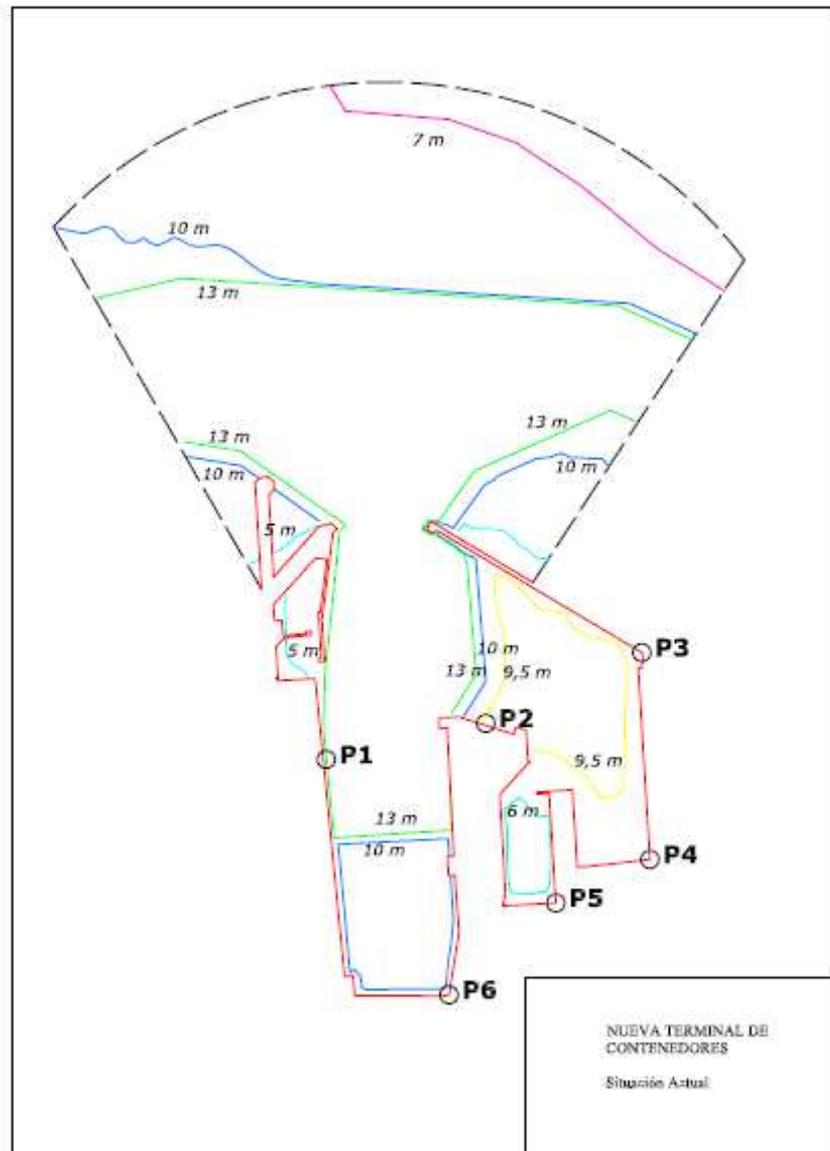


Figura 1: Situación “Actual”. Planta de la dársena, batimetría y localización de los puntos de control P1-P6.

1.1.2. Alternativa de Proyecto

La Alternativa de Proyecto (Figura 2) incluye la Terminal de Contenedores, con una superficie de aproximadamente 38 Ha. Las principales modificaciones en planta respecto a la “Situación Actual” son la disminución del espejo de agua de la dársena al modificar la alineación del Dique de Levante en 10°, y la ampliación de la bocana de 300 a 400 metros (mediante el desmantelamiento del tramo final del Dique de Levante).

La ampliación de la bocana, a pesar de permitir la entrada de mayor cantidad de energía de onda corta (oleaje) en la dársena, pudiendo aumentar así la agitación en la misma, es

beneficiosa en general en el caso de las oscilaciones de largo periodo, ya que favorece la radiación de energía de onda larga hacia el exterior del puerto¹. Por lo tanto, en principio, la Alternativa de Proyecto presentará una menor amplificación de las ondas largas que la Situación Actual.

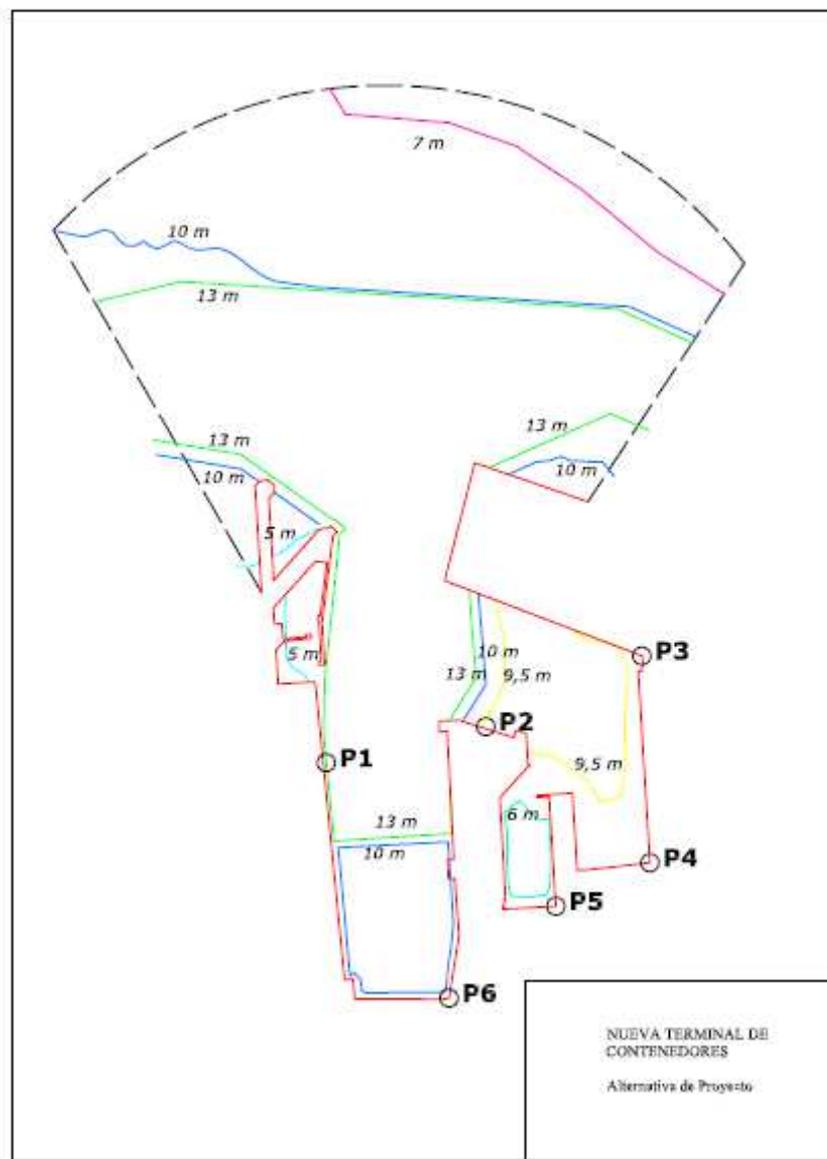


Figura 2: Alternativa de Proyecto. Planta de la dársena, batimetría y localización de los puntos de control P1-P6.

¹ Esta aparente contradicción se conoce como “Paradoja portuaria”.

1.2. Metodología de análisis

El estudio del comportamiento de la dársena frente a las ondas largas se ha realizado desde un punto de vista comparativo con la Situación Actual. Para ello, se han analizado las dos situaciones de la dársena siguiendo el mismo procedimiento, que consiste en:

1. Se han analizado por separado los estados de marea Bajamar Viva Equinoccial y Pleamar Viva Equinoccial.
2. Se han propagado en dichas condiciones 21 casos de ondas de periodos comprendidos entre 40 y 240 segundos.
3. Se han obtenido los coeficientes de amplificación en seis puntos de control (véase Figura 1 y Figura 2), situados en las paredes de la dársena, donde la amplificación es generalmente mayor.
4. Finalmente, se han dibujado, para cada punto de control, los coeficientes de amplificación obtenidos para los periodos analizados, en la Situación Actual y en la Alternativa de Proyecto.

1.2.1. Detalles de la propagación

La propagación se ha realizado empleando el modelo numérico en elementos finitos MSP-UGR, que resuelve la ecuación de la pendiente suave en su forma elíptica. Se ha empleado, tanto en la Situación Actual como en la Alternativa de Proyecto, una malla de elementos finitos triangulares de 35 m de lado.

Condiciones de contorno

Este modelo requiere la especificación de unas condiciones de contorno en todas las fronteras del dominio. Estas condiciones de contorno son de dos tipos:

- Condiciones de radiación. Esta condición se aplica en un contorno en forma de arco en el que se genera el oleaje. El oleaje viene definido por su periodo y dirección de incidencia, que se ha tomado perpendicular a la bocana en todos los casos (véase Tabla 1). En las figuras, esta condición se representa en color magenta.
- Condiciones de absorción. Esta condición se aplica en el resto de los contornos, donde se fija el valor del coeficiente de absorción, α , que indica el tanto por uno de la energía incidente sobre el contorno que es absorbida por éste. El coeficiente de absorción se relaciona con el coeficiente de reflexión, R , de la siguiente manera: $\alpha = 1 - R$. Se han empleado los siguientes valores de α :

- i. Estructuras verticales: Reflexión total, $\alpha = 0$
- ii. Diques en talud: Reflexión parcial, $\alpha = 0,6$
- iii. Contornos ficticios en el mar: Absorción total, $\alpha = 1$

En la Figura 3 y la Figura 4 se pueden observar las condiciones de contorno impuestas en la Situación Actual y en la Alternativa de Proyecto respectivamente. En la Alternativa de Proyecto se ha considerado que los muelles exterior e interior de la nueva Terminal de contenedores son completamente reflejantes.

CASOS	Periodo, T(s)	Dirección
Caso 1	40	N42°E
Caso 2	50	N42°E
Caso 3	60	N42°E
Caso 4	70	N42°E
Caso 5	80	N42°E
Caso 6	90	N42°E
Caso 7	100	N42°E
Caso 8	110	N42°E
Caso 9	120	N42°E
Caso 10	130	N42°E
Caso 11	140	N42°E
Caso 12	150	N42°E
Caso 13	160	N42°E
Caso 14	170	N42°E
Caso 15	180	N42°E
Caso 16	190	N42°E
Caso 17	200	N42°E
Caso 18	210	N42°E
Caso 19	220	N42°E
Caso 20	230	N42°E
Caso 21	240	N42°E

Tabla 1: Casos de onda larga propagados.

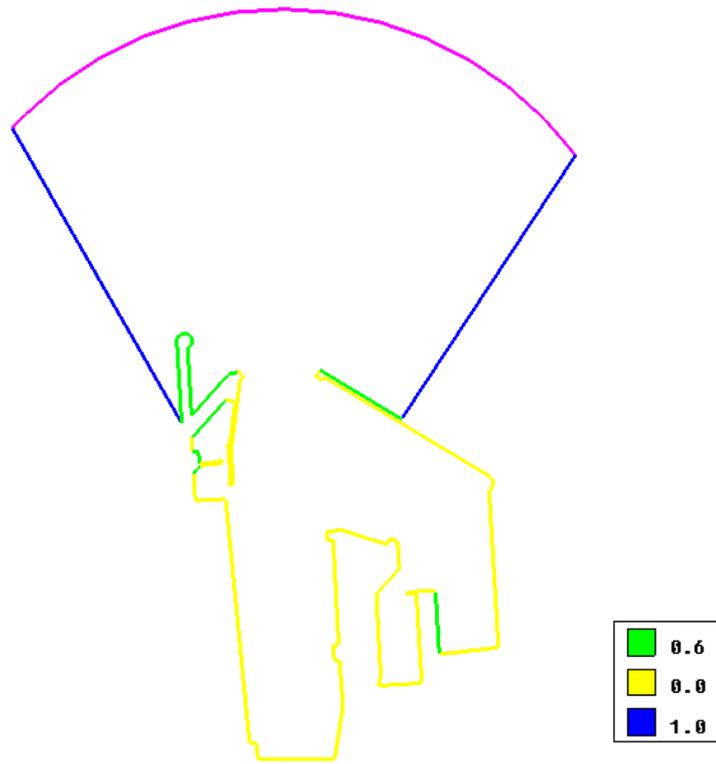


Figura 3: Condiciones de contorno de la Situación Actual.

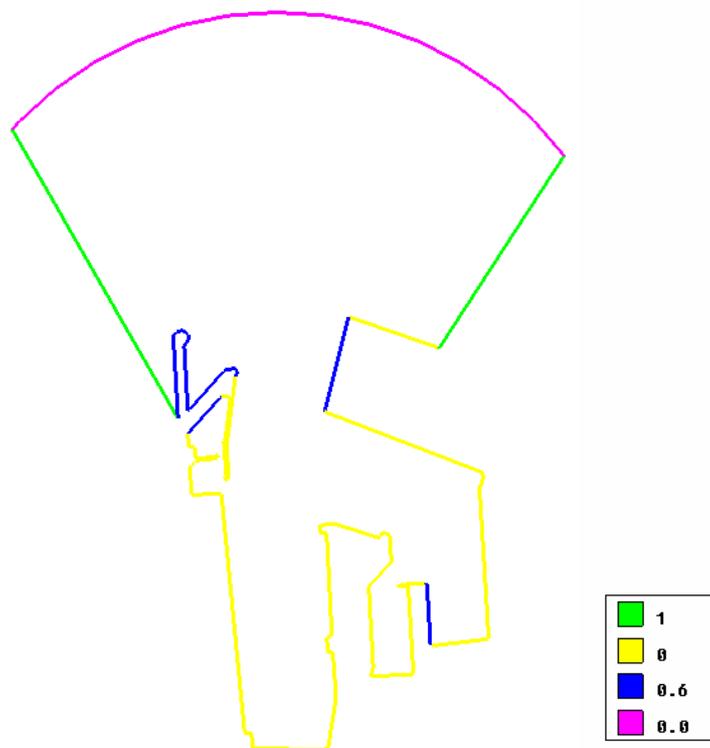


Figura 4: Condiciones de contorno de la Alternativa de Proyecto.

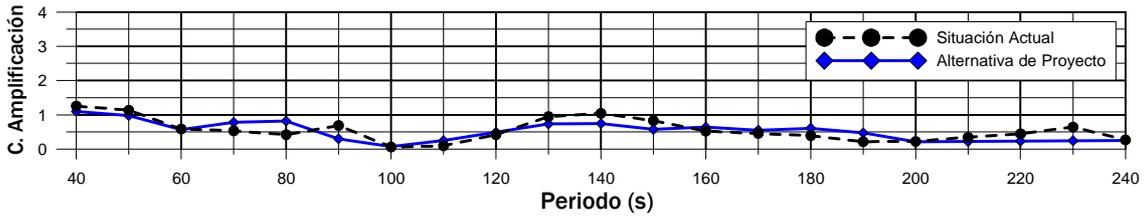
1.3. Resultados

En la Figura 5 y la Figura 6 se presentan los coeficientes de amplificación obtenidos en los puntos de control para los diferentes periodos de onda larga, en BMVE y PMVE respectivamente. En ellas se puede comparar la respuesta de la dársena en la Situación Actual y en la Alternativa de Proyecto.

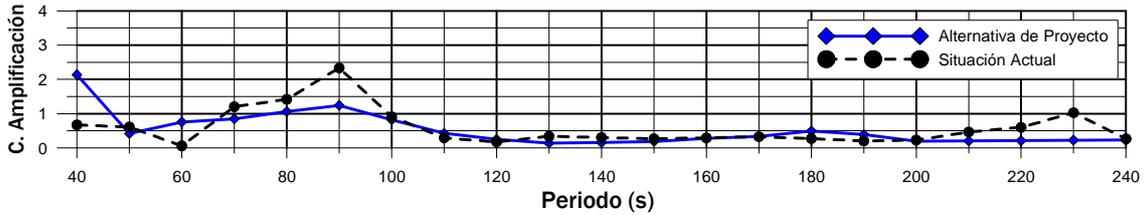
En BMVE se puede observar que, en los seis puntos de control, en la Alternativa de Proyecto los coeficientes de amplificación se reducen considerablemente para los periodos en el rango de los 120-140 segundos y los 200-240 segundos. Por otra parte, en la Alternativa de Proyecto desaparecen algunos “picos” del coeficiente de amplificación que aparecían en la Situación Actual (90 s. en P2 y 130 s. en P3, P4 y P6). Sin embargo, la Alternativa de Proyecto presenta una amplificación mayor de las oscilaciones de periodos entre 40-60 segundos en los puntos de control P2, P3 y P4, siendo el punto P3 el más desfavorable en este caso.

En PMVE, por otro lado, se observa una disminución de los coeficientes de amplificación en todos los puntos de control para los periodos comprendidos entre 80 y 120 segundos. Por otro lado, en la alternativa propuesta desaparecen algunos “picos” del coeficiente de amplificación que aparecían en la Situación Actual (40 s. en P5 y P6; 50 s. en P4; 80 s. en P2 y P3; 130 s. en P3 y P4). Sin embargo, se observan coeficientes de amplificación mayores en la Alternativa de Proyecto para 40 segundos en los puntos P3 y P4, y para 50 s. y 190s. en el punto P6. Por otro lado, aunque las condiciones de oscilación de la dársena empeoran en algunos casos para periodos en el rango 190-220 s, continúan manteniéndose por debajo de la unidad.

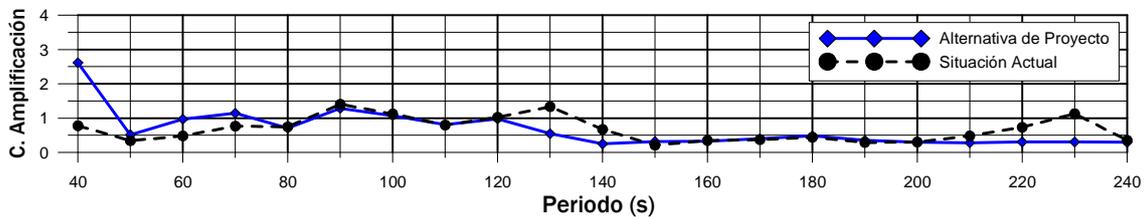
Bajamar Viva Equinoccial Punto de control P1



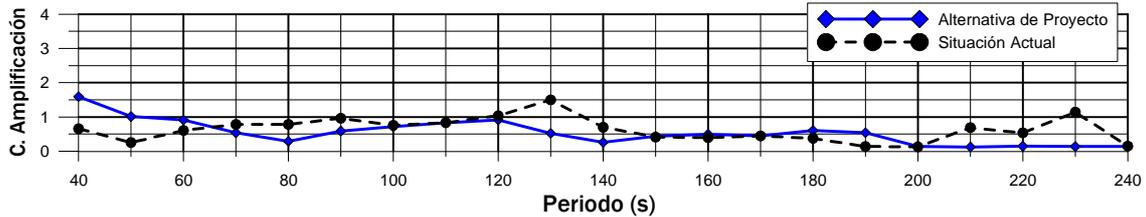
Punto de control P2



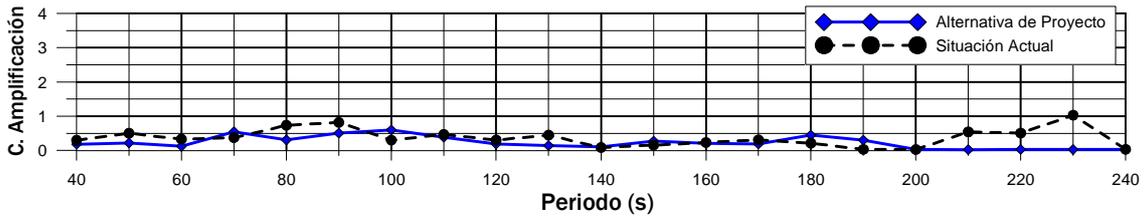
Punto de control P3



Punto de control P4



Punto de control P5



Punto de control P6

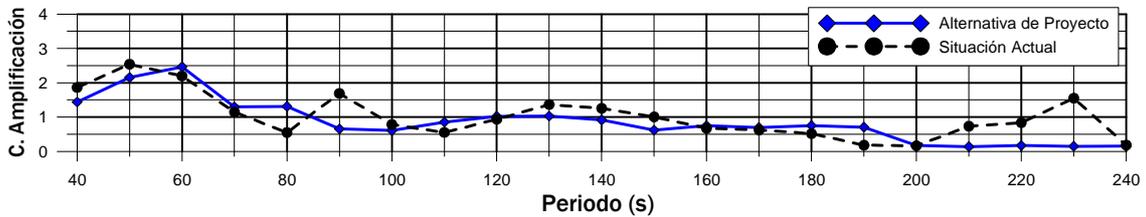
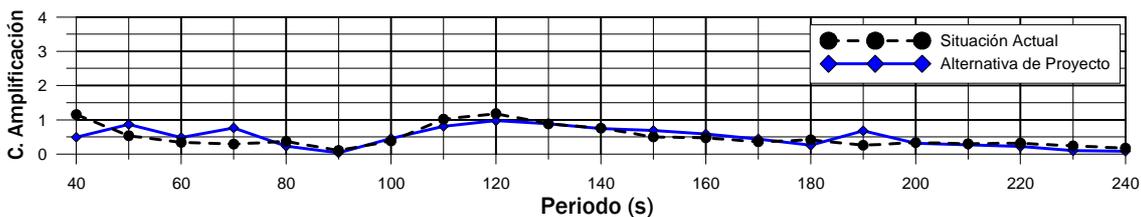


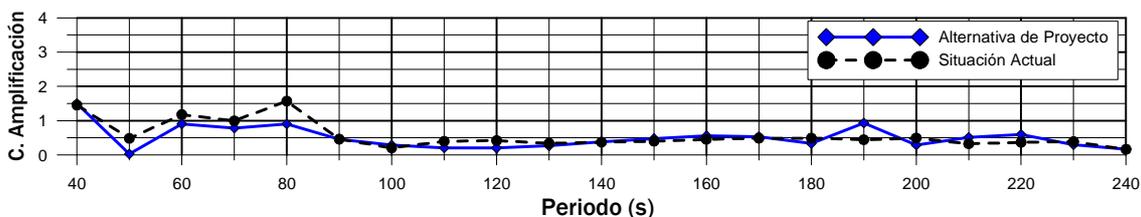
Figura 5: Coeficientes de amplificación en los 6 puntos de control para la Situación Actual y la Alternativa de Proyecto en Bajamar Viva Equinoccial.

Pleamar Viva Equinoccial

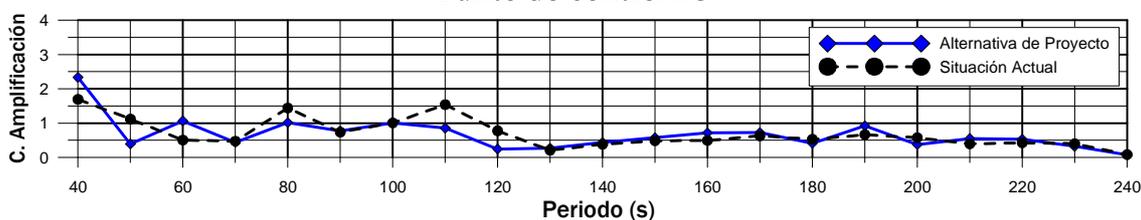
Punto de control P1



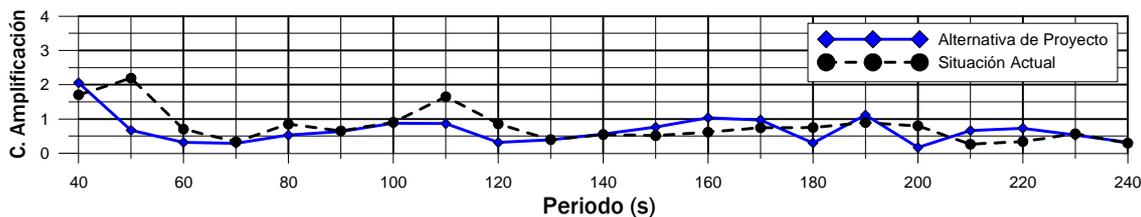
Punto de control P2



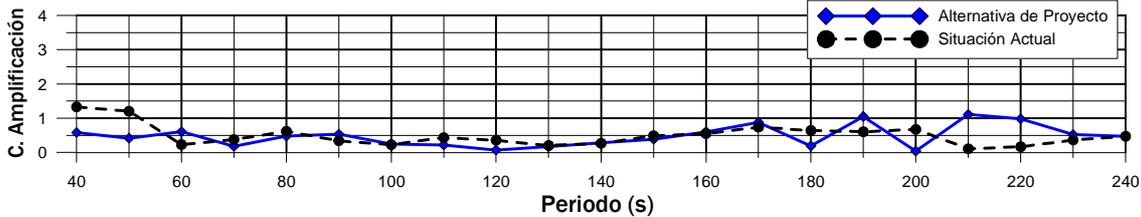
Punto de control P3



Punto de control P4



Punto de control P5



Punto de control P6

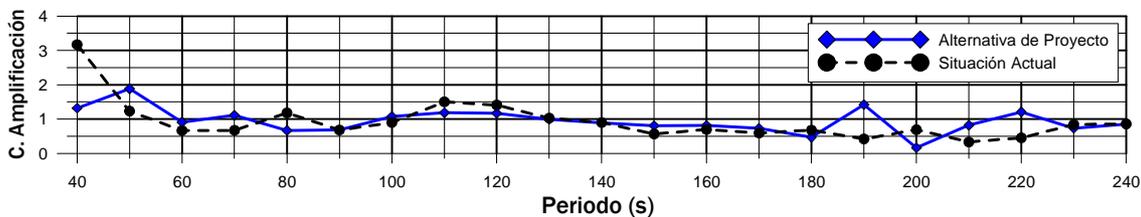


Figura 6: Coeficientes de amplificación en los 6 puntos de control para la Situación Actual y la Alternativa de Proyecto en Pleamar Viva Equinoccial.

1.4. Conclusiones

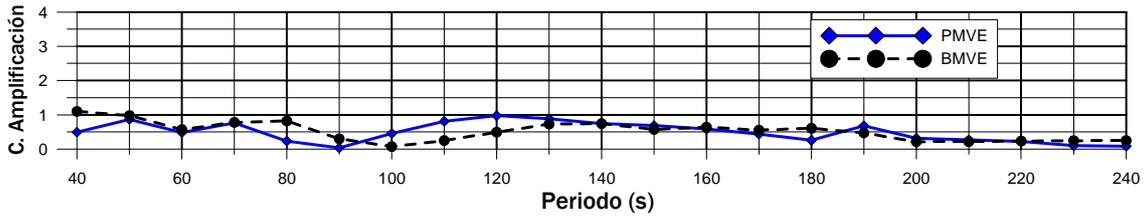
A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que la Alternativa de Proyecto mejora sustancialmente las condiciones de agitación debido a la onda larga en la dársena respecto a la Situación “Actual”, aunque aumenta la amplificación de las ondas de 40-60 segundos en los puntos P2, P3 y P4. Esto se ha conseguido ampliando la bocana, que favorece la radiación de energía al exterior de la dársena.

Se ha observado también que en la Alternativa de Proyecto se producen unos picos de amplificación de la onda larga para los periodos 40 s en P3, P2 y P4 y para 50 y 60 s. en P6, con coeficientes mayores o iguales a 2. Para el resto de los periodos analizados, los coeficientes de amplificación son menores que 1,5.

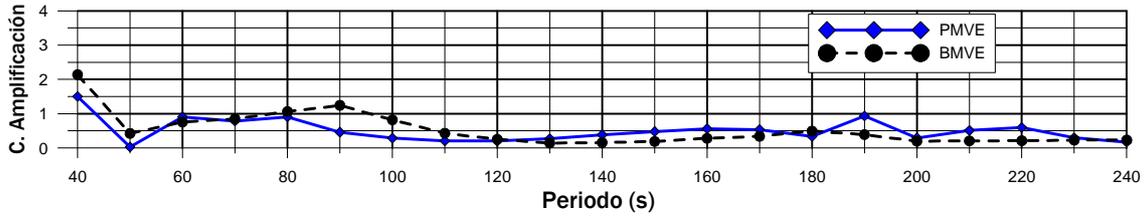
Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el modelo empleado en el presente análisis es lineal y no incluye la fricción con los contornos. Un análisis exhaustivo incluyendo la fricción podría relevar coeficientes de amplificación menores para los periodos de onda más cortos.

Por otro lado, el filtrado de las características del oleaje, especialmente las bandas de frecuencia más energéticas, que se produce al propagarse hacia el interior de la bahía, antes de alcanzar la bocana del puerto y la zona de posible implantación de la terminal, permiten identificar y determinar, sin nuevos estudios, los principales mecanismos de generación de ondas largas y sus principales bandas de confianza que puedan afectar el comportamiento del buque atracado y las oscilaciones de las dársenas comerciales. No obstante, y por razones de exhaustividad, se puede realizar un análisis estadístico del agente forzador en la zona de estudio, en este caso las oscilaciones de largo periodo, teniendo en cuenta la energía presente en cada frecuencia de oscilación y la probabilidad de ocurrencia de los estados definidos por dichas condiciones, en especial en los puntos antes P3 y P6 en la banda de periodos (40-60 segundos).

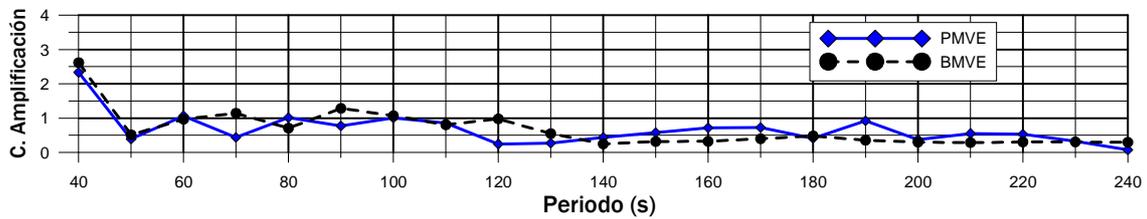
Alternativa de Proyecto Punto de control P1



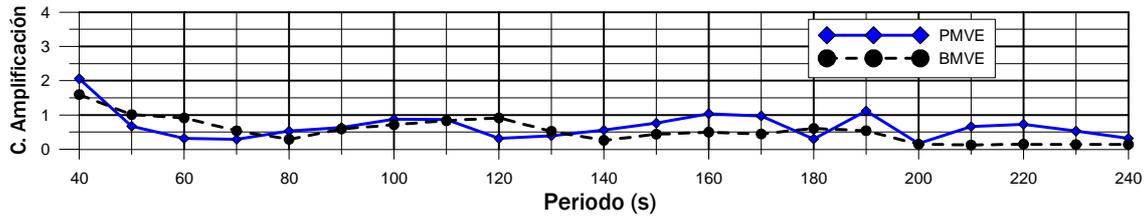
Punto de control P2



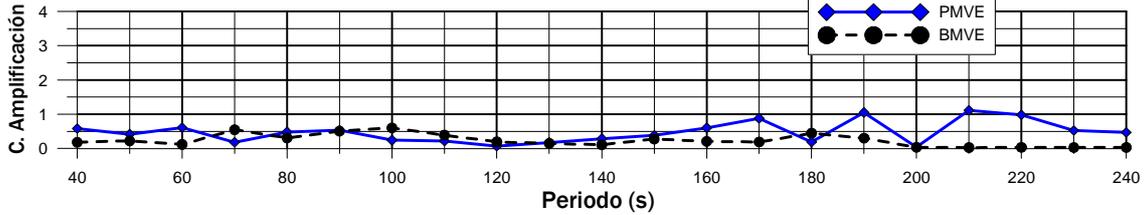
Punto de control P3



Punto de control P4



Punto de control P5



Punto de control P6

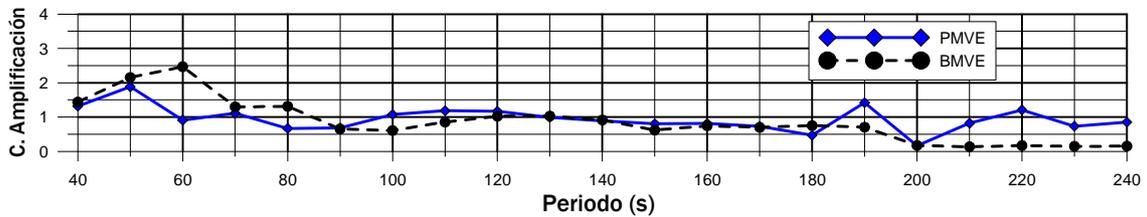
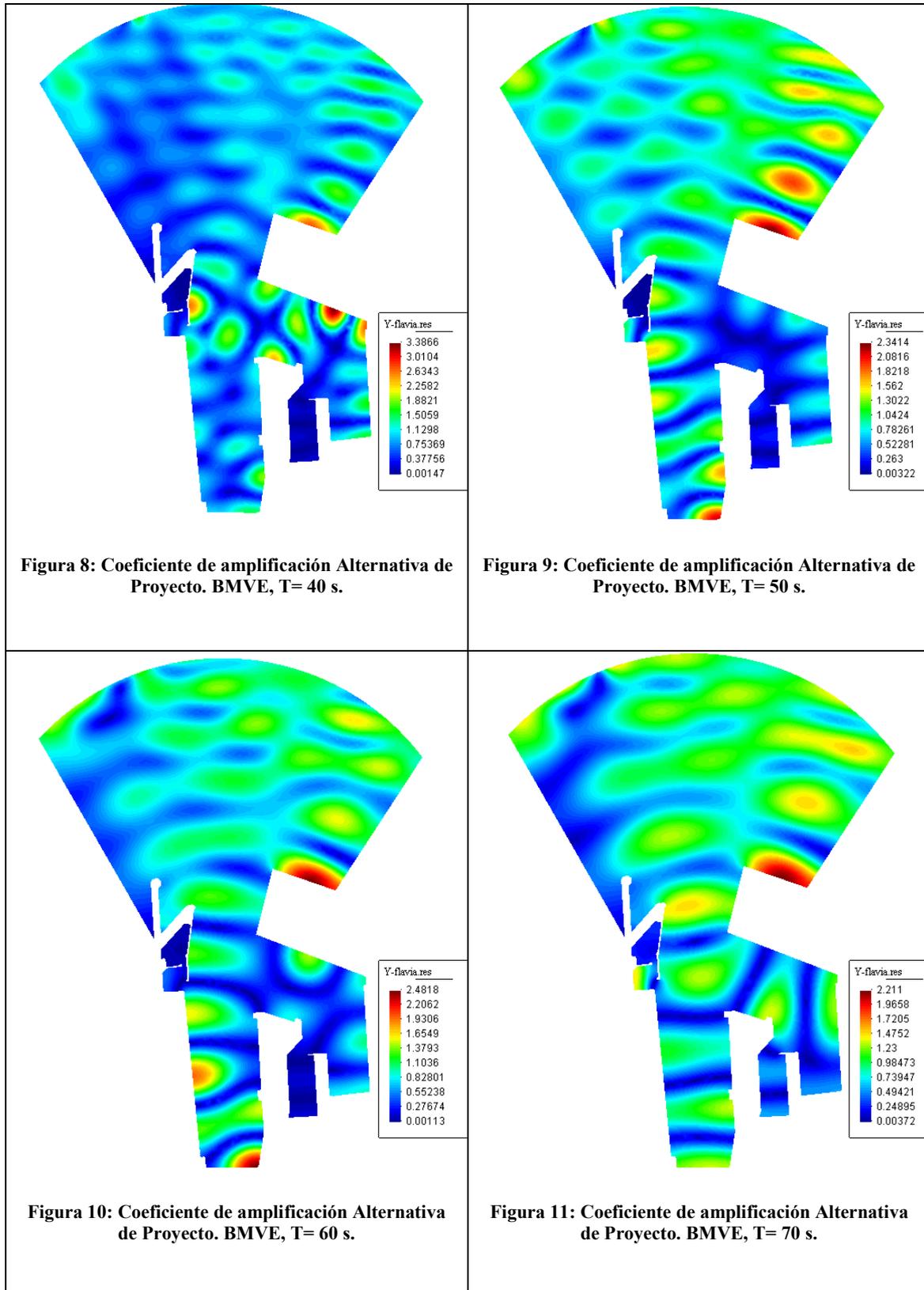


Figura 7: Coeficientes de amplificación en los 6 puntos de control para la Alternativa de Proyecto.

1.5. Mapas de agitación

1.5.1. Bajamar Viva Equinoccial



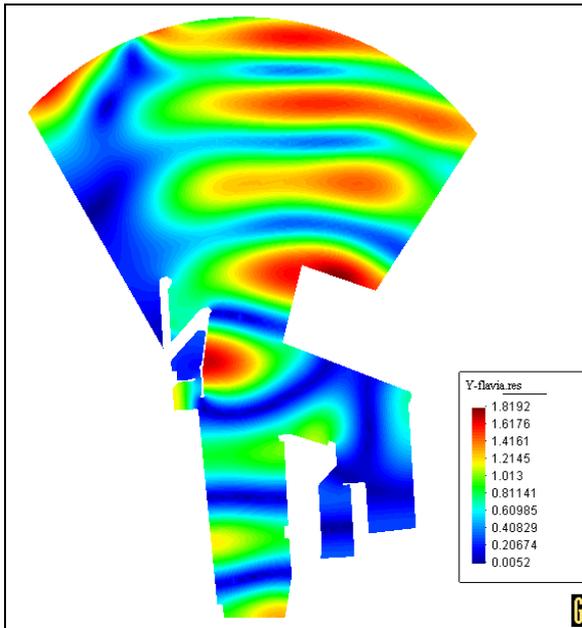


Figura 12: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 80 s.

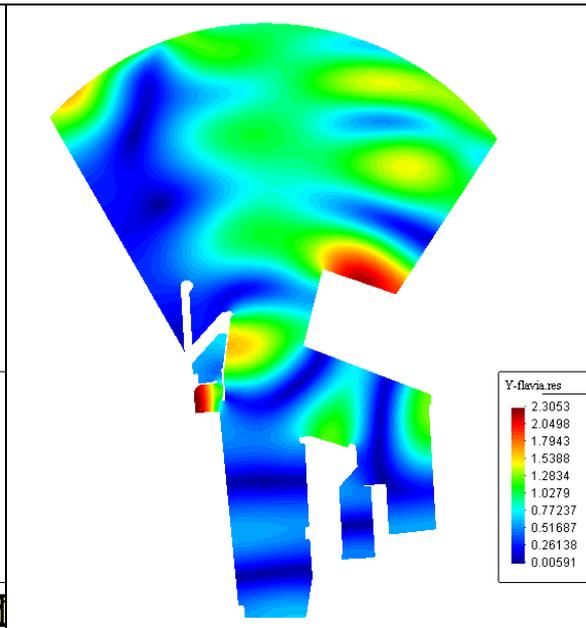


Figura 13: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 90 s.

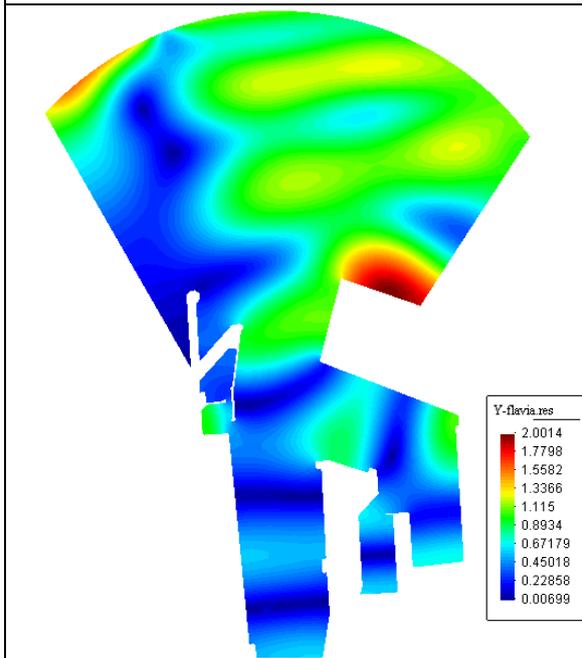


Figura 14: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 100 s.

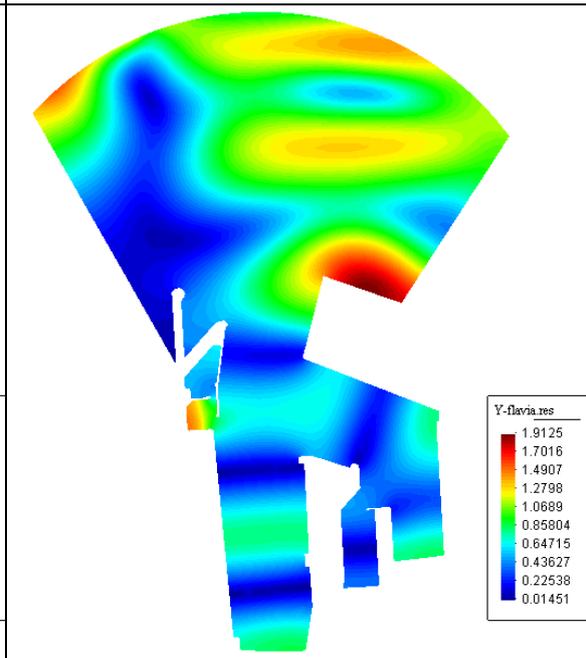


Figura 15: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 110 s.

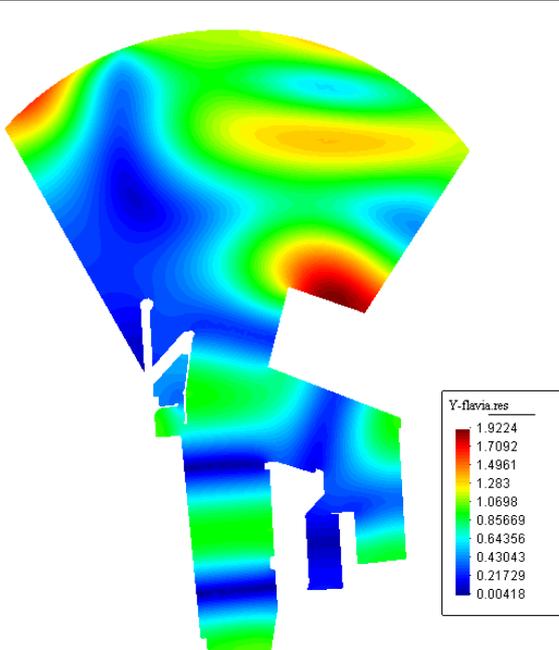


Figura 16: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 120 s.

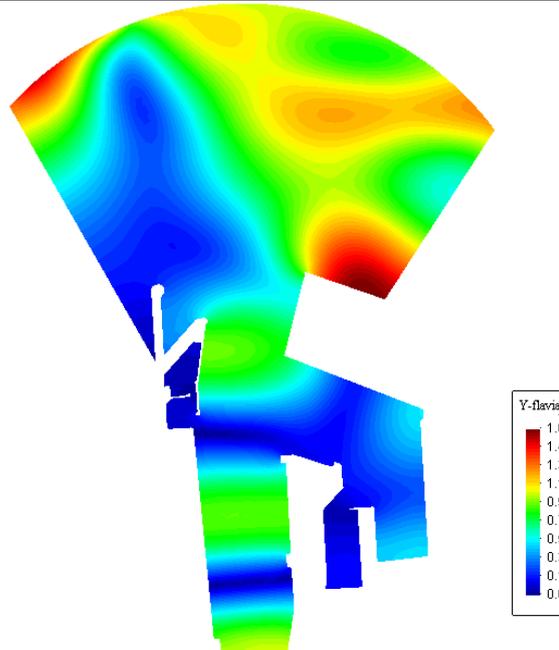


Figura 17: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 130 s.

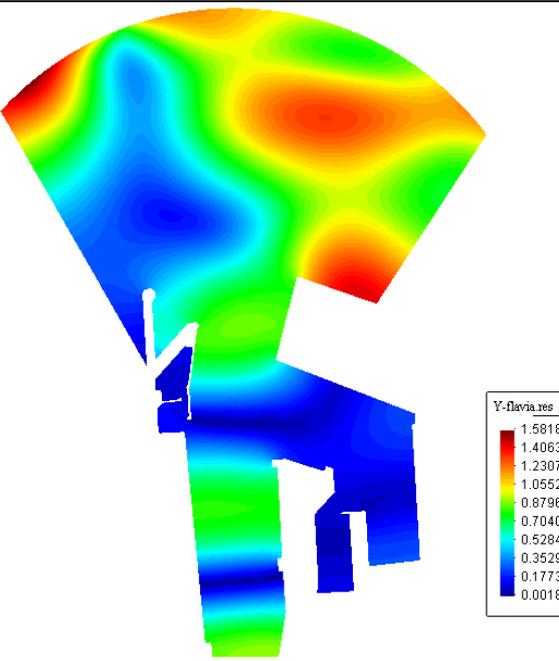


Figura 18: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 140 s.

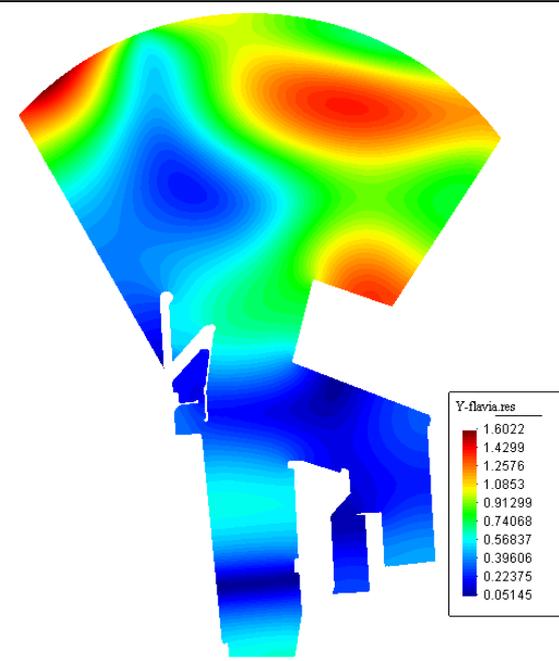


Figura 19: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 150 s.

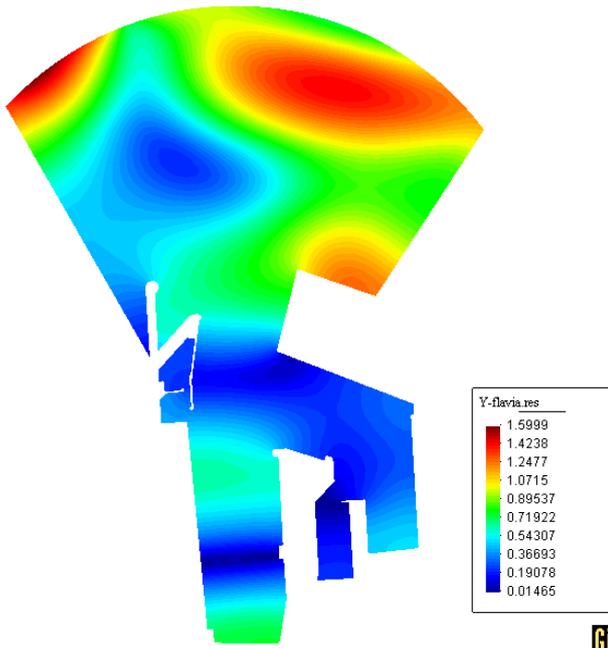


Figura 20: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 160 s.

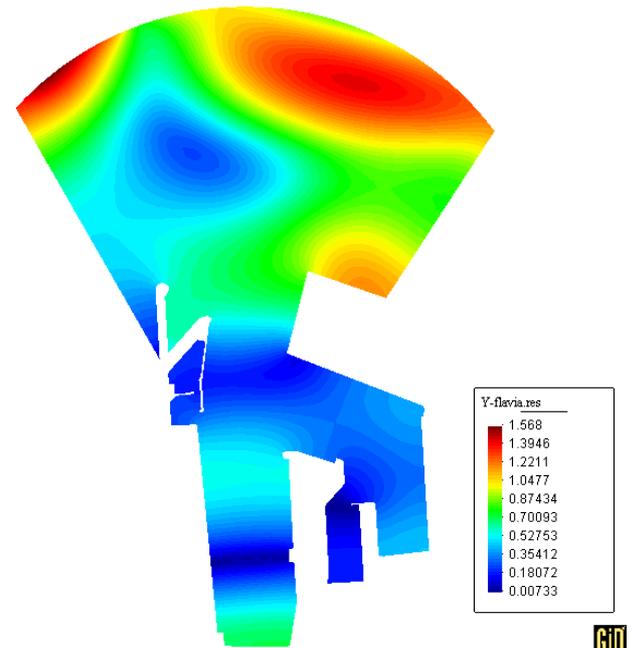


Figura 21: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 170 s.

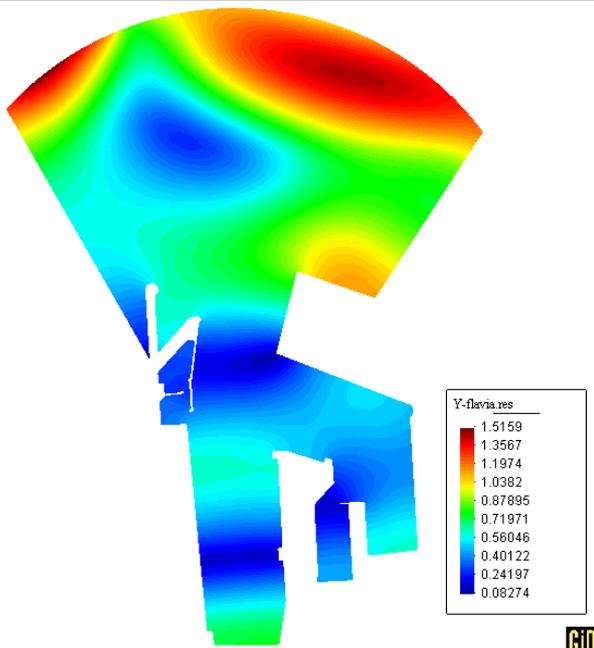


Figura 22: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 180 s.

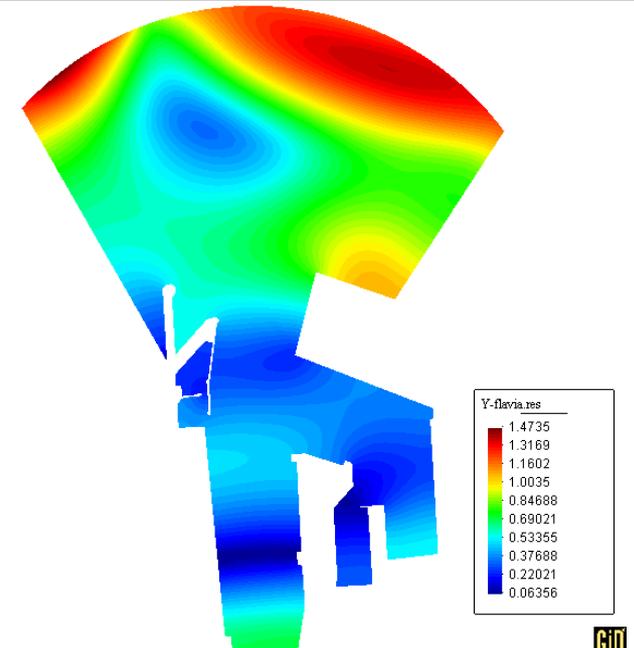


Figura 23: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 190 s.

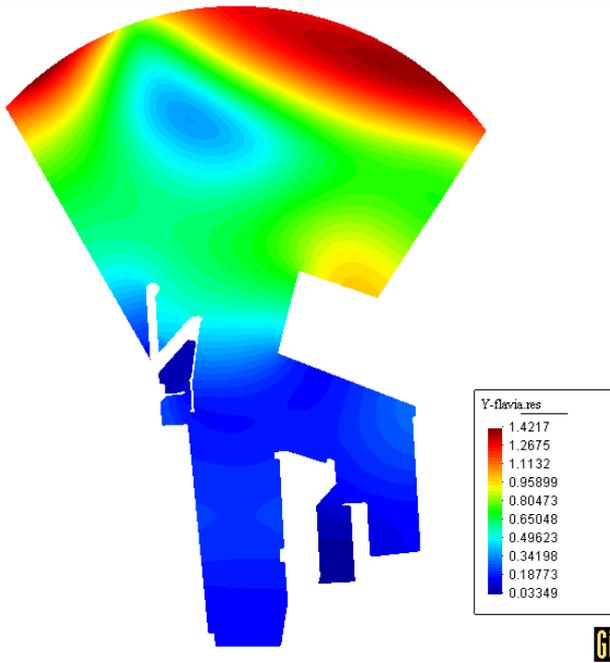


Figura 24: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 200 s.

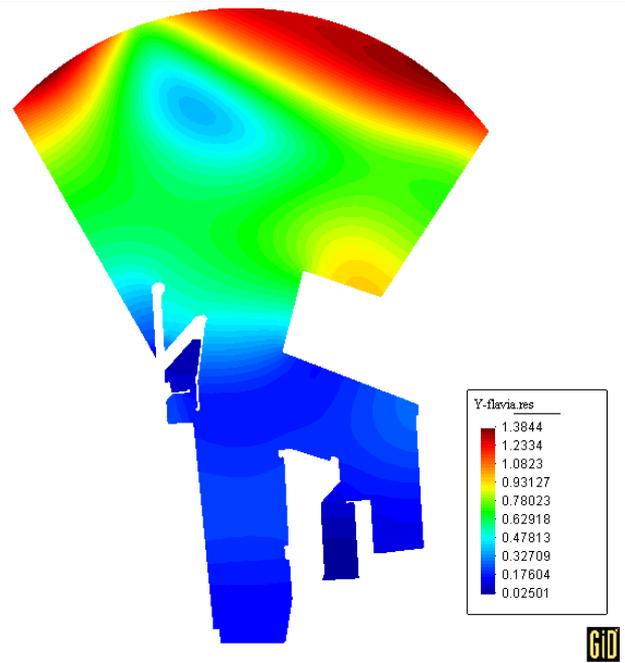


Figura 25: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 210 s.

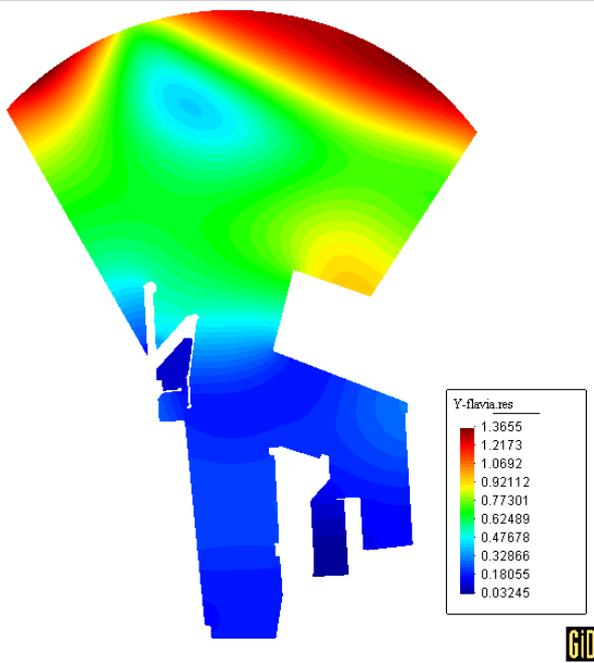


Figura 26: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 220 s.

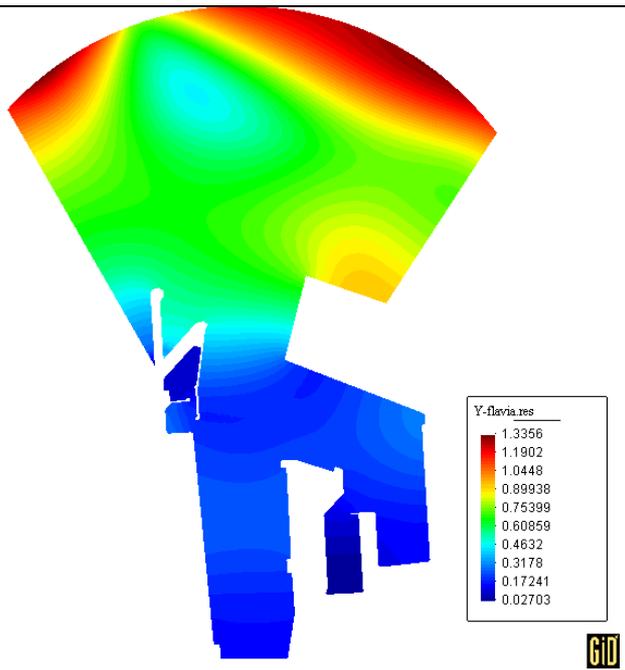
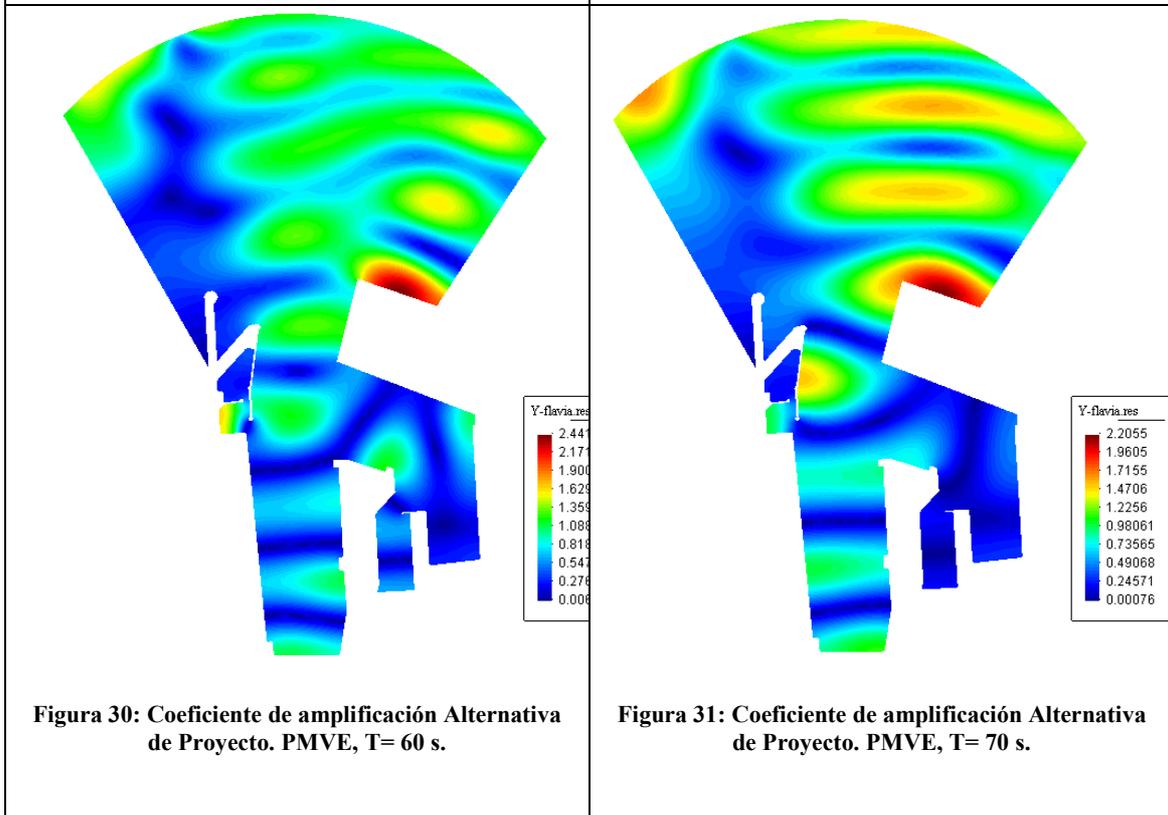
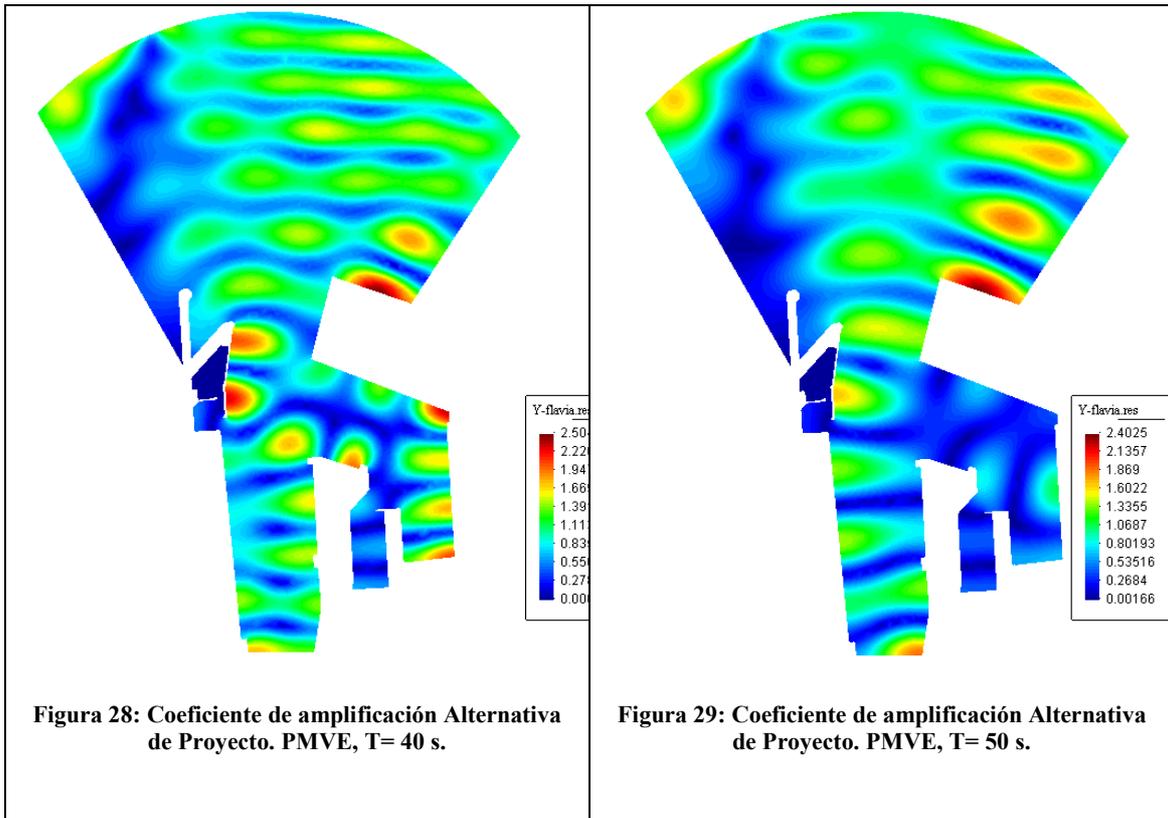
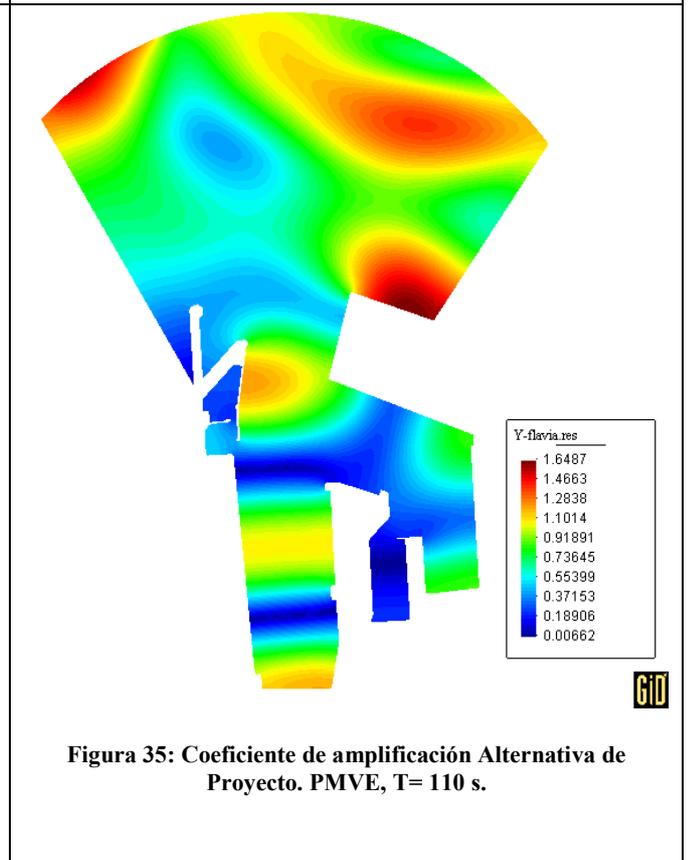
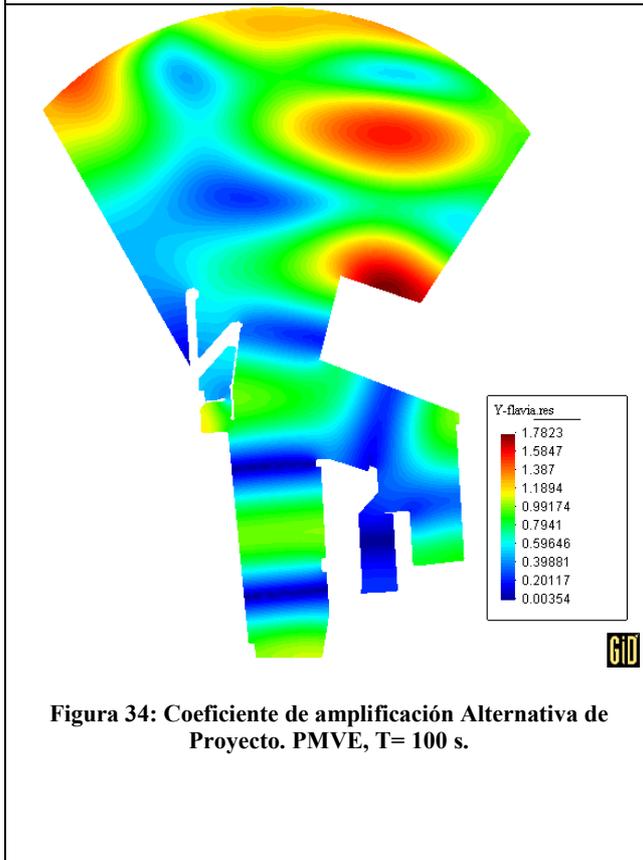
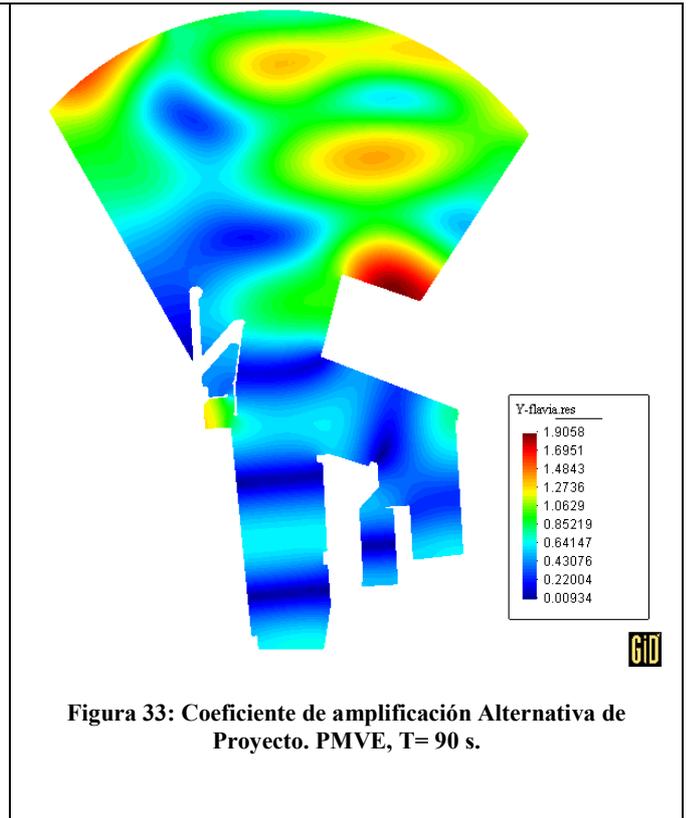
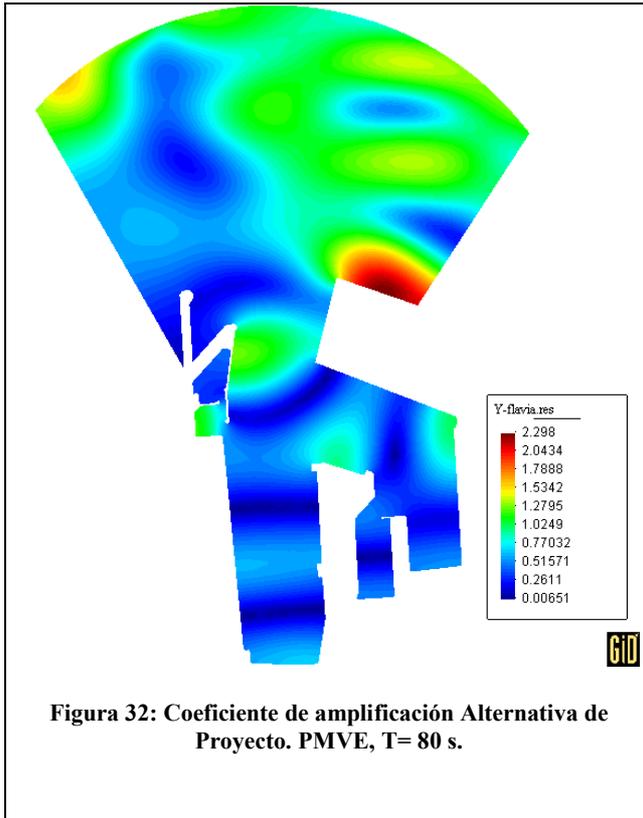


Figura 27: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. BMVE, T= 230 s.

1.5.2. *Pleamar Viva Equinoccial*





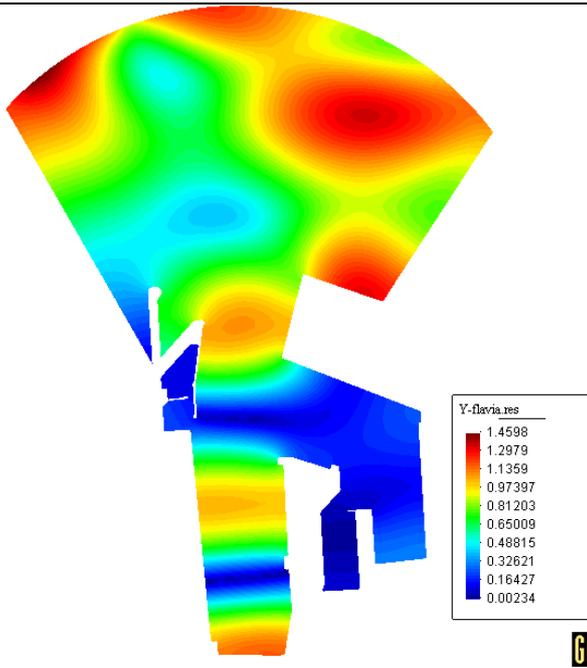


Figura 36: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 120 s.

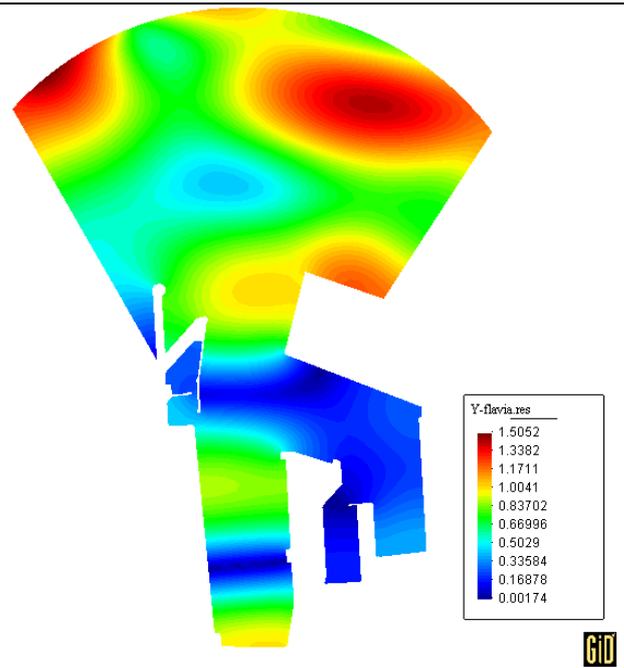


Figura 37: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 130 s.

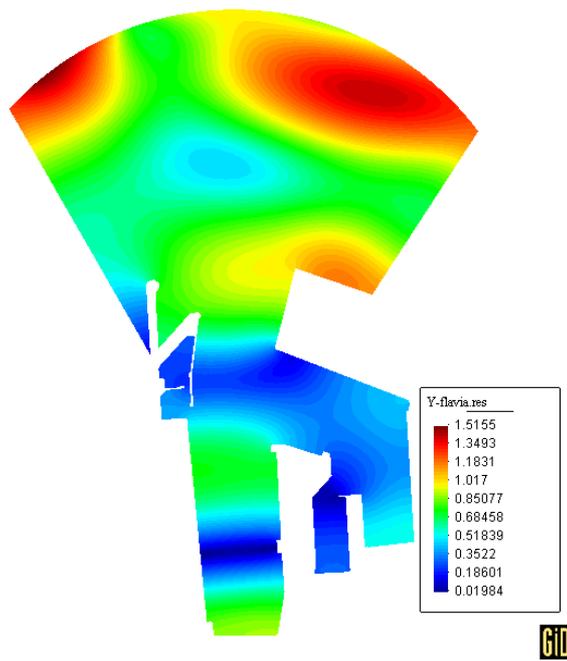


Figura 38: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 140 s.

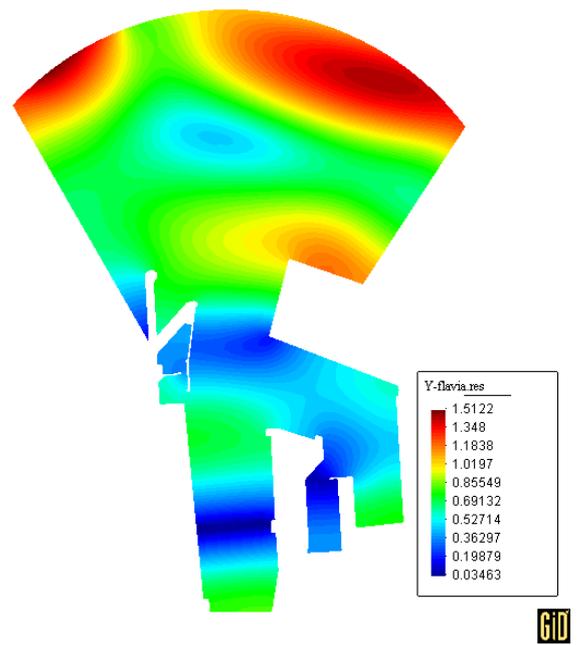


Figura 39: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 150 s.

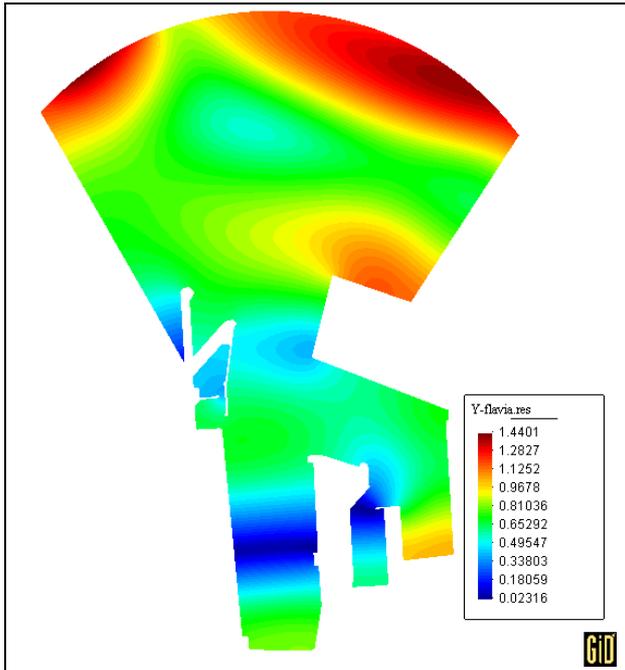


Figura 40: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 160 s.

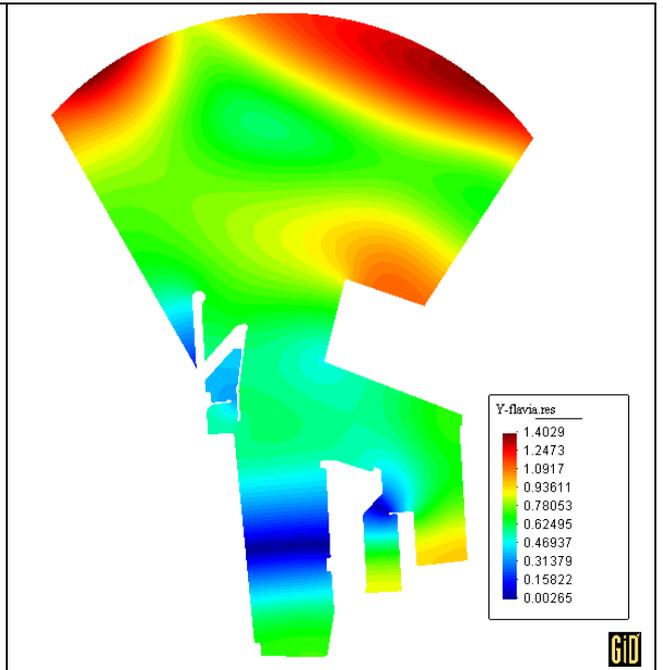


Figura 41: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 170 s.

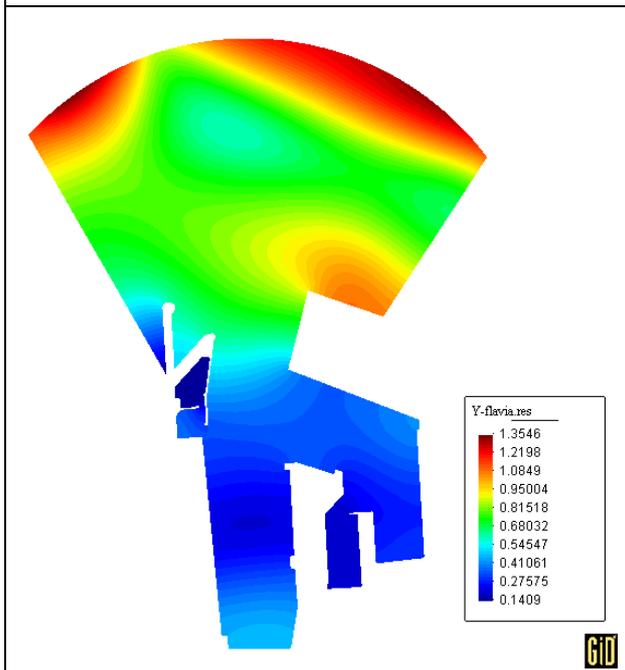


Figura 42: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 180 s.

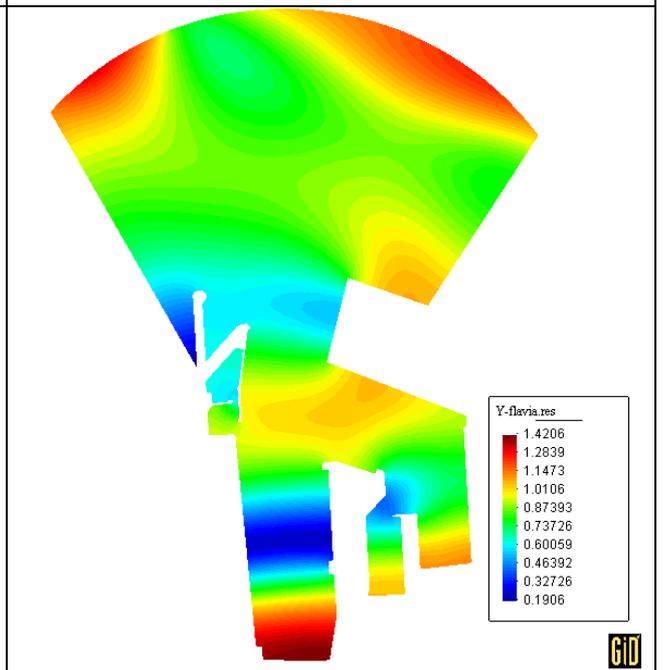


Figura 43: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 190 s.

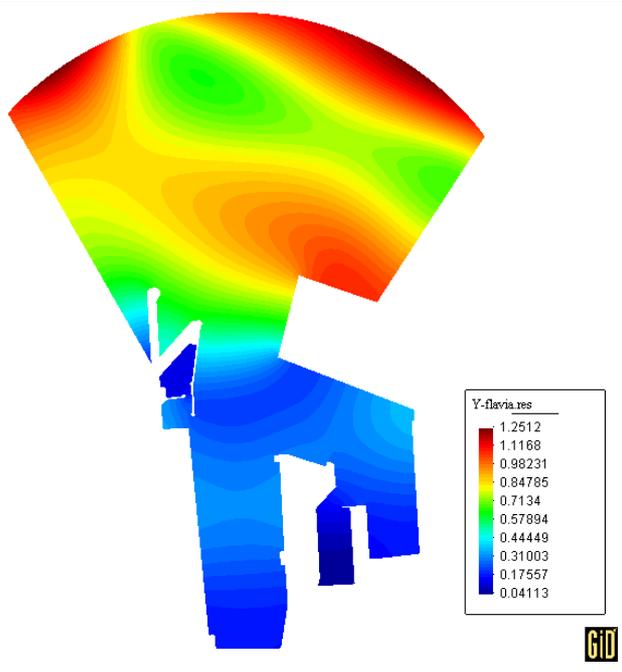


Figura 44: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 200 s.

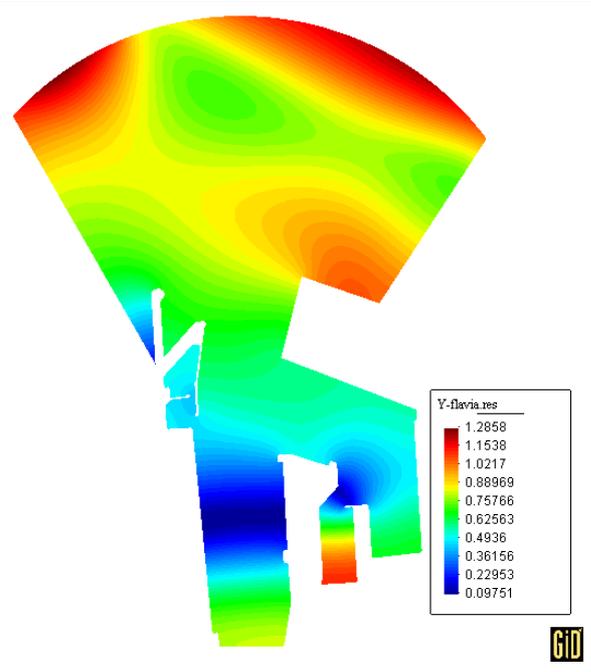


Figura 45: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 210 s.

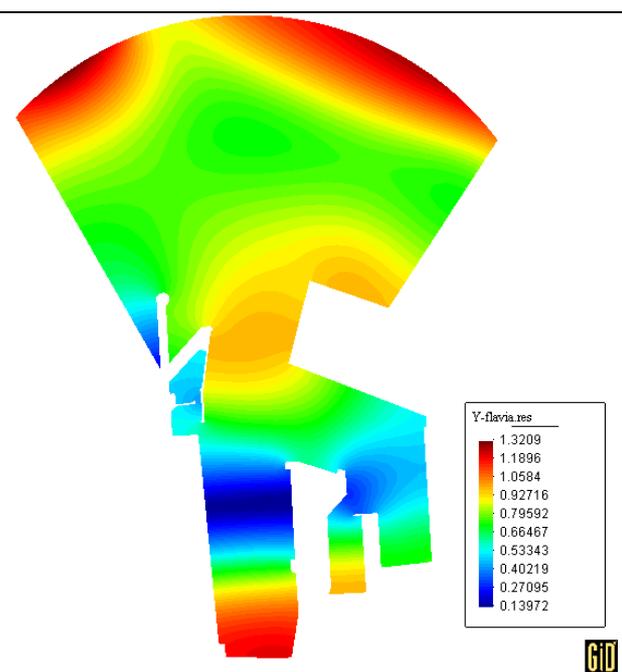


Figura 46: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 220 s.

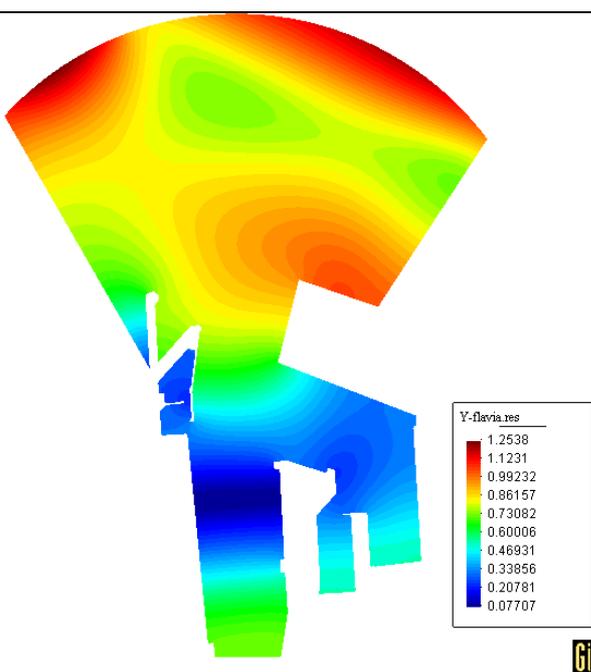


Figura 47: Coeficiente de amplificación Alternativa de Proyecto. PMVE, T= 230 s.

ANEXO VII

DIMENSIONES DEL DIQUE DE ABRIGO. ESTUDIOS PREVIOS

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
2.CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO	3
2.1. Tramos de obra.....	3
2.2. Carácter de la obra.....	3
2.2.1. Carácter General	3
2.2.2. Criterios generales.....	4
2.2.3. Carácter Operativo	4
2.2.4. Criterios de proyecto dependientes del carácter operativo.....	4
3.FACTORES DE PROYECTO	5
3.1. Parámetros de proyecto.....	5
3.1.1. Parámetros geométricos.....	5
3.1.2. Parámetros del medio físico	5
3.1.3. Parámetros del terreno.....	6
3.2. Agentes del medio físico	6
4.DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIÓN.....	7
4.1. Definición de los modos de fallo y de parada operativa.....	7
4.1.1. Estado Límite Último: Pérdida del equilibrio estático	7
4.1.2. Estado Límite Último: Agotamiento resistente.....	8
4.1.3. Estado Límite Último: Deformación acumulada.....	8
4.1.4. Estado Límite Operativo: Umbral operativo.....	8
4.2. Tipos de combinación y clases de valores	8
4.2.1. Estados Límite Últimos	8
4.2.2. Estados Límite Operativos.....	10
4.3. Reparto de la probabilidad de fallo y de parada. Valores de cálculo para la verificación	11
4.3.1. Reparto de la probabilidad de fallo frente a E.L.U.....	11
4.3.2. Reparto de la probabilidad de parada operativa	12
4.3.3. Valores de cálculo para la verificación de la fiabilidad	12
4.3.4. Valores de cálculo para la verificación de la operatividad.....	15
4.4. Verificación del dique en talud: Método de Nivel I	17
4.4.1. Modo de fallo: Salida de piezas del manto principal.....	17
4.4.2. Modo de fallo: Deslizamiento del espaldón.....	18
4.4.3. Modo de fallo: Vuelco del espaldón.....	20
4.4.4. Modo de Fallo: Extracción de Piezas de la Berma de Pie.....	20

4.4.5. Modo de Parada: Rebase.....	21
4.5. Sección propuesta.....	22
5.PREDISEÑO DEL DIQUE DE ABRIGO SEGÚN LA TIPOLOGÍA “DIQUE EN S”	
23	



1. INTRODUCCIÓN

La nueva Terminal de Contenedores propuesta para el Puerto de Cádiz cuenta con una superficie de almacenaje de aproximadamente 38 Ha, protegida del oleaje por medio de un elemento de abrigo frontal situado en el límite Norte de la Terminal (véase Figura 1). La tipología propuesta para este elemento es la de un dique en talud tradicional, aunque podría ser conveniente analizar una configuración que minimice la reflexión y por tanto la agitación en la bocana (por ejemplo “dique en S”)

En este anejo se describe el diseño y verificación del elemento de abrigo frontal que conforma el límite Norte de la Terminal. Se han empleado para ello los criterios expuestos en las Recomendaciones para Obras Marítimas, en concreto:

- ROM 0.0: Procedimiento General y Bases de Cálculo
- ROM 0.2-90: Parámetros y Agentes de Uso y Explotación
- ROM 0.4-95: Descripción del Medio Físico, II: Procesos Atmosféricos
- ROM 1.1: Diques de Abrigo

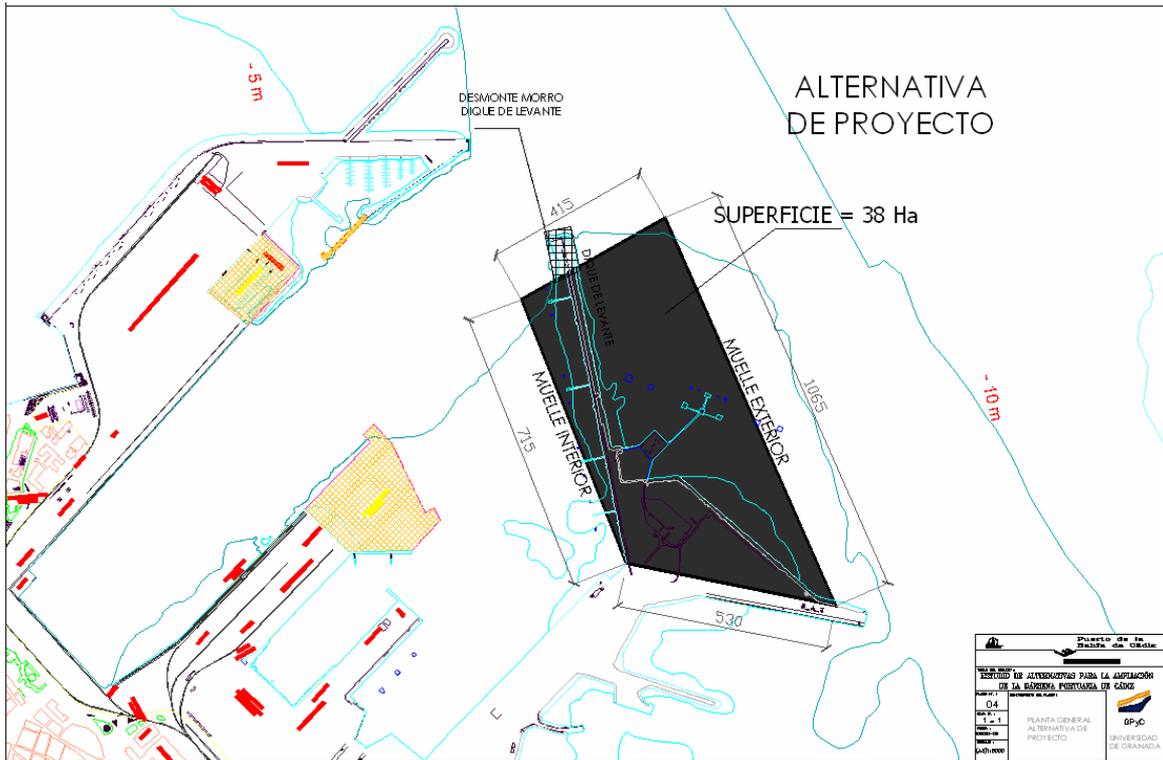


Figura 1. Vista en planta de la Nueva Terminal de Contenedores.



2. CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

2.1. Tramos de obra

El elemento de abrigo frontal se analiza como un único tramo dada su longitud y su homogeneidad. Sus características son las siguientes:

Tramo: Elemento de abrigo frontal

- Orientación: N60E
- Longitud: 415 m
- Cota de cimentación: -14 m con respecto al Cero del Puerto de Cádiz
- Tipología: dique en talud (tradicional) o dique en S

2.2. Carácter de la obra

La importancia de una obra marítima, así como su repercusión económica, social y ambiental se valora por medio del carácter general de la obra. Este carácter se define para el modo de fallo que dé lugar a la destrucción o pérdida de operatividad total en el tramo durante la fase de servicio. El carácter general de la obra se determina a partir de los índices de Repercusión Económica (IRE) y de Repercusión Social y Ambiental (ISA).

2.2.1. *Carácter General*

Índice de Repercusión Económica

IRE = 14 – obra con repercusión económica media

- Coste de Restitución: 20.75 MEuros
- Coste Base: 3 MEuros
- Papel del sistema económico – ámbito: nacional/internacional
- Papel del sistema económico – actividad: relevante
- Papel de la obra en el sistema económico - actividad: relevante



Índice de Repercusión Social y Ambiental

$ISA = 5$ – obra sin repercusión social y ambiental significativa

- Pérdida de vidas humanas - posibilidad y alcance: remota
- Daños ambientales – posibilidad y daños: remota
- Alarma Social – intensidad: media

2.2.2. Criterios generales

Los criterios generales que se desprenden de los índices calculados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios generales correspondientes al elemento de abrigo frontal

CARÁCTER GENERAL	Vida útil mínima	25 años
	Probabilidad máxima de fallo en ELU	0.10
	Probabilidad máxima de fallo en ELS	0.10

2.2.3. Carácter Operativo

El carácter operativo del tramo *Elemento de Abrigo Frontal* se ha calculado en el anejo XV: Criterios Generales de Proyecto. Los índices de repercusión obtenidos son los siguientes:

Índice de Repercusión Económica Operativa

$IREO = 8$ – Tramo con repercusión económica operativa media

Índice de Repercusión Social y Ambiental Operativa

$ISAO = 3$ – Tramos sin repercusión social y ambiental operativa significativa

2.2.4. Criterios de proyecto dependientes del carácter operativo

Los criterios de proyecto que se desprenden de los índices IREO e ISA calculados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de operatividad correspondientes al elemento de abrigo frontal

CARÁCTER OPERATIVO	Operatividad mínima	95%
	Número Medio Anual de Paradas Operativas	10
	Duración Máxima de la Parada Operativa	12 h



3. FACTORES DE PROYECTO

Los factores de proyecto son el conjunto de parámetros, agentes y acciones que intervienen en el proyecto (ROM 0.0, apartado 3.4) y se utilizan para verificar la seguridad, servicio y explotación, en este caso del elemento de abrigo frontal, durante la vida útil.

3.1. Parámetros de proyecto

Sirven para definir y caracterizar la geometría de la obra y del terreno y las propiedades del medio físico, del terreno y los materiales. A continuación se enuncian los parámetros a considerar en la verificación del dique de abrigo.

3.1.1. *Parámetros geométricos*

El dique en estudio tiene una tipología de dique en talud con las siguientes características:

- Emplazamiento: Orientación N60E, con el extremo E de coordenadas UTM29 (744158; 4047631) y el extremo W (743799; 4047426).
- Terreno natural: Se supone que posee capacidad portante suficiente y se encuentra aproximadamente a cota -13 m con respecto al CP.
- Manto principal, manto secundario, núcleo, espaldón, etc..., se definen en el apartado 4.5.

3.1.2. *Parámetros del medio físico*

Parámetros de estado

- Peso específico del agua: $\gamma_w = 1.025 \text{ t/m}^3$
- Peso específico del aire: $\rho = 1.225 \text{ t/m}^3$

Parámetros mecánicos

- Viscosidad cinemática del agua: $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



3.1.3. Parámetros del terreno

Parámetros de identificación

- Sedimento del fondo

Parámetros mecánicos

- Peso específico del material del fondo
- Ángulo de fricción del material del fondo
- Cohesión del material del fondo

3.2. Agentes del medio físico

Los agentes son todo lo que puede ejercer o producir en la obra o sobre la misma y su entorno efectos significativos en la fiabilidad, funcionalidad y operatividad. En el anejo de Clima Marítimo y sucesivos se realiza una descripción de los agentes que interaccionan con el dique de abrigo.



4. DIMENSIONAMIENTO Y VERIFICACIÓN

4.1. Definición de los modos de fallo y de parada operativa

El tramo de obra se verifica frente a los Estados Límite Últimos en condiciones de trabajo extremas (CT2), es decir, para los estados de proyecto asociados a las acciones más severas debidas a los agentes; y frente a los Estados Límite Operativos en condiciones de trabajo normales operativas (CT1), es decir, para los estados de proyecto asociados a las acciones medias.

A continuación se indican los estados límite y los modos de fallo y de parada adscritos a ellos. En aquellos casos en los que se necesita verificar el modo se indica la participación de los factores que actúan simultáneamente en el mismo.

4.1.1. Estado Límite Último: Pérdida del equilibrio estático

Modo de fallo: Extracción de piezas de la berma

Predominante: Oleaje, nivel del mar

Mismo origen: Viento

Independientes: Gravitatorio, terreno

Modo de fallo: Salida de piezas del manto principal

Predominante: Oleaje

Mismo origen: Marea meteorológica, viento

Independientes: Marea astronómica, gravitatorio, terreno

Modo de fallo: Deslizamiento del espaldón

Predominante: Oleaje, nivel del mar

Mismo origen: Viento



Independiente: Gravitatorio, terreno

Modo de fallo: Vuelco del espaldón

Predominante: Oleaje, nivel del mar

Mismo origen: Viento

Independiente: Gravitatorio, terreno

4.1.2. Estado Límite Último: Agotamiento resistente

Los modos de fallo que se listan a continuación pueden evitarse mediante normas de buena práctica.

- Deslizamiento del manto principal
- Deslizamiento del Núcleo

4.1.3. Estado Límite Último: Deformación acumulada

Los modos de fallo que se enlistan a continuación pueden evitarse mediante normas de buena práctica.

- Socavación de la berma
- Socavación de la cimentación del espaldón
- Erosión interna del manto secundario
- Hundimiento del espaldón

4.1.4. Estado Límite Operativo: Umbral operativo

Modo de fallo: Rebase

Predominante: Oleaje, nivel del mar

Mismo origen: Viento

Independientes: Gravitatorio, terreno.

4.2. Tipos de combinación y clases de valores

4.2.1. Estados Límite Últimos

Para la verificación del tramo en cada estado límite último y modo de fallo, para las condiciones de trabajo extremas (CT2), se establecen los distintos tipos de combinación de los términos que actúan de forma simultánea. Se consideran los siguientes modos de fallo principales:

- Extracción de piezas de la berma



- Salida de piezas del manto principal
- Deslizamiento del espaldón
- Vuelco del espaldón

Las combinaciones propuestas para los distintos modos de fallo se muestran en Tabla 3 - Tabla 6

Tabla 3. Combinación fundamental para la salida de piezas del manto principal

ELU: Pérdida del equilibrio estático		
Salida de piezas del manto principal – Combinación fundamental		
Factor	Descripción	Clase de valor
Oleaje	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Nivel del mar	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Viento	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Gravitatorio	Determinista	Valor nominal

Tabla 4 Combinación fundamental para evaluar el deslizamiento del espaldón

ELU: Pérdida del equilibrio estático		
Deslizamiento del espaldón – Combinación fundamental		
Factor	Descripción	Clase de valor
Oleaje	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Nivel del mar	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Viento	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Gravitatorio	Determinista	Valor nominal

Tabla 5. Combinación fundamental para evaluar el vuelco del espaldón.

ELU: Pérdida del equilibrio estático		
Vuelco del espaldón – Combinación fundamental		
Factor	Descripción	Clase de valor
Oleaje	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Nivel del mar	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Viento	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Gravitatorio	Determinista	Valor nominal

**Tabla 6. Combinación fundamental para evaluar la extracción de piezas de la berma de pie.**

ELU: Pérdida del equilibrio estático		
Extracción de piezas de la berma de pie – Combinación fundamental		
Factor	Descripción	Clase de valor
Oleaje	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Nivel del mar	Aleatorio-Régimen extremal	Cola inferior
Viento	Aleatorio-Régimen extremal	Cola superior
Gravitatorio	Determinista	Valor nominal

4.2.2. Estados Límite Operativos

Para la verificación del tramo en el estado límite operativo, para las condiciones de trabajo medias operativas (CT1), se establece el tipo de combinación de los términos que actúan de forma simultánea. Se considera el siguiente modo de parada:

- Rebase del elemento de abrigo

La combinación propuesta para dicho modo de parada se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Combinación fundamental para evaluar el rebase.

ELO: Umbral Operativo		
Rebase – Combinación fundamental		
Factor	Descripción	Clase de valor
Oleaje	Aleatorio-Régimen medio	Cola superior
Nivel del mar	Aleatorio-Régimen medio	Cola superior
Viento	Aleatorio-Régimen medio	Cola superior
Gravitatorio	Determinista	Valor nominal



4.3. Reparto de la probabilidad de fallo y de parada. Valores de cálculo para la verificación

4.3.1. Reparto de la probabilidad de fallo frente a E.L.U.

Se considera por tanto un dique en talud con cuatro modos de fallo principales, en los que a efectos del reparto de la probabilidad de fallo, los modos vuelco y deslizamiento de la superestructura se computarán como uno solo, ya que estos dos modos ocurren simultáneamente y con los mismos valores de los agentes. Por lo tanto, a efectos del reparto de la probabilidad conjunta de fallo se consideran tres modos principales:

- Deslizamiento del espaldón (s_1)
- Extracción de piezas del manto principal (s_2)
- Extracción de piezas de la berma (s_3)

En este análisis preliminar se va a asumir que las consecuencias derivadas de la ocurrencia de cada modo de fallo son similares, por lo que la probabilidad máxima de fallo de cada modo en la vida útil (25 años) será:

$$p_{f,s_1} = p_{f,s_2} = p_{f,s_3} = \frac{0.1}{3} = 0.0333$$

Esto implica que la máxima probabilidad de fallo anual de cada modo será

$$p_{f,s_i} = 1 - (1 - p_{f,anual,s_i})^{25} \rightarrow p_{f,anual,s_i} = 0.00134$$

Por lo tanto, se debería realizar la verificación del tramo para todas las combinaciones de agentes posibles tales que su probabilidad de ocurrencia anual sea menor o igual a 0.00134. Obviamente, existen infinitas posibilidades, que no es ni más ni menos, lo que se realiza con métodos de nivel III. En el caso que nos ocupa vamos a usar el siguiente criterio para reducir el número de combinaciones de los agentes actuantes:

- Para todos los modos de fallo considerados, los agentes predominantes son el nivel del mar y el oleaje, pero el oleaje es el determinante a la hora de desencadenar el modo de fallo. De esta manera, seremos más exigentes con el oleaje que con el nivel del mar a la hora de fijar su valor de cálculo.
- De esta manera, fijamos un periodo de retorno de 5 años para la carrera de marea astronómica y un periodo de retorno de 150 años para el oleaje, de manera que se cumpla que la probabilidad de ocurrencia anual de dicho suceso sea menor que la



probabilidad de fallo máxima asignada a cada modo de fallo del tramo:

$$Pr_{anual}(\text{oleaje} \cap \text{marea}) = 1/150 \cdot 1/5 = 0.00133 < p_{f_{anual, s_i}} = 0.00134.$$

- Fijada una carrera de marea con un periodo de retorno de 5 años, dependiendo del modo de fallo a verificar, se tomará el nivel correspondiente a bajamar o el de pleamar según el modo de fallo:
 - Para el modo de fallo: Extracción de piezas de la berma de pie se tomará el nivel de marea correspondiente a bajamar (más el nivel de marea meteorológica simultáneo y compatible con el oleaje con periodo de retorno de 150 años), ya que se dan las condiciones pésimas en la bajamar.
 - Para los modos de fallo restantes, el nivel de marea astronómica se tomará el de pleamar.

4.3.2. Reparto de la probabilidad de parada operativa

Se ha considerado únicamente un modo de parada operativa en el tramo “Elemento de abrigo frontal”:

- Rebase del dique (s_1),

Por lo tanto, la probabilidad de parada operativa adscrita a este modo será:

$$p_{p, s_1} = p_{pTOTAL} = 1 - \text{operatividad} = 1 - 0.95 = 0.05$$

4.3.3. Valores de cálculo para la verificación de la fiabilidad

Los valores de cálculo de los agentes climáticos se obtienen usando el Anejo de Clima Marítimo y se resumen a continuación:

- **Oleaje**
 - Periodo de retorno: $T_r = 150$ años
 - Altura de ola significativa de diseño $H_s = 9.1$ m (punto WANA dirección W).
 - Periodo de pico asociado: $T_p = 19$ s.
 - Coeficiente de propagación: $C_p = 0.74 \cdot 0.53 = 0.39$ (0.74 = Coeficiente de propagación obtenido del modelo parabólico y 0.53 = Coeficiente de agitación obtenido del modelo elíptico)
 - Altura de ola significativa a pie de dique $H_s = 9.1 \cdot 0.39 = 3.57$ m
 - Altura de ola máxima de diseño a pie de dique: $H_{max} = 1.7 \cdot 3.57 ; 6.1$ m
- **Marea astronómica:**



- Carrera de marea (CM) con periodo de retorno de 5 años referida al cero del puerto:

- Pleamar: $Z_0 + 0.5CM_{T_r=5 \text{ años}} = 2.0015 + (0.5) (3.7) = 3.85 \text{ m.}$
- Bajamar: $Z_0 + 0.5CM_{T_r=5 \text{ años}} = 2.0015 - (0.5) (3.7) = 0.15 \text{ m}$

- **Marea meteorológica:**

- Se asume que existe una correlación positiva entre la sobreelevación de nivel de marea meteorológica y la altura de ola significativa de tal manera que $S_{MM} = -0.0218071 - 0.00208886H_s + 0.0286215H_s^2$, por lo que el nivel de marea meteorológica con periodo de retorno de 150 años se estima como $S_{MM} = 2.33 \text{ m}$. Esta fórmula se ha obtenido en base a un ajuste entre valores de altura de ola medidos por la boya de Cádiz y niveles medidos en el mareógrafo. Este valor obtenido parece algo elevado, y por lo tanto, en este dimensionamiento previo se empleará el valor $S_{MM} = 1.50 \text{ m}$, y la sobreelevación debida a la marea meteorológica será analizada con mayor detalle posteriormente.

Condiciones de Trabajo Extremas			
Modo de Fallo: Deslizamiento o Vuelco del Espaldón			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Oleaje	Predominante	Reg. Extremal ($T=150$ años)	$H_{\max}=6.1 \text{ m}; T_p=19 \text{ s}$
Marea Astronómica	Predominante	Reg. Extremal ($T=5$ años; Pleamar)	3.85 m
Marea Meteorológica	Dependiente del Oleaje	Reg. Extremal ($T=150$ años)	1.5 m
Viento	Dependiente del Oleaje	Reg. Extremal ($T=150$ años)	-
Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Sismo	-	-	-



Condiciones de Trabajo Extremas			
Modo de Fallo: Extracción de Piezas Manto Principal			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Oleaje	Predominante	Reg. Extremal ($T=150$ años)	$H_{\max}=6.1$ m; $T_p=19$ s
Marea Astronómica	Predominante	Reg. Extremal ($T=5$ años; Pleamar)	3.85 m
Marea Meteorológica	Dependiente del Oleaje	Reg. Extremal ($T=150$ años)	1.5 m
Viento	Dependiente del Oleaje	Reg. Extremal ($T=150$ años)	-
Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Sismo	-	-	-

Condiciones de Trabajo Extremas			
Modo de Fallo: Extracción de Piezas Berma de Pie			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Oleaje	Predominante	Reg. Extremal ($T=150$ años)	$H_{\max}=6.1$ m; $T_p=19$ s
Marea Astronómica	Predominante	Reg. Extremal ($T=5$ años; Bajamar)	0.15 m
Marea Meteorológica	Dependiente del Oleaje	Reg. Extremal ($T=150$ años)	1.5 m
Viento	Dependiente del Oleaje	Reg. Extremal ($T=150$ años)	-
Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Sismo	-	-	-



4.3.4. Valores de cálculo para la verificación de la operatividad

Los valores de cálculo de los agentes climáticos se han obtenido a partir del Anejo de Clima Marítimo y se resumen a continuación:

- **Oleaje**
 - Probabilidad de no excedencia: 0.95
 - Altura de ola significativa de diseño $H_s = 3.75$ m (punto WANA régimen medio escalar).
 - Periodo de pico asociado: $T_p = 11$ s.
 - Coeficiente de propagación: $C_p = 0.94 \cdot 0.21 = 0.197$ (0.94 = Coeficiente de propagación obtenido del modelo parabólico y 0.21 = Coeficiente de agitación obtenido del modelo elíptico)
 - Altura de ola significativa a pie de dique $H_s = 3.75 \cdot 0.197 = 0.74$ m
 - Altura de ola máxima a pie de dique: $H_{max} = 1.7 \cdot 0.74 = 1.26$ m
- **Marea astronómica:**
 - Carrera de marea (CM) correspondiente a una probabilidad de no excedencia del 95%:
 - Pleamar: $Z_0 + 0.5CM_{p0,95} = 2.0015 + 0.5(3.3) = 3.65$ m.
- **Marea meteorológica:**
 - Se asume que existe una correlación positiva entre la sobreelevación de nivel de marea meteorológica y la altura de ola significativa de tal manera que $S_{MM} = -0.0218071 - 0.00208886H_s + 0.0286215H_s^2$, por lo que el nivel de marea meteorológica asociado al estado de mar de cálculo se estima en $S_{MM} = 0.37$ m. Esta fórmula se ha obtenido en base a un ajuste entre valores de altura de ola medidos por la boya de Cádiz y niveles medidos en el mareógrafo.



Condiciones de Trabajo Medias Operativas			
Modo de Parada: Rebase			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Oleaje	Predominante	Reg. Medio (Pr_exced=0.05)	$H_{\max}=1.26$ m; $T_p=11$ s
Marea Astronómica	Predominante	Reg. Medio (Pr_exced=0.05)	3.65 m
Marea Meteorológica	Dependiente del Oleaje	Reg. Medio (Pr_exced=0.05)	0.37 m
Viento	Dependiente del Oleaje	Reg. Medio (Pr_exced=0.05)	-
Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Sismo	-	-	-



4.4. Verificación del dique en talud: Método de Nivel I

Se verifica el tramo de obra según el método de Nivel I de coeficientes de seguridad global. Se indican a continuación las ecuaciones de verificación empleadas en cada uno de los modos de fallo evaluados.

4.4.1. Modo de fallo: Salida de piezas del manto principal

La ecuación de verificación del modo de fallo “Salida de piezas del manto principal” es la siguiente:

$$S = W - \gamma_w R \psi H^3 = 0$$

Los parámetros de diseño son:

- Altura de ola máxima de diseño: $H_{max} = 6,1$ m
- Periodo pico de diseño: $T_p = 19$ s
- Cota del fondo respecto al Cero del puerto = -13 m
- Nivel del mar de cálculo respecto al CP: $1.5 + 3.85 = 5.35$ m
- Profundidad a pie de dique = $5.35 - (-13) = 18.35$ m
- Pendiente del talud: $cot \alpha = 2$
- Longitud de onda en aguas profundas: $L_o = 563.6$ m
- Número de Iribarren: $Ir = 4.81$
- Parámetros para el cálculo de R_u , para cubos de hormigón: $A_u = 1.2$, $B_u = -0.65$
- Ascenso máximo: $R_u = 7.0$ m
- Parámetros para el cálculo de la función de estabilidad, para cubos de hormigón y $cot \alpha = 2$: $A = 0.3968$, $B = -0.6247$, $Ir_0 = 1.33$
- Inicio de avería $\psi_{max} = 0.0554$
- Peso específico del hormigón: $\gamma_r = 2.4$ t/m³
- Peso de las piezas: $W = 13$ t

Tabla 8. Características del manto principal, secundario y núcleo del dique en talud.

	W (t)	Lado (m)	Espesor (m)
Manto principal	13	1,8	3,6
Manto secundario	1.1	0.8	1.6
núcleo	0.073	-	-



4.4.2. Modo de fallo: Deslizamiento del espaldón

La ecuación de verificación es la siguiente

$$S = \Sigma(\mu F_v) - \Sigma F_h$$

La geometría que se propone para el espaldón se presenta en la Figura 2. Los valores de las fuerzas horizontales y verticales de diseño se obtienen con la metodología propuesta por Martín et. al. (1995) y se desglosan a continuación.

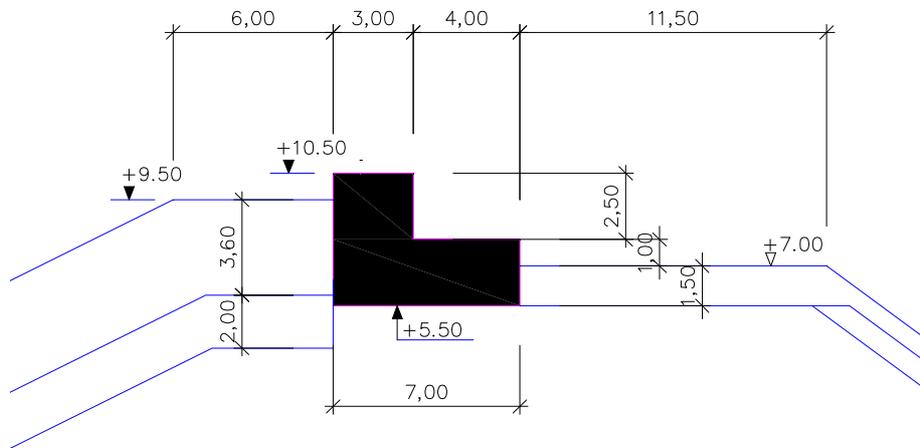


Figura 2. Dimensiones propuestas para el espaldón.

- Altura de ola máxima de diseño: $H_{max} = 6.1$ m
- Periodo pico de diseño: $T_p = 19$ s
- Cota del fondo respecto al Cero del puerto = -13 m
- Nivel del mar de cálculo respecto al CP: $1.5 + 4.0 = 5.5$ m
- Profundidad a pie de dique = $5.5 - (-13) = 18.5$ m
- Pendiente del talud: $\cot \alpha = 2$
- Longitud de onda en aguas profundas: $L_o = 563.6$ m
- Número de Iribarren: $I_r = 4.81$
- Parámetros para el cálculo del ascenso, para cubos de hormigón: $\cot \alpha = 2$. $A_u = 1.2$, $B_u = -0.65$
- Ascenso máximo: $Ru = 7.0$ m
- Ancho de la berma $B = 6$ m
- Altura del espaldón protegida por el manto 4 m



- Altura del espaldón de la zona expuesta 1 m
- Altura de la lámina de agua que rebasa $S_o = 2.48$ m
- Peso específico del hormigón $\gamma = 2.4$ t/m³
- Coeficiente de fricción hormigón-enrase $\mu = 0.65$
- Peso del espaldón $W_{esp} = 63$ ton
- Parámetro adimensional $\alpha = 3.05$

Se determinan la presión dinámica y reflectiva siguiendo la metodología de Martín et al. (1995) y se calculan los coeficientes de seguridad por deslizamiento para cada caso. Los coeficientes de seguridad deben ser iguales o mayores a 1.2.

Presión reflectiva

- Presión reflectiva $P_r = 31.3$ kN/m² (distribución trapezoidal debido a la ocurrencia de rebase)
- Fuerza reflectiva $F_r = 96.1$ kN/m
- Subpresión reflectiva (triangular) $S_{pr} = 31.3$ kN/m²
- Fuerza asociada a la subpresión reflectiva $FS_{pr} = 109.5$ kN/m
- Coeficiente de seguridad por deslizamiento presión reflectiva $CS_{deslizamiento} = 3.24$

Presión dinámica

- Presión dinámica (zona expuesta) $P_d = 76,2$ kN/m²
- Fuerza dinámica (zona expuesta) $F_d = 76,2$ kN/m
- Factor de reducción de la presión dinámica (zona protegida) $\lambda = 0.62$
- Presión dinámica (zona protegida por el manto) $P_{d\lambda} = 47,2$ kN/m²
- Fuerza dinámica (zona protegida por el manto) $F_{d\lambda} = 188,7$ kN/m
- Subpresión dinámica (triangular) $S_{pd} = 47,2$ kN/m²
- Fuerza asociada la subpresión dinámica $FS_{pd} = 165,14$ kN/m
- El coeficiente de seguridad ante el deslizamiento $CS_{deslizamiento} = 1.04$



4.4.3. Modo de fallo: Vuelco del espaldón

Para determinar la estabilidad del espaldón a un posible vuelco se utilizan las fuerzas de diseño determinadas en el apartado anterior.

Presión reflectiva

- Momento estabilizante $M_s = 1902.2 \text{ kNm/m}$
- Momento de vuelco $M_v = 190.0 \text{ kNm/m}$
- Coeficiente de seguridad $CS_{\text{vuelco}} = 10$

Presión dinámica

- Momento estabilizante $M_s = 1642.6 \text{ kNm/m}$
- Momento de vuelco $M_v = 720.5 \text{ kNm/m}$
- Coeficiente de seguridad $CS_{\text{vuelco}} = 2.28$

4.4.4. Modo de Fallo: Extracción de Piezas de la Berma de Pie

El dimensionamiento de la berma de pie se realiza a partir de la fórmula recomendada por el Coastal Engineering Manual (2002), en la que se calcula el peso mínimo de las piezas de la berma para asegurar una estabilidad aceptable de la misma (es decir, susceptible de que ocurra algún movimiento de piezas). El peso de las piezas se calcula a partir de la siguiente fórmula

$$W_b = \frac{\gamma_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3}$$

Donde N_s es el número de estabilidad adimensional, que se estima en función del cociente de profundidades h_b / h_0 , con h_b = distancia del nivel medio del mar de cálculo a la coronación de la berma de pie, y h_0 = profundidad a pie de dique. Las condiciones pésimas se dan en bajamar.

- Suponemos una berma compuesta por dos capas de piezas de 10 ton, lo que supone un espesor de 3.2 m.
- Esto implica que $h_0 = 13 + 1.5 + 0.15 = 14.65 \text{ m}$ y $h_b = h_0 - 3.2 = 11.45 \text{ m}$, y por lo tanto, $h_b / h_0 = 0.78$
- Para estas condiciones $N_s^3 = 60$
- El mínimo peso de las piezas es $W_b = 3.9 \text{ ton}$



- El coeficiente de seguridad con respecto a la extracción de piezas de la berma de pie es: $Cs_{Berma} = 10/3.9 = 2.59$.
- La longitud de la berma será de tres veces el lado equivalente, por lo que $L = 3 \cdot 1.6 = 5$ m.

4.4.5. Modo de Parada: Rebase

Se ha calculado la cota de coronación mínima del espaldón del dique de abrigo tal que el rebase del mismo tenga una probabilidad de ocurrencia menor del 5% (por tanto la operatividad del dique sea del 95%).

Para ello, se ha calculado el ascenso (o run-up, R_u) para el estado de proyecto de cálculo (véase apartado 4.3.4) mediante la formulación de Losada y Giménez-Curto (1981) para trenes de onda regulares con incidencia normal, según la que:

$$R_u / H = A_u (1 - \exp(B_u \cdot Ir)),$$

donde H es la altura de ola de cálculo, A_u y B_u son unos coeficientes de ajuste que dependen del material del talud, e Ir es el número de Iribarren: $Ir = \tan \alpha / \sqrt{H / L_0}$, donde $\tan \alpha$ es la pendiente del talud y $L_0 = gT^2 / 2\pi$ es la longitud de onda en profundidades indefinidas.

En este caso se ha empleado la altura de ola máxima del estado de mar $H_{\max} = 1.26$ m y el periodo de pico asociado $T = 11$ s; una pendiente del talud de 1:2; y los valores de los coeficientes correspondientes a manto de cubos de hormigón: $A_u = 1.05$ y $B_u = -0.67$; y se ha obtenido un ascenso (run-up) máximo en el estado de mar de cálculo de 1.30 m.

La ecuación de verificación del modo de parada es

$$Z_{\text{coronación}} \geq Z_0 + \eta_A + \eta_M + R_u,$$

por lo tanto, teniendo en cuenta que para el estado de cálculo el nivel de marea astronómica es +3.65 m y que la marea meteorológica es de 0.37 m, la coronación del espaldón del dique deberá situarse a una cota mayor o igual que +5.35 m, o +6.35 m si dejamos un resguardo de 1 m, para garantizar que la operatividad asociada al rebase del dique sea del 95%.

$$Z_{\text{coronación}} \geq +5.35 \text{ m}$$



4.5. Sección propuesta

El dique de abrigo frontal presenta una tipología de dique en talud. La sección tipo que se propone y sus características se muestran en la siguiente figura.

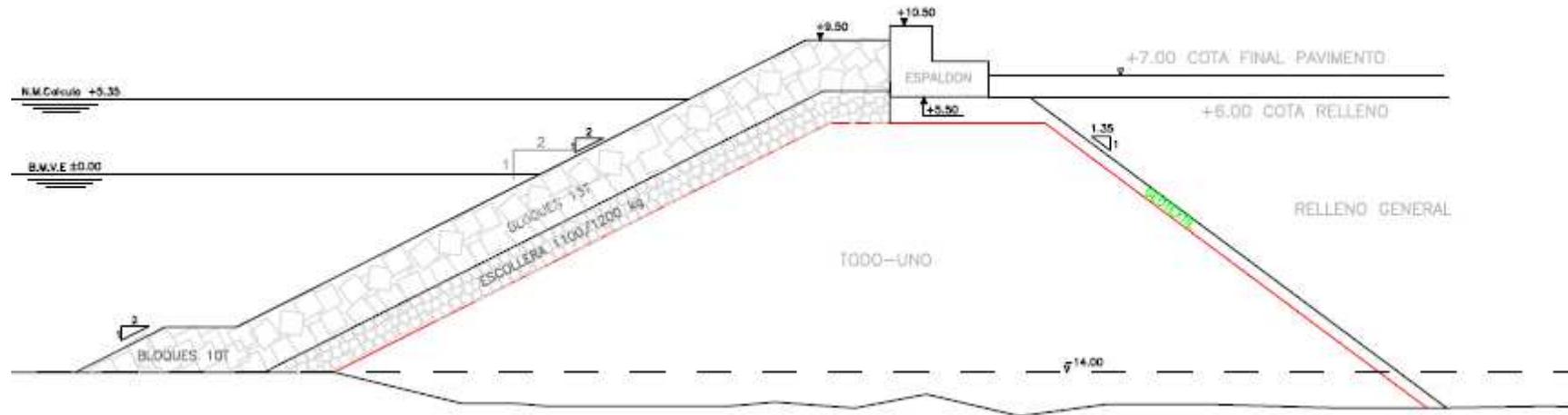


Figura 3. Sección tipo propuesta para el dique de abrigo frontal



5. PREDISEÑO DEL DIQUE DE ABRIGO SEGÚN LA TIPOLOGÍA “DIQUE EN S”

Una alternativa al empleo de un dique en talud tradicional sería la construcción de un dique “en S”, que tiene como ventajas principales el empleo de piezas de menor tamaño que en el caso del dique en talud tradicional, y la minimización de la reflexión del oleaje hasta valores cercanos al 10%.

Un dique en S se caracteriza por poseer un perfil con tres taludes (perfil en S) de diferente pendiente y colocación, en los cuales se desarrollan procesos diferentes de interacción entre el oleaje y el dique. El talud central, en el que se desarrollará el proceso de rotura, tiene una inclinación bastante tendida (con un talud de inclinación del orden de $\cot \alpha = 5.5$), y las piezas deben colocarse de una manera organizada. Por otro lado, el núcleo del dique puede estar compuesto por un árido de pequeño tamaño, ya que la impermeabilidad del núcleo no afecta a la reflexión del dique.

Los parámetros de diseño para el cálculo del dique en S son los mismos que para el dique en talud tradicional:

- Altura de ola máxima de diseño a pie de dique: $H_{max} = 6.1$ m
- Periodo pico de diseño: $T_p = 19$ s
- Cota del fondo respecto al Cero del puerto = -13 m
- Nivel del mar de cálculo respecto al CP: $1.5 + 3.85 = 5.35$ m
- Profundidad a pie de dique = $5.35 - (-13) = 18.35$ m
- Longitud de onda en aguas profundas: $L_o = 563.6$ m
- Peso específico del hormigón: $\gamma_r = 2.4$ t/m³



Con esos condicionantes se prediseña un dique de perfil en S, esquematizado en la Figura 4, con las siguientes características principales:

- Pendiente del talud central: $\cot \alpha = 5.5$
- Peso específico del hormigón: $\gamma_r = 2.4 \text{ t/m}^3$
- Peso de las piezas: $W = 1-2 \text{ t}$

El diseño detallado de esta tipología se realizará en la siguiente fase, tanto en planta como en perfil, ya que se podría diseñar de tal forma que se crearan distintos efectos ópticos con el flujo de agua bajo condiciones de temporal, convirtiendo de esta manera este elemento en un icono para la ciudad de Cádiz.



La sección tipo del dique en S propuesta se muestra en la Figura 4

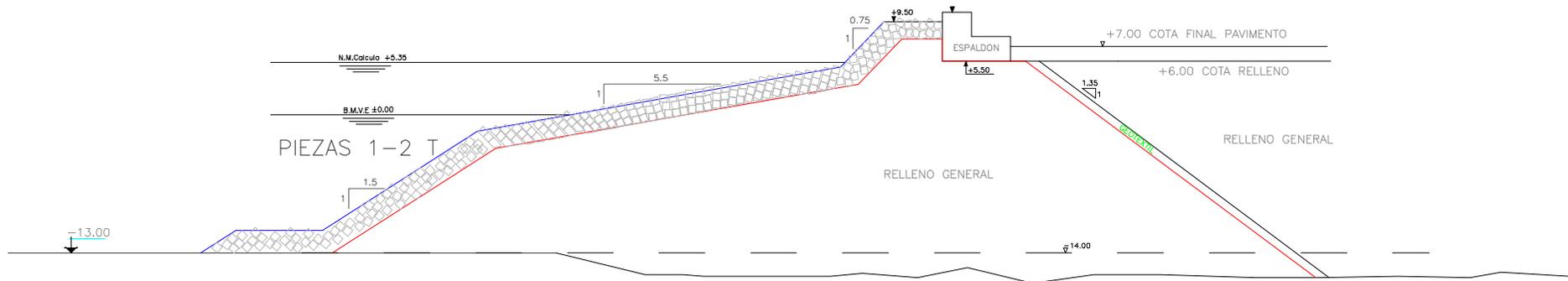


Figura 4. Sección tipo de dique en S propuesta para el dique de abrigo frontal

ENSAYOS 3D EN MODELO FÍSICO DEL DIQUE DE ABRIGO CON TIPOLOGÍA EN S



2
Junio
2009

Estabilidad del Dique en S

Asistencia técnica del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada a la Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz para el diseño del dique de abrigo en la nueva terminal de contenedores del Puerto de Cádiz para el Proyecto “Nueva terminal de contenedores del Puerto de Cádiz”.

Clave: TOM-06-04

ÍNDICE

ANTECEDENTES	3
RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. GENERALIDADES DEL MODELO	4
2.1. Escala de trabajo	4
2.2. Dimensiones y características geométricas	5
2.3. Construcción del modelo.....	8
2.4. Playa Disipativa y Disipadores Laterales Ranurados	11
2.5. Monitorización de los ensayos	12
2.6. Metodología experimental.....	13
2.6. Ensayos de calibración a pleamar.....	14
2.6.1. Dispositivo experimental	15
2.6.1. Análisis de datos y resultados obtenidos.....	16
ANEJO A. PLANOS EN PROTOTIPO DEL NUEVO MODELO	21

Informe de estabilidad del Dique en S

Antecedentes

En el marco del Convenio de colaboración entre la Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz y la Universidad de Granada para la realización del proyecto Estudio de alternativas para la ampliación de la dársena portuaria de Cádiz, se presenta esta nota técnica referente a la estabilidad y estudio de alternativas en 3D del dique de abrigo de tipología en S para el Puerto de Cádiz.

Este informe ha sido realizado por la Ing. Eva Smolka Cabezas, con la colaboración en la realización de ensayos de las Ing. Montserrat Vilchez Solís e Inmaculada Ruiz Parrado, siendo supervisado por la Dra. María Clavero Gilabert, Coordinadora de Ensayos del Laboratorio de Hidráulica y dirigido por el Dr. D. Miguel Á. Losada Rodríguez, Catedrático de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Granada y Director del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales.

Resumen

En este Informe se presenta el último modelo desarrollado dentro de los trabajos realizados para la experimentación en 3D del Estudio de Alternativas para la ampliación de la dársena portuaria de Cádiz, mediante un dique de abrigo de tipología en S para el Puerto de Cádiz.

Este modelo es fruto de los previamente desarrollados con el mismo fin en el Tanque de Oleaje Multidireccional del Laboratorio de Hidráulica del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada y se ajusta a las modificaciones requeridas para optimizar el aprovechamiento de la línea de atraque.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo general de este informe es verificar la estabilidad para el diseño de la tipología de Dique en S seleccionada para la ampliación de la dársena portuaria de Cádiz.

Con esta tipología se conseguirá:

- Reducir los costes:
 - Construyendo un núcleo con material no seleccionado.
 - Permitiendo que los materiales del manto tengan un menor peso.
- Reducir el coeficiente de reflexión del oleaje al incidir sobre el dique.

A continuación se exponen las características del nuevo dique en S resultado de los ensayos previos realizados y posteriormente se expone la metodología experimental que se va a seguir para la verificación de su comportamiento frente al oleaje incidente. Hasta la fecha se han realizado los ensayos de calibración y rebase. En este informe se presenten los resultados de los ensayos de calibración.

2. GENERALIDADES DEL MODELO

Como ya se ha indicado, los ensayos se realizan en el Tanque de Oleaje Multidimensional del Laboratorio de Hidráulica del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada.

2.1. Escala de trabajo

Al igual que en los modelos anteriores, la escala de trabajo empleada es de 1:55, conservando el Número de Froude, tal que favorece que los valores del Número de Reynolds sean siempre lo suficientemente elevados como para asegurar que en todo momento el ensayo va a transcurrir bajo régimen turbulento.

2.2. Dimensiones y características geométricas

Las dimensiones del nuevo modelo se ajustan a las modificaciones que se introdujeron en cuanto a la longitud del dique, de manera que se pasa de los 415 metros a los 372.98 metros actuales, y a su planta, que ha variado como consecuencia de la optimización de la línea de atraque. En este sentido, de entre las alternativas propuestas, la Autoridad Portuaria ha considerado que la mejor conexión entre el dique y el muelle de atraque es la correspondiente a la mostrada en la figura 1, ya que en ella el cono de vertido no afecta al muelle de atraque y la superficie ganada es la mayor de entre todas las alternativas.

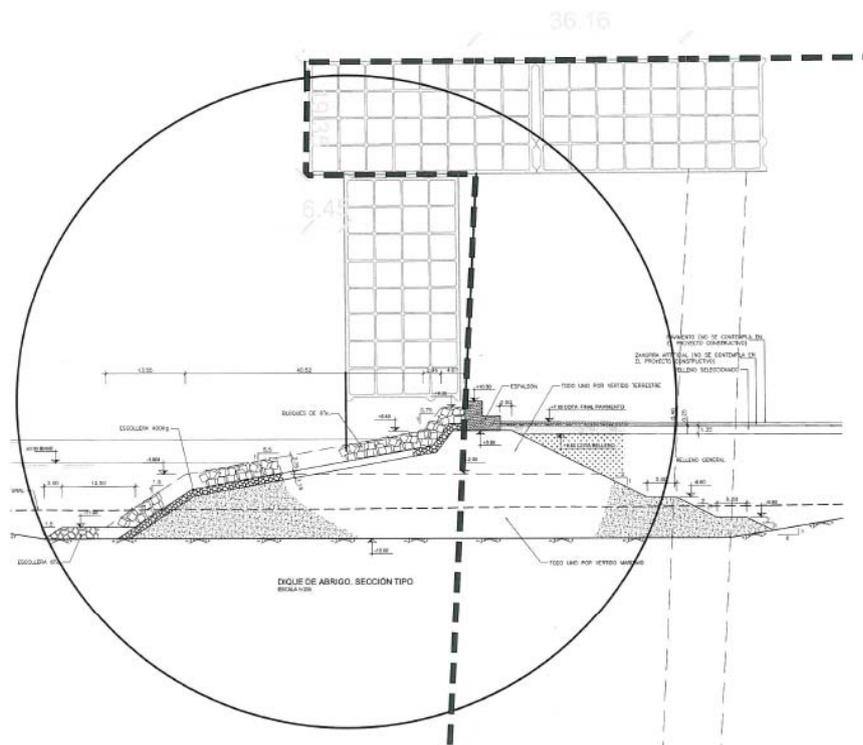


FIGURA 1. ALTERNATIVA ÓPTIMA PARA CONEXIÓN MUELLE-DIQUE

En este nuevo modelo se mantienen las mismas condiciones de contorno y se emplean los mismos materiales que en el modelo ensayado anteriormente, la diferencia reside en: 1) la cota de cimentación del espaldón, que en este caso es constante, lo que hace que las secciones se tengan que adaptar, introduciendo en algunas de ellas una berma horizontal en la parte superior del talud intermedio, 2) las vaguadas, que en lugar de ser tres simétricas (de 15 m cada tramo) se construyen dos vaguadas asimétricas (de tramos de 20 m y 10 m) para conseguir una mayor concentración de la energía en el seno de la vaguada, y 3) se suaviza el quiebro entre el espaldón y el cajón horizontal dándole cierta inclinación a éste último. Estas modificaciones se pueden observar en el esquema en planta del dique representado en la figura 2.

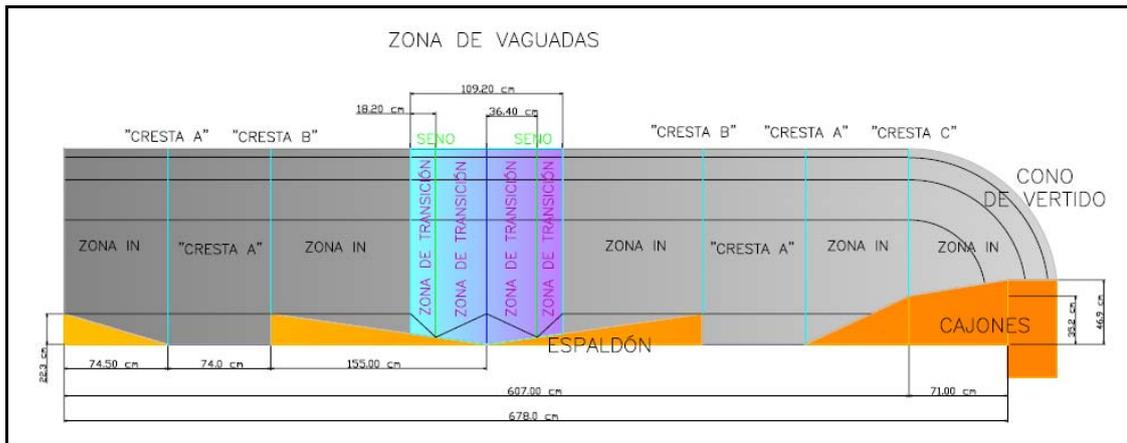


FIGURA 2. PLANTA DEL DIQUE. DIMENSIONES Y DISTRIBUCIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES

Las secciones tipo de este modelo se muestran en la figura 3, mientras que su localización en el modelo se muestra en la figura anterior. La zona denominada como "Zona IN" es una zona intermedia cuya sección transversal se encuentra entre la sección tipo "cresta A" y la sección tipo "cresta B". Esta sección intermedia se diferencia de las anteriores únicamente en el avance del espaldón respecto a la alineación inicial, que es la correspondiente a la de la sección tipo "cresta A". La "Zona de Transición" tiene una sección transversal cuya geometría depende de su ubicación en la zona de vaguadas y es intermedia entre la sección tipo "cresta A" y tipo "seno". La pendiente del talud intermedio es constante en todo el dique e igual a 1:4.1 excepto en la zona de vaguadas que varía hasta alcanzar una pendiente 1:5.5 en la sección tipo "seno". En el caso del talud inferior la pendiente permanece igual a 1:1.5.

En el Anejo A del informe se adjuntan los planos de la planta y principales secciones transversales en prototipo.

Otras dimensiones importantes a considerar en sección de prototipo y modelo son:

- Profundidad: $h_p=19.25 \text{ m} \rightarrow h_M=35 \text{ cm}$
- Francobordo: variable
- Nivel Medio de Cálculo: $NM_p=+5.35 \text{ m} \rightarrow NM_M = +9.7 \text{ cm}$

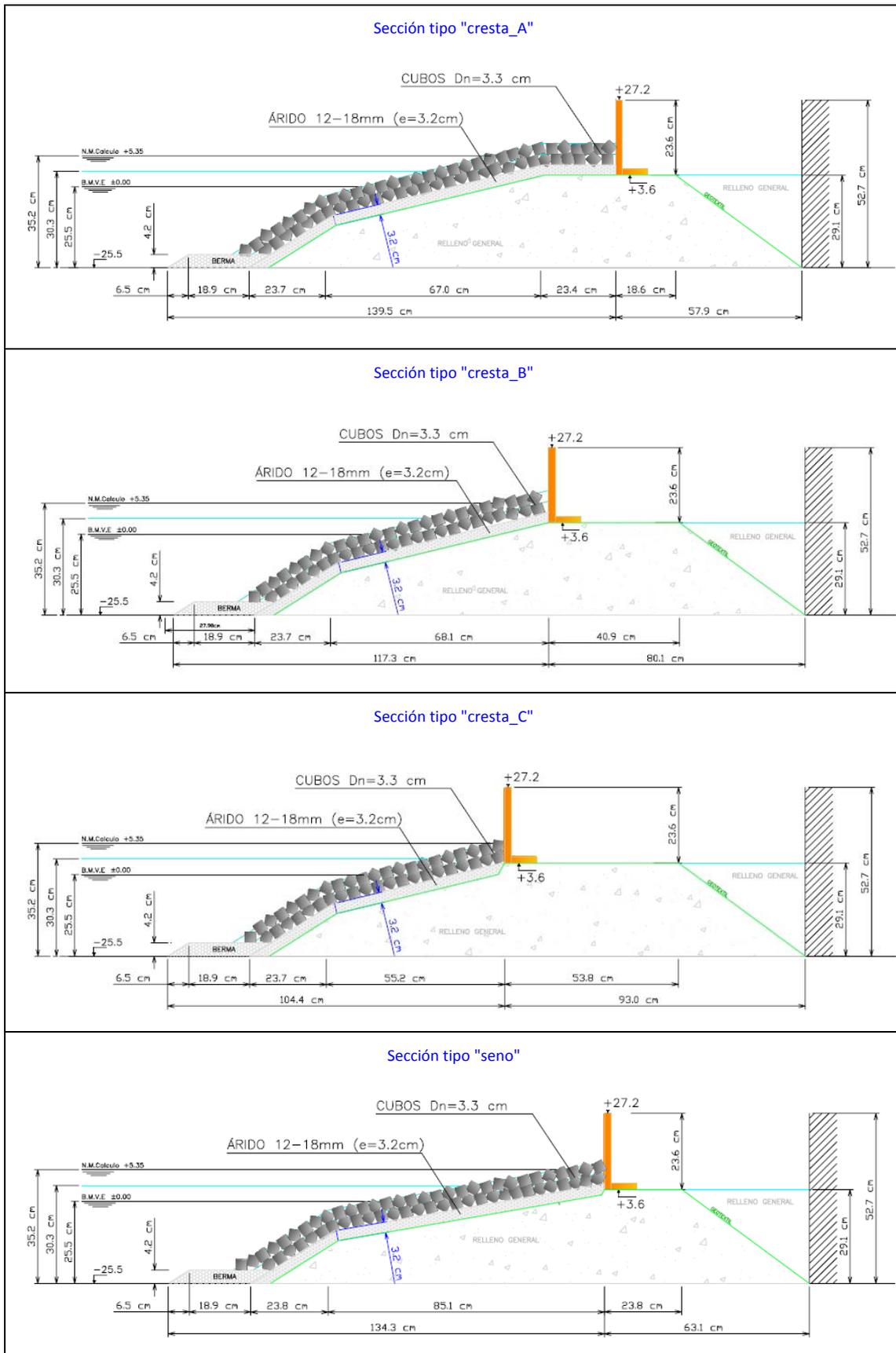


FIGURA 3. SECCIONES TRANSVERSALES TIPO DEL DIQUE.

2.3. Construcción del modelo

La construcción del nuevo modelo del Dique en S se inicia con un nuevo corte de las costillas de madera, que permitirá colocar el espaldón con una cota de cimentación constante además de facilitar la posterior obtención del perfil nuevo que tiene el núcleo. El nuevo corte se ha realizado según la línea de puntos en cian (Figura 4).

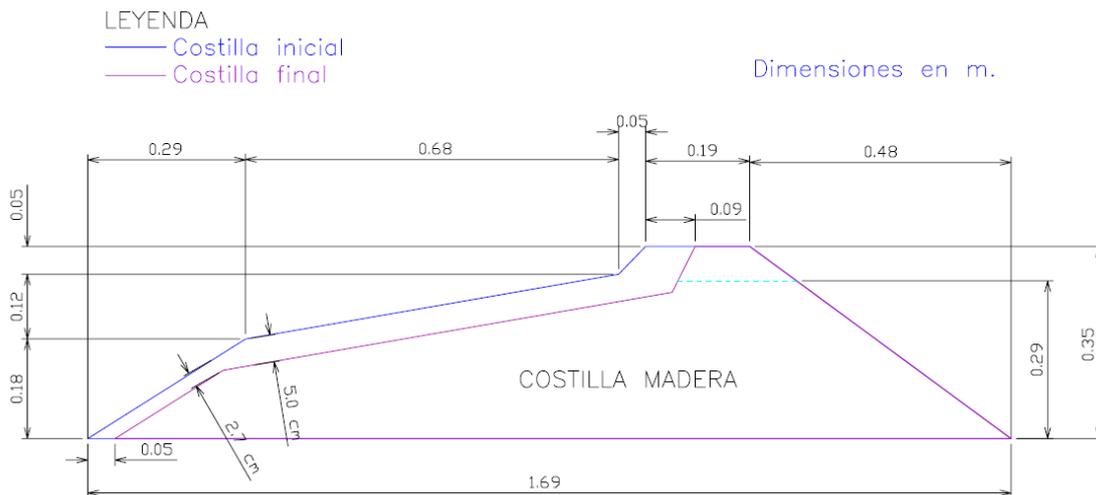


FIGURA 4. EVOLUCIÓN DE LA SECCIÓN DE LAS COSTILLAS

El núcleo, al igual que en los modelos anteriores, está formado por un material de granulometría no seleccionada, cubierto por un geotextil que permite una transición adecuada entre el mismo y el filtro.

Para poder obtener un perfil más exacto de la forma en S buscada, se ha introducido árido de tamaño 8-12 mm entre los huecos de dicho material, de igual forma que la observada en la fotografía.



FIGURA 5. CONSTRUCCIÓN DEL NÚCLEO. ARRIBA IZQUIERDA: MATERIAL NO SELECCIONADO DE MAYOR TAMAÑO. BAJO DERECHA: MATERIAL DE MENOR TAMAÑO.

A continuación, se cubre el núcleo con el geotextil, que realiza las funciones de filtro entre capas y antes de seguir con la colocación de las capas que restan, se procede a colocar el espaldón.



FIGURA 6. DETALLE DEL GEOTEXTIL.

Seguidamente se coloca el filtro o manto secundario, dándole la forma adecuada en la zona central para reproducir las vaguadas representadas en el plano.

Finalmente se colocan las dos capas de cubos de mármol de 3.3 cm de lado, que se corresponden en prototipo con cubos de 14 tn.

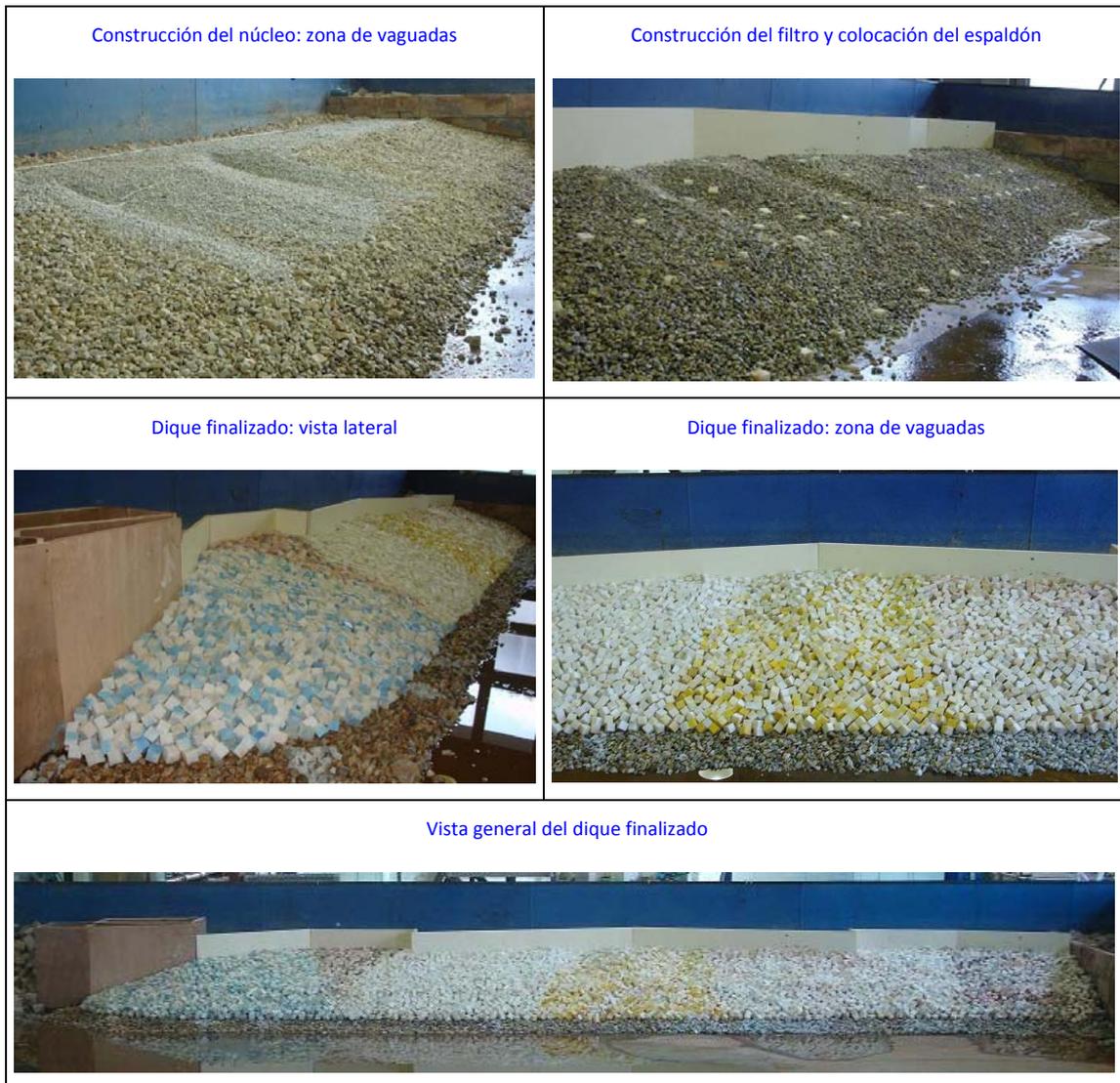


FIGURA 7. IMÁGENES DEL DIQUE EN CONSTRUCCIÓN Y UNA VEZ FINALIZADO

En la siguiente tabla se presentan las características de los materiales utilizados en cada una de las capas. El material correspondiente al manto secundario o filtro se puede colocar de menor tamaño. Asimismo, el núcleo se puede hacer con un todo uno de cantera con un peso comprendido entre 35-140 kg.

Los cubos empleados en los ensayos son de mármol y su peso específico es de 2.65 tn/m³. El peso de los mismos en prototipo, calculado con este peso específico, es de 15.8 tn. En la tabla 1 el peso que se muestra es el obtenido de utilizar el peso específico del hormigón.

	D _{n50} MODELO	D _{n50} PROTOTIPO	PESO PROTOTIPO	ESPESOR EN MODELO
Manto principal	33 mm	1.815 m	14 tn	6.6 cm (2D _n)
Manto secundario	12-18 mm	0.825 m	1.46 tn	Según sección
Berma de pie	25 mm	1.375 m	6.76 tn	4.2 cm

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

2.4. Playa Disipativa y Disipadores Laterales Ranurados

Como se observa en la Figura 8, se colocaron en el contorno del tanque paredes porosas absorbentes formadas por tableros ranurados de okume marino, situados verticalmente y anclados al fondo del tanque. Para mejorar la disipación del oleaje se rellenaron con poliexpán con el fin de favorecer la disipación del oleaje.



FIGURA 8. VISTA DE PARED POROSA ABSORBENTE

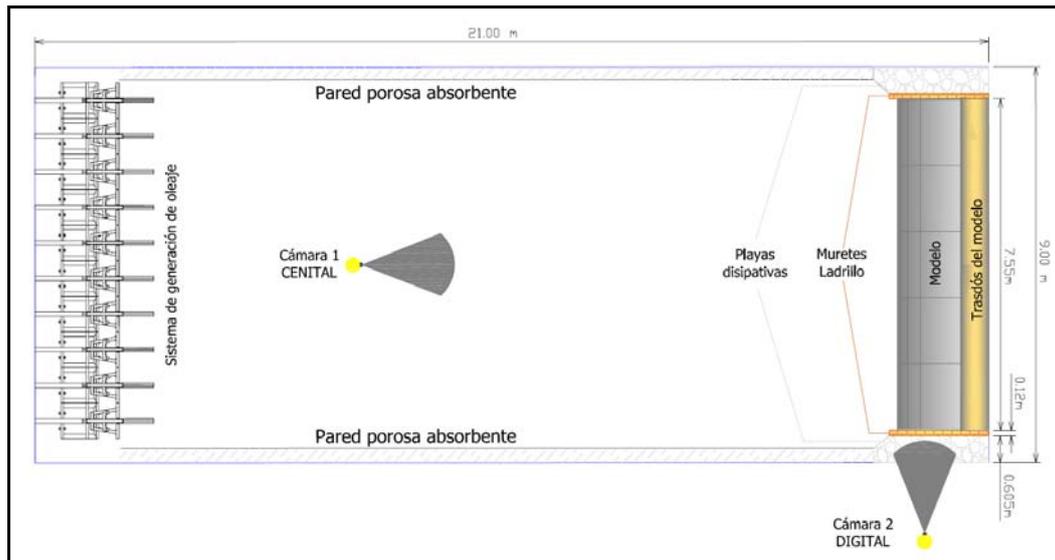


FIGURA 9. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL: UBICACIÓN DEL MODELO, SISTEMA DE GENERACIÓN Y SISTEMA DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA.

2.5. Monitorización de los ensayos

Para la realización de los ensayos se ha dispuesto en el Tanque de Oleaje de los siguientes dispositivos de monitorización y de adquisición de datos:

- 9 sensores de nivel
- Cámara fotográfica y de video digital
- Cámara de video tipo PTZ, marca AXIS, modelo 214.

Las oscilaciones que se producen en el canal se han medido mediante sensores de nivel, suministrados por HR Wallingford. Dichos sensores miden el ascenso y descenso del nivel del mar respecto a su cero. Los valores de ascenso y descenso de la superficie libre son enviados a una tarjeta de adquisición de datos y posteriormente almacenados en el PC. A partir de dichos datos se obtienen los parámetros del oleaje generado en cada punto (altura de ola y periodo), y a su vez recogen los datos de la sobre elevación en cada punto. El oleaje y sobre elevación se ha medido en cada punto de control, establecido en cada ensayo.

El control visual de los fenómenos que se producen se ha realizado con el empleo de una cámara de video tipo PTZ y de una cámara fotográfica y de video digital. La cámara tipo PTZ proporciona una visión cenital del modelo y la cámara digital una visión lateral del modelo lo que permite determinar, entre otras cosas, el tipo de rotura que se produce sobre el modelo.

Además de estos dispositivos se han empleado sensores de presión para determinar la altura que alcanza la lámina de agua en su ascenso por el espaldón, y un hidrófono, que registra la onda de presión generada por la rotura de las olas incidentes.

2.6. Metodología experimental

El proceso que se está siguiendo para la verificación del nuevo dique en S es el que a continuación se describe:

1º) Se debe determinar la cota de coronación del espaldón. Para ello se construye el espaldón del modelo con una cota de coronación que se presume irrebalsable. Los ensayos se deben realizar con el nivel de agua correspondiente a la pleamar, por ser el caso más desfavorable. En el caso de estos ensayos se ha establecido un nuevo nivel de la pleamar: 33.6 cm, correspondiente a una profundidad en prototipo de 18.5 m y una carrera de marea de 4.50 m. El motivo de esta modificación es el de encontrar una solución de compromiso entre (seguridad-explotación)-(coste económico), puesto que el nivel de marea de 5.35 m es la suma de las condiciones más pésimas que se pueden dar en el emplazamiento de la obra según los requisitos del proyecto. Cabe destacar que el rebase en este modelo tiene un carácter heterogéneo, no es igual en todas las secciones del dique, es por ello que a partir de los resultados obtenidos no sólo se establecerá la cota de coronación óptima del espaldón sino que también se establecerán los tramos en los que dicha cota puede ser rebajada. De esta forma el espaldón se puede diseñar con varias cotas de coronación convirtiéndose en un elemento que forma parte del conjunto estético del dique, de manera semejante a como se hizo en el modelo anterior.

Al establecer este nuevo nivel se debe realizar la calibración del modelo otra vez y así poder establecer la relación existente entre (amplitud o stroke de las palas)-(Altura de ola generada). El dispositivo experimental utilizado y los resultados obtenidos de estos ensayos se exponen en el siguiente apartado.

2º) Verificación de la estabilidad de los cubos de $D_n=3.3$ cm, del comportamiento del flujo sobre el dique y de la reflexión. Como la geometría de las secciones transversales y de las vaguadas ha sufrido alguna modificación es necesario observar nuevamente el comportamiento de la rotura del oleaje y de los chorros que se producen con el fin de comprobar que dichas modificaciones generan la respuesta adecuada del dique.

La metodología a seguir en los ensayos de estabilidad es la siguiente: en primer lugar se realiza una fotografía del manto principal antes de cada ensayo. Fijado un periodo de ola, se van lanzando al dique tandas de 500 olas, hasta que se produce el fallo del dique. Tras cada tanda se hace una fotografía para poder determinar posteriormente el nivel de

avería que se produce tras el ensayo. Cada una de las tandas se lanza con una altura de ola, los ensayos se empiezan con una altura para la cual no se va a producir avería y se va incrementando de una tanda a otra hasta que se produce el fallo correspondiente al inicio de destrucción. Una vez finalizados los ensayos para un periodo determinado se reconstruye el manto principal. Siguiendo este proceso se ensayan varios periodos para los tres niveles de agua a pie de dique.

A partir de los resultados se puede establecer el comportamiento del dique frente a la estabilidad del manto principal.

3º) Realización de ensayos de estabilidad con cubos de $D_n=3$ cm en modelo. Los cubos de este diámetro tienen un peso en prototipo de 10.55 tn (peso específico 2.35 tn/m³), el cual se encuentra entre los de 6 tn ($D_n=2.5$ cm en modelo) y 14 tn ($D_n=3.3$ cm en modelo) utilizados. Estos ensayos se realizan con el objetivo de optimizar la relación (estabilidad del manto principal)-(coste económico), ya que los cubos de $D_n=3.3$ cm en modelo han resultado estables para condiciones de oleaje que en la zona del emplazamiento de la obra tienen un periodo de retorno superior al fijado en los requisitos de proyecto. La metodología a seguir en estos ensayos es la misma que la descrita anteriormente.

2.6. Ensayos de calibración a pleamar

Para poder generar los oleajes deseados, antes de proceder a la realización metódica de los ensayos se debe calibrar el modelo con el fin de obtener los parámetros de generación pertinentes. Para ello, se lanzan tandas de oleaje de periodo e incidencia fija, en este caso normal al modelo, variando la amplitud o stroke de las palas que componen el sistema de generación, y se analizan posteriormente los datos adquiridos por los sensores en cada uno de los puntos de control para conocer qué altura de ola en prototipo se genera con cada tanda.

A partir de los datos se obtienen unas tablas en las que se recogen los valores de amplitud de movimiento de las palas para cada ensayo de calibración junto con los valores de la altura media cuadrática obtenida del análisis de dichos datos.

De este modo se crean unos ábacos de trabajo, a partir de los cuales puede obtenerse la relación entre la altura de ola en modelo y/o en prototipo y la amplitud del movimiento de las palas. Entrando en los ábacos con las alturas de ola que se desea ensayar, para un periodo dado, se tienen las amplitudes de recorrido de las palas generadoras de oleaje para cada ensayo.

Tras la calibración del modelo ya se está en disposición de realizar los ensayos correspondientes al estudio del rebase.

2.6.1. Dispositivo experimental

Los ensayos de calibración del modelo se han realizado con una profundidad en modelo de 33.6 cm (18.50 m en prototipo), correspondiente al nuevo nivel de la pleamar fijado (PMVE). En un principio se establecieron como periodos de ensayo en prototipo 6, 8, 12, 14 y 18 s y unas amplitudes correspondientes al 20%, 40%, 60% y 80% del stroke máximo de la pala, 300 mm. Para alguno de los periodos de ensayo ciertas amplitudes generaban una altura de ola excesiva, lo que daba lugar a la rotura por fondo del oleaje generado, por lo que al final se optó por hacer los ensayos que se presentan en la tabla 2. En cada ensayo se han lanzado un total de 100 olas, por lo que la duración del ensayo es función del periodo del mismo.

Se emplearon un total de nueve sensores de nivel para registrar la variación en el tiempo de la superficie libre. Su localización en el tanque de oleaje se muestra en la figura 10.

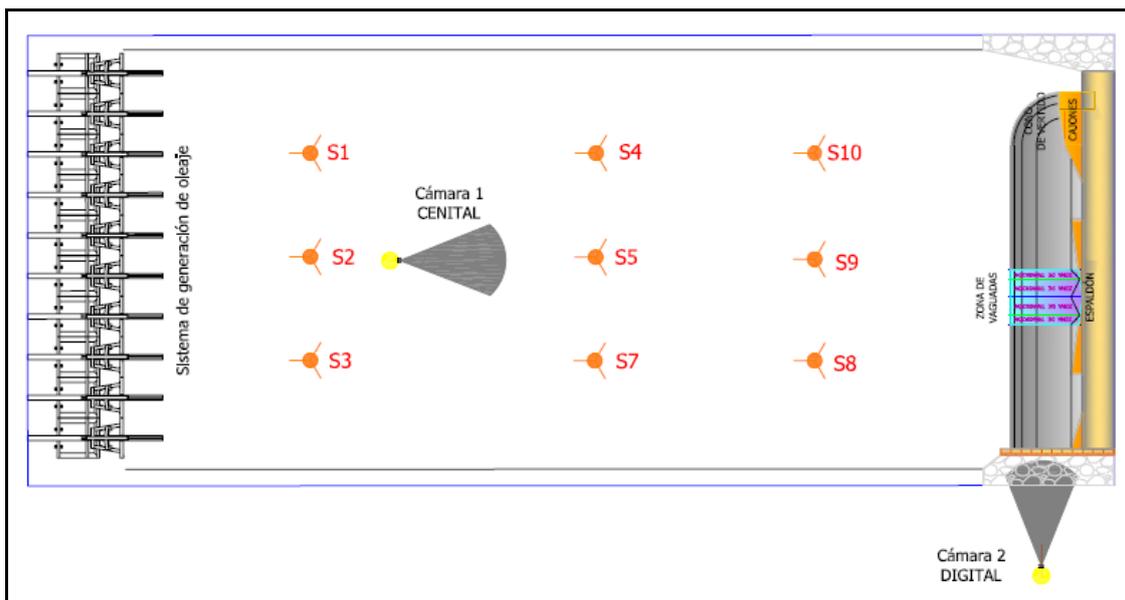


FIGURA 10. UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE NIVEL EN LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN

Nombre ensayo	T _{prot} (s)	T _{mod} (s)	A(mm)	f(Hz)	Duración ensayo (s)
T6A10	6	0.809	10	1.236	90
T6A25	6	0.809	25	1.236	90
T6A30	6	0.809	30	1.236	90
T6A35	6	0.809	35	1.236	90
T8A30	8	1.079	30	0.927	120
T8A40	8	1.079	40	0.927	120
T8A50	8	1.079	50	0.927	120
T8A60	8	1.079	60	0.927	120
T12A30	12	1.618	30	0.618	180
T12A60	12	1.618	60	0.618	180
T12A75	12	1.618	75	0.618	180
T12A90	12	1.618	90	0.618	180
T14A60	14	1.888	60	0.530	210
T14A90	14	1.888	90	0.530	210
T14A100	14	1.888	100	0.530	210
T14A120	14	1.888	120	0.530	210
T16A60	16	2.157	60	0.464	240
T16A90	16	2.157	90	0.464	240
T16A120	16	2.157	120	0.464	240
T16A150	16	2.157	150	0.464	240
T18A60	18	2.427	60	0.412	270
T18A90	18	2.427	90	0.412	270
T18A120	18	2.427	120	0.412	270
T18A150	18	2.427	150	0.412	270

TABLA 2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN REALIZADOS

2.6.1. Análisis de datos y resultados obtenidos

Los datos registrados por cada uno de los sensores han sido analizados temporal y espectralmente para cada uno de los ensayos realizados. De cada sensor se ha tomado la parte inicial del ensayo, para que no esté afectada por la reflexión de las olas en el modelo. Para obtener adecuadamente las alturas de ola y periodos que definen el oleaje se ha procedido a un filtrado de los datos. Los resultados que interesan del análisis realizado se observan en la tabla 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** A partir de estos datos se representa la altura de ola media cuadrática en función de la amplitud de la pala (figura 11) según los periodos ensayados. Como se puede observar la relación existente, para un periodo dado, es lineal, por lo que se ha realizado el ajuste pertinente que permita, en un paso posterior, obtener las amplitudes de la pala a introducir para obtener una altura de ola dada.

Nombre ensayo	A (mm)	H _{rms} (cm)	T ₀₂ (s)	k	L (m)	h/L
T6A10	10	3.1	0.81	6.31	0.996	0.337
T6A25	25	7.4	0.81	6.31	0.996	0.337
T6A30	30	8.8	0.81	6.31	0.996	0.337
T6A35	35	10.3	0.81	6.31	0.996	0.337
T8A30	30	6.1	1.08	3.97	1.584	0.212
T8A40	40	8.6	1.08	3.96	1.585	0.212
T8A50	50	11.2	1.08	3.97	1.584	0.212
T8A60	60	13.1	1.08	3.97	1.584	0.212
T12A30	30	3.7	1.62	2.34	2.687	0.125
T12A60	60	8.0	1.62	2.34	2.687	0.125
T12A75	75	10.3	1.62	2.34	2.688	0.125
T12A90	90	12.7	1.62	2.34	2.689	0.125
T14A60	60	5.9	1.89	1.96	3.212	0.105
T14A90	90	9.8	1.89	1.96	3.214	0.105
T14A100	100	11.3	1.89	1.96	3.213	0.105
T14A120	120	13.4	1.89	1.96	3.211	0.105
T16A60	60	5.7	2.16	1.69	3.724	0.090
T16A90	90	8.9	2.16	1.69	3.726	0.090
T16A120	120	11.8	2.16	1.69	3.725	0.090
T16A150	150	13.8	2.16	1.69	3.726	0.090
T18A60	60	4.6	2.43	1.48	4.239	0.079
T18A90	90	7.1	2.43	1.48	4.239	0.079
T18A120	120	9.8	2.43	1.48	4.241	0.079
T18A150	150	12.6	2.43	1.48	4.241	0.079

TABLA 3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DATOS

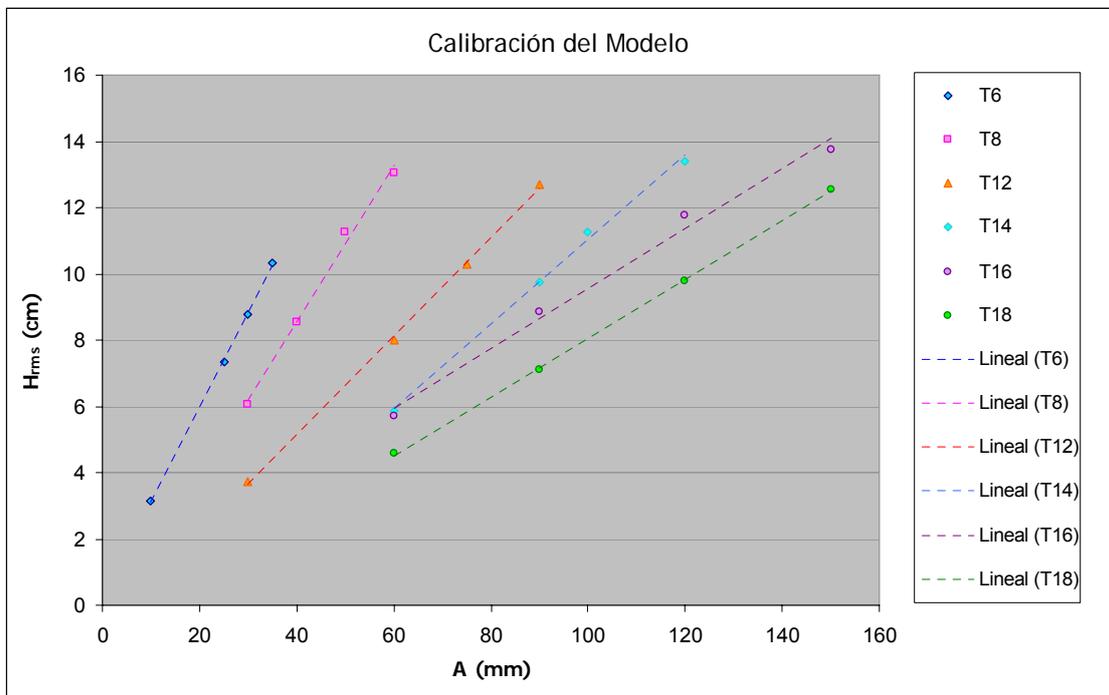


FIGURA 11. GRÁFICA DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para comprobar que los resultados obtenidos en la calibración del modelo son coherentes con la formulación teórica, se ha representado en un mismo gráfico la altura de ola media cuadrática adimensionalizada con el stroke o amplitud de la pala en función de la profundidad relativa, para los datos obtenidos de manera experimental y los obtenidos de manera teórica (figura 12). En el cálculo teórico de H_{rms}/A se ha utilizado la ecuación de pala-pistón (Dean & Dalrymple, 1991) suponiendo que las diez palas que forman el sistema de generación son una única pala:

$$\frac{H}{A} = \frac{2(\cosh 2kh - 1)}{\sinh 2kh + 2kh}$$

Además, se ha obtenido el ajuste de los datos experimentales, la mejor curva que se ajusta a los mismos es un polinomio de segundo orden, cuya ecuación es:

$$\frac{H_{rms}}{A} = -0.3282 \cdot (kh)^2 + 2.204 \cdot kh - 0.2057$$

Como se puede observar los datos experimentales tienen una tendencia similar a los teóricos, sin embargo no se ajustan a la curva obtenida teóricamente. Aún así se considera que el comportamiento de las palas es el adecuado ya que la curva teórica no tiene en cuenta, entre otras cosas, el efecto en la altura de ola generada debido a la holgura existente entre éstas.

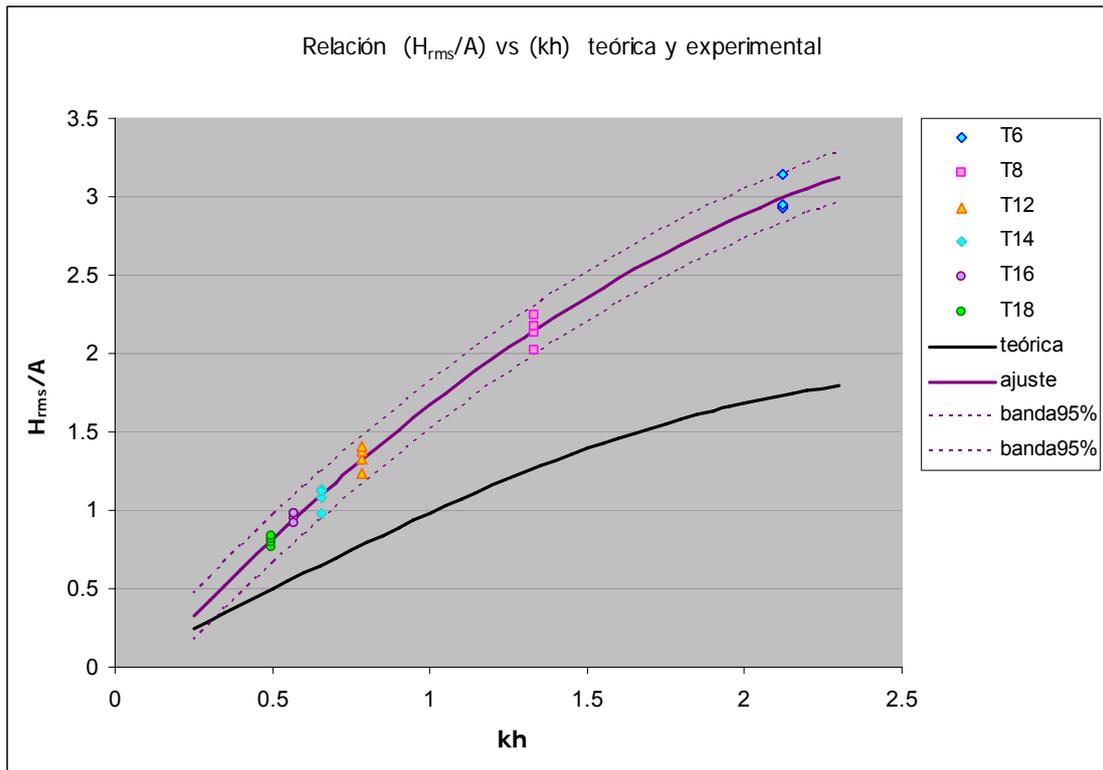


FIGURA 12. REPRESENTACIÓN DE HRMS/A EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD RELATIVA KH PARA LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LOS TEÓRICOS, LÍNEA DE AJUSTE E INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95%

En los ensayos de calibración realizados, además de obtener la relación (altura de ola)-(stroke de la pala) se han podido observar los patrones de flujo que se producen sobre el dique. Debido a las modificaciones introducidas se producen ligeras diferencias en ascenso y descenso del agua en el talud intermedio, por la existencia de la berma horizontal superior en alguna de las secciones del dique, pero no en los chorros que se forman al chocar ola incidente y reflejada y se observa mayor concentración de energía en la zona de las vaguadas incrementando el chorro producido por la asimetría introducida en la configuración de las vaguadas. En la siguiente figura se muestra un detalle de la zona de vaguadas y se marca la dirección del flujo en esta zona.

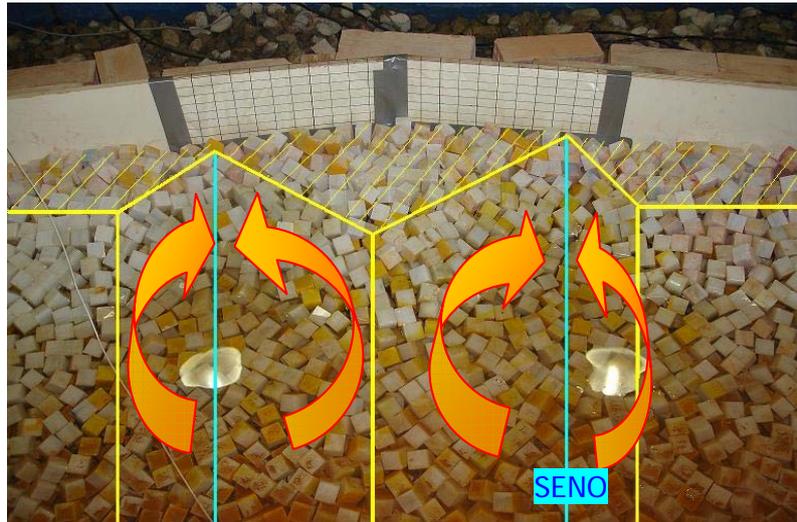


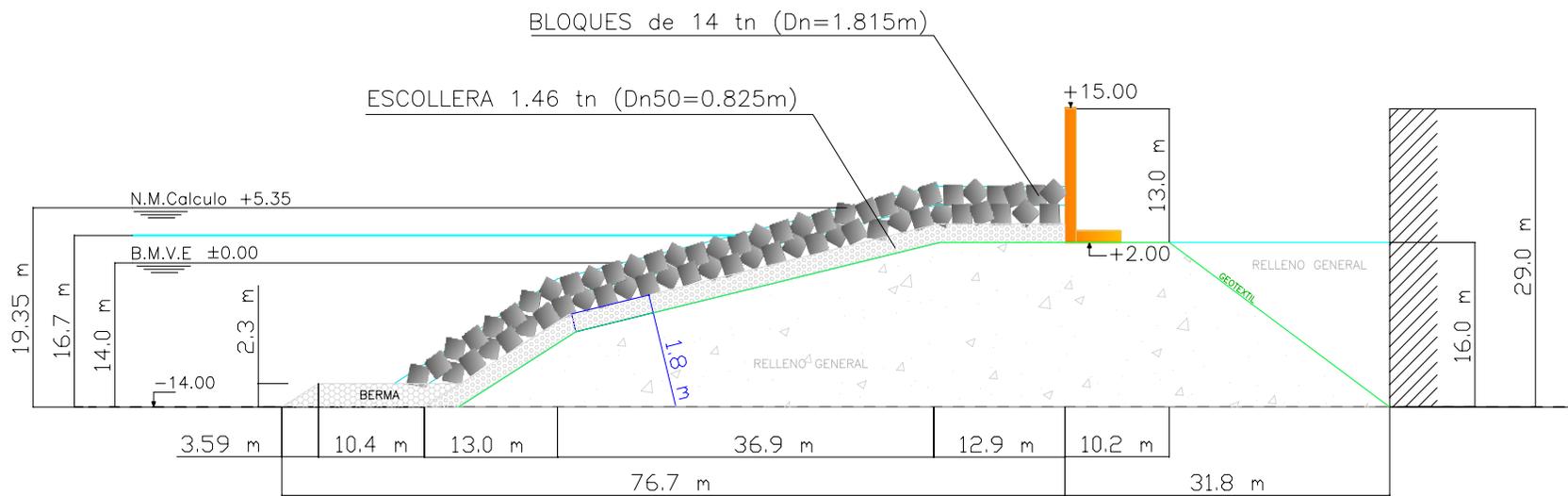
FIGURA 13. DETALLE DE LA ZONA DE VAGUADAS DEL MODELO C2: DIRECCIÓN DEL FLUJO

En todos los ensayos realizados, para los rangos de alturas de ola y periodo ensayadas, no se ha producido el movimiento de ninguna de las piezas que forman parte del manto principal y de la berma, en ninguna de las secciones del dique.

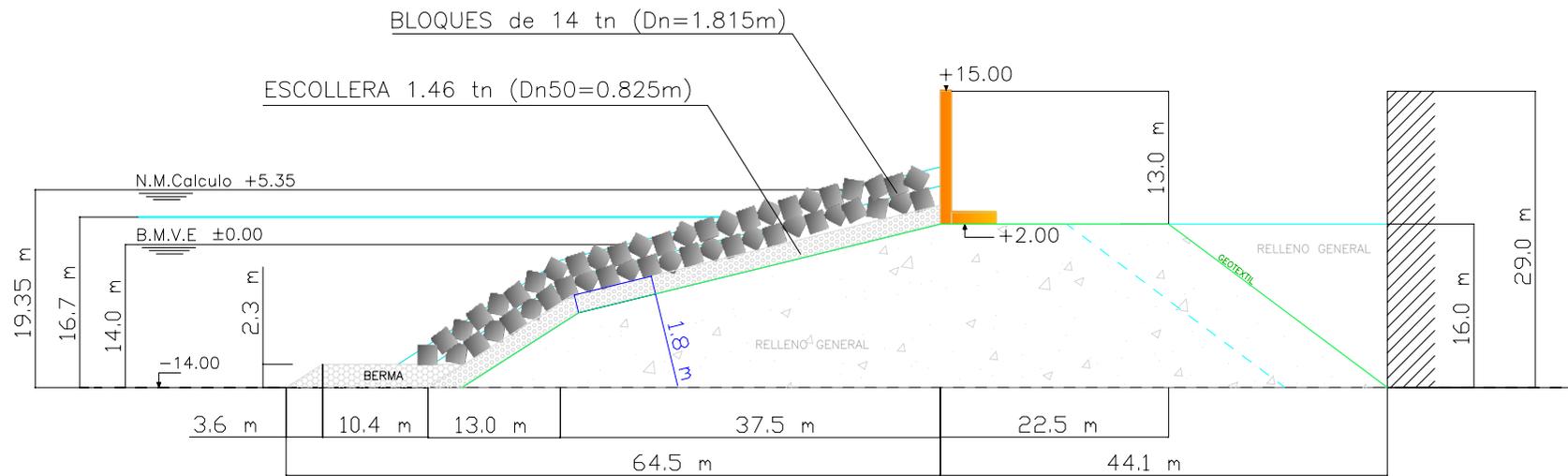
Queda pendiente para el siguiente informe los resultados obtenidos en los ensayos de rebase.

ANEJO A. PLANOS EN PROTOTIPO DEL NUEVO MODELO

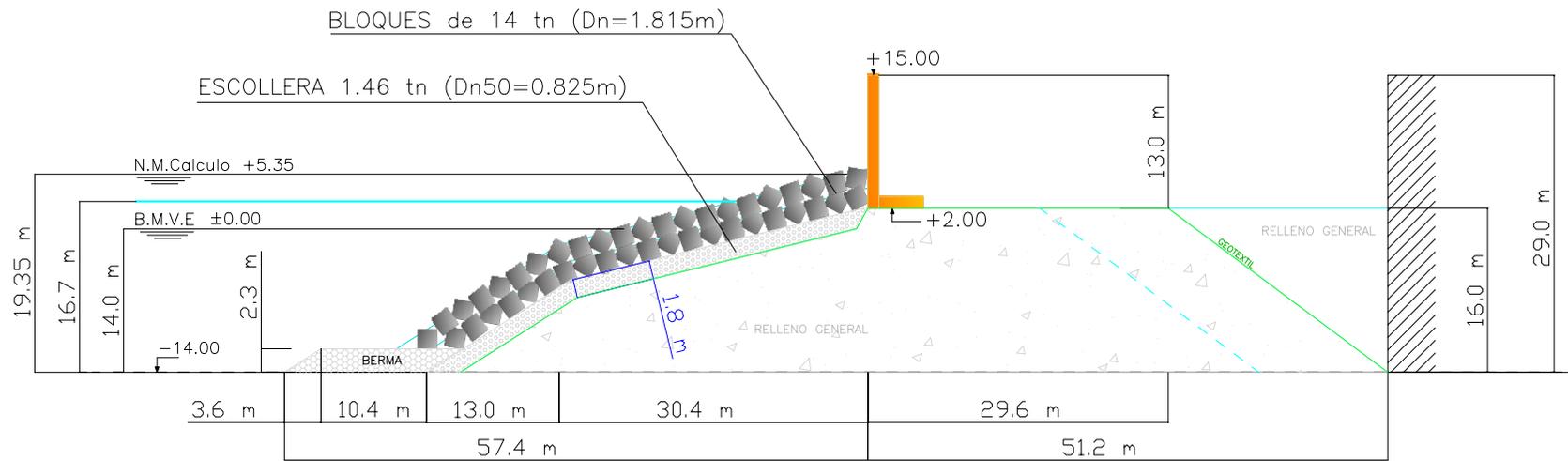
SECCIÓN TIPO CRESTA_A



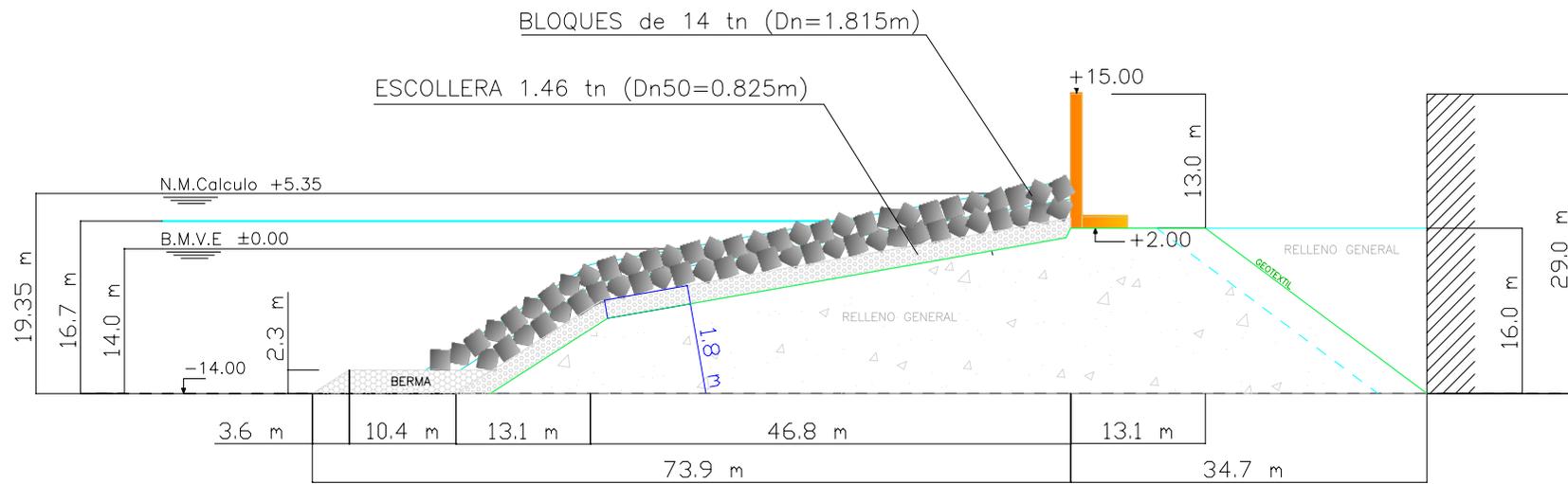
SECCIÓN TIPO "CRESTA_B"



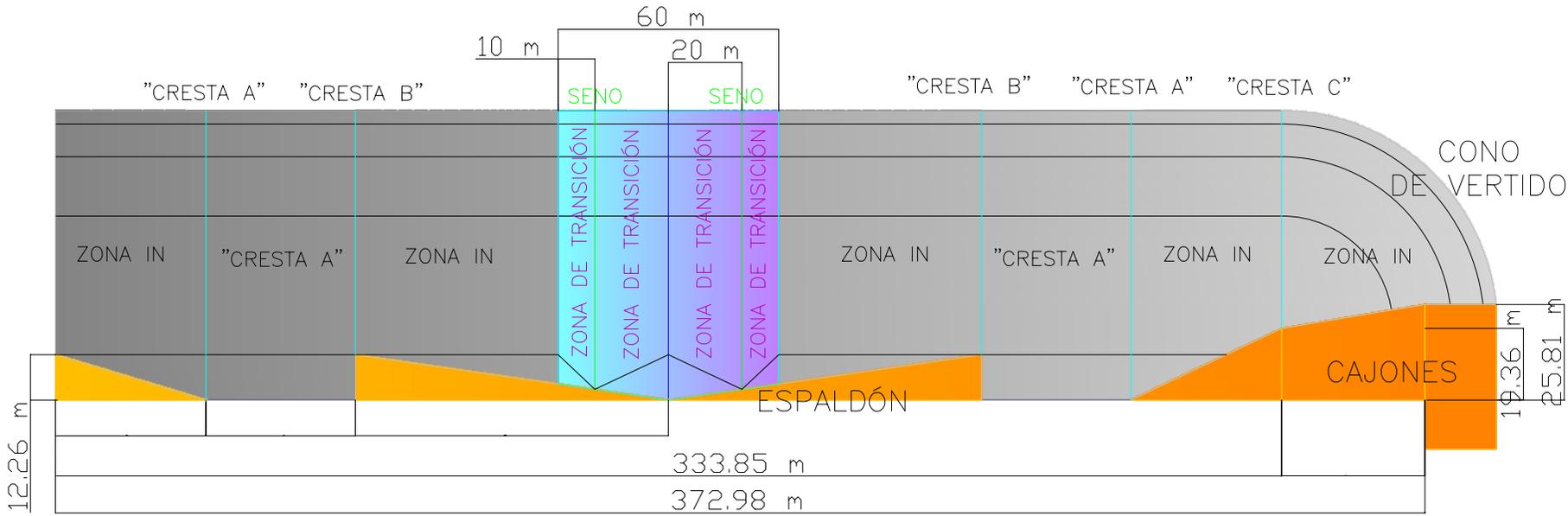
SECCIÓN TIPO "CRESTA_C"



SECCIÓN TIPO "SENO"

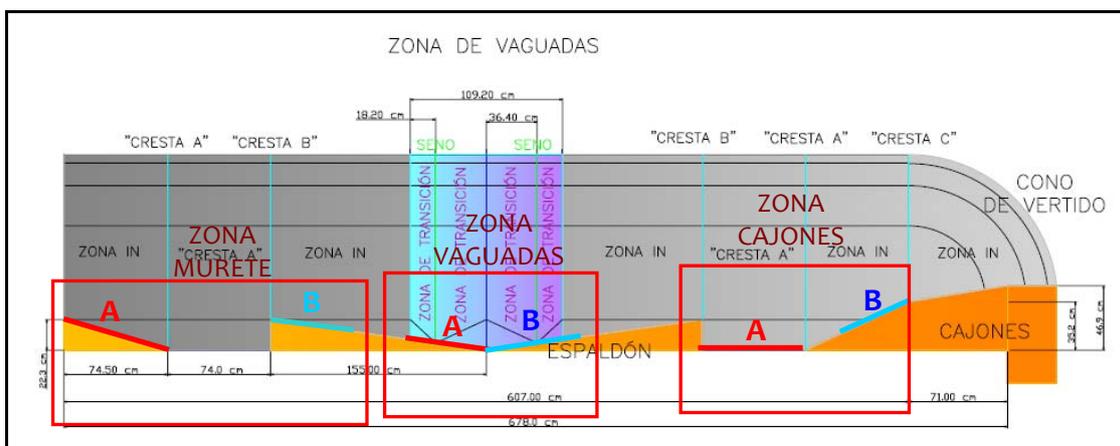


ZONA DE VAGUADAS



NOTAS SOBRE LOS ENSAYOS DE REBASE Y ANÁLISIS DE DATOS

En las tablas de los ensayos se han recogido: 1) la altura de ola media cuadrática, en modelo y prototipo, 2) el periodo de pico, en modelo y prototipo, 3) el número de onda y la longitud de onda (para profundidad 33.6 cm en modelo), 4) el número de Iribarren (calculado con la altura de ola media cuadrática y el talud de 1:4.1), 5) el ascenso de la lámina de agua obtenida del análisis visual de los ensayos, en modelo y prototipo. En la siguiente figura se muestran las zonas y las subzonas A y B, en las que se ha medido el rebase.



Los datos de oleaje se han obtenido del análisis espectral en la banda de frecuencias del ensayo, de esta forma se filtran los datos evitando los armónicos de orden superior o las ondas largas.

En la tabla se indican los ensayos en los que se ha producido rebase. Para un mismo ensayo, se produce un mayor rebase en la zona del murete de ladrillo que en el resto del dique.

En la zona de los cajones se produce una onda corredera que va desde el quiebro del cajón con el espaldón hasta la subzona A. Su intensidad crece conforme aumenta el periodo del ensayo.

ENSAYO	Hrms	Hrms	Tp	Tp	k	L	lr	Ascenso (cm)	Ascenso (m)	Ascenso (cm)	Ascenso (m)
	modelo (cm)	prototipo (m)	modelo	prototipo				A	A	B	B
T8H4	5,78	3,18	1,080	8,006	3,966	1,584	1,277	5,50	3,03	6,50	3,58
T8H6	7,10	3,91	1,080	8,006	3,966	1,584	1,152	6,50	3,58	10,30	5,67
T8H8	10,44	5,74	1,080	8,006	3,966	1,584	0,950	12,75	7,01	14,31	7,87
T12H4	6,57	3,61	1,629	12,083	2,323	2,705	1,565	5,75	3,16	8,86	4,87
T12H6	7,69	4,23	1,629	12,083	2,323	2,705	1,447	12,17	6,69	14,50	7,98
T12H8	11,37	6,25	1,629	12,083	2,323	2,705	1,190	Rebase	Rebase	Rebase	Rebase
T16H4	6,20	3,41	2,167	16,068	1,678	3,744	1,895	11,75	6,46	7,75	4,26
T16H6	8,03	4,42	2,155	15,983	1,688	3,722	1,661	Rebase	Rebase	12,50	6,88
T16H7	-	-	-	-	-	-	-	Rebase	Rebase	14,50	7,98
T16H8	11,11	6,11	2,167	16,068	1,678	3,744	1,416	Rebase	Rebase	Rebase	Rebase

ENSAYO	Hrms modelo (cm)	Hrms prototipo (m)	Tp modelo	Tp prototipo	k	L (modelo)	lr (modelo)	Ascenso (cm)	Ascenso (m)	Ascenso (cm)	Ascenso (m)
								A	A	B	B
T8H4	6,27	3,45	1,080	8,006	3,969	1,583	1,226	8,5	4,675	7,75	4,26
T8H6	7,64	4,20	1,080	8,006	3,969	1,583	1,110	11,00	6,05	10,50	5,78
T8H8	10,58	5,82	1,080	8,006	3,969	1,583	0,943	12,50	6,88	11,88	6,53
T12H4	7,16	3,94	1,611	11,948	2,353	2,670	1,489	12,25	6,7375	10,88	5,98
T12H6	8,25	4,54	1,611	11,948	2,353	2,670	1,387	15,42	8,48	11,00	6,05
T12H8	11,70	6,44	1,611	11,948	2,353	2,670	1,165	Rebase	Rebase	14,50	7,98
T16H4	6,23	3,43	2,167	16,068	1,678	3,745	1,891	6,625	3,64375	7,50	4,13
T16H6	7,97	4,38	2,155	15,983	1,688	3,722	1,667	10,75	5,91	12,92	7,10
T16H8	10,99	6,04	2,167	16,068	1,678	3,745	1,424	Rebase	Rebase	14,50	7,98

ENSAYO	Hrms modelo (cm)	Hrms prototipo (m)	Tp modelo	Tp prototipo	k	L (modelo)	lr (modelo)	Ascenso (cm) A	Ascenso (m) A	Ascenso (cm) B	Ascenso (m) B
T8H4	6,87	3,78	1,080	8,006	3,969	1,583	1,171	No alcanza el espaldón	No alcanza el espaldón	12,00	6,60
T8H6	7,98	4,39	1,080	8,006	3,969	1,583	1,087	7,90	4,35	11,17	6,14
T8H8	11,70	6,43	1,080	8,006	3,969	1,583	0,897	13,25	7,29	15,29	8,41
T12H4	8,17	4,50	1,611	11,948	2,353	2,670	1,394	No alcanza el espaldón	No alcanza el espaldón	6,67	3,67
T12H6	9,18	5,05	1,611	11,948	2,353	2,670	1,316	6,00	3,30	8,50	4,68
T12H8	12,77	7,02	1,611	11,948	2,353	2,670	1,115	Rebase	Rebase	15,69	8,63
T16H4	6,44	3,54	2,159	16,012	1,685	3,730	1,856	No alcanza el espaldón	No alcanza el espaldón	8,38	4,61
T16H6	8,69	4,78	2,159	16,012	1,685	3,730	1,598	15,17	8,34	12,88	7,08
T16H8	11,84	6,51	2,160	16,023	1,683	3,732	1,369	Rebase	Rebase	16,33	8,98

ANEXO VIII

DIMENSIONES DEL MUELLE. ESTUDIOS PREVIOS.

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
2.CALADO Y CORONACIÓN DE LOS MUELLES.....	6
2.1. Buques tipo.....	6
2.2. Calado mínimo de los muelles.....	6
2.3. Cota de coronación de los muelles	8
2.3.1. Análisis comparativo de la cota de coronación	9
3.DIMENSIONAMIENTO DE LOS CAJONES	11
3.1. Introducción.....	11
3.2. Carácter de la obra y criterios de proyecto	11
3.3. Ordenación de factores de proyecto.....	12
3.3.1. Condiciones de Trabajo Operativas Normales CT ₁	12
3.3.2. Condiciones de Trabajo Extremas CT ₂	14
3.3.3. Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas al Sismo CT _{3,3} Sismo.....	16
3.3.4. Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a tsunami CT _{3,3} tsunami	18
3.4. Tipos de Combinación	21
3.5. Parámetros de proyecto.....	24
3.5.1. Agua y aire	24
3.5.2. Materiales de construcción.....	24
3.6. Parámetros geométricos del cajón del muelle exterior.....	27
3.7. Parámetros geométricos del cajón del muelle interior	28
3.8. Agente gravitatorio.....	29
3.9. Agentes del medio físico	30
3.9.1. Viento	30
3.9.2. Corrientes.....	30
3.9.3. Acción del oleaje	30
3.9.4. Nivel del mar	31
3.10. Agente sísmico.....	32
3.11. Acciones debidas al tsunami.....	33
3.12. Agentes de uso y explotación	34
3.12.1. Estacionamiento y almacenamiento de mercancías	34
3.12.2. Manipulación de mercancías.....	36
3.12.3. Tráfico terrestre.....	38
3.12.4. Operaciones de los buques	38

3.13. Coeficientes de seguridad.....	39
3.14. Coeficientes de seguridad para BAJAMAR.....	42
3.14.1. H1: Condiciones de trabajo operativas normales: Muelle Exterior.....	42
3.14.2. H2: Condiciones operativas normales: Muelle Interior.....	42
3.14.3. H3: Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo: Muelle Exterior.....	43
3.14.4. H4: Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo: Muelle Interior.....	44
3.15. Coeficientes de seguridad con sismo.....	44
3.15.1. H5: Condiciones de Trabajo Extremas con Sismo: Muelle Exterior	44
3.15.2. H6: Condiciones de Trabajo Extremas con Sismo: Muelle Interior	45
3.15.3. H7: Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a Sismo: Muelle Exterior45	
3.15.4. H8: Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a Sismo: Muelle Interior45	
3.16. Coeficientes de seguridad con tsunamí.....	45
3.16.1. H9: Condiciones Trabajo Excepcionales debidas a Tsunami: Muelle Exterior45	
3.16.2. H10: Condiciones Trabajo Excepcionales debidas a Tsunami: Muelle Interior46	
3.17. Coeficientes de seguridad para PLEAMAR.....	46
3.17.1. H11: Condiciones de trabajo operativas normales: Muelle Exterior.....	46
3.17.2. H12: Condiciones operativas normales: Muelle Interior.....	46
3.17.3. H13: Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo: Muelle Exterior.....	47
3.17.4. H14: Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo: Muelle Interior.....	48



1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se aborda tanto la definición de los muelles como la justificación necesaria de la geometría y propiedades de los mismos.

La Terminal de Contenedores proyectada consta de dos líneas de atraque, denominadas muelle exterior y muelle interior (Fig. 1). El muelle exterior se compone de una alineación recta de 1065 m de longitud con dirección N23°W, mientras que el muelle interior tiene 715 m de longitud con dirección N22°W.

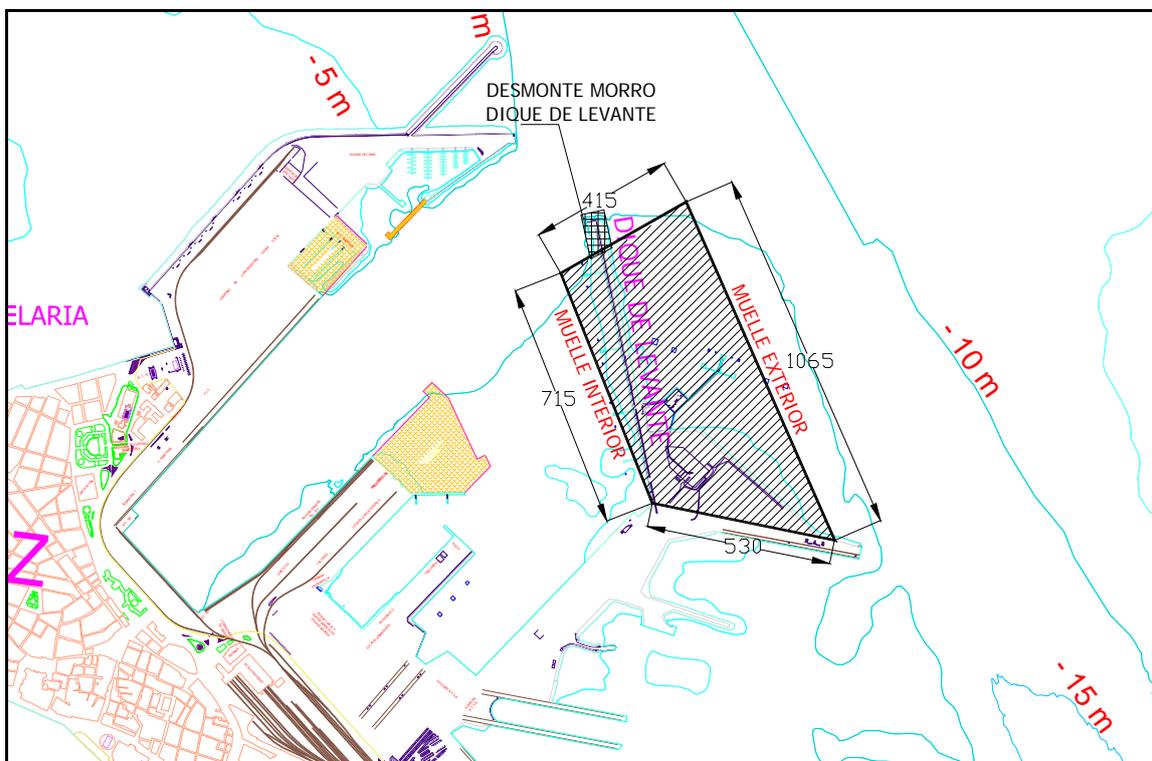


Fig. 1: Planta de la Terminal de Contenedores proyectada.



Las operaciones de carga y descarga de contenedores deben poder efectuarse a lo largo de toda la eslora del buque y es imprescindible disponer de una explanada adyacente a la línea de atraque. Por dichas razones la configuración física del atraque más conveniente para la Terminal de Contenedores es el muelle.

La elección de la tipología estructural más conveniente se debe hacer analizando las ventajas e inconvenientes de cada una de las tipologías frente a los requerimientos de uso y explotación y a los condicionantes geotécnicos, morfológicos, climáticos, ambientales, constructivos y de los materiales, de conservación y mantenimiento existentes en la zona de estudio.

Las principales características de la obra de atraque y amarre para el caso en estudio son:

- Se trata de un muelle continuo con explanada adosada ya que dará servicio a una Terminal de Contenedores.
- Cargas verticales importantes impuestas por las grúas portacontenedores y por los propios contenedores.
- Altura libre del orden de 20 m.
- De la información geotécnica disponible en la zona de estudio se puede sintetizar que en la ubicación del futuro muelle exterior se tiene actualmente:
 - Calados del orden de 10 – 12 m.
 - Un primer estrato de fango de 1 m de espesor.
 - Un segundo estrato de limo arcilloso de 2 – 3 m de espesor.
 - Un tercer estrato de limo-arenoso, arena-limosa del orden de 5 m de espesor.
 - Un cuarto estrato a partir aproximadamente la cota -20 m, de arena con arenisca aumentando la proporción de arenisca hasta el final de los sondeos, a aproximadamente la cota -25 m.

Teniendo en cuenta los requerimientos de uso y explotación de los muelles a proyectar y las características de las distintas tipologías de muelles, se opta por la consideración de las siguientes tipologías para los muelles de la nueva Terminal de Contenedores del Puerto de Cádiz:

- **Muelle de pilotes o de claraboya.** Sección tipo en Fig. 2. Presenta las siguientes ventajas e inconvenientes:



Ventajas:

- Mayor control de la reflexión del oleaje.
- Mejor comportamiento hidráulico en interferencias con corrientes y masa de agua desplazada en las maniobras de atraque.
- Puede ser usado en terrenos con escasa capacidad portante y a cualquier profundidad.
- Menor coste.
- Mayor flexibilidad y adaptabilidad de la estructura a cambios de uso y ampliaciones del muelle, por ejemplo por aumento de calados.

Inconvenientes:

- Mayor dificultad constructiva.
- Mayor flexibilidad de la estructura ante cargas horizontales.

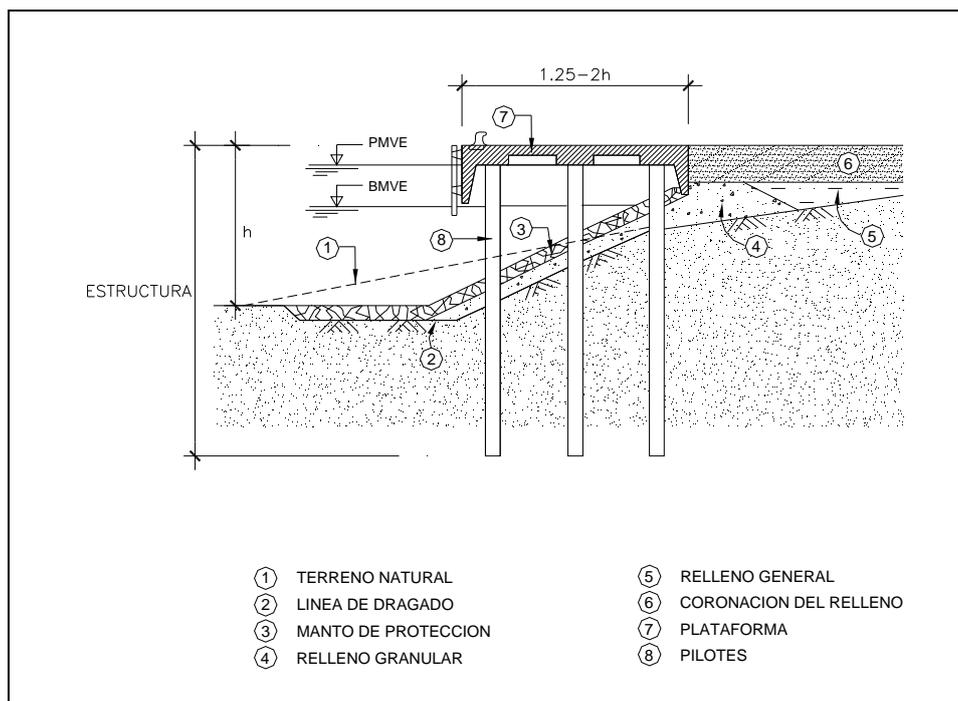


Fig. 2: Obra de atraque de pilotes. Sección tipo

➤ **Muelle de cajones.** Sección tipo en Fig. 3. Presenta las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Facilidad constructiva.
- Tipología adecuada para los calados considerados.



- Control de la reflexión en el caso de paredes ranuradas.

Inconvenientes:

- Coste elevado.
- Necesidad de alcanzar cotas de cimentación en terrenos competentes.

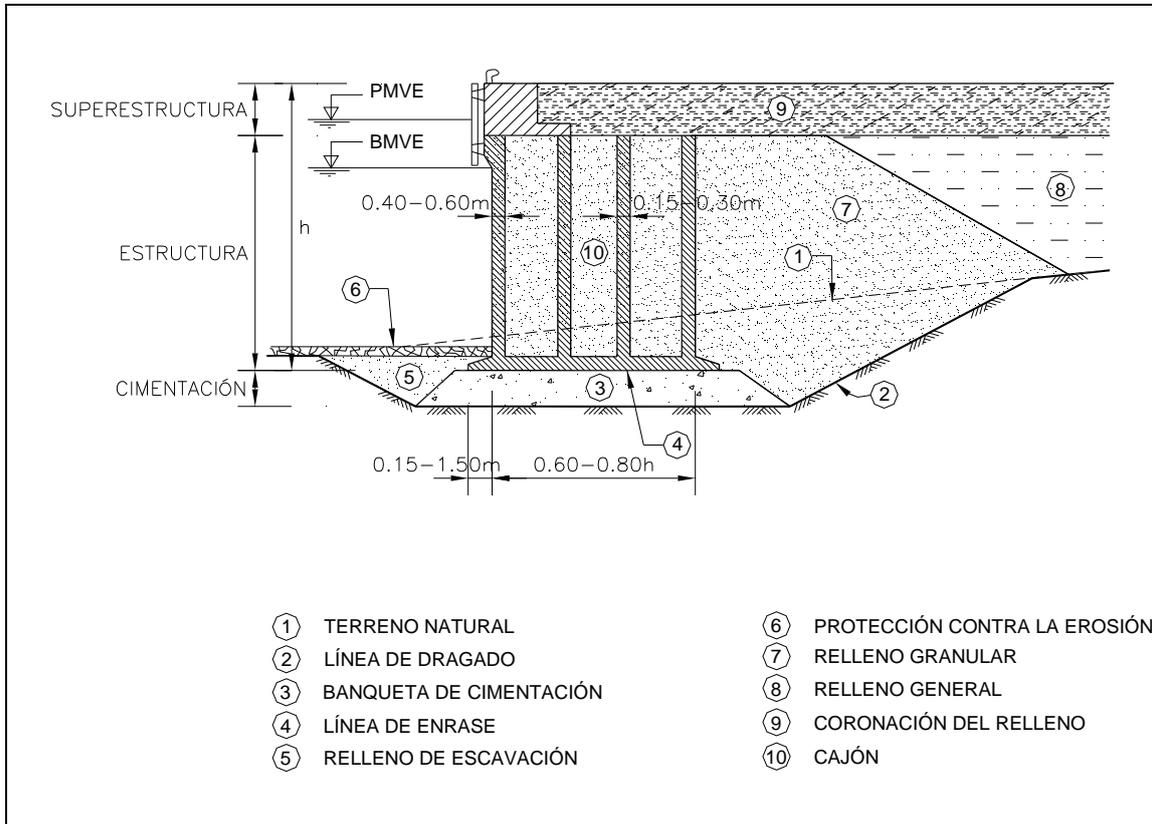


Fig. 3: Obra de atraque de cajones, sección tipo.

En este análisis preliminar, la tipología de muelles escogida ha sido la de muelle de cajones. En un documento posterior se realizará un análisis comparativo entre el muelle de pilotes y el de cajones.

Para la correcta definición de los muelles, el presente documento se centrará en la elección tanto de los calados para los muelles, como de una cota de coronación de los mismos, así como en las dimensiones de los cajones a emplear.

Dentro de la justificación de la solución, se va a realizar el cálculo de la estabilidad de los muelles, en el que se va a utilizar la metodología propuesta por la ROM 2.1 (actualmente en fase final de redacción) y se tiene en cuenta el “Manual para el diseño y la ejecución de



cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias”. Primeramente, se va a desarrollar el cálculo determinista de los muelles, merced al empleo de las acciones de cálculo recogidas en la R.O.M 2.1. En un documento posterior se realizará la verificación y optimización de las características de los cajones por métodos probabilísticos de nivel III.



2. CALADO Y CORONACIÓN DE LOS MUELLES

El objetivo de este capítulo es justificar el calado de los muelles proyectados, el cual debe dimensionarse para dedicarse al tráfico de contenedores.

2.1. Buques tipo

Tal y como ha sido comunicado por la Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz, los buques tipo portacontenedores a analizar presentan unas dimensiones medias a plena carga que se muestran a continuación:

Tabla 1: Características de los buques tipo considerados.

Buque	TPM [t]	Desplazto Δ [t]	Eslora total, L [m]	Eslora entre perpendiculares, L_{pp} [m]	Manga, B [m]	Puntal, T [m]	Calado, D [m]	Coef. bloque
Portacontenedores	75000	85000	310	290	35	22	13	0.70
Portacontenedores	30000	40500	210	200	30	18.5	10.7	0.63

A partir de ahora se asume que el portacontenedores de 310 m de eslora total es el buque tipo de proyecto para el muelle exterior, mientras que el de 210 m de eslora será para el muelle interior.

2.2. Calado mínimo de los muelles

El calado mínimo necesario del atraque es función de:

- Calado estático correspondiente al mayor buque de proyecto a plena carga (D_e)
- Factores estáticos y dinámicos relacionados con el buque que cuantifican que algún punto del casco alcance cotas más bajas que el calado estático (principalmente por efectos climatológicos, de distribución de las cargas y de movimientos del buque).
- Resguardos de seguridad que se establecen para asegurar la maniobrabilidad del buque y prevenir el contacto del buque con el fondo.



- Factores relacionados con la variabilidad de los niveles de las aguas.
- Factores relacionados con el fondo, tales como imprecisiones de batimetría, depósito de sedimentos y tolerancias de ejecución del dragado (H_3)

Según la ROM 2.1, se recomienda para estudios previos un calado mínimo relacionado con el buque de $1.12 D_e$ para buques de gran desplazamiento y obras de atraque situadas en áreas poco abrigadas y $1.08 D_e$ para buques de gran desplazamiento y obras de atraque situadas en áreas abrigadas. En el caso que nos ocupa, se va a adoptar un calado mínimo relacionado con el buque de $1.10 D_e$ para el muelle exterior y de $1.08 D_e$ para el muelle interior.

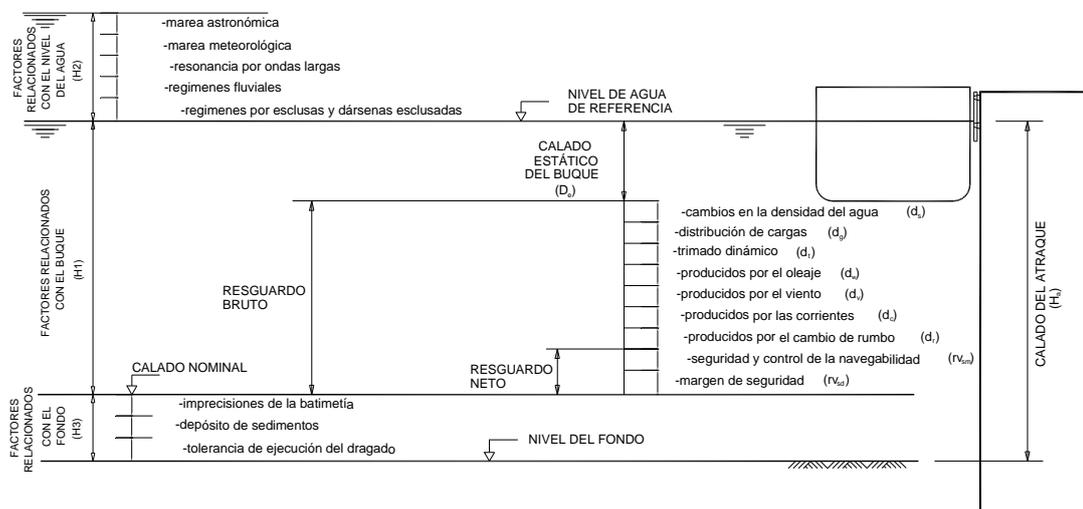


Fig. 4: Órdenes de magnitud de los factores relacionados con el buque y el fondo para la definición de calados mínimos en obras de atraque.

Para el caso que nos ocupa, se tendrá:

- Calado mínimo del muelle exterior será de $1.10 \times 13 = 14.3$ m. Según estos valores, se va a adoptar un calado de 15 m para este estudio previo.
- Calado mínimo del muelle interior será de $1.08 \times 10.7 = 11.55$ m. Según estos valores, se va a adoptar un calado de 13 m para este estudio previo.

Se debe hacer notar que se han tenido en cuenta hipótesis conservadoras y la carrera de marea es de 4 m, por lo que en la práctica podrán atracar buques de mayor calado.



2.3. Cota de coronación de los muelles

El nivel de coronación de la obra de atraque y amarre, medido en la línea de atraque, será el mínimo que permita su explotación adecuada para la flota de buques y las operaciones portuarias previstas, en las condiciones climáticas locales, particularmente en las que afectan a los niveles de las aguas exteriores.

Según la ROM 2.1 y la ROM 05-05 se va a tomar como nivel representativo de las aguas exteriores el nivel global máximo con un periodo de retorno de 50 años en el emplazamiento y un francobordo de 2.50 m. Teniendo en cuenta el régimen extremal de nivel del mar total en el Puerto de Cádiz, el nivel del mar con respecto al NMMA con periodo de retorno de 50 años es 2.4 m, es decir, $2.4 + 1.887 = 4.29$ m con respecto al Cero del Puerto de Cádiz. Por lo tanto, teniendo en cuenta el francobordo de 2.5 m, la cota de coronación mínima de los muelles sería de 6.79 m, por lo que se tomará como cota de coronación de los muelles = +7 m con respecto al cero del Puerto de Cádiz, tanto para el muelle exterior como el interior.

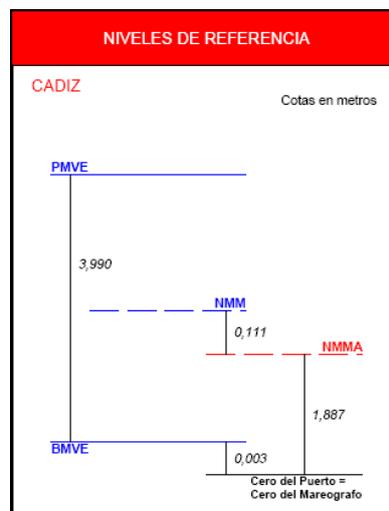


Fig. 5: Niveles de referencia para el mareógrafo de Cádiz.

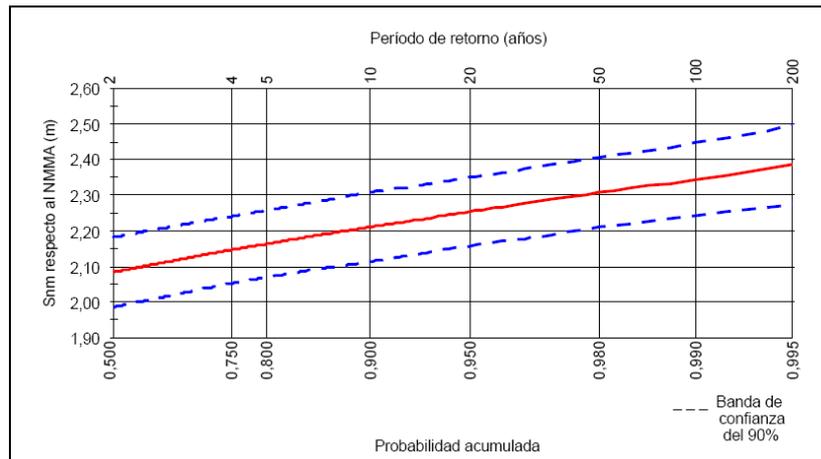


Fig. 6: Régimen extremal del nivel del mar total en Cádiz. Probabilidad de no excedencia.

2.3.1. Análisis comparativo de la cota de coronación

Según el carácter operativo de los tramos muelle exterior y muelle interior, la operatividad de los mismos debe ser superior al 95% en un año medio. Si analizamos el modo de parada operativa: Rebase de los muelles bajo condiciones de trabajo operativas normales, obtenemos:

Condiciones de Trabajo Operativas Normales			
Modo de Parada: Rebase Muelle Exterior			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Marea Astronómica	Predominante	Reg Medio 95%	3.4 m
Oleaje	Predominante	Reg. Medio 95%	$H_{mo} = 0.32m; T_p = 14s$ $H_{max} = 1.7 \cdot 0.32 = 0.54$
Viento	Dependiente del Predom	Reg. Medio 95%	-
Marea Meteorológica	Dependiente del Predom.	Reg. Medio 95%	0.38 m

Condiciones de Trabajo Operativas Normales			
Modo de Parada: Rebase Muelle Interior			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Marea Astronómica	Predominante	Reg Medio 95%	3.4 m
Oleaje	Predominante	Reg. Medio 95%	$H_{mo} = 0.30m; T_p = 14s$ $H_{max} = 1.7 \cdot 0.30 = 0.51$
Viento	Dependiente del Predom	Reg. Medio 95%	-
Marea Meteorológica	Dependiente del Predom.	Reg. Medio 95%	0.38 m



Por lo tanto, la cota de los muelles debería ser como mínimo:

- Cota mínima = $2 + 3.4/2 + 0.38 + 0.54/2 = +4.35 m$ sobre el Cero del Puerto.
Considerando un resguardo de 2.5 m, tendríamos una cota de coronación de $6.85 \approx +7 m$ sobre el Cero del Puerto.



3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS CAJONES

3.1. Introducción

Se va a aplicar la metodología ROM 0.0 y ROM 2.1 para el predimensionamiento y verificación del muelle de cajones usando metodología determinista. En un documento posterior se realizará el dimensionamiento, optimización y verificación con métodos de Nivel III (probabilísticos).

3.2. Carácter de la obra y criterios de proyecto

En el Anejo correspondiente se ha obtenido el carácter general y operativo de los tres tramos de obra definidos inicialmente:

- Tramo I: Elemento de abrigo frontal o dique de abrigo
- Tramo II: Muelle exterior
- Tramo III: Muelle interior

De acuerdo con los índices IRE e ISA obtenidos, se recomienda, como mínimo, adoptar los siguientes valores de proyecto:

- **Vida Útil Mínima:**

Tabla 2: Vida útil mínima para cada tramo

Tramo de Obra	Vida Útil Mínima
Tramo II:	25 años
Tramo III:	25 años



- **Máxima Probabilidad de Fallo en la vida útil** frente a todos los modos de fallo adscritos a los Estados Límite Últimos:

Tabla 3: Máxima probabilidad de fallo en la vida útil para cada tramo.

Tramo de Obra	Probabilidad de Fallo
Tramos II:	0.10
Tramo III:	0.10

A su vez, los criterios de proyecto asociados a los índices IREO e ISAO de los Tramos II y III presentan los siguientes valores:

- **Operatividad Mínima: 95%**
- **Número Medio de Paradas Operativas: 10**
- **Duración Máxima admisible de la Parada Operativa: 12 horas**

3.3. Ordenación de factores de proyecto

La fase de proyecto que se va a considerar para los muelles va a ser de servicio, y las condiciones de trabajo que se consideran son las Condiciones de Trabajo Operativas Normales (CT_1), las Condiciones de Trabajo Extremas (CT_2), las Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a la presentación de una acción sísmica ($CT_{3,3Sismo}$) y las Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a la presentación de un tsunami ($CT_{3,3tsunami}$). Las Condiciones Operativas post-Extremas ($CT_{1,2}$) y las Condiciones Operativas post-Excepcionales ($CT_{1,3}$), serán analizadas en un documento posterior.

3.3.1. Condiciones de Trabajo Operativas Normales CT_1

Estas condiciones de trabajo incluyen los estados de proyecto que se dan habitualmente y en los cuales la obra presta el servicio para el que ha sido concebida.

Los factores actuantes simultáneos en estas condiciones de trabajo son:

- Uso y explotación
- Medio físico



- Terreno
- Gravitatorios

A continuación se indica, para cada Estado Límite y modo de fallo, la participación de los distintos factores. Para ello, se ha tenido en cuenta que en CT_1 , los agentes predominantes suelen ser los de uso y explotación y el empuje del terreno, pudiendo actuar simultáneamente los restantes agentes. En esta fase de prediseño sólo se van a considerar los modos de fallo principales.

Estado Límite Último: Pérdida de equilibrio estático

Modo de fallo: Deslizamiento

Predominante:

- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- q_{v4} (buque, dependiente de oleaje y viento)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento

Modo de fallo: Vuelco

Predominante:

- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- q_{v4} (buque, dependiente de oleaje y viento)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente



- Oleaje
- Viento

Estado Límite Último: Agotamiento resistente o rotura

Modo de fallo: Hundimiento

Predominante:

- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- q_{v4} (buque, dependiente de oleaje y viento)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento

Modo de fallo: Vuelco plástico

Predominante:

- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- q_{v4} (buque, dependiente de oleaje y viento)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento

3.3.2. Condiciones de Trabajo Extremas CT2

Estas condiciones de trabajo incluyen los estados de proyecto asociados a las más severas acciones debidas a los factores de proyecto.



Los factores actuantes simultáneos en estas condiciones de trabajo son:

- Uso y explotación (estacionamiento, almacenamiento y manipulación restringida)
- Medio físico
- Terreno
- Gravitatorios
- Sismo y maremoto

A continuación se indica, para cada Estado Límite y modo de fallo, la participación de los distintos factores. Para ello, se ha tenido en cuenta que en CT_2 , los agentes predominantes suelen ser los ambientales climáticos.

Estado Límite Último: Pérdida de equilibrio estático

Modo de fallo: Deslizamiento

Predominante:

- Oleaje
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen: Viento

Independiente:

- Permanente
 - Nivel del mar
 - Gravitatorio
 - Sismo

Modo de fallo: Vuelco

Predominante:

- Oleaje
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen: Viento

Independiente:

- Permanente
 - Nivel del mar



- Gravitatorio
- Sismo

Estado Límite Último: Agotamiento resistente o rotura

Modo de fallo: Hundimiento

Predominante:

- Oleaje
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen: Viento

Independiente:

- Permanente
 - Nivel del mar
 - Gravitatorio
 - Sismo

Modo de fallo: Vuelco plástico

Predominante:

- Oleaje
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen: Viento

Independiente:

- Permanente
 - Nivel del mar
 - Gravitatorio
 - Sismo

3.3.3. Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas al Sismo CT3,3Sismo

Estas condiciones de trabajo incluyen los estados de proyecto correspondientes al agente extraordinario sismo.

Los factores actuantes simultáneos en estas condiciones de trabajo son:

- Sismo



- Uso y explotación (estacionamiento, almacenamiento y manipulación restringida)
- Medio físico
- Terreno
- Gravitatorios

A continuación se indica, para cada Estado Límite y modo de fallo, la participación de los distintos factores. Para ello, se ha tenido en cuenta que en $CT_{3,3sismo}$ el agente predominante es el sismo.

Estado Límite Último: Pérdida de equilibrio estático

Modo de fallo: Deslizamiento

Predominante:

- Sismo
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento

Modo de fallo: Vuelco

Predominante:

- Sismo
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente



- Oleaje
- Viento

Estado Límite Último: Agotamiento resistente o rotura

Modo de fallo: Hundimiento

Predominante:

- Sismo
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento
 -

Modo de fallo: Vuelco plástico

Predominante:

- Sismo
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento

3.3.4. Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a tsunami CT3,3tsunami

Estas condiciones de trabajo incluyen los estados de proyecto correspondientes al agente extraordinario tsunami.



Los factores actuantes simultáneos en estas condiciones de trabajo son:

- Maremoto
- Uso y explotación (estacionamiento, almacenamiento y manipulación restringida)
- Medio físico
- Terreno
- Gravitatorios

A continuación se indica, para cada Estado Límite y modo de fallo, la participación de los distintos factores. Para ello, se ha tenido en cuenta que en $CT_{3,3tsunami}$ el agente predominante es el tsunami.

Estado Límite Último: Pérdida de equilibrio estático

Modo de fallo: Deslizamiento

Predominante:

- Tsunami
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento

Modo de fallo: Vuelco

Predominante:

- Tsunami
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente



- Gravitatorio
- Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento

Estado Límite Último: Agotamiento resistente o rotura

Modo de fallo: Hundimiento

Predominante:

- Tsunami
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento

Modo de fallo: Vuelco plástico

Predominante:

- Tsunami
- q_{v1} (estacionamiento y almacenamiento)
- q_{v2} (manipulación y transporte de mercancías)
- Terreno

Mismo origen:

Independiente:

- Permanente
 - Gravitatorio
 - Nivel del mar
- No permanente
 - Oleaje
 - Viento



3.4. Tipos de Combinación

Se establecen a continuación los distintos tipos de combinación de los términos que influyen en la verificación del muelle para cada estado límite, condiciones de trabajo y modo de fallo.

A la hora de establecer los tipos, se han tenido en cuenta solamente aquellos bajo los que la ocurrencia del modo es significativa, siendo estos:

- Tipos (i 1 1): Aplicado a condiciones de trabajo operativas normales verifica el modo frente a la presentación de valores máximos de los términos de uso y explotación. Los valores umbrales de los términos, en general, estarán asociados a ocurrencias poco frecuentes pero no extremas, por lo que su determinación se realizará a partir de la clase de valores centrados.
- Tipos (i 2 1): Aplicado a condiciones de trabajo extremas verifica el modo frente a la presentación de valores extremos de los términos predominantes. Los valores extremos de aquellos términos descritos mediante un modelo de probabilidad, se deben determinar con la función de distribución extremal. En general, este tipo se aplica a modos adscritos a los estados límites últimos. Los valores de los términos o factores predominantes pertenecerán a la clase de valores de la cola superior.
- Tipos (i 3 3): Aplicado a condiciones de trabajo excepcionales ante el sismo o tsunami verifica el modo frente a la presentación de valores excepcionales del agente sísmico o tsunami simultáneamente con otros términos, los cuales, en general, se podrán considerar por sus valores pertenecientes a la clase centrada o a la cola inferior, dependiendo de la duración y de la cadencia del estado del proyecto excepcional. Los valores de los factores predominantes o de los términos excepcionales, en general pertenecerán a la clase de valores de la cola superior.

Se han considerado 4 modos de fallo principales: deslizamiento, vuelco, hundimiento y vuelco plástico. Se va a realizar la verificación de los 4 modos bajo Condiciones de Trabajo Operativas Normales, Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo, Condiciones de Trabajo Extremas con Sismo y Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a Sismo y a Tsunami, respectivamente. Los factores actuantes simultáneos y compatibles, así como sus valores, están indicados en las tablas siguientes. En los apartados siguientes se explica la elección de los valores de cálculo para los distintos factores actuantes en los modos de fallo.



Condiciones de Trabajo Operativas Normales			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Sb Operación	Predominante	Determinista	20 kN/m ²
Sb Almacenamiento	Predominante	Determinista	75 kN/m ²
Sb Manipulc Restr.	Predominante	Determinista	Pata Mar =583 kN
			Pata Tierra=450 kN
Buque (T. Bolardo)	Predominante	Determinista	6 Ton/m
Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Nivel del Mar	Independ del Predom	Reg. Medio 5%	+0.64 m
		Reg. Medio 95 %	+3.29 m
Oleaje	Independ del Predom	Reg. Medio 95%	H _{max} =0.55 m; T _p =14 s
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Sismo	-	-	

Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Sb Operación	Independ del Predom	Determinista	20 kN/m ²
Sb Almacenamiento	Independ del Predom	Determinista	75 kN/m ²
Sb Manipulc Restr.	Predominante	Determinista	Pata Mar =708 kN
			Pata Tierra=642 kN
Buque (T. Bolardo)	-	-	-
Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Nivel del Mar	Independ del Predom	Reg. Extremal	+0.00 m (Bajamar)
		T=20	+4.24 m (Pleamar)
Oleaje	Predominante	Reg. Extremal T=50	H _{max} =3.6 m; T _p =19s
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Sismo	-	-	



Condiciones de Trabajo Extremas con Sismo			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Sb Operación	Independ del Predom	Determinista	20 kN/m ²
Sb Almacenamiento	Independ del Predom	Determinista	75 kN/m ²
Sb Manipulc Restr.	Independ del Predom	Determinista	Pata Mar =583 kN
			Pata Tierra=450 kN
Buque (T. Bolardo)	-	-	-
Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Nivel del Mar	Independ del Predom	Reg. Medio 50%	+2.0 m
Oleaje	Independ del Predom	Reg. Medio 50%	-
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Sismo	Predominante	Reg. Extremal T=50 años	$a_{h,max,50} = 0.0298g$

Condiciones de Trabajo Excepcionales Debidas a Sismo			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Sb Operación	Independ del Predom	Determinista	20 kN/m ²
Sb Almacenamiento	Independ del Predom	Determinista	75 kN/m ²
Sb Manipulc Restr.	Independ del Predom	Determinista	Pata Mar =583 kN
			Pata Tierra=450 kN
Buque (T. Bolardo)	-	-	-
Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Nivel del Mar	Independ del Predom	Reg. Medio 50%	+2.0 m
Oleaje	Independ del Predom	Reg. Medio 50%	-
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Sismo	Predominante	Reg Extremal T=500 años	$a_{h,max,500} = 0.07g$

Condiciones de Trabajo Excepcionales Debidas a Tsunami			
Factor	Tipo	Clase	Valor Cálculo
Sb Operación	Independ del Predom	Determinista	20 kN/m ²
Sb Almacenamiento	Independ del Predom	Determinista	75 kN/m ²
Sb Manipulc Restr.	Independ del Predom	Determinista	Pata Mar =583 kN
			Pata Tierra=450 kN
Buque (T. Bolardo)	-	-	-



Terreno	Independ del Predom	Determinista	
Nivel del Mar	Independ del Predom	Reg. Medio 50%	+2.0 m
Oleaje	Independ del Predom	Reg. Medio 50%	-
Ag. Gravitatorio	Independ del Predom	Determinista	
Tsunami	Predominante	Reg Extremal T=500 años	$H_{m,max} = 10 m;$ $T_m = 20 min$

3.5. Parámetros de proyecto

En el presente apartado se indican los valores de los parámetros de proyecto que definen las propiedades del medio físico, del terreno y de los materiales de construcción.

3.5.1. Agua y aire

Parámetros de estado

Peso específico del agua: $\gamma_w = 1,025 \text{ t/m}^3$

Peso específico del aire: $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Parámetros mecánicos

Viscosidad cinemática del agua: $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

3.5.2. Materiales de construcción

Parámetros de identificación

Banqueta de cimentación: Está formada por cantos de escollera caliza de 600-800 kg de peso.

Cajones de hormigón: Cajones paralelepípedicos de hormigón armado con celdas rectangulares en su interior rellenas de material granular.

Superestructura: Está constituida por hormigón en masa.

Relleno del trasdós del cajón: Está compuesto por material granular seleccionado para evitar en lo posible el contenido en finos.



Parámetros de estado

Tanto para los parámetros de estado del relleno y de la banquetta como para los mecánicos se adoptan los siguientes valores nominales:

Banqueta de cimentación:

Índice de poros: $e = 0.472$

Porosidad: $n = \frac{e}{1+e} = 0,321$

Peso específico: $\gamma_d = \gamma_s \cdot (1 - n) = 1,80 \text{ t/m}^3$

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w \cdot (G + e)}{1 + e} = 2,125 \text{ t/m}^3$

Cajones de hormigón:

Peso específico medio: $\gamma_{cajón} = 2,17 \text{ t/m}^3$ (media de la densidad del hormigón y del relleno de las celdas parcialmente saturadas)

Superestructura:

Peso específico del hormigón: $\gamma_c = 2,30 \text{ t/m}^3$

Relleno:

Índice de poros: $e = 0.472$

Porosidad: $n = \frac{e}{1+e} = 0,321$

Peso específico: $\gamma_d = \gamma_s \cdot (1 - n) = 1,80 \text{ t/m}^3$

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w \cdot (G + e)}{1 + e} = 2,125 \text{ t/m}^3$

Parámetros mecánicos

Banqueta de escollera:

Cohesión: $c = 10 \text{ KN/m}^2$

Módulo de deformación a largo plazo: $E = 10 \text{ MN/m}^2$



Coefficiente de Poisson: $\nu = 0,35$

Ángulo de rozamiento interno: $\phi = 45^\circ$

Coefficiente de rozamiento con el terreno: $\mu_{\text{terreno}} = 0,70$

Cajones de hormigón:

Resistencia característica a compresión: $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$

Resistencia característica a tracción: $f_{ct,k} = 0,21 \cdot (f_{ck})^{\frac{2}{3}} = 1,79 \text{ N/mm}^2$

Módulo de deformación longitudinal: $E = 10000 \cdot (f_{ck})^{\frac{1}{3}} = 29240 \text{ N/mm}^2$

Coefficiente de Poisson: $\nu = 0,20$

Coefficiente de dilatación térmica: $\alpha = 10^{-5} \pm \delta$ con $\delta = 0,3\alpha$

Retracción: $R = 0,35 \text{ mm/m}$

Coefficiente de rozamiento cajón-banqueta: $\mu = 0,70$

Superestructura:

Resistencia característica a compresión: $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$

Resistencia característica a tracción: $f_{ct,k} = 0,21 \cdot (f_{ck})^{\frac{2}{3}} = 1,79 \text{ N/mm}^2$

Módulo de deformación longitudinal: $E = 10000 \cdot (f_{ck})^{\frac{1}{3}} = 29240 \text{ N/mm}^2$

Coefficiente de Poisson: $\nu = 0,20$

Coefficiente de dilatación térmica: $\alpha = 10^{-5} \pm \delta$ con $\delta = 0,3\alpha$

Retracción: $R = 0,35 \text{ mm/m}$

Relleno:

Cohesión: $c = 10 \text{ KN/m}^2$

Módulo de deformación a largo plazo: $E = 10 \text{ MN/m}^2$

Coefficiente de Poisson: $\nu = 0,35$

El ángulo de rozamiento del relleno adoptado para el presente estudio será de 35° .



3.6. Parámetros geométricos del cajón del muelle exterior

Cajón de hormigón armado de celdas rectangulares de 11.5 m de manga, 20 m de puntal y 29.7 m de eslora (con orejetas).

Celdas:

- 7 celdas según la eslora del cajón
- 3 celdas según la manga del cajón
- Dimensiones de las celdas centrales interiores: 3.80 m x 3.80 m
- Dimensiones de la celda de esquina: 3.20 m x 3.80 m
- Dimensiones de las celdas exteriores longitudinales: 3.80 m x 3.20 m
- Dimensiones de las celdas exteriores transversales: 3.80 m x 3.80 m
- Espesor de las paredes exteriores del cajón: 0.40 m
- Espesor de las paredes interiores del cajón: 0.25 m
- Superficie total de las celdas del cajón: 268.76 m²

Elementos estructurales:

- Espesor de la solera: 0.8 m
- Zapata rectangular de 0.8 m de espesor con 1 m de vuelo
- Volumen de la solera del cajón: 315.16 m³
- Volumen del fuste del cajón: 1263.17 m³
- Volumen de hormigón del cajón: 1578.33 m³
- Peso del cajón: 3945.82 t

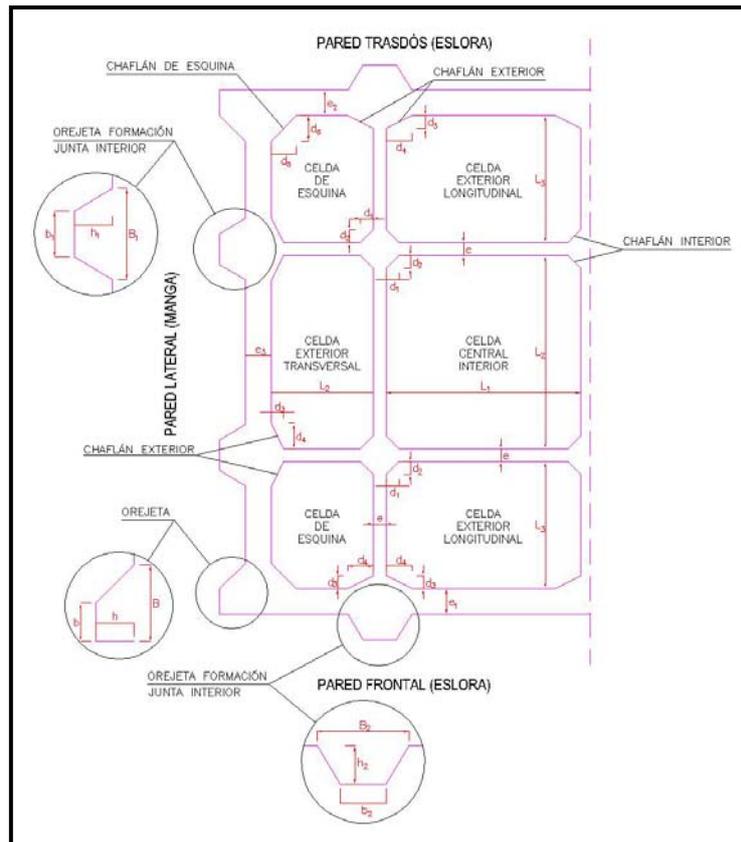


Fig. 7: Croquis de los elementos del cajón.

3.7. Parámetros geométricos del cajón del muelle interior

Por simplicidad, se adoptan las mismas características geométricas para los cajones que forman en muelle interior que para los del muelle exterior, con la única diferencia del puntal. Cajón de hormigón armado de celdas rectangulares de 11.5 m de manga, 18 m de puntal y 29.7 m de eslora (con orejetas).

Celdas:

- 7 celdas según la eslora del cajón
- 3 celdas según la manga del cajón
- Dimensiones de las celdas centrales interiores: 3.80 m x 3.80 m
- Dimensiones de la celda de esquina: 3.20 m x 3.80 m
- Dimensiones de las celdas exteriores longitudinales: 3.80 m x 3.20 m
- Dimensiones de las celdas exteriores transversales: 3.80 m x 3.80 m
- Espesor de las paredes exteriores del cajón: 0.40 m
- Espesor de las paredes interiores del cajón: 0.25 m
- Superficie total de las celdas del cajón: 268.76 m²



Elementos estructurales:

- Espesor de la solera: 0.8 m
- Zapata rectangular de 0.8 m de espesor con 1 m de vuelo
- Volumen de la solera del cajón: 315.16 m³
- Volumen del fuste del cajón: 1131.59 m³
- Volumen de hormigón del cajón: 1446.75 m³
- Peso del cajón: 3616.87 t

3.8. Agente gravitatorio

En este apartado se tienen en cuenta el peso propio y los pesos muertos.

- Peso propio $q_{g,1}$. Se tiene en cuenta el peso del cajón relleno por metro lineal de eslora.
- Pesos muertos $q_{g,2}$. Se tiene en cuenta:
 - Peso de la superestructura de hormigón con unas dimensiones de 2 m de alto y 5 m de ancho situado sobre el cajón.
 - Peso del relleno sobre el fuste con unas dimensiones de 2 m de alto y 6.5 m de ancho situado sobre el cajón.
 - Peso de las tierras sobre la zapata del trasdós.

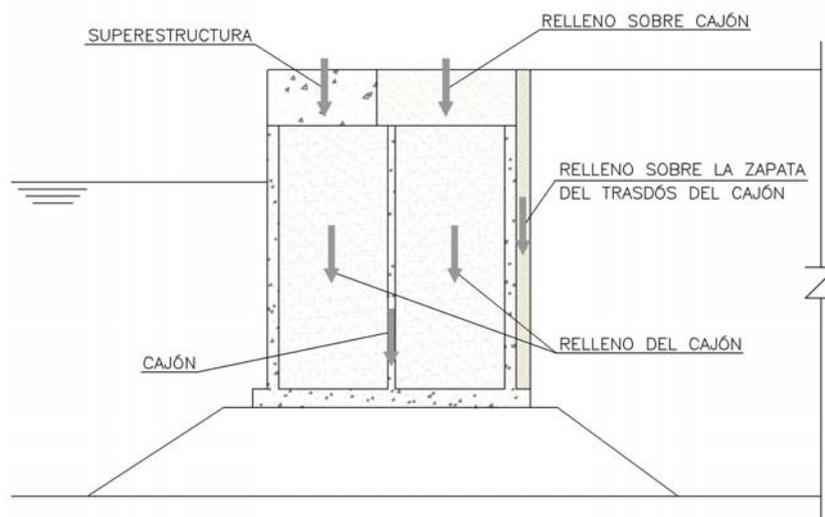


Fig. 8: Esquema de las acciones consideradas.



3.9. Agentes del medio físico

3.9.1. Viento

El agente viento solicita a la obra de atraque de forma indirecta a través de la acción ejercida sobre el buque determinado parte de las cargas de amarre. En el procedimiento de verificación de los modos de fallo “globales” se va a despreciar su contribución directa.

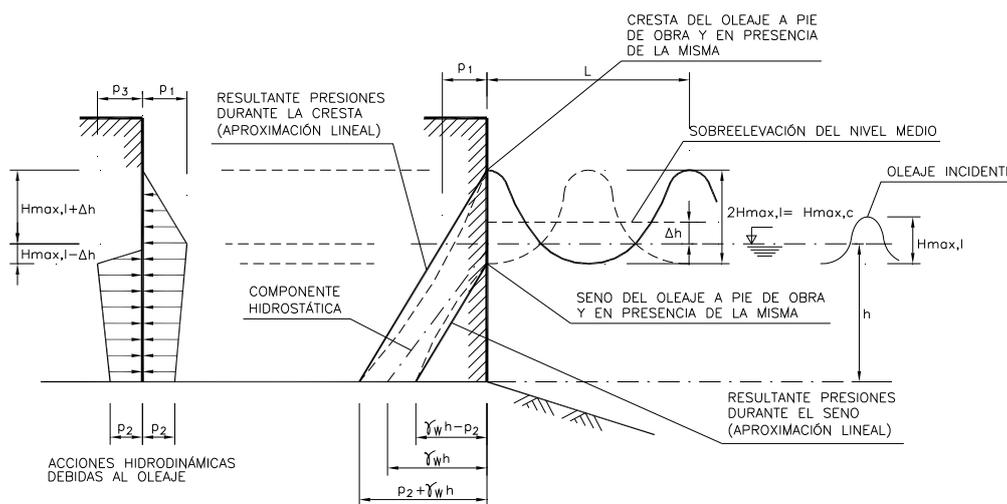
3.9.2. Corrientes

La acción de las corrientes sobre las obras de atraque y amarre se manifiesta de dos formas: Una indirecta, actuando a través del buque durante el atraque o amarrado, y otra directa ejerciendo una fuerza sobre la propia estructura. En el caso que nos ocupa, el efecto de las corrientes se va a despreciar a la hora de verificar los modos de fallo globales usando métodos de Nivel I.

3.9.3. Acción del oleaje

La acción del oleaje sobre las obras de atraque y amarre se manifiesta de dos formas: una indirecta, actuando a través del buque durante el atraque o amarrado, y otra directa ejerciendo fuerzas sobre la propia estructura.

En el caso que nos ocupa, como se trata de un muelle trasdosado, se van a calcular las acciones sobre el muelle durante el seno, por considerarse más desfavorable que la cresta, usando el modelo de Sainflou.



- $$\Delta h = \frac{\pi H_{\max,I}^2}{L} \coth\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$



- $p_1 = (p_2 + \gamma_w h) \frac{H_{max,I} + \Delta h}{H_{max,I} + \Delta h + h}$
- $p_2 = \frac{\gamma_w H_{max,I}}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$
- $p_3 = \gamma_w (H_{max,I} - \Delta h)$

Muelle exterior:

Para condiciones de trabajo operativas normales consideraremos:

- Altura de ola máxima incidente=0.55 m
- Periodo = 14 s

Para condiciones de trabajo extremas consideraremos:

- Altura de ola máxima incidente=3.6 m
- Periodo = 19 s

Muelle interior:

Para condiciones de trabajo operativas normales consideraremos:

- Altura de ola máxima incidente=0.55 m
- Periodo = 14 s

Para condiciones de trabajo extremas consideraremos:

- Altura de ola máxima incidente=3.6 m
- Periodo = 19 s

3.9.4. Nivel del mar

Todas las superficies de las obras de atraque y amarre que se encuentren sumergidas estarán sometidas a empujes en la dirección normal a la superficie (u_w) asociados con los niveles de agua debidos a mareas y regímenes fluviales.

Para la determinación de los niveles de saturación compatibles a considerar en los rellenos y terrenos naturales deberá analizarse la posibilidad que se produzcan desfases entre dichos niveles y los de las aguas exteriores por la capacidad de la obra en su conjunto de amortiguar o no la onda de marea o los ciclos fluviales, así como de evacuar los flujos de agua que se generan. Estos desfases dependerán fundamentalmente de las características de variabilidad de las mareas y niveles fluviales y de las dimensiones de la obra, así como de la permeabilidad y porosidad del cimiento, del terreno natural, del relleno y de la obra.

Para el caso que nos ocupa se tendrá:



Condiciones de Trabajo Operativas Normales:

- Nivel del mar de las aguas exteriores:
 - Valor de la cola inferior correspondiente al 5% del régimen medio del nivel del mar total: +0.64 m con respecto al Cero del Puerto de Cádiz.
 - Valor de la cola superior correspondiente al 95% del régimen medio del nivel del mar total: +3.29 m con respecto al Cero del Puerto de Cádiz.
- Desnivel entre nivel exterior y la línea de saturación: Usando la tabla 3.4.1 de la ROM 0.5-05, considerando que hay una marea astronómica significativa, que la permeabilidad de la obra es media, se tiene que el desnivel es de $0.3 \times (\text{PMVE} - \text{BMVE}) = 0.3 \times 3.99 = 1.2$ m.

Condiciones de Trabajo Extremas:

- Nivel del mar de las aguas exteriores:
 - Valor de la cola inferior del régimen extremal correspondiente a un periodo de retorno de 20 años. Nivel del mar total: +0. con respecto al Cero del Puerto de Cádiz.
 - Valor de la cola superior del régimen extremal correspondiente a un periodo de retorno de 20 años. Nivel del mar total: +4.24 m con respecto al Cero del Puerto de Cádiz.
- Desnivel entre nivel exterior y la línea de saturación: Usando la tabla 3.4.1 de la ROM 0.5-05, considerando que hay una marea astronómica significativa, que la permeabilidad de la obra es media, se tiene que el desnivel es de $0.3 \times (\text{PMVE} - \text{BMVE}) = 0.3 \times 3.99 = 1.2$ m.

3.10. Agente sísmico

Para verificar los modos de fallo globales bajo el efecto de la acción sísmica se va a realizar mediante el método de cálculo pseudo-estático, es decir, con los procedimientos usuales de la estática, pero añadiendo fuerzas adicionales que representan a la acción dinámica.

La ubicación del proyecto es Cádiz, por lo que el agente sísmico debe considerarse para la verificación de modos de fallo globales. Según la Norma de Construcción Sismorresistente (NCRS-02) la aceleración sísmica básica para Cádiz es $a_b = 0.07g$. A partir de este valor, la función de distribución extremal de la aceleración horizontal máxima se considera definida por la siguiente expresión:



$$a_{h,\max,T} = a_b \cdot \left(\frac{T}{500} \right)^{\frac{1}{2.7}}$$

donde T es el periodo de retorno en años. Para calcular la aceleración sísmica horizontal para la estructura concreta se asume que el factor de flexibilidad de la obra frente a terremotos, $\alpha = 0.5$, que corresponde a muelles de gravedad sin coacciones. De esta manera se tiene que

$$a_h = \alpha \cdot a_{h,\max,T}$$

$$a_v = 0.5 \cdot a_h$$

Para calcular las acciones estáticas equivalentes a la acción sísmica, se ha seguido la metodología descrita en la ROM 0.5-05 y la ROM 2.1 para la estimación de:

- Fuerzas de inercia de la estructura
- Empujes dinámicos del terreno
- Empujes dinámicos del agua intersticial
- Empujes hidrodinámicos del agua libre

considerando que el sentido de las fuerzas y empujes es el más desfavorable.

Para la verificación de los modos de fallo globales teniendo en cuenta el sismo, se han definido (según la ROM 2.1) dos estados sísmicos, una bajo Condiciones de Trabajo Extremas (CT2) y otro bajo Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a la presentación de un sismo de carácter extraordinario (CT3,3). En CT2, el valor característico del agente sísmico viene definido por el valor asociado a un periodo de retorno de 50 años, mientras que el valor del resto de los agentes será el asociado a la probabilidad de no excedencia del 50%, tomada del régimen medio. Por otro lado, en CT3,3 el valor característico del agente sísmico viene definido por el valor asociado a un periodo de retorno de 500 años, mientras que el valor del resto de los agentes será el asociado a la probabilidad de no excedencia del 50%, tomada del régimen medio.

3.11. Acciones debidas al tsunami

Para verificar los modos de fallo globales bajo el efecto de la acción de un tsunami se ha seguido el procedimiento simplificado expuesto en la ROM 2.1, que está basado en el propuesto por “Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan (2002)”. Las acciones del maremoto en condiciones de no rotura vienen especificadas en la Tabla 4.



Tabla 4: Acciones del maremoto en condiciones de no rotura sobre obras lineales de atraque fijas cerradas de gravedad^{*)}

<i>PASO DE CRESTA</i>	<i>PASO DEL SENO</i>
<p>- ^{*)} La formulación se ajusta al modelo recomendado por Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan (2002)</p> <p>- Rango de validez recomendado de la formulación para las obras de gravedad:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Fondo horizontal o pendiente muy tendida ($\text{tg } \alpha < 1/50$) ○ Cualquier dirección de incidencia ○ Peralte $H_{m,l}/L < 0.04$ ○ Profundidades reducidas: $h/L < 0.04$ ○ No rotura 	

Según la ROM 2.1, en la fachada suratlántica (golfo de Cádiz) se han producido maremotos de cierta importancia, aunque no hay información suficiente para cuantificarlos en tamaño y en periodo de retorno. En tanto no se disponga de datos más precisos a través de métodos de evaluación de riesgos de generación de maremotos y de procesos de simulación de consecuencias, se pueden adoptar como valores nominales de las variables de estado del maremoto en el golfo de Cádiz los siguientes, que pueden considerarse representativo de un periodo de retorno de 500 años:

$$H_{m,\max} = 10 \text{ m};$$

$$T_m = 20 \text{ min}$$

En el caso que nos ocupa, se considerará únicamente la situación de paso del seno, por ser ésta más desfavorable que la de paso de cresta, para los modos de fallo “globales”, por tratarse de muelles trasdosados.

Comentar lo de la red de alerta frente a tsunamis.

3.12. Agentes de uso y explotación

3.12.1. Estacionamiento y almacenamiento de mercancías

Los parámetros que definen este agente son:



- Sobrecarga vertical uniformemente repartida. Para el caso de Terminal de contenedores se va a tomar una sobrecarga repartida de:
 - Sobrecarga de almacenamiento: $q_{v,1k}=75 \text{ kN/m}^2$ para contenedores llenos apilados en 5 alturas.
 - Sobrecarga de operación: $q_{v,1k}=20 \text{ kN/m}^2$
- Combinación de cargas concentradas verticales. No las tomaremos en consideración para la verificación de los modos de fallo “globales”, aunque se tendrán en cuenta para la verificación de los modos de fallo “locales”.

Las sobrecargas verticales anteriormente expresadas las tendremos en cuenta con su valor de combinación fundamental tanto bajo condiciones de trabajo operativas normales como extremas.

Las sobrecargas de estacionamiento y almacenamiento solicitan a las obras de atraque y amarre bien de forma directa, bien indirectamente aumentando los pesos y empujes producidos por el terreno natural o los rellenos. Éstos se pueden calcular de acuerdo con lo dispuesto en la ROM 05-05 y esquematizado en las figuras siguientes.

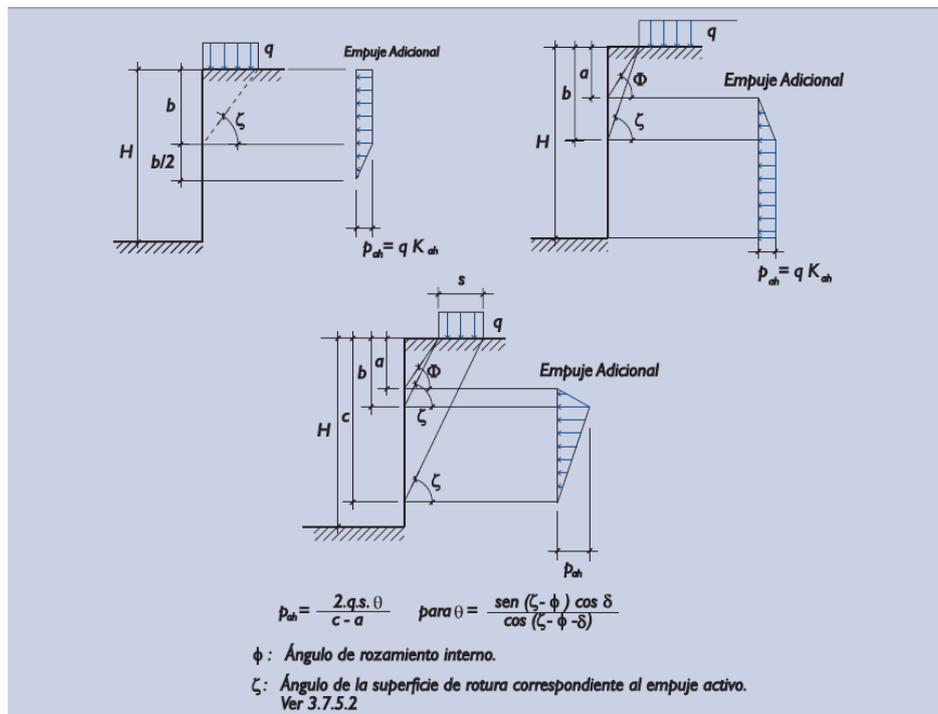


Fig. 9: Efecto de sobrecargas parciales en el empuje activo horizontal.

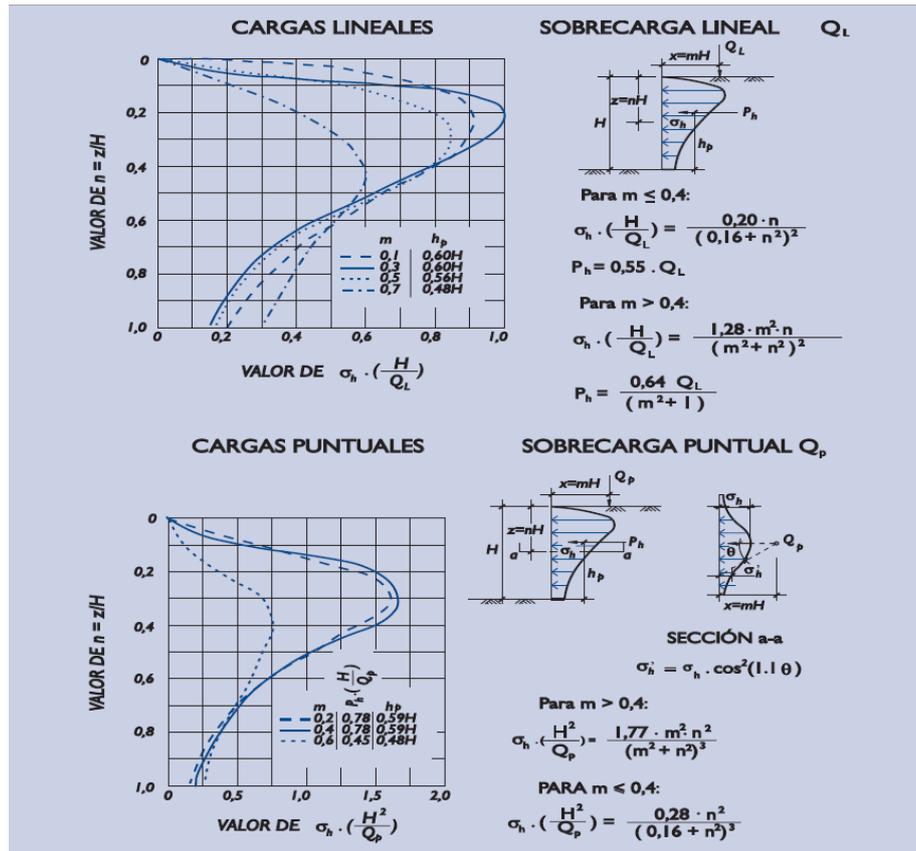


Fig. 10: Efecto de cargas lineales o concentradas en el empuje activo horizontal.

3.12.2. Manipulación de mercancías

El agente manipulación de mercancías en las áreas de operación está asociado con las cargas transmitidas por los equipos e instalaciones necesarios para la realización de las actividades de carga, descarga, estiba, desestiba y trasbordo, las cuales permiten la transferencia de las mercancías entre buques o entre éstos y tierra u otros medios de transporte, así como para las actividades de transporte horizontal y depósito necesarias para el estacionamiento de las mismas en las condiciones previstas en dicha área y para su traslado a las áreas de almacenamiento o a otras zonas dentro o fuera de la zona de servicio del puerto.

En el caso que nos ocupa, se considerará el uso de equipos de movilidad restringida particularizados en grúas sobre carriles para contenedores. En general, para la verificación de modos de fallo “globales” será suficiente únicamente considerar conjuntamente las sobrecargas repartidas de estacionamiento y almacenamiento o de tráfico terrestre con las cargas debidas a sistemas discontinuos por elevación mediante equipos fijos y de movilidad restringida, así como a sistemas continuos, en función del sistema de manipulación



considerado. Por otra parte, deberán tomarse en consideración alternativamente las cargas concentradas transmitidas tanto por las mercancías estacionadas o almacenadas como por todos los equipos de manipulación considerados para la verificación de modos de fallo “locales” (estructurales o de inestabilidad interna) en obras de atraque y amarre en las que sea necesario comprobar dichos modos de fallo, particularmente las fijas abiertas, de pantallas y flotantes.

Este agente se define mediante las cargas puntuales, verticales y horizontales, transversales y longitudinales, y momentos transmitidos directamente al cimiento en el caso del equipo fijo o, en el caso de equipos de movilidad restringida, a través de las ruedas que situadas en cada una de las patas permiten la movilidad del equipo, así como por los anclajes y brochados en aquellos estados de proyecto en los cuales se considere la inmovilización de éste. En el caso de equipos de movilidad restringida, en general para la verificación de modos de fallo “globales” es admisible considerar la carga transmitida por cada pata del equipo como una carga lineal equivalente a la carga transmitida por las ruedas, obtenida por división de la carga transmitida por cada una de ellas por la separación entre ejes de ruedas.

Tanto para el muelle exterior como el interior, se va a considerar una grúa Super Post-Panamax Suezmax (5000-8000 TEUS) con las siguientes características:

CONFIGURACION GEOMETRICA	Distancia entre carriles (G) (m)		30.50
	Espacio entre patas (m)		18.3
	Separación entre patas (W) (m)		15-17
	Nº de ruedas por pata (n)		8
	Separación de ruedas (S) (m)		1.30-1.50
	Distancia entre topes (B) (m)		24-27
	Distancia tirante anclaje/agarre (A) (m)		9
MAXIMA CARGA POR RUEDA (kN)¹⁾	En condiciones de operación	Vertical lado mar	800-900
		Vertical lado tierra	600-700
		Horizontal ⁵⁾	120-130
	En condiciones Extremas	Vertical lado mar	1000-1100
		Vertical lado tierra	900-1000
		Horizontal ⁶⁾	130-150
MAXIMA CARGA EN DISPOSITIVOS DE ANCLAJE	En condiciones Excepcionales	Tracción tirante de anclaje (kN/pata)	4000-5500
		Horizontal en brochado (kN/lado)	

Los valores de las tablas incluidas en la ROM 2.1 incluyen los efectos dinámicos, amplificación dinámica y efectos inerciales. Cuando estas cargas actúen indirectamente a través de capas de reparto de espesor mayor o igual a 1.5 m o a través de los rellenos ejerciendo empujes adicionales verticales y horizontales, no se considerará la influencia de la componente de amplificación dinámica ni la debida a los efectos inerciales. En este caso,



las cargas verticales debidas a manipulación restringida deben minorarse por medio de un coeficiente 1.2, y además no se considerarán las cargas horizontales debidas a los efectos inerciales. Lo que se materializa en:

Bajo Condiciones de Trabajo Operativas Normales:

- Carga puntual vertical en pata lado mar de $700/1.2= 583$ kN
- Carga puntual vertical en pata lado tierra de $540/1.2=450$ kN

Bajo Condiciones de Trabajo Extremas:

- Carga puntual vertical en pata lado mar de $850/1.2=708$ kN
- Carga puntual vertical en pata lado tierra de $770/1.2=642$ kN

3.12.3. Tráfico terrestre

El agente tráfico terrestre no se considera en esta fase de predimensionamiento del muelle.

3.12.4. Operaciones de los buques

El agente operación de los buques está asociado con las acciones debidas directa o indirectamente al buque cuando está navegando, cuando realiza las maniobras necesarias para atracar y/o amarrar en un puesto de atraque o viceversa, o cuando permanece en el mismo en condiciones adecuadas para su seguridad y para que puedan desarrollarse las operaciones portuarias de carga, descarga, estiba, desestiba y trasbordo de mercancías y vehículos o de embarque y desembarque de pasajeros.

En las obras de atraque y amarre se diferencian los siguientes agentes de operaciones de buques:

- Efectos hidrodinámicos inducidos por el buque navegando ($q_{v,41}$)
- Acciones de atraque ($q_{v,42}$)
- Choque de buques ($q_{v,43}$)
- Efectos debidos a las hélices ($q_{v,44}$)
- Acciones debidas a las rampas o portones del buque ($q_{v,45}$)
- Acciones de amarre ($q_{v,46}$)

En el caso que nos ocupa, (obra de atraque fija cerrada) no será necesaria la consideración de las acciones de atraque para la verificación de modos de fallo “globales” de pérdida de



equilibrio estático o inestabilidad externa. Por el contrario, en general esta acción será relevante para la verificación de obras fijas abiertas o flotantes, así como para la verificación de los modos de fallo locales de los elementos estructurales que formen parte del sistemas de atraque (defensas, superestructuras, ...).

En esta fase de proyecto, sólo se van a considerar las acciones de amarre de buques bajo condiciones de trabajo operativas normales particularizadas en un tiro de bolardo horizontal de valor 6 ton/m.

3.13. Coeficientes de seguridad

La Fig. 11 representa un esquema de las acciones de uso y explotación consideradas. Para la verificación de la estabilidad de los muelles se han considerado cuatro modos de fallo principales:

Estabilidad al deslizamiento en el contacto hormigón – banqueta de apoyo: El coeficiente de seguridad frente al deslizamiento se estima como

$$CS_{Deslizamiento} = \frac{\mu \cdot \sum F_V}{\sum F_H}$$

donde μ = coeficiente de rozamiento entre la banqueta y el cajón, $\sum F_V$ = resultante de fuerzas verticales y $\sum F_H$ = resultante de fuerzas horizontales.

Estabilidad al vuelco. El coeficiente de seguridad frente al vuelco se estima como la relación entre el momento estabilizador y el volcador respecto al extremo de la zapata,

$$CS_{Vuelco} = \frac{M_{estabilizador}}{M_{volcador}}$$

Estabilidad al hundimiento. El estudio de la estabilidad frente al hundimiento se ha realizado según el método de Brinch-Hansen, estudiando el valor de la carga de hundimiento del terreno y comparando el resultado con la que ha de soportar el cajón. Según la fórmula de Brinch-Hansen, la componente vertical de la presión que produce el hundimiento viene dada por:

$$P_{v,h} = c \cdot N_c \cdot i_c \cdot s_c + q \cdot N_q \cdot i_q \cdot s_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot i_\gamma \cdot s_\gamma$$

donde:



- q = sobrecarga de tierras a la profundidad de la cimentación, en el entorno del cimiento
- c = cohesión
- N_q, N_c, N_γ = coeficientes de capacidad de carga
- s_q, s_c, s_γ = coeficientes de forma
- i_q, i_c, i_γ = coeficientes de inclinación

Por lo tanto, se estima el *CSHundimiento* como el cociente entre $P_{v,h}$ y la componente vertical de la presión actuante, P_v ,

$$\text{CSHundimiento} = \frac{P_{v,h}}{P_v}$$

Estabilidad frente al vuelco plástico. Las estructuras portuarias pueden experimentar un tipo de rotura similar al vuelco rígido. Cuando la resultante de las acciones sobre el terreno se acerca al borde del área de apoyo se puede producir una concentración de tensiones tal que provoque la rotura local (plastificación) en esa zona. El coeficiente de seguridad al vuelco plástico se define como el cociente entre los momentos de las fuerzas estabilizadoras y el de las volcadoras respecto a un punto próximo al pié del muro del cajón, pero que no coincide con él. El vuelco plástico recibe su adjetivo precisamente de la plastificación local que tiene lugar en el borde de la zona de apoyo cuando se produce este mecanismo de fallo. Se define como coeficiente de seguridad frente al vuelco plástico el número por el que habría que multiplicar H (componente horizontal de la resultante de las acciones) para provocar la plastificación local del terreno. Para ello se ha usado la formulación de Brinch-Hansen en un proceso iterativo.

En la Tabla 5 se listan los coeficientes de seguridad para los casos analizados para el muelle exterior y el interior.

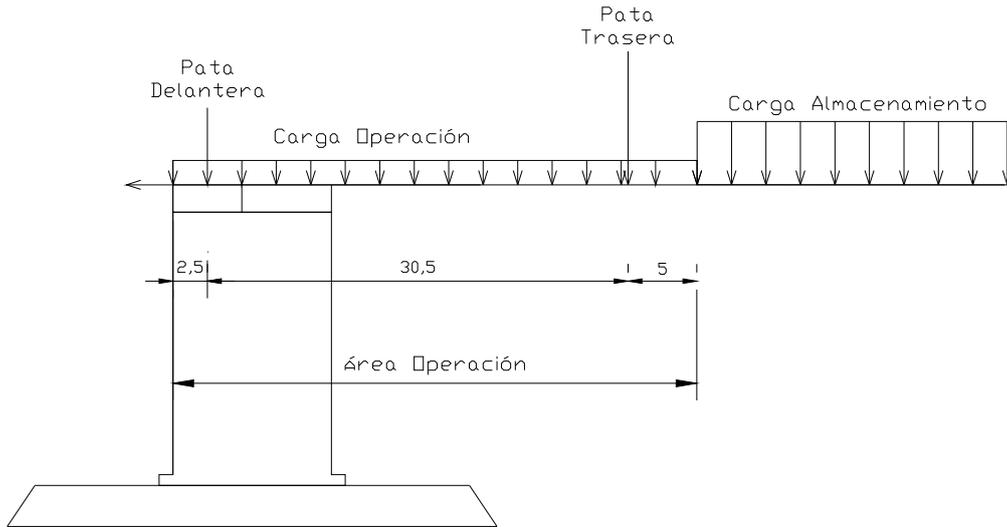


Fig. 11: Esquema de cargas consideradas.

Tabla 5: Resumen de los coeficientes de seguridad de los casos analizados en el siguiente apartado.

Caso	Coeficientes de Seguridad			
	Deslizamiento	Vuelco	Hundimiento	Vuelc. Plástico
H1	2.9	1.9	5.0	1.5
H2	3.1	2.0	6.1	1.7
H3	2.2	1.8	3.3	1.8
H4	2.4	1.9	4.2	1.9
H5	2.3	1.6	3.7	1.6
H6	2.5	1.8	4.8	1.5
H7	2.0	1.5	2.9	1.6
H8	2.2	1.7	3.9	1.7
H9	2.1	1.7	3.1	1.7
H10	2.3	1.9	4.0	1.9
H11	2.6	1.7	4.6	1.4
H12	2.8	1.8	5.6	1.5
H13	1.8	1.4	2.0	1.4
H14	1.9	1.5	2.7	1.5



3.14. Coeficientes de seguridad para BAJAMAR

3.14.1. H1: Condiciones de trabajo operativas normales: Muelle Exterior

Resumen de Fuerzas y Momentos				
	F_H [ton]	F_V [ton]	M_V [ton·m]	M_E [ton·m]
Peso propio	0.0	504.0	0.0	3402.2
Cargas muertas	0.0	89.6	0.0	843.9
Cargas hidráulicas	20.0	-208.9	1687.2	0.0
Empuje del terreno	61.5	26.5	471.4	331.8
Sobrecargas de operación	10.1	27.8	110.7	200.8
Sobrecargas de almacenamiento	0.4	0.2	0.5	2.2
Sobrecargas de manipulación	15.0	59.4	158.6	208.0
Tiro de bolardo	6.0	0.0	132.0	0.0
Oleaje	8.2	0.0	66.7	0.0

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.9	1.9	5.0	1.5

3.14.2. H2: Condiciones operativas normales: Muelle Interior

Resumen de Fuerzas y Momentos				
	F_H [ton]	F_V [ton]	M_V [ton·m]	M_E [ton·m]
Peso propio	0.0	454.3	0.0	3066.8
Cargas muertas	0.0	85.4	0.0	789.3
Cargas hidráulicas	17.5	-183.3	1464.0	0.0
Empuje del	51.2	22.1	358.8	275.9



terreno				
Sobrecargas de operación	9.2	27.4	91.5	195.9
Sobrecargas de almacenamiento	0.1	0.0	0.0	0.4
Sobrecargas de manipulación	13.6	59.4	130.7	208.0
Tiro de bolardo	6.0	0.0	120.0	0.0
Oleaje	7.2	0.0	51.2	0.0

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
3.1	2.0	6.1	1.7

3.14.3. H3: Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo: Muelle Exterior

Resumen de Fuerzas y Momentos				
	F_H [ton]	F_V [ton]	M_V [ton·m]	M_E [ton·m]
Peso propio	0.0	504.0	0.0	3402.2
Cargas muertas	0.0	89.3	0.0	840.5
Cargas hidráulicas	19.2	-200.7	1615.3	0.0
Empuje del terreno	62.0	26.7	479.2	334.3
Sobrecargas de operación	10.1	27.8	110.7	200.8
Sobrecargas de almacenamiento	0.4	0.2	0.5	2.2
Sobrecargas de manipulación	21.4	72.2	226.2	252.6
Tiro de bolardo	0.0	0.0	0.0	0.0
Oleaje	53.1	0.0	425.4	0.0

Coeficientes de Seguridad			
---------------------------	--	--	--



CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.2	1.8	3.3	1.8

3.14.4. H4: Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo: Muelle Interior

Resumen de Fuerzas y Momentos				
	F_H [ton]	F_V [ton]	M_V [ton·m]	M_E [ton·m]
Peso propio	0.0	454.3	0.0	3066.8
Cargas muertas	0.0	85.1	0.0	785.9
Cargas hidráulicas	16.7	-175.1	1393.6	0.0
Empuje del terreno	51.6	22.3	365.7	278.4
Sobrecargas de operación	9.2	27.4	91.5	195.9
Sobrecargas de almacenamiento	0.1	0.0	0.0	0.4
Sobrecargas de manipulación	19.4	72.2	186.5	252.6
Tiro de bolardo	0.0	0.0	0.0	0.0
Oleaje	45.9	0.0	318.0	0.0

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.4	1.9	4.2	1.9

3.15. Coeficientes de seguridad con sismo

3.15.1. H5: Condiciones de Trabajo Extremas con Sismo: Muelle Exterior

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.3	1.6	3.7	1.6



3.15.2. H6: Condiciones de Trabajo Extremas con Sismo: Muelle Interior

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.5	1.8	4.8	1.5

3.15.3. H7: Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a Sismo: Muelle Exterior

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.0	1.5	2.9	1.6

3.15.4. H8: Condiciones de Trabajo Excepcionales debidas a Sismo: Muelle Interior

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.2	1.7	3.9	1.7

3.16. Coeficientes de seguridad con tsunami

3.16.1. H9: Condiciones Trabajo Excepcionales debidas a Tsunami: Muelle Exterior

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.1	1.7	3.1	1.7



**3.16.2. H10: Condiciones Trabajo Excepcionales debidas a Tsunami:
Muelle Interior**

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.3	1.9	4.0	1.9

3.17. Coeficientes de seguridad para PLEAMAR

3.17.1. H11: Condiciones de trabajo operativas normales: Muelle Exterior

Resumen de Fuerzas y Momentos				
	F_H [ton]	F_V [ton]	M_V [ton·m]	M_E [ton·m]
Peso propio	0	504.0235	0	3402.1589
Cargas muertas	0	90.62	0	857.685
Cargas hidráulicas	23.247	-242.9762	1991.8164	0
Empuje del terreno	60.1616	25.9512	446.6552	324.3897
Sobrecargas de operación	10.0658	27.7874	110.7234	200.8085
Sobrecargas de almacenamiento	0.4	0.1725	0.4592	2.1566
Sobrecargas de manipulación	15.0163	59.4292	158.5721	208.002
Tiro de bolardo	6	0	132	0
Oleaje	9.4374	0	90.2872	0

Coeficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.6	1.7	4.6	1.4

3.17.2. H12: Condiciones operativas normales: Muelle Interior



Resumen de Fuerzas y Momentos				
	F_H [ton]	F_V [ton]	M_V [ton·m]	M_E [ton·m]
Peso propio	0	454.3336	0	3066.7518
Cargas muertas	0	86.42	0	803.085
Cargas hidráulicas	20.787	-217.3512	1762.0011	0
Empuje del terreno	49.7933	21.4788	336.8649	268.4844
Sobrecargas de operación	9.1507	27.3927	91.5069	195.8744
Sobrecargas de almacenamiento	0.0703	0.0303	0.0339	0.3793
Sobrecargas de manipulación	13.6192	59.4292	130.7439	208.002
Tiro de bolardo	6	0	120	0
Oleaje	8.5004	0	72.263	0

Coefficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
2.8	1.8	5.6	1.5

3.17.3. H13: Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo: Muelle Exterior

Resumen de Fuerzas y Momentos				
	F_H [ton]	F_V [ton]	M_V [ton·m]	M_E [ton·m]
Peso propio	0	504.0235	0	3402.1589
Cargas muertas	0	90.98	0	862.365
Cargas hidráulicas	24.354	-254.5075	2096.8384	0
Empuje del terreno	59.9132	25.844	441.7072	323.0501
Sobrecargas de	10.0658	27.7874	110.7234	200.8085



operación				
Sobrecargas de almacenamiento	0.4	0.1725	0.4592	2.1566
Sobrecargas de manipulación	21.4233	72.1713	226.2296	252.5994
Tiro de bolardo	0	0	0	0
Oleaje	67.7245	0	694.6899	0

Coefficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
1.8	1.4	2.0	1.4

3.17.4. H14: Condiciones de Trabajo Extremas sin Sismo: Muelle Interior

Resumen de Fuerzas y Momentos				
	F_H [ton]	F_V [ton]	M_V [ton·m]	M_E [ton·m]
Peso propio	0.0	454.3	0.0	3066.8
Cargas muertas	0.0	85.1	0.0	785.9
Cargas hidráulicas	16.7	-175.1	1393.6	0.0
Empuje del terreno	51.6	22.3	365.7	278.4
Sobrecargas de operación	9.2	27.4	91.5	195.9
Sobrecargas de almacenamiento	0.1	0.0	0.0	0.4
Sobrecargas de manipulación	19.4	72.2	186.5	252.6
Tiro de bolardo	0.0	0.0	0.0	0.0
Oleaje	45.9	0.0	318.0	0.0

Coefficientes de Seguridad			
CS Deslizamiento	CS Vuelco	CS Hundimiento	CS Vuelco Plástico
1.9	1.5	2.7	1.5



ANEXO IX

ANÁLISIS AMBIENTAL PRELIMINAR

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
2.ANÁLISIS AMBIENTAL DEL MEDIO.....	2
2.1. Área de trabajo.....	2
2.2. Análisis del medio.....	5
2.2.1. Factores del medio marino.....	6
2.2.2. Factores del medio terrestre.....	7
2.2.3. Factores del medio social.....	9
2.2.4. Valoración de factores.....	10
2.3. Campañas de campo	11
2.3.1. Campaña ambiental	12
2.3.2. Campaña hidrodinámica	13
3.EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS ALTERNATIVAS DE PROYECTO	14
3.1. Breve descripción de las alternativas de proyecto	14
3.2. Identificación de impactos	17
3.3. Descripción y valoración de impactos.....	23
3.3.1. Impactos sobre el medio marino.....	25
3.3.2. Afección a la playa de Valdelagrana y las marismas del Río San Pedro.....	27
3.3.3. Impactos sobre el medio atmosférico.....	33
3.3.4. Impactos sobre el medio perceptual.....	33
3.3.5. Impactos sobre el medio social.....	34
3.4. Ordenación de alternativas.....	35
3.4.1. Selección de criterios.....	35
3.4.2. Selección de métodos.....	37
3.5. Conclusiones	40
3.5.1. Consideraciones ambientales	40
3.6. Medidas de mejora ambiental	42
3.6.1. Medidas preventivas y correctoras de los impactos sobre la calidad de las aguas marinas durante el dragado.....	42
3.6.2. Medidas dirigidas a mejorar los efectos positivos de las operaciones de dragado	42
3.6.3. Medidas preventivas y correctoras de los impactos derivados del relleno de la explanada.....	43
3.6.4. Medidas de protección del patrimonio cultural.....	43
3.6.5. Medidas de protección ante los impactos derivados de la actividad portuaria	43

3.7. Plan de Vigilancia Ambiental.....	43
3.7.1. Actuaciones preliminares.....	44
3.7.2. Control de calidad de las aguas marinas	44
3.7.3. Control del transporte y vertido del material de dragado	44
3.7.4. Control de las afecciones al patrimonio cultural.....	44
3.7.5. Control de las afecciones derivadas de la actividad portuaria	44



1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este documento es la redacción de un Análisis Ambiental Preliminar para el proyecto de la Futura Terminal de Contenedores del Puerto de la Bahía de Cádiz, donde se considera la dimensión ambiental de este proyecto. En él se hará una breve descripción de la propuesta de alternativas y se realizará la identificación y valoración de los principales impactos que sobre el medio ejercerían las alternativas consideradas, de tal forma que en el proceso de toma de decisión se conozcan y se tengan en cuenta los impactos críticos no admisibles que ocasionan cada una de ellas.

Los objetivos específicos del presente estudio son:

- Recopilación de información ambiental del entorno en el que se ubicaría el proyecto
- Evaluación de la información recopilada
- Identificación y valoración preliminar de los impactos más relevantes de cada una de las alternativas
- Selección de criterios ambientales críticos y no críticos para rechazar alternativas con impactos ambientales críticos
- Ordenación de alternativas en función de su comportamiento ambiental en base a métodos multicriterio



2. ANÁLISIS AMBIENTAL DEL MEDIO

2.1. Área de trabajo

El área de ubicación donde se encuentra la actuación a considerar en este documento es la Bahía de Cádiz. Esta bahía se encuentra situada en el sector oriental del Golfo de Cádiz, al Este de la línea imaginaria que une Punta Candor (Rota) y el Castillo de Sancti Petri, (Chiclana).

En la Bahía de Cádiz se pueden distinguir varios sectores:

- Bahía Externa, situada al N del Estrecho de Puntales, y conectada directamente al Océano Atlántico a través de las más de 5 millas que separan Punta del Sur de Punta Morena. A esta parte de la Bahía se asoman las poblaciones de Cádiz y el Puerto de Santa María. Desembocan en este sector los ríos Guadalete y San Pedro. En este entorno se pueden encontrar marismas y zonas inundables, ambientes que dan un alto valor ambiental a la zona.
- Sector Central, que se corresponde con el Estrecho de Puntales. Se trata de una franja que conecta la Bahía Externa con la Interna y que se corresponde con el área marina situada entre el bajo de la Cabezuela y las costas orientales de la ciudad de Cádiz.
- Bahía Interna, situada al Sur y Suereste del Estrecho de Puntales, bañando las costas de San Fernando y Puerto Real. Las marismas también están presentes en esta zona.



Figura 1. Provincias de la Bahía de Cádiz

Por el alto valor ecológico y paisajístico de las zonas naturales de esta región, playas, marismas, dunas y pinares costeros entre otros, así como por la flora y la fauna que albergan estos ambientes, se constituye en 1989 el Parque Natural de la Bahía de Cádiz, con una superficie total de 10.000 hectáreas, que también es zona de especial protección para las aves (zona ZEPA) y forma parte del lugar de interés comunitario (LIC) denominado Bahía de Cádiz. El área sumergida de Bahía de Cádiz da lugar al LIC Fondos marinos de la Bahía de Cádiz.

Los términos municipales que se asientan a las orillas de la bahía son Cádiz, Puerto Real, San Fernando, Chiclana de la Frontera y El Puerto de Santa María. Constituyen una aglomeración urbana de gran importancia en Andalucía, con más de 400000 habitantes en su conjunto, que se ve incrementada en verano por la afluencia de turistas. Las extensas playas de arena existentes en la zona, como son las de Valdelagrana, la Puntilla y Vistahermosa, constituyen un reclamo turístico y también una importante fuente de ingresos. La actividad militar, la acuicultura y la industrial relacionada con la construcción de barcos y aeronáutica son otras actividades económicas de interés, si bien el desempleo es uno de los principales problemas de la zona. En tiempos pretéritos, el comercio con América hizo de esta bahía uno de los principales puertos del mundo al ser el punto por el que las mercancías entraban y salían de Europa.



Figura 2. Zona de estudio

Se puede afirmar que la bahía natural de Cádiz, albergó en sus orillas un puerto o centro de actividad portuaria importante desde la fecha de la fundación de la actual ciudad de Cádiz. Por tanto, el papel como puerto natural de la Bahía de Cádiz es al menos tan antiguo como el poblamiento de este arco litoral. A lo largo de los siglos se ha producido una transformación del paisaje de la Bahía al hilo de los avances tecnológicos, pero es en el siglo XX cuando se produce la consolidación de la zona como una bahía portuaria.

En la actualidad el Puerto de la Bahía de Cádiz está estructurado en cuatro zonas:

- Dársena de Cádiz-ciudad (pasajeros, comercial y pesquera).
- Dársena de Cádiz-Zona Franca (comercial).
- Instalaciones de Puerto Real-Cabezuela (comercial).
- El Puerto de Santa María (comercial y pesquera).

Y además existen instalaciones de particulares, en régimen de concesión administrativa:



- Instalaciones para construcción y reparación de buques de NAVANTIA en Puerto Real y Cádiz
- Planta Off-Shore de Dragados y Construcciones en Puerto Real
- Instalaciones dedicadas a la náutica y la vela de: R.C. Náutico de Cádiz y Puerto América en Cádiz y R.C. Náutico y Puerto Sherry en el Puerto de Santa María.

2.2. Análisis del medio

Para poder conocer el entorno en el que se enmarcan las alternativas consideradas se ha realizado un análisis exhaustivo del medio, en el que se han tenido en cuenta tanto los elementos como los procesos que ocurren en el entorno de la Bahía de Cádiz. Para ello se han estudiado factores atmosféricos, marinos, terrestres y pertenecientes al medio social en base a registros bibliográficos y campañas de campo específicamente realizadas para conocer la situación actual de los elementos y procesos en los que la actuación propuesta podría tener incidencia. Los factores a tener en cuenta son:

- Medio atmosférico
 - Clima
 - Calidad del aire
- Medio marino
 - Clima marítimo
 - Dinámica litoral
 - Geomorfología costera y de plataforma
 - Calidad de las aguas
 - Biología marina
- Medio terrestre
 - Unidades funcionales ambientales
 - Espacios naturales protegidos
 - Hidrología
 - Vegetación
 - Fauna
- Medio social
 - Población
 - Economía
 - Infraestructuras



- Patrimonio arqueológico sumergido
- Paisaje

Del análisis realizado, se exponen aquí los principales resultados obtenidos, haciendo hincapié en aquellos factores que, por sus características ambientales y/o sociales, presentan una especial importancia.

2.2.1. Factores del medio marino

Clima marítimo: Del análisis de los datos de la zona se deduce que las alturas de ola que predominan en la zona son inferiores a los 3 m (están presentes durante aproximadamente un 95% del tiempo) y que los periodos más frecuentes son los inferiores a 14s, aunque tienen una mayor variabilidad. En cuanto a su dirección, el oleaje procede principalmente de los sectores WSW, W y WNW.

Dinámica litoral: La dinámica y transporte sedimentario que se genera en este área afecta y se ve afectado por todo lo que ocurre en el Golfo de Cádiz. Los sedimentos que llegan a la Bahía proceden de los ríos Guadalete y San Pedro, del intercambio de agua entre la Bahía Interna y la Externa y de la erosión de playas y marismas. También hay que destacar la existencia de una transferencia sedimentaria entre las zonas litorales y la plataforma continental. El sistema hidrodinámico principal que determina el transporte y distribución de los sedimentos finos son las corrientes mareales, mientras que el oleaje y las corrientes litorales son las encargadas de la erosión y transporte de los sedimentos más gruesos. En la Bahía Interior el fenómeno de la marea astronómica es el principal factor determinante de la existencia de corrientes. Las velocidades de la corriente son elevadas en el Estrecho de Puntales, siendo menores tanto en la Bahía Interna como en la Externa. Es por lo tanto el Estrecho de Puntales el agente configurador más importante del sistema de corrientes, al encauzar toda el agua entrante y saliente a la Bahía Interior.

Geomorfología costera y de plataforma: La Bahía presenta una batimetría de pendientes suaves en general, salvo en la zona de bajos como son los de la Galera, el Diamante y Los Puercos. Las pendientes más acusadas están presentes en el canal de navegación del Puerto de Cádiz, donde se alcanzan profundidades de hasta 15 m. El Aculadero, La Puntilla y Valdelagrana son las playas de la zona, todas ellas pertenecientes al término municipal de El Puerto de Santa María. Esta última playa se localiza en un antiguo cordón litoral que discurre entre la desembocadura del río Guadalete y la desembocadura del río San Pedro. Tiene una longitud de



más de 7000 m y una anchura de aproximadamente 1500 m. Es de destacar la presencia de dunas embrionarias de escasa altura fijadas por vegetación. En torno a 1600 m de este cordón litoral se encuentran urbanizados, correspondiéndose con el tramo más cercano al El Puerto de Santa María, estando el resto en estado natural.

Calidad de las aguas: Debido a la acción de las mareas se produce un intercambio de aguas superficiales entre la Bahía Externa y el Golfo de Cádiz siendo su tasa de renovación diaria del orden del 40%. Episodios de precipitación conllevan un aumento de los nutrientes y los sólidos en suspensión en la zona, aportados por los ríos Guadalete y San Pedro. En cuanto al fitoplancton, las especies dominantes pertenecen a las diatomeas, aunque en determinadas épocas son sustituidas por los dinoflagelados. El bentos de la zona no presenta una gran diversidad ni tampoco la densidad de individuos es muy elevada, siendo el grupo más abundante los poliquetos. En cuanto a los metales pesados, las concentraciones de estos son en general bajas, a excepción del manganeso y el cobre. En puntos próximos a la desembocadura del Guadalete es donde se alcanzan las concentraciones más elevadas de estos metales y de carbono orgánico total.

Biología marina: Es de destacar la existencia de praderas de la fanerógama *Cymodocea nodosa* y el alga verde *Caulerpa prolifera* frente a la playa de Valdelagrana y la parte norte de la Cabezuela, aunque su extensión actual no está bien delimitada. En cuanto a la fauna, la Bahía de Cádiz alberga poblaciones de más de 60 especies de peces y 81 de macroinvertebrados, fundamentalmente crustáceos y moluscos. Entre estos últimos destacan por su interés comercial la chirla, navaja y coquina, que se localizan principalmente en la zona intermareal de la playa de Valdelagrana. Especies representativas de peces son la dorada, lenguado, lubina, baila, lisas, serranillo y sapillo.

2.2.2. Factores del medio terrestre

Unidades funcionales ambientales: Las unidades funcionales ambientales más representativas de la Bahía de Cádiz son las marismas, si bien muy pocas se conservan en su estado natural y muchas fueron desecadas para convertirlas en tierras de cultivo, y el litoral, que alterna los tramos altos con acantilados y pequeñas playas, con otros bajos formados por playas abiertas y zonas de fangales. Globalmente el litoral aparece como una sucesión de zonas urbanizadas y naturales, existiendo incluso pinares, donde los crecimientos urbanos e industriales han ocupado buena parte de la costa. Los arenales se sitúan más hacia el interior, englobando los terrenos de morfología plana o ligeramente tendida que configuran la orla intermedia de la Bahía entre el litoral y las campiñas y áreas forestales.



Espacios naturales protegidos: Dentro de la Bahía Externa de Cádiz se han propuesto para formar parte de la Red Natura 2000 el Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) ES 6120009 “Fondos Marinos de la Bahía de Cádiz”. Los hábitats principales que describen este LIC son ríos y estuarios sometidos a la dinámica mareal, bancos de arena o de fango y lagunas, incluidas las salinas de producción. Otro LIC de la zona, es el denominado ES 0000140 “Bahía de Cádiz”. Los límites de este LIC coinciden con los del Parque Natural de la Bahía de Cádiz, declarado por la Ley 2/1989, de 18 de julio e incluye la playa de Valdelagrana y las marismas asociadas al río San Pedro. Esta área también se constituye como una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) coincidiendo sus límites con los del parque natural y como Humedal de Importancia Internacional, formando parte de las listas de humedales Ramsar.

Hidrología: El río que mayor volumen de agua, sedimentos, nutrientes y contaminantes aporta a la zona es el río Guadalete, perteneciente a la cuenca hidrográfica Guadalete-Barbate. El río San Pedro constituye en la actualidad un brazo de mar ya que su cauce se interrumpió varios kilómetros río adentro con motivo de las obras de desecación de esta zona de marisma. En su margen derecha se localiza una red de caños que drenan el agua de las mareas desde las marismas de los Toruños al río San Pedro, siendo los caños más importantes los del Bote y el Caserón que atraviesan la playa de Valdelagrana.

Vegetación: Las dunas embrionarias de la playa de Valdelagrana son colonizadas por especies pioneras como *Salsola kali* y *Cakile maritima*, apareciendo a continuación las gramíneas perennes *Elymus farctus* y *Ammophila arenaria*. En las marismas que se sitúan tras este cordón, los límites del slikke se solapan con los del schorre presentando especies de ambos medios. En la zona de transición entre el slikke alto y el schorre aparecen las primeras especies terrestres *Spartina maritima* y *Salicornia ramosissima*. En niveles topográficos mayores aparecen especies características como *Sarcocornia perennis* seguida de *S. fruticosa*. En la playa de Valdelagrana también existe el pinar-sabinar de la Algaida.

Fauna: La Bahía de Cádiz es uno de los lugares fundamentales de reproducción y alevinaje de los peces e invertebrados del litoral suratlántico ibérico y constituye un hábitat fundamental de reposo y alimentación para numerosas aves acuáticas, tanto en invernada como en sus rutas migratorias, y como lugar de cría de algunas especies de aves limícolas. El citado Parque Natural alberga de modo habitual poblaciones superiores a los 20.000 individuos de alrededor de 70



especies de aves acuáticas. Entre las especies protegidas cabe destacar la cigüeña negra (*Ciconia nigra*) y el fartet (*Lebias iberia*) por ser especies catalogadas en peligro de extinción.

2.2.3. Factores del medio social

Población: Los municipios que se asoman a la Bahía de Cádiz son Cádiz capital, El Puerto de Santa María, Puerto Real y San Fernando. Entre ellos constituyen una aglomeración urbana de 350000 habitantes, siendo Cádiz capital la ciudad que más habitantes presenta, con cerca de 150000 habitantes y una densidad de 192 hab/km². La población de esta aglomeración se ha incrementado en más de un 200% en el último siglo. La población de todos estos municipios se incrementa considerablemente en verano, debido a una gran afluencia de turistas.

Economía: La situación estratégica que posee la Bahía de Cádiz la ha convertido desde tiempos muy antiguos en un puerto natural de entrada y salida de mercancías, lo que permitió un gran auge económico de esta zona en épocas pasadas. Sin embargo, la situación económica de la Bahía de Cádiz no atraviesa hoy uno de sus mejores momentos. La tasa de paro de la zona es muy elevada. En lo que a la industria se refiere, ésta está relacionada principalmente con la acuicultura y producción salinera, la industria aeronáutica, manufacturera y los astilleros e industrias de materiales auxiliares para ellos. La agricultura y ganadería son casi inexistentes en estos municipios, siendo la pesca la actividad del sector primario más frecuente. El Puerto de Cádiz contribuye al funcionamiento y competitividad de las grandes industrias de la Bahía y aglutina en su entorno a un conglomerado de empresas de fabricación de bienes de equipo y productos intermedios.

Infraestructuras: El desarrollo y la evolución de la red de infraestructuras en la Bahía de Cádiz ha estado condicionado por las características del medio físico, constituyendo la superficie de humedales y marismas el principal factor limitante. Existen actualmente dos accesos a la ciudad de Cádiz como son el puente Carranza y el acceso desde San Fernando por la carretera de Andalucía. Se ha proyectado la construcción de un tercer acceso que una Cádiz con la Cabezuela a través de un puente, obras que comenzarán en breve. El Puerto de Santa María y Cádiz y Rota también se unen a través del mar por la puesta en marcha de estaciones marítimas para el transporte de pasajeros. Las instalaciones portuarias en la Bahía actúan dentro de las redes de transporte, producción y distribución a escala internacional, atrayendo y conservando cargas y promoviendo actividades de comercio, transporte y logística.



Patrimonio arqueológico: Dada la gran cantidad de actividad que ha tenido el Puerto de Cádiz desde tiempos fenicios, la Bahía es considerada como un gran yacimiento estando considerada como Zona de Servidumbre Arqueológica. Los restos que se encuentran en la misma se deben principalmente al naufragio de navíos, sobre todo en la época moderna, relacionado con el comercio con América. Las zonas donde están los restos más importantes y que aspiran a convertirse en Zonas Arqueológicas son el canal de entrada al Puerto de Cádiz, los bajos del noroeste de la ciudad, la desembocadura del río Guadalete, la zona costera de Puerto Real y las zonas portuarias de la ciudad de Cádiz.

Paisaje: El paisaje de la Bahía tiene fundamentalmente un carácter humano, estando ocupado por elementos de tipo urbano e industrial, si bien existen zonas naturales como es la zona sur de la playa de Valdelagrana. Las dársenas que el Puerto de la Bahía de Cádiz tiene en la ciudad de Cádiz se pueden ver tanto desde la propia ciudad como desde las poblaciones que se sitúan al otro lado de la bahía, si bien las infraestructuras portuarias están asimiladas al paisaje circundante, integradas en su entorno.

2.2.4. Valoración de factores

La calidad del medio natural o de un elemento del mismo se entiende como el grado de excelencia, el mérito para no ser alterado o destruido, o de otra manera, el mérito para que su esencia, su estructura actual se conserve [Ministerio de Medio Ambiente, 2000 #20]. El concepto de calidad puede estar relacionado con conceptos como el de valor naturalístico, que es el mérito de una unidad debido al estado de conservación de los ecosistemas que contiene o a la presencia de especies notables, y al de valores perceptuales y culturales, que abarcan aquellos valores subjetivos derivados del paisaje. En estos casos el análisis de la calidad va unido a aspectos tales como:

- Naturalidad
- Fragilidad
- Diversidad
- Singularidad
- Rareza
- Productividad
- Presencia de especies protegidas
- Presencia de recursos
- Grado de aceptación social



En el caso de la Bahía de Cádiz, y tras el análisis del medio realizado, se pueden identificar dos áreas de calidad muy diferentes:

- Espacios naturales protegidos. Aquellas áreas con mayor naturalidad, fragilidad, diversidad y singularidad, en la que habitan especies amenazadas o protegidas, que se corresponden con los espacios naturales ya protegidos por la Junta de Andalucía o propuestos para entrar en la lista de los Lugares de Interés Comunitario de la red Natura 2000. Su valor, por tanto está reconocido oficialmente y se han tomado las medidas legislativas oportunas para seguir manteniendo sus características principales e incluso, si es posible, aumentar su calidad ambiental.
- Suelo de uso residencial e industrial. Por otra parte, rodeando a estas zonas naturales de usos tradicionales, existe otra región que soporta grandes alteraciones y modificaciones realizadas por el hombre, en la que los principales usos del suelo son residencial, industrial y turístico, siendo prácticamente nula la presencia de recursos naturales y de vida salvaje con interés para ser preservada.

De especial importancia para las actuaciones que nos ocupan son:

- Existencia de zonas de alto valor ecológico como el Parque Natural de la Bahía de Cádiz en la región de estudio.
- Importancia de la circulación mareal en el mantenimiento de las condiciones ambientales del entorno, y en especial en los flujos biogeoquímicos en las zonas inundables y la Bahía Interior.
- Disminución de la calidad ambiental de la Bahía por efecto de las actuaciones humanas realizadas a lo largo del tiempo.
- Alta tasa de paro en la región.
- Papel fundamental del puerto como motor de la economía regional.
- Existencia de Zonas de Servidumbre Arqueológica en el entorno.

2.3. Campañas de campo

Para completar la información sobre el medio donde se ubican las actuaciones descritas en este documento, se han realizado campañas de campo específicas para la obtención de parámetros tanto hidrodinámicos como del medio bentónico y pelágico. Es de destacar, que el objetivo general a medio plazo de estas campañas es el desarrollo de un modelo ecológico e hidrodinámico de toda la Bahía de Cádiz.



A continuación se presenta un resumen de las campañas efectuadas.

2.3.1. Campaña ambiental

En el Anejo XIII se describe la campaña DÁRSENA, que se desarrolló en aguas de la Bahía de Cádiz en los días 20 y 22 de Febrero de 2007 a bordo del barco “Antonio Vidal”, perteneciente al Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (CSIC). El principal objetivo de esta campaña es describir las características del medio químico y biológico de la zona marina contigua y al este de la dársena comercial del puerto de Cádiz.

La campaña interdisciplinar que se ha llevado a cabo ha consistido en dos muestreos bien diferenciados. El primero de ellos, con 12 estaciones de muestreo, se desarrolló para la identificación de los organismos bentónicos y la concentración de metales pesados en el mismo sustrato; y el segundo muestreo, se ha desarrollado para el estudio de parámetros hidrológicos y biogeoquímicos de la columna de agua.

La conclusión general de los datos recogidos y analizados en la campaña de campo apunta a que la zona del saco externo de la bahía que coincide con el área de futura expansión del dique de levante presenta síntomas evidentes de degradación y es el área menos sensible desde la perspectiva medioambiental de aquellas que fueron analizadas en el estudio. Los elementos que evidencian esta conclusión son:

- 1) La fauna bentónica presentó en el conjunto del área analizada valores bajos de biomasa y de riqueza específica. Estas características, baja biomasa y riqueza específica, son especialmente evidentes en el bentos del sector sur, que coincide con el área cercana a la planta Delta.
- 2) Los sedimentos analizados tienen concentraciones bajas de contaminantes que no superan la mitad de las previstas en la categoría I de la ROMs excepto para el cadmio. Dentro de ese marco general de valores bajos de contaminantes, las mayores concentraciones de metales se encontraron en los sedimentos cercanos a la planta Delta.
- 3) El muestreo del ciclo mareal en el sistema pelágico mostró síntomas evidentes de estancamiento en la masa de agua de la región cercana a la planta Delta. Frente a la importante renovación que ocurre en la zona de la canal y al norte de la misma, las aguas cercanas a la planta Delta no son tan sensibles al ciclo mareal. Por tanto, esta zona



concentra elementos y propiedades de influencia humana que no se renuevan con la rapidez que lo hacen otras zonas de la bahía ante el forzamiento que impone la marea.

2.3.2. Campaña hidrodinámica

El anejo XIII se describen los detalles de la campaña de campo hidrodinámica realizada en el marco de este proyecto, cuyo objetivo ha sido caracterizar la propagación del oleaje y las corrientes en la Bahía de Cádiz. Se instalaron 4 instrumentos capaces de medir tanto la velocidad de la corriente en toda la columna de agua como el espectro direccional del oleaje. Los instrumentos utilizados han sido los perfiladores de corriente basados en el efecto *doppler* Aquadopp y AWAC, de la empresa Nortek AS. Estos datos están siendo utilizados para la calibración/validación de los modelos numéricos hidrodinámicos empleados en el estudio.

Tras realizar medidas durante el periodo comprendido entre el 12 de Febrero y el 9 de Abril de 2007, se ha procedido a la realización de un control de calidad para eliminar los datos no válidos y un posterior procesado de la información válida.

De los resultados obtenidos del estudio de la marea astronómica cabe resaltar que las velocidades máximas alcanzadas en el periodo de medida son de 1,05 m/s en el canal de navegación, velocidad que se reduce notablemente en la zona al abrigo del dique de Levante.

En cuanto a la propagación de oleaje se ha estudiado la relación existente entre un punto exterior de la bahía y la zona abrigada existente entre el dique de Levante y el muelle 5. El coeficiente de propagación, definido como la relación entre la altura de ola significativa en el exterior de la bahía y el punto interior, tiene un valor medio comprendido entre 0.277 y 0.217, dependiendo de la dirección de procedencia del oleaje. Estos oleajes, además cambian su dirección de procedencia, pasando de ser oleajes del sector Oeste a ser del sector Norte. Esta variación es debida a los efectos de refracción y difracción del oleaje inducidos por la batimetría y los contornos.



3. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS ALTERNATIVAS DE PROYECTO

3.1. Breve descripción de las alternativas de proyecto

Uno de los objetivos de este estudio es hacer compatible los objetivos técnicos y socioeconómicos con los valores ambientales del entorno, por lo que la dimensión ambiental del mismo ha sido considerada desde el principio, desechando a priori las actuaciones que pudieran causar impactos críticos en el medio. Las 3 alternativas de proyecto planteadas para la construcción de la futura Terminal de Contenedores, son sensiblemente homogéneas desde un punto de vista técnico con las siguientes características operacionales:

- Máxima seguridad y operatividad de las instalaciones para garantizar la competitividad de la instalación.
- Mínima interferencia con la actividad portuaria en las instalaciones existentes.
- Área de almacenamiento para contenedores entre 35 - 40 Ha.
- Anchura media de la Terminal entre 350 - 400 m.
- Longitud mínima de la línea de atraque: 800 m.
- Calado de la línea de atraque entre 13 - 15 m.

Las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM 0.0) recomiendan unos valores mínimos de la vida útil y la operatividad, así como la máxima probabilidad de fallo en la vida útil de la obra en función de la repercusión económica y la repercusión social y ambiental de la instalación. Estos valores están íntimamente ligados con la competitividad de la Terminal, ya que si los requerimientos de seguridad y operatividad no están garantizados, se pierde competitividad en el mercado.

**Tabla 1: Requisitos de seguridad, servicio, uso y explotación.**

CARÁCTER GENERAL	Vida útil mínima	25 años
	Probabilidad máxima de fallo en ELU	0.10
	Probabilidad máxima de fallo en ELS	0.10
CARÁCTER OPERATIVO	Operatividad mínima	0.95
	Número medio de paradas al año	10
	Duración máxima probable de la parada	12 horas

Las 3 alternativas de proyecto consideradas son:

- Alternativa 1: “Exterior Norte”. Consiste en la creación de una nueva dársena al Norte de la dársena comercial del Puerto de Cádiz compuesta por una obra de abrigo exterior con la bocana orientada hacia el Este. La futura Terminal de Contenedores estaría adosada a la Terminal de Contenedores existente.
- Alternativa 2: “Dique de Levante”. Consiste en la creación de una Terminal de Contenedores al E de la dársena comercial del Puerto de Cádiz, adosada al actual dique de Levante, con la línea de atraque principal en el exterior.
- Alternativa 3: “Cabezuela Oeste”. Consiste en la creación de una explanada al Oeste del Bajo de la Cabezuela, adosada a la frontera Norte de la Factoría de Dragados Off-Shore, con la línea de atraque al W.

La Figura 3 muestra la situación actual del Puerto de Cádiz, mientras que en la Figura 4 se representan las alternativas consideradas para el análisis y comparación. A continuación se exponen las principales características desde el punto de vista técnico de las 3 alternativas consideradas, cuyas dimensiones y geometría pueden variar sensiblemente a la luz de las conclusiones de estudios posteriores.



Figura 3: Situación actual del entorno del proyecto.

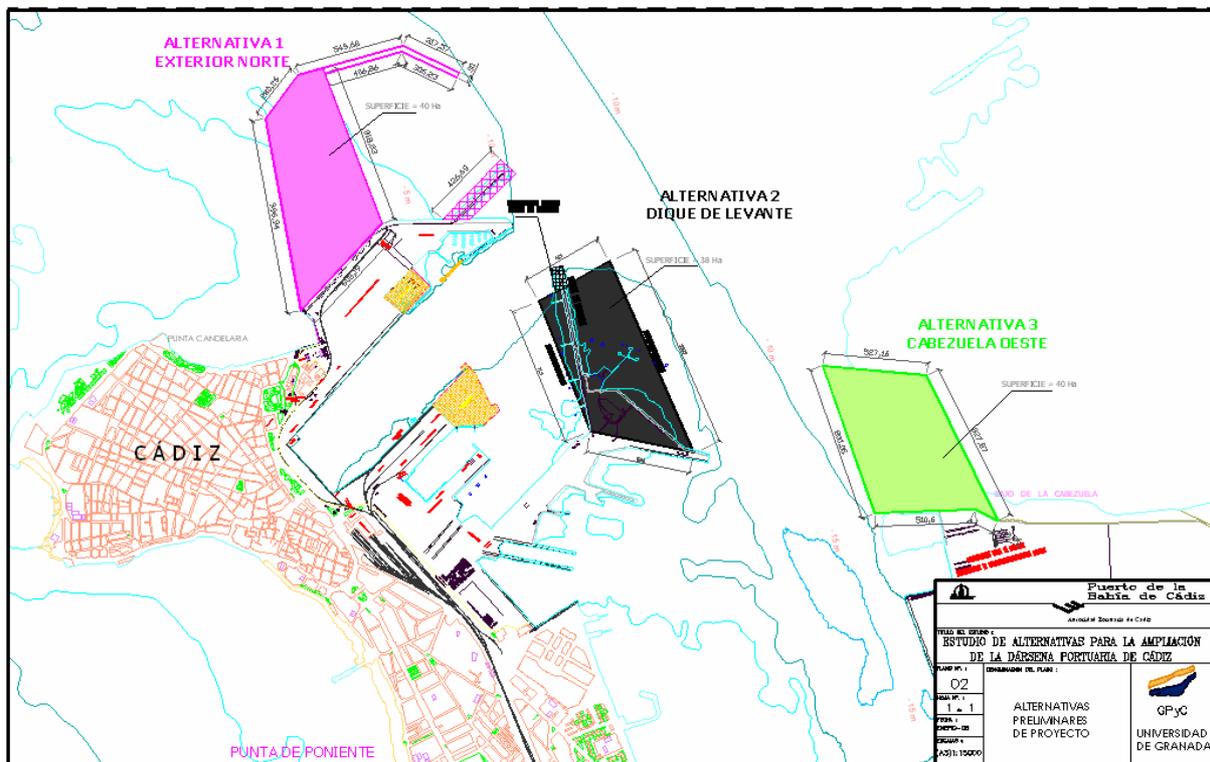


Figura 4: Alternativas de ampliación consideradas para el análisis.



3.2. Identificación de impactos

A continuación se realiza una identificación y descripción de las posibles interacciones, tanto negativas como positivas, que pueden tener lugar entre las acciones de las distintas alternativas y el medio en el que tendrían lugar dichas acciones. Además se realiza una valoración de dichos impactos en base a los criterios exigidos por la legislación vigente. Posteriormente se realiza una ordenación de las alternativas en función de su desempeño ambiental.

A la hora de plantear las posibles alternativas para la construcción de una nueva terminal de contenedores, y antes de realizar su formulación técnica, se ha procedido a eliminar a priori, y por lo tanto no considerar, todas aquellas opciones que pudieran ocasionar impactos críticos al entorno. Estos impactos son definidos como aquellos cuya magnitud es superior al umbral aceptable, produciéndose una pérdida permanente de la calidad de las condiciones ambientales sin posible recuperación, incluso con la adopción de medidas protectoras o correctoras (RD 1131/1988). Esto implica el tener que realizar una selección de los factores ambientales que por su interés ecológico, económico o social hagan que su desaparición o modificación no sea deseable. Los criterios empleados han sido ocupación de la línea de costa, alteración grave de la dinámica litoral y afección permanente al Parque Natural Bahía de Cádiz o a alguno de los elementos abióticos, bióticos o paisajísticos que lo componen. Una vez descartadas todas las opciones que pudieran dar lugar a este tipo de impactos, se procede a la selección de aquellas alternativas que en opinión de los técnicos de la Autoridad Portuaria, en acuerdo tácito con el equipo redactor de este documento, presentarían un buen comportamiento tanto técnico como ambiental.

Para lograr las metas propuestas se va a realizar una formulación de las hipótesis de impacto. Esto se ha llevado a cabo siguiendo un procedimiento matricial, donde se relacionan las acciones del proyecto potenciales de alterar el entorno con los elementos y procesos del mismo susceptibles de ser alterados.

Para la identificación de impactos se ha diferenciado entre la fase de construcción y la fase de explotación (fase de funcionamiento de la terminal).

- **Fase de construcción.** La construcción de la nueva Terminal de Contenedores conlleva cuatro operaciones básicas: 1) Construcción de obras de abrigo o mota de cierre perimetral, 2) Construcción de muelles, 3) Realización de dragados para alcanzar calados



de proyecto o suministro de material y 4) Relleno de explanada de almacenamiento. Por lo tanto, las posibles causas de impacto serán las derivadas de estas actividades básicas.

- **Fase de explotación.** En esta fase, la infraestructura creada y la actividad portuaria serán las posibles causas de impacto.

La identificación de los elementos y procesos ambientales susceptibles de ser alterados por las acciones de impacto se ha realizado de una manera sistemática, mediante la jerarquización de niveles, según el método Battelle:

- Primer nivel: categorías ambientales
- Segundo nivel: componentes ambientales
- Tercer nivel: indicadores ambientales

Las categorías, componentes e indicadores elegidos se exponen a continuación:

1. Medio marino

- a. Dinámica litoral
 - i. Oleaje
 - ii. Corrientes marinas
 - iii. Transporte de sedimentos
 - iv. Renovación de aguas de la Bahía Interna
- b. Calidad de las aguas
 - i. Oxígeno disuelto
 - ii. Turbidez
 - iii. Metales pesados y otros contaminantes
- c. Fauna marina
 - i. Plancton
 - ii. Bentos
 - iii. Necton
- d. Vegetación marina
 - i. Praderas

2. Medio terrestre

- a. Geomorfología de playas
 - i. Línea de costa, con especial atención a la playa de Valdelagrana
- b. Vegetación
 - i. Vegetación de las marismas del río San Pedro



- c. Fauna
 - i. Avifauna
- 3. Medio atmosférico**
 - a. Calidad del aire
 - i. Concentración de PM₁₀
 - ii. Otras emisiones a la atmósfera
- 4. Medio perceptual**
 - a. Paisaje
 - i. Calidad visual
- 5. Medio social**
 - a. Ámbito económico
 - i. Empleo
 - ii. Comercio
 - b. Ámbito cultural
 - i. Patrimonio sumergido

Las grandes áreas receptoras de impacto quedan delimitadas de la siguiente manera:

- **Medio marino:** Comprende la Bahía Externa de Cádiz, su plataforma y su litoral sumergido. Para determinados elementos y procesos del medio también hay que considerar la Bahía Interna y el Sector Central, ya que están comunicados diariamente debido a los flujos mareales.
- **Medio terrestre:** Se considerará el entorno más cercano a la Bahía de Cádiz, incluidas todas las playas, el territorio ocupado por las poblaciones de Cádiz, El Puerto de Santa María, Puerto Real y San Fernando, así como su área de influencia, y las zonas naturales colindantes a esta Bahía con influencia marina.
- **Medio atmosférico:** Se consideran las primeras capas de aire de la troposfera situadas sobre el medio marino y terrestre.
- **Medio perceptual:** Dado lo abierto de la bahía, hay que tener en cuenta que la introducción de cualquier elemento nuevo en el paisaje puede modificar la percepción visual de la Bahía de Cádiz.
- **Medio social:** Se consideran la población y las actividades económicas y sociales que tienen lugar en las poblaciones mencionadas anteriormente en el medio terrestre.



Para determinar las interacciones entre las acciones que pueden alterar el medio y factores del medio susceptibles de ser modificados se hará uso de una matriz de relación causa-efecto. Dado que todas las alternativas tienen fases y elementos similares, se realizará una única matriz para todas ellas. En este análisis de alternativas, el número de indicadores ambientales también es similar en todas ellas, habiendo sido elegidos un total de 20. La Tabla 2 representa una matriz en la que figuran las interacciones encontradas, comunes para todas las alternativas. Posteriormente, en la sección 3.4 se realiza un análisis más detallado de cada una de las alternativas y se procede a su ordenación en base a su capacidad potencial para producir impactos.

En esta matriz, las acciones del proyecto aparecen representadas en columnas, mientras que los indicadores del medio lo hacen en filas. En cada matriz se señalan las casillas en las que existe interacción entre las acciones y los factores del medio, lo que significa que puede existir un impacto. Se señalan sólo los efectos notables previsible y que pueden servir de criterios comparativos entre las distintas alternativas, efectos que se describen de forma más detallada en la siguiente sección.



Indicadores del medio			Acciones: Fase de construcción		Acciones: Fase de operación	
			Dragado	Relleno	Infraestructuras fijas	Actividad portuaria
Medio marino	Dinámica litoral	Oleaje				
		Corrientes marinas				
		Transporte sedimentos				
		Renovación de aguas				
	Calidad	Turbidez				
		Contaminantes				
	Fauna	Plancton				
		Bentos				
		Necton				
Vegetación	Praderas					
Medio terrestre	Geomorfología	Línea de costa				
	Vegetación	Vegetación marismas S. Pedro				
	Fauna	Avifauna				
Medio atmosférico	Calidad	Ruidos				
		Partículas				
		Otros contaminantes				
Medio perceptual	Paisaje	Calidad visual				
Medio social	Ámbito económico	Empleo				
		Comercio				
	Ámbito cultural	Patrimonio sumergido				

Tabla 2. Matriz de identificación de impactos



3.3. Descripción y valoración de impactos

En la Bahía Externa de Cádiz, el territorio colindante al mar disponible y adecuado para la creación de una nueva Terminal de contenedores es prácticamente inexistente por dos motivos fundamentales:

- El primero de ellos es que buena parte de la línea de costa que aún no ha sido sometida a actuaciones humanas pertenece a un espacio natural protegido de gran importancia ecológica y paisajística como es el Parque Natural de la Bahía de Cádiz.
- El segundo es relativo a la ocupación que se hace del resto del territorio no protegido, estando buena parte del mismo dedicado a uso urbano o industrial.

Como consecuencia de lo anterior cualquier incorporación de superficie emergida deberá ser generada ganándole terrenos al mar o mediante la reutilización de espacios portuarios en desuso.

La construcción y explotación de la Terminal de Contenedores podría dar lugar a alteraciones en el medio marino, medio terrestre, medio atmosférico, medio perceptual y medio social, pudiendo esta alteración ser positiva o negativa, y con una magnitud diferente en función de la alternativa propuesta.

La valoración de impactos permite determinar la gravedad o bondad de los impactos identificados. Dado que se está realizando un análisis de las alternativas del proyecto, para esta valoración se utilizará un método descriptivo, no sistemático, de nivel bajo, en el que los atributos signo, magnitud, importancia y sinergia del impacto, así como la importancia del factor ambiental afectado son los criterios evaluados. La gravedad de un impacto será mayor cuanto mayor sea su magnitud e importancia, y mayor sea la importancia del factor ambiental afectado. La ROM 5.0-06 (en redacción) ofrece una lista de los criterios señalados por la legislación como imprescindibles en la definición de los efectos de un impacto, así como otros comúnmente utilizados, junto con sus atributos y estados de presentación. Esta lista se presenta en la Tabla 3 y será utilizada para la valoración de los impactos.

Criterios	Atributos	Estados
Signo del impacto	Carácter	Positivo
		Negativo
Magnitud o intensidad del impacto	Grado de destrucción	Alto



		Medio
		Bajo
Importancia del impacto	Tipo de acción	Directo
		Indirecto
	Reversibilidad	Reversible
		Irreversible
	Momento	Inmediato
		Medio plazo
		Largo plazo
	Persistencia	Temporal
		Permanente
	Acumulación	Simple
		Acumulativo
	Recuperabilidad	Inmediata
		Medio plazo
		Mitigable
		Irrecuperable
	Periodicidad	Irregular
		Periódico
		Continuo
	Sinergia	Sinérgico
		No sinérgico
Extensión	Puntual	
	Parcial	
	Total	
	Crítico	
Importancia del factor afectado		Escasa
		Media
		Alta
		Muy alta

Tabla 3. Criterios, atributos y estados de efectos de impactos

A la vista de los estados de estos atributos se calificarán los impactos como:

- Compatible: aquel cuya regeneración es inmediata tras el cese de la actividad, y no precisa de prácticas protectoras o correctoras
- Moderado: aquel cuya recuperación no precisa de prácticas protectoras o correctoras intensivas, y en el que la consecución de las condiciones ambientales iniciales requiere corto tiempo



- Severo: aquel en el que la recuperación de las condiciones del medio exige la adecuación de medidas protectoras o correctoras, y en el que, aún con estas medidas, aquella recuperación precisa un periodo de tiempo dilatado

3.3.1. Impactos sobre el medio marino

El medio marino se puede ver afectado por la creación de una nueva Terminal de Contenedores tanto en su fase de construcción como en la de explotación.

Fase de construcción

En la fase de construcción las alteraciones en el medio marino vendrán causadas fundamentalmente por las operaciones de dragado y de relleno de la explanada.

Operaciones de dragado:

- **Dinámica litoral.** Las operaciones de dragado implican una variación en la batimetría de la zona con posibles alteraciones en las características del oleaje y las corrientes. Éstas tendrían un impacto positivo en la bahía interna, ya que la regularización de fondos y márgenes podría mejorar el intercambio de aguas en la Bahía al uniformizar el sistema de corrientes de marea y aumentar el prisma de marea, incrementando la calidad ambiental del entorno.
- **Calidad de aguas.** Las operaciones de dragado pueden dar lugar a la modificación de la calidad de las aguas, con efectos de tipo físico y químico. Los primeros pueden dar lugar a un aumento de la turbidez del agua, como consecuencia de la remoción de partículas, mientras que los segundos se originarían por la liberación de elementos químicos adsorbidos en los sedimentos. Se hace necesario la caracterización de los sedimentos a dragar según las Recomendaciones para la Gestión del Material Dragado en los Puertos Españoles. Sin embargo, el resultado de la caracterización de los sedimentos efectuados en varios proyectos de la zona hace suponer que el material pertenece a la categoría I, es decir que sus efectos químicos y biológicos sobre el agua de mar son prácticamente nulos, por lo que, según las citadas recomendaciones puede verterse libremente al mar sin efectos químicos perjudiciales sobre la flora y la fauna marina, aunque se contempla su aprovechamiento como relleno de la explanada.
- **Fauna y vegetación.** Del estudio sobre la biota marina llevado a cabo en la zona de estudio, se concluye que las comunidades bentónicas en esta zona poseen una diversidad específica baja y no se encuentra ninguna especie ni comunidad biológica protegida en la legislación europea, así como la existencia de praderas de fanerógamas marinas.



Los efectos derivados de las acciones a realizar durante las operaciones de dragado serán reversibles, puntuales en el tiempo y espacio y recuperables para la biota si se considera la turbidez y la resuspensión de materia orgánica desde el fondo. Estos efectos se consideran equiparables a los que se producen todos los años durante un temporal de poniente con fuertes lluvias.

Relleno de la explanada:

- **Calidad de aguas.** La creación de la explanada supone el vertido del material de relleno procedente, fundamentalmente, de las operaciones de dragado. El impacto se considerará compatible e incluso nulo, debido a la posible adopción de medidas protectoras.
- **Fauna y vegetación.** El relleno de la explanada de almacenamiento supone la ocupación y pérdida de fondo marino. En concreto, la alternativa Exterior Norte supone el enterramiento de la plataforma de abrasión actual constituida por roca ostionera. Se trata por tanto de substratos duros donde la biodiversidad animal y vegetal supera a otros fondos con substratos blandos en la Bahía. La alternativa Dique de Levante se extiende sobre la planta DELTA, una zona industrial degradada y en desuso. Debido a esta actividad, la flora y fauna en esta zona es escasa o nula. La alternativa Cabezuela Oeste se sitúa al borde de una pradera de la fanerógama *Cymodocea nodosa* y cerca de los bajos donde en el pasado se ha observado la existencia de colonias de aves protegidas. En caso de que la alternativa Cabezuela Oeste resultase elegida, habría que realizar un estudio específico de la extensión de las praderas y otros componentes de la biota en esa zona.

El relleno, en lo que a la ocupación de fondos se refiere, conlleva efectos permanentes, irreversibles, irrecuperables y continuos, cuya magnitud y la importancia del factor afectado dependerán de la alternativa escogida. La alternativa Dique de Levante presenta destrucción mínima del medio por situarse sobre los terrenos de la Planta DELTA, mientras que la alternativa Cabezuela Oeste es la que mayor grado de destrucción podría presentar por estar en una zona de biota sensible. Este impacto se podría clasificar como severo en el caso de la alternativa Cabezuela Oeste, compatible en la alternativa Exterior Norte y positivo en el caso de la alternativa Dique de Levante.



Fase de explotación

En la fase de explotación, las alteraciones en el medio marino vendrán causadas fundamentalmente por el obstáculo que pueden representar las infraestructuras fijas en el oleaje y las corrientes, así como la alteración de la calidad de las aguas debido a posibles vertidos de productos resultantes de operaciones portuarias.

Infraestructuras fijas:

- **Dinámica litoral.** La construcción de infraestructuras fijas puede ocasionar cambios en la relación que existe entre las aguas de la Bahía Externa y la Bahía Interna al disminuir o aumentar el área transversal en la que se produce el intercambio de agua, sobre todo en el área del Estrecho de Puntales. Los impactos derivados de las infraestructuras fijas tendrían signo negativo si disminuyen la tasa de renovación de aguas de la Bahía Interna y signo positivo si la aumentan. Este efecto sería continuo, permanente y directo. El impacto sería compatible para la alternativa Dique de Levante y moderado para la alternativa Cabezuela Oeste y la Exterior Norte.
- **Afección a playas.** El efecto que tendrían las distintas alternativas de la futura Terminal de Contenedores en las playas del entorno, en especial en la playa de Valdelagrana, se analiza en el siguiente apartado.

Actividad portuaria:

- **Calidad de aguas.** Superada la fase de construcción, la calidad del agua sólo podrá verse afectada por las labores propias de las operaciones marítimas que se realizan en los puertos. Las posibilidades de contaminación son muy escasas, ya que la nueva terminal creada se empleará para el transporte de contenedores, calificado como tráfico “limpio”. No obstante, un estricto cumplimiento de la vigente legislación sobre vertidos y los convenios internacionales firmados por España asegurarán una calidad aceptable en las inmediaciones de la nueva Terminal. Los vertidos por accidentes o negligencias en las aguas del puerto tendrían signo negativo y serían puntuales.

3.3.2. Afección a la playa de Valdelagrana y las marismas del Río San Pedro

Los principales impactos que podrían observarse en el medio terrestre provienen de la modificación de la línea de costa debido a la construcción de una nueva infraestructura. A su vez podrían producirse cambios en la dinámica marina asociada, lo que podría modificar el régimen



de energía del oleaje y las corrientes que existen en la zona. Cambios en la morfología sumergida o emergida, con especial atención a la playa de Valdelagrana o en el prisma de marea del Río San Pedro podrían ocasionar cambios en la vegetación y fauna existentes en las conocidas como marismas del Río San Pedro, que pertenecen al Parque Natural de la Bahía de Cádiz y a la zona ZEPA del mismo nombre.

Fase de explotación

Infraestructuras fijas: Para analizar y evaluar la influencia que la construcción de las obras de ampliación del Puerto de Cádiz pudieran tener en las playas del entorno, en concreto en la playa de Valdelagrana y la desembocadura del Río San Pedro, se han simulado las transformaciones que experimenta el oleaje al propagarse hacia la costa bajo las condiciones actuales (en ausencia de obra) y para cada una de las alternativas analizadas. En base a estos resultados se ha estimado el flujo medio de energía en cinco puntos de la playa de Valdelagrana y se ha evaluado la posible afección de cada una de las alternativas a la dinámica litoral y la forma en planta de la playa.

En la Figura 5, Figura 7 y Figura 9 se compara el flujo medio de energía que recibe la playa de Valdelagrana en cinco puntos distintos, para la situación actual y la alternativa analizada, mientras que en la Figura 6, Figura 8 y Figura 10 se representa, a modo de ejemplo, la superficie libre para un oleaje de procedencia W, periodo 12 s y altura de ola 3 m, teniendo en cuenta la obra construida. Las principales conclusiones del análisis realizado son las siguientes:

- Las características del oleaje y del sistema de corrientes en la playa de Valdelagrana quedan condicionados por el efecto de la batimetría.
- La zona de afección de las obras depende de las características del oleaje incidente.
- Las distintas alternativas analizadas influyen en el oleaje que incide en la playa de Valdelagrana, afectando únicamente al extremo Sur de la misma, aunque el grado de afección es distinto para cada alternativa.
- Lo mencionado en el punto anterior queda claramente reflejado en la Figura 5, Figura 7 y Figura 9, donde se compara el flujo medio de energía que recibe la playa de Valdelagrana en cinco puntos distintos, para la situación actual y la alternativa analizada. Se observa que las diferencias se concentran únicamente en el extremo Sur (Puntos P1 y P2). Esto se debe al abrigo que proporcionaría la ampliación frente a los oleajes del sector W en el extremo Sur de la playa de Valdelagrana.
- El efecto de las obras se manifiesta en una reducción de la energía del oleaje incidente en la zona de la playa de Valdelagrana desde el punto P1 al P2. Esto implica que se podría



modificar la forma en planta de la playa en su extremo Sur, produciéndose un avance de la misma y giro de la línea de costa en sentido de avance de las agujas del reloj con respecto a su posición actual, adaptándose de esta forma a la nueva situación de equilibrio.

- La dinámica litoral de la zona y la forma en planta de la Playa de Valdelagrana no se verán afectadas de forma importante por ninguna de las alternativas analizadas, aunque el grado de afección es distinto para cada una de ellas.
- El grado de afección a la dinámica litoral de la zona de la alternativa Dique de Levante puede calificarse como nulo, mientras que el de la alternativa Exterior Norte sería mayor que el de la alternativa Cabezuela Oeste.

Por lo tanto se puede decir que el impacto de las alternativas 1 y 3 sobre la modificación de la forma en planta de la playa de Valdelagrana es moderado, mientras que el de la alternativa 2 es prácticamente nulo.

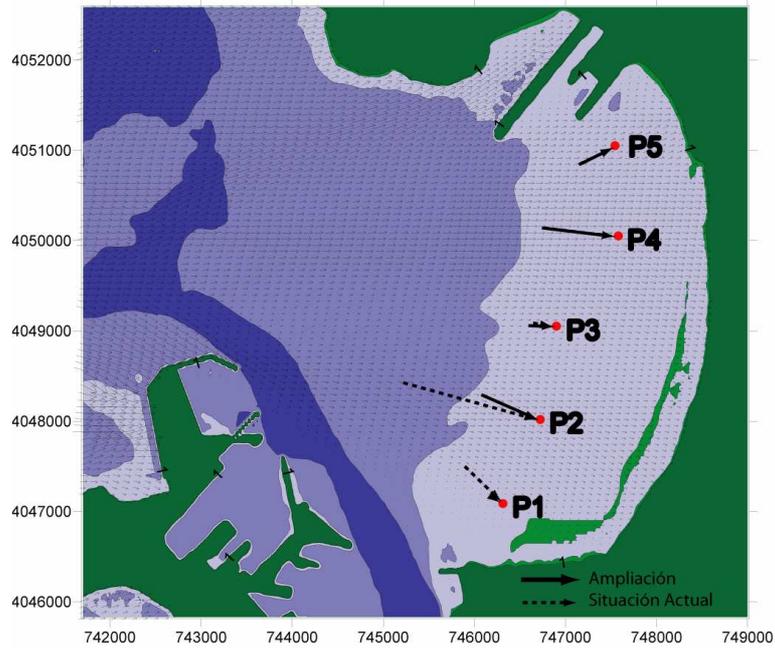


Figura 5: Flujo medio de energía del oleaje en 5 puntos de la playa de Valdelagrana para la situación actual y la alternativa Exterior Norte.

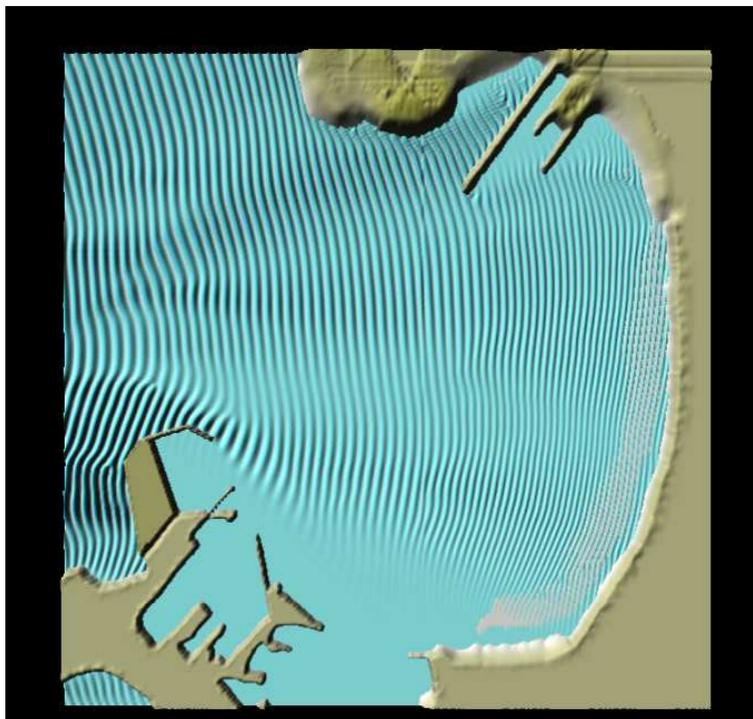


Figura 6: Superficie libre para oleaje de procedencia W, periodo 12 s y altura de ola exterior 3 m.

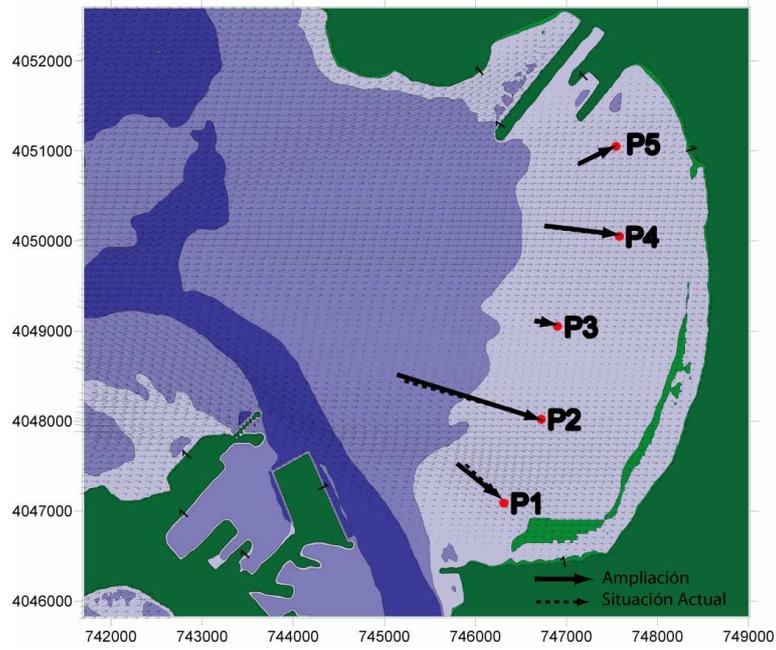


Figura 7: Flujo medio de energía del oleaje en 5 puntos de la playa de Valdelagrana para la situación actual y la alternativa Dique de Levante.

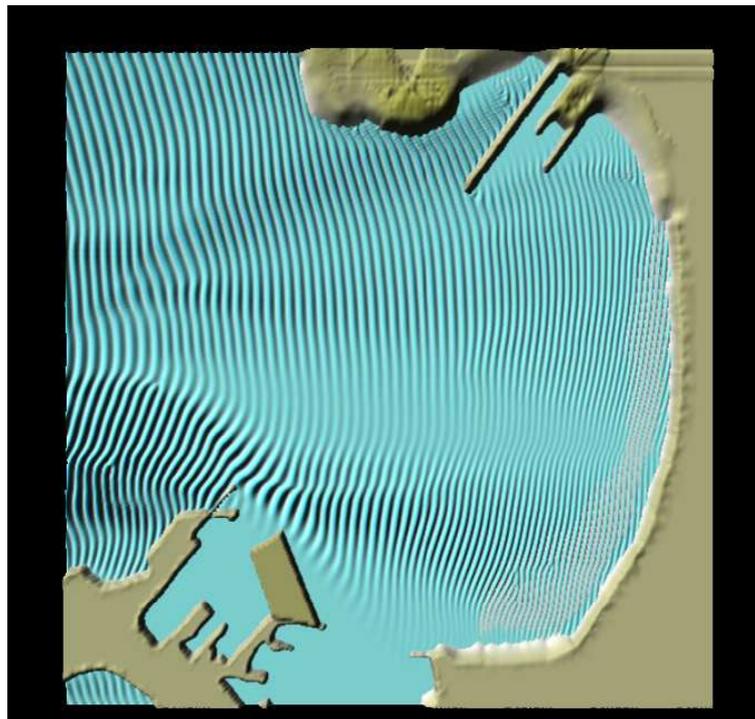


Figura 8: Superficie libre para oleaje de procedencia W, periodo 12 s y altura de ola exterior 3 m.

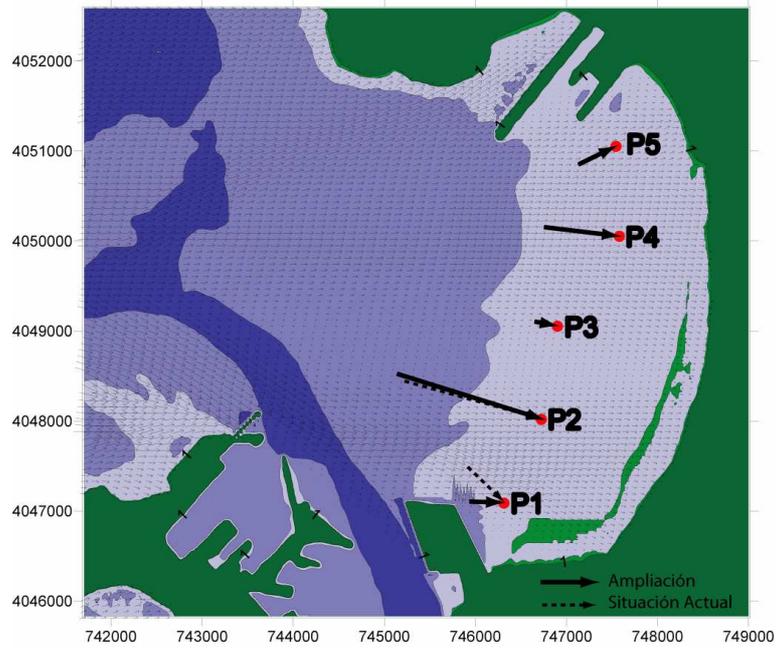


Figura 9: Flujo medio de energía del oleaje en 5 puntos de la playa de Valdelagrana para la situación actual y la alternativa Cabezuela.

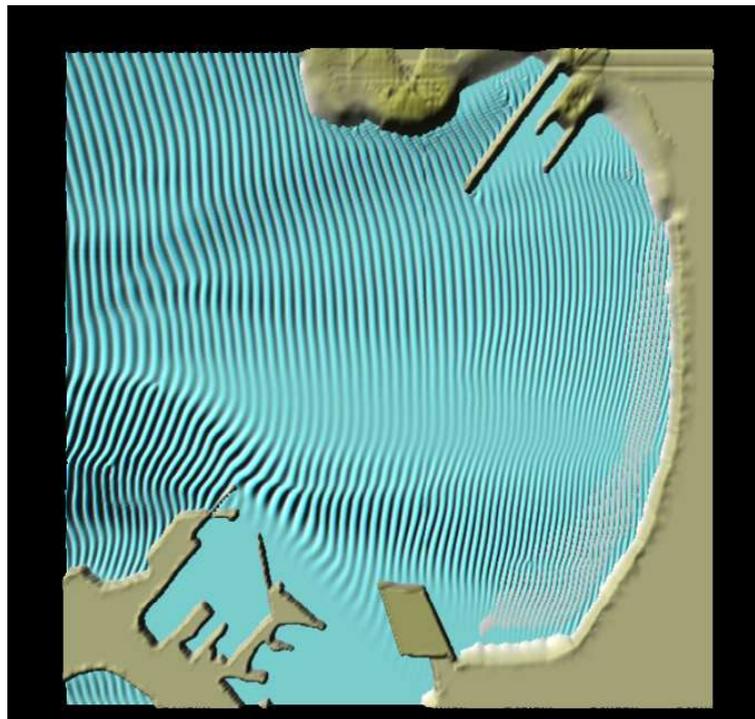


Figura 10: Superficie libre para oleaje de procedencia W, periodo 12 s y altura de ola exterior 3 m.



3.3.3. Impactos sobre el medio atmosférico

El medio atmosférico se podría ver afectado por la creación de una nueva Terminal de Contenedores tanto en su fase de construcción como en la de explotación.

Fase de construcción

Operaciones de dragado y relleno de explanada: En la fase de construcción las alteraciones en el medio atmosférico vendrán causadas fundamentalmente por la contaminación acústica causadas por las operaciones de dragado y relleno de explanadas. Las tres alternativas analizadas contemplan la ubicación en zonas alejadas de la ciudad, por lo que la contaminación acústica se ve minimizada. Los efectos son puntuales, no sinérgicos, inmediatos y reversibles, por lo que el impacto se considera compatible.

Fase de explotación

Actividad portuaria: La contaminación atmosférica que puede producir el tráfico marítimo se debe sobre todo a las emisiones de ruidos, partículas y de gases procedentes de los buques. La emisión de partículas y el ruido supondrían efectos negativos, reversibles, inmediatos, temporales, acumulativos y simples, respectivamente, y no sinérgicos. Debido a que todas las alternativas contemplan la ubicación de la Terminal de Contenedores en zonas alejadas de la ciudad, la intensidad del efecto sería baja y el impacto se considera compatible.

3.3.4. Impactos sobre el medio perceptual

En la fase de explotación el impacto en el medio perceptual vendrá causado fundamentalmente por la introducción de un nuevo elemento en el paisaje de la Bahía.

Fase de explotación

Infraestructuras fijas y actividad portuaria: La introducción de nuevas líneas, superficies y volúmenes a la Bahía Externa de Cádiz incrementará aún más el componente humano del paisaje. No obstante, no supondrá ninguna novedad en el escenario, ya que el paisaje portuario es común a lo largo de toda la Bahía. La presencia de astilleros y otras instalaciones industriales tanto a un lado de la Bahía como al otro hacen que su paisaje tenga un claro componente humano. Dependiendo de la alternativa a construir, de su diseño y de su penetración en las aguas de la bahía, las distintas alternativas tendrán un efecto u otro sobre el paisaje. Por tanto, el impacto visual puede alcanzar cierta magnitud, y sin embargo no se considera crítico.



El impacto sería negativo, permanente, continuo y mitigable. La valoración del paisaje para la sociedad es subjetiva, por lo que puede haber parte de la población que encuentre el signo de este impacto positivo. Dado que el paisaje creado por la nueva Terminal se integraría en el paisaje circundante, el impacto se valora como compatible para la alternativa Dique de Levante, moderado para la alternativa Cabezuela Oeste y severo para la alternativa Exterior Norte, debido a que implica el cierre del horizonte o mar abierto de las visuales procedentes de amplias zonas de la Bahía.

3.3.5. Impactos sobre el medio social

La ampliación del Puerto de Cádiz está justificada por la necesidad, a corto y medio plazo, de mejorar y completar la actual infraestructura portuaria con una nueva terminal de contenedores que permita el aumento de la actividad comercial que registra el puerto en estos momentos. Esta ampliación dotará al Puerto de Cádiz de mayores instalaciones y de una mayor competitividad lo que reportará beneficios directos, indirectos e inducidos a la aglomeración urbana en cuyo seno se sitúa.

Fase de construcción

Ámbito económico. La construcción de una nueva terminal de contenedores generará empleo en su fase de construcción. El impacto se considera positivo.

Patrimonio cultural. Éste podría verse afectado, ya que el área objeto de dragado pertenecería a la Zona de Servidumbre Arqueológica de la Bahía de Cádiz, pudiendo existir restos arqueológicos. Las alternativas Dique de Levante y Cabezuela Oeste se sitúan además en áreas que en un futuro quieren ser inscritas como Zonas Arqueológicas. Los efectos serían puntuales, mitigables, simples y con grado de destrucción bajo si el dragado se encuentra supervisado. Habría que seguir las indicaciones de la Consejería de Cultura a la hora de realizar el dragado y el relleno para minimizar los impactos. En este caso éstos resultarían compatibles o moderados.

Fase de explotación

Ámbito económico. El Puerto de Cádiz contribuye de forma esencial al funcionamiento y competitividad del tejido industrial de la Bahía de Cádiz, actuando como motor de desarrollo económico. En la actualidad, el paro es el problema económico más grave de la Bahía, por lo que se hace necesario reforzar el papel del puerto como elemento dinamizador de la economía regional. El impacto se considera, por tanto, positivo.



3.4. Ordenación de alternativas

Los métodos de ordenación de alternativas permiten comparar y ordenar las opciones de un proyecto en base a unos criterios prefijados, facilitando la selección de aquellas alternativas con mejor comportamiento ambiental. Por tanto, para conseguir la meta propuesta es necesario realizar tres acciones:

- Selección de criterios
- Selección de métodos
- Aplicación de los métodos a los criterios

Estos pasos se realizan a continuación:

3.4.1. Selección de criterios

Los criterios de evaluación se refieren a factores ambientales relevantes, valorándose la afectación de cada una de las alternativas sobre dichos factores, en términos positivos o negativos. En consecuencia, y teniendo en cuenta la identificación y descripción de los impactos realizados en las secciones 3.1 y 3.3, los criterios seleccionados son:

1. Superficie ocupada
2. Volumen de dragado
3. Alteración de los recursos marinos vivos
4. Alteración del intercambio de agua entre Bahía Externa e Interna
5. Alteración de playas o de la línea de costa
6. Impacto visual
7. Afección a la flora y la fauna de las marismas del río San Pedro
8. Afección al patrimonio cultural sumergido

A continuación se describe brevemente cada uno de ellos:

1. Superficie ocupada: La ejecución de cualquiera de las alternativas supone la ocupación de fondos marinos en los que pudiera haber comunidades biológicas bentónicas. Éstas se verán afectadas en mayor o menor medida en función de la superficie ocupada por las nuevas instalaciones portuarias y la diversidad del medio bentónico. El criterio de selección de las alternativas, en este caso, será la superficie total que ocupa cada una de ellas, incluyendo tanto la zona abrigada como la explanada.
2. Volumen de dragado: Para la ejecución de las diferentes alternativas se prevé la realización de obras de dragado en la zona del actual canal de navegación. Dependiendo



de la alternativa a materializar, el volumen de dragado necesario para construir los muelles difiere y por tanto, el fondo marino, la batimetría y los hábitats existentes pueden verse modificados. Como criterio se emplea el volumen total a dragar, tanto para la operación de relleno como los necesarios para alcanzar los calados de proyecto.

3. Alteración de los recursos marinos vivos: En este criterio se valorará la afectación de las praderas de algas y fanerógamas por cada una de las alternativas y su interacción con los recursos pesqueros y de moluscos. Se tendrá en cuenta especialmente la superficie de pradera que sería ocupada por los rellenos u otras obras necesarias para viabilidad de las distintas alternativas.
4. Alteración del intercambio de agua en la Bahía: Las alternativas Dique de Levante y Cabezuela Oeste implican un cambio en la geometría de la zona de la Bahía Externa colindante al Estrecho de Puntales, cuya sección es limitante a la hora de la realización del intercambio de aguas en la Bahía. El criterio a emplear es la alteración de la tasa de intercambio de agua en la Bahía, considerándose el aumento de esta tasa un impacto positivo.
5. Alteración de playas o de la línea de costa: La presencia de las infraestructuras contempladas en las diferentes alternativas puede inducir la modificación de la dinámica litoral. Esto puede dar lugar a la modificación de la morfología de las playas, ocasionando variaciones bien en el perfil o en la planta de las mismas. La playa más susceptible de ser afectada es la de Valdelagrana.
6. Impacto visual: En la Bahía de Cádiz se observa el contraste entre zonas urbanas, industriales con paisajes naturales tradicionales y áreas de turismo de sol y playa. La integración en el paisaje existente es el criterio a utilizar.
7. Afección a la flora y la fauna de las marismas del río San Pedro: Las marismas del río San Pedro pertenecen al Parque Natural de la Bahía de Cádiz, siendo su flora y su fauna de un interés particular. Junto al estudio de afecciones a las playas se observan también los posibles cambios en el prisma de marea que podría haber en el río San Pedro. Alteraciones en el régimen hídrico de las plantas podría causar estrés en las mismas e incluso un cambio en la vegetación y en la flora de la región. El criterio a utilizar, por tanto, será el de modificación del prisma de marea.
8. Afección al patrimonio cultural sumergido: Dada la gran cantidad de restos arqueológicos y de barcos hundidos que existen en el fondo de la Bahía Externa de Cádiz, las acciones de relleno y dragado podrían interferir con los mismos. El criterio a seguir es la ocupación de zonas valoradas como de interés arqueológico en la zona.



3.4.2. Selección de métodos

Un método de valoración es óptimo cuando el resultado obtenido es independiente del equipo evaluador que lo lleva a cabo. Para que un método de valoración sea considerado ideal, es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

1. Si un equipo evaluador utiliza dos o más métodos de valoración diferentes, el resultado obtenido es el mismo. En la práctica es equivalente a la existencia de un método único universalmente aceptado.
2. Si dos o más equipos evaluadores diferentes utilizan un mismo modelo, el resultado obtenido es el mismo. Esto supone la existencia de una solución única.

La existencia de un modelo único que satisfaga a todos es impensable en la actualidad. El desarrollo de los modelos o métodos de valoración es aún reciente y, como en toda ciencia que nace, surgen diferentes equipos y escuelas, las cuales aportan métodos distintos aunque todos ellos de alguna manera válidos.

En la práctica, este problema se puede abordar utilizando diferentes métodos por un mismo equipo evaluador. Empleará dicho equipo el mismo conjunto de criterios para la evaluación según cada método. El posterior análisis de los resultados decidirá la selección u ordenación de las distintas alternativas en función del grado de concordancia o de similitud entre las distintas soluciones (s_i) obtenidas. La incertidumbre será cero si el grado de coincidencia entre las soluciones obtenidas aplicando los diferentes métodos es total ($s_1 = s_2 = s_3 \dots$).

En este caso en cuestión se han aplicado los siguientes métodos de evaluación para ordenar las tres alternativas de más a menos favorable desde la perspectiva ambiental:

- **Método simple de ordenación.** Consiste en ordenar las alternativas según su comportamiento relativo a cada criterio. Cada casilla de cruce (alternativa-criterio) se cumplimenta según el orden de 1 a n, siendo n el número total de alternativas. A la mejor se le asigna el orden 1, a la siguiente el orden 2, y así sucesivamente. A partir de los resultados obtenidos se establece el orden preferencial en cuanto a su desempeño ambiental de las alternativas del proyecto.
- **Método de la puntuación ponderada.** En los métodos de puntuación ponderada se añade a la forma simple de ordenación de alternativas el peso relativo de los factores ambientales adoptados como criterio de evaluación. Cada criterio, y para cada una de las alternativas, es puntuado según una escala de valores de 0 a 10. La asignación del valor se



hace en función del comportamiento que el criterio tiene según la alternativa, donde 10 significa comportamiento excelente y 0 pésimo. Efectuada esta valoración, el método considera que no todos los criterios tienen el mismo peso o importancia en la clasificación y valoración final de las distintas alternativas. En consecuencia, hay que realizar una asignación de pesos específicos relativos a cada criterio. Para ello se valora cada criterio en función de su importancia entre 1 y 10, siendo 5 la no existencia de impacto, 10 impacto muy positivo y 1 impacto muy negativo.



Método simple de ordenación

		Alternativas		
		A1	A2	A3
Criterios de evaluación	Superficie ocupada	3	1	2
	Dragado	3	1	2
	Recursos Vivos	2	1	3
	Interacción B. Interna	2	1	2
	Playas	3	1	2
	Impacto visual	3	1	2
	Marismas S. Pedro	1	1	2
	Patrimonio histórico	1	2	2
		18	9	17

Este resultado permite establecer la siguiente ordenación de las alternativas:

$$A2 > A3 > A1$$

Método de puntuación ponderada

		Peso	Alternativas		
			A1	A2	A3
Criterios de evaluación	Superficie	4	2	8	7
	Dragado	5	2	4	4
	Recursos Vivos	8	5	5	3
	Interacción B. Interna	9	6	8	7
	Playas	8	1	5	3
	Impacto visual	6	1	5	4
	Marismas S. Pedro	9	5	5	3
	Patrimonio histórico	4	5	3	3
			191	291	222

Este resultado permite establecer la siguiente ordenación de las alternativas:

$$A2 > A3 > A1$$



Esto implica que usando los dos métodos la alternativa 2 “Dique de Levante” es la que mejor desempeño ambiental tiene.

3.5. Conclusiones

En los capítulos anteriores se ha mostrado que las alternativas 2 (Dique de Levante) y 3 (Cabezuela Oeste) son muy similares desde un punto de vista técnico, con mucha mayor puntuación que la alternativa 1 (Exterior Norte), pero desde un punto de vista ambiental, la alternativa 2 obtiene una mayor puntuación que las demás.

La alternativa 2 “Dique de Levante” tiene un mejor comportamiento ambiental que el resto puesto que:

- El impacto sobre la playa de Valdelagrana y las marismas del Río San Pedro, y por ende al Parque Natural de la Bahía de Cádiz, es inexistente.
- El volumen de dragado para el relleno de la explanada es el menor.
- El impacto visual es prácticamente nulo.
- Aumenta la tasa de renovación de aguas de la Bahía de Cádiz, lo que implica una mejora ambiental.
- No implica una modificación de la calidad del medio marino, ya que la ubicación corresponde con una zona degradada ambientalmente.
- Plantea la reutilización de una superficie industrial degradada y en desuso (Planta DELTA), y su reconversión en una zona de actividad portuaria de tráfico “limpio”, como son los contenedores.

3.5.1. Consideraciones ambientales

Desde un punto de vista global, no se puede obviar el impacto positivo en el medio ambiente que tiene el transporte marítimo en comparación con otros medios de transporte como el aéreo o la carretera, debido fundamentalmente al bajo consumo energético por ton/km transportado y su bajo poder contaminante.

Concretamente, en el caso que nos ocupa, la construcción de la nueva Terminal de Contenedores siguiendo las especificaciones técnicas expuestas en la alternativa denominada “Dique de Levante” introduce mejoras tanto en el tejido estructural y social de la Bahía de Cádiz como en su medio natural. Es por tanto la alternativa que mejor desempeño ambiental presenta.



Se puede considerar por tanto que esta alternativa plantea una solución integral desde el punto de vista tanto técnico como socioeconómico y ambiental.

Entre las ventajas de esta alternativa está el favorecer la circulación en la zona y aumentar la renovación de las aguas de la Bahía, y por tanto, su calidad, debido a un aumento de alguna de las secciones transversales del estrecho de Puntales, pero sin llegar a extremos en los que la velocidad de las corrientes existentes en el estrecho de Puntales se vean drásticamente modificadas.

Dada su ubicación, justo al E de la dársena comercial de Cádiz, el añadido al impacto visual que presenta la dársena ya construida será mínimo, puesto que debido a la existencia anterior del Dique de Levante, el impacto queda minimizado.

A la vista de los resultados obtenidos al realizar la propagación del oleaje con modelos numéricos, esta alternativa asegura una afección nula a la playa de Valdelagrana, lo que también lleva a considerar una nula modificación de la desembocadura del río San Pedro, de sus marismas, y de la flora y fauna que alberga. Por tanto, el Parque Natural de la Bahía de Cádiz apenas notará los efectos de la construcción de la nueva Terminal de Contenedores.

Puesto que la nueva Terminal se construiría sobre la antigua planta DELTA, zona en la que no existen praderas de fanerógamas ni algas, y en la que la tanto la biodiversidad de especies como el número de individuos en el bentos es reducido, se considera que no hay modificación sustancial de los recursos vivos.

La generación de empleo y riqueza económica que puede proporcionar a la Bahía esta ampliación del Puerto, es una gran ventaja para esta sociedad en su conjunto.

Los potenciales impactos negativos en el medio se reducen a:

- Eliminación de unas 30 Ha de lámina de agua.
- Disminución temporal de la transparencia del agua durante la fase de construcción.
- Impactos en el medio Arqueológico submarino en la zona de rellenos y posibles zonas de dragados.

Para detectar y paliar posibles efectos negativos se han propuesto unas medidas de mejora ambiental y se diseñará un plan de vigilancia ambiental, empleando las técnicas apropiadas para



cada tipo de impacto, de tal forma que se realice un control exhaustivo de las afecciones que la construcción de una nueva Terminal de contenedores pudiese ejercer sobre el medio.

3.6. Medidas de mejora ambiental

En este apartado se señalan las medidas preventivas y correctoras para minimizar o eliminar los impactos previstos en los apartados anteriores.

3.6.1. Medidas preventivas y correctoras de los impactos sobre la calidad de las aguas marinas durante el dragado

Durante la fase de construcción, las operaciones de dragado podrían generar un descenso de la transparencia del agua y un incremento de la concentración de sólidos en suspensión. Los efectos derivados de las operaciones de dragado se consideran reversibles y recuperables para la biota. Sin embargo se proponen las siguientes medidas correctoras para minimizar dichos efectos:

- Balizamiento de la zona de actuación
- Suspensión de las operaciones de dragado en momentos de elevada agitación del mar
- Confinamiento del proceso de dragado con sistemas de barreras flotantes con cortinas antiturbidez, si fuera necesario
- Uso de dragas de succión en marcha, teniendo especial cuidado en el llenado de la cántara para que rebose la menor cantidad de material posible
- Presencia en la draga de personal cualificado que controle la correcta ejecución de las operaciones

3.6.2. Medidas dirigidas a mejorar los efectos positivos de las operaciones de dragado

Las operaciones de dragado tendrán un impacto positivo considerando que podrán incrementar la tasa de renovación de aguas entre la Bahía Interna y la Externa. De esta manera se disminuirán las pérdidas de carga sobre las corrientes de marea producidas por el efecto de los contornos. Para ello es conveniente realizar un análisis específico de las características de la zona de dragado que contemple este aspecto teniendo en cuenta que los fondos marinos de la Bahía de Cádiz están catalogados como Lugar de Interés Comunitario (LIC ES6120009).



3.6.3. Medidas preventivas y correctoras de los impactos derivados del relleno de la explanada

La creación de la explanada supone el vertido del material de relleno procedente, fundamentalmente, de las operaciones de dragado. Para reducir el impacto de esta actividad en la calidad de las aguas se propone realizar el vertido una vez que el perímetro se haya cerrado.

3.6.4. Medidas de protección del patrimonio cultural

El área objeto de dragado pertenecería a la Zona de Servidumbre Arqueológica de la Bahía de Cádiz, pudiendo existir restos arqueológicos. Debido a este hecho, las medidas propuestas son:

- Analizar junto con la Consejería de Cultura las zonas propuestas para el dragado y creación de la explanada
- Seguir las indicaciones de la Consejería de Cultura a la hora de realizar las operaciones de dragado y relleno
- Notificar a la Consejería de Cultura con suficiente antelación la zona definitiva a dragar y los límites de la Terminal de contenedores
- Contar con la presencia de un experto arqueólogo reconocido por la Consejería de Cultura
- Notificar a la Consejería de Cultura el descubrimiento de objetos de valor

3.6.5. Medidas de protección ante los impactos derivados de la actividad portuaria

Superada la fase de construcción, la calidad del agua sólo podrá verse afectada por las labores propias de las operaciones marítimas que se realizan en los puertos. Un estricto cumplimiento de la vigente legislación sobre vertidos y los convenios internacionales firmados por España asegurarán una calidad aceptable en las inmediaciones de la nueva Terminal (Convenio de Oslo y París, Londres y Marpol). No obstante, al objeto de garantizar dicho cumplimiento se recomienda diseñar un Plan de Seguimiento de la calidad de las aguas de la Bahía de Cádiz en la fase de proyecto o vida útil de la terminal, como una continuación natural del Plan de Seguimiento Ambiental de la fase de construcción de las infraestructuras y dragado.

3.7. Plan de Vigilancia Ambiental

En este apartado se incluyen las características principales del Plan de Vigilancia Ambiental para el seguimiento y control de los impactos y de la eficacia de las medidas preventivas y correctoras previstas. Los objetivos del Plan son los siguientes:



- Controlar la correcta ejecución de las medidas previstas
- Comprobar la eficacia de las medidas de mejora ambiental
- Detectar los impactos no previstos y proponer las medidas adecuadas para reducirlos, eliminarlos o compensarlos.

3.7.1. Actuaciones preliminares

Con carácter previo al comienzo de las obras, la empresa constructora entregará al titular del proyecto un manual de buenas prácticas ambientales.

Se comprobará el adecuado diseño e incorporación al plan de obras de las medidas de mejora ambiental. En concreto, en relación a la protección del patrimonio cultural, una vez definido el perímetro definitivo de la Terminal y de las operaciones de dragado, se completará la prospección arqueológica efectuada en aquellas zonas no prospectadas.

3.7.2. Control de calidad de las aguas marinas

Durante la ejecución de las operaciones de dragado, se realizarán las siguientes actividades:

- Verificación de la instalación de dispositivos antiturbidez.
- Realización de un plan de seguimiento de las características de las aguas marinas. Se realizará una campaña de muestro de la calidad de las aguas en distintos puntos de la Bahía de Cádiz analizando los parámetros de transparencia, concentración de sólidos en suspensión y análisis de elementos contaminantes en el sedimento a dragar. Se realizarán campañas de muestreo antes, durante y después del inicio de las obras cuyas características y periodicidad deben ser especificadas en el proyecto.

3.7.3. Control del transporte y vertido del material de dragado

Se controlará el transporte y vertido del material de dragado comprobando que no se producen reboses y que el vertido se realiza en la zona propuesta para la explanada con un perímetro cerrado.

3.7.4. Control de las afecciones al patrimonio cultural

Se contratará asistencia técnica adecuada, con la titulación pertinente y demostrada experiencia en el campo de la arqueología submarina y se vigilará el cumplimiento adecuado de las actuaciones de las medidas propuestas por la Consejería de Cultura.

3.7.5. Control de las afecciones derivadas de la actividad portuaria

Se controlará que se cumple la legislación sobre vertidos y los convenios internacionales firmados por España en esta materia.

ANEXO X

INFLUENCIA SOBRE LA PLAYA DE VALDELAGRANA

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
2.CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	2
2.1. Introducción.....	2
2.2. Características del entorno	2
2.3. Influencia de la hidrodinámica de la desembocadura del Río San Pedro.....	5
3.METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	8
3.1. Introducción.....	8
3.2. Clima marítimo	8
3.3. Propagaciones de oleaje.....	13
3.4. Modelo de corrientes de rotura	16
3.5. Perfil de playa.....	17
4.DINÁMICA LITORAL ACTUAL.....	18
4.1. Introducción.....	18
4.2. Oleaje y Sistema de Corrientes	18
4.3. Perfil de playa.....	22
5.AFECCIÓN DE LAS OBRAS A LA DINÁMICA LITORAL.....	24
5.1. Introducción.....	24
5.2. Oleaje y Sistema de Corrientes	25
5.2.1. Alternativa Exterior Norte	25
5.2.2. Alternativa Dique de Levante	30
5.2.3. Alternativa Cabezuela.....	34
5.3. Perfil de playa.....	38
5.4. Conclusiones	41
6.APÉNDICE: PROPAGACIONES DE OLEAJE.	44



1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente documento es estudiar la influencia que las obras de Ampliación del Puerto de Cádiz pudieran tener en las playas de su entorno, concretamente en la Playa de Valdelagrana.

Para ello se ha realizado en primer lugar una descripción geomorfológica y geofísica de la zona de estudio. Posteriormente se ha realizado un análisis comparativo de la hidrodinámica en la situación actual y en las distintas alternativas preliminares de ampliación. Este análisis consiste en la propagación de una serie de estados de mar característicos del régimen medio de oleaje en las distintas situaciones, obteniendo el flujo de energía medio anual del oleaje y los sistemas circulatorios en la Playa de Valdelagrana. A partir de estos resultados se obtienen conclusiones sobre la influencia de las distintas alternativas en la estabilidad del perfil y la forma en planta de la playa, y por tanto, el efecto general en la zona, siendo éste un parámetro importante en la elección de la alternativa de ejecución más conveniente.



2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

2.1. Introducción

En este apartado se realiza una caracterización geofísica, geomorfológica e hidrodinámica de la Bahía de Cádiz en general y de la playa de Valdelagrana en particular. Estas descripciones permitirán comprender las transformaciones que sufrirá el oleaje al propagarse hacia la zona de interés y la interacción del mismo con el entorno.

2.2. Características del entorno

En la Figura 1 se muestra una fotografía aérea de la zona de estudio, en la que de forma intuitiva se puede apreciar que las obras de construcción de la ampliación del puerto de Cádiz sólo podrían tener un efecto significativo en la Playa de Valdelagrana. Esto es debido, entre otras causas, a que el oleaje más energético proviene del sector W, como se expone en el apartado 3.2, no variando apenas su dirección en su propagación.

El río Guadalete y el río San Pedro fueron individualizados artificialmente en el siglo XVIII, funcionando el río San Pedro actualmente como el principal caño mareal del antiguo estuario del río Guadalete.

Actualmente, el sector correspondiente a la Playa de Valdelagrana es el resultado de la consolidación del cordón litoral que limita los estuarios de los ríos Guadalete y San Pedro. Este cordón litoral, que se encuentra en el Parque Natural de los Toruños y se designa con el mismo nombre, posee algo más de 7 km de longitud y termina, cerca de la desembocadura del Río San Pedro, en una flecha litoral originada por el transporte de sedimentos a lo largo de la playa en la dirección norte-sur y las corrientes de marea del río San Pedro.



Figura 1: Zona de estudio.

La mayor parte del cordón litoral se encuentra en estado natural. En cuanto a la playa de Valdelagrana, tan sólo existe una zona antropizada en la parte norte, de unos 1600 m de longitud, junto a los espigones que encauzan la desembocadura del río Guadalete. Asimismo se pueden encontrar varios aparcamientos y zonas de acceso a bañistas en el resto de la flecha. Es en estas zonas donde el cordón litoral, formado por dunas de escasa altura (inferior a 2 m), de tipo embrionario y fijadas por vegetación, se ve modificado e interrumpido. Aún así, hay una extensión de más de 5 km de playa sin influencia humana apreciable.

Las marismas constituyen uno de los ambientes más frecuentes en la Bahía de Cádiz. En el sector estudiado, éstas se encuentran al abrigo de la Playa de Valdelagrana. En dichas marismas aparecen amplias áreas sin vegetación (*silkeke*), pero fundamentalmente dominan las áreas marismales ricas en vegetación (*schorre*). También se pueden observar abanicos de desbordamiento, tanto actuales como pretéritos. Asimismo, se pueden observar cordones arenosos antiguos, que corresponden a episodios anteriores de crecimiento de la flecha, intercalados con las morfologías típicas de las



marismas. La flecha de Valdelagrana se encuentra atravesada por dos canales mareales, que conectan el río San Pedro y la zona de marisma con el mar abierto, el caño del Bote, al norte, y el caño del Caserón, al sur, y que propician que se originen deltas de reflujo en las áreas colindantes con sus desembocaduras.

El extremo meridional de la flecha de Valdelagrana, coincidiendo con la desembocadura del río San Pedro, se encuentra dominada por un extenso bancal, con más de 1 km de anchura, y modelado principalmente por las corrientes mareales de flujo y reflujo. El lóbulo deltaico que aparece en la desembocadura del citado río, actúa como sumidero de sedimentos, presentando un crecimiento no en altura, sino en sentido longitudinal.

La pendiente media de esta playa oscila desde el 2.3 % en la zona norte hasta el 0.7 % en la zona sur. Este valor tan suave de las pendientes sea tan suave ocasiona que buena parte de la extensión de la playa quede expuesta durante la bajamar, propiciando así los vientos de poniente la formación del cordón litoral. La arena erosionada de la playa posteriormente será distribuida por los fuertes vientos de levante que se dan en la zona.

En la zona del la Punta de los Saboneses son las corrientes mareales de flujo y reflujo las que condicionan la morfología de la zona, puesto que se encuentra protegida del oleaje por la batimetría circundante. El recorrido de las ondas de marea en esta latitud es de S a N durante el flujo.



2.3. Influencia de la hidrodinámica de la desembocadura del Río San Pedro.

Para analizar la importancia del efecto que las obras de ampliación del Puerto de Cádiz puedan tener en la Playa de Valdelagrana, es necesario realizar una revisión de la hidrodinámica y sedimentología del entorno que lo acoge.

La dinámica de la desembocadura del Río San Pedro, situada entre la Playa de Valdelagrana (margen derecha) y el bajo de La Cabezuela (margen izquierda), juega un papel muy importante en la morfodinámica de la playa de Valdelagrana, ya que en ella confluyen diferentes agentes climático-marítimos, como el oleaje y las corrientes de marea. Además, la desembocadura tiene un gran valor ecológico debido a su proximidad al Parque Natural de los Toruños, y por lo tanto, una modificación de la dinámica litoral en esta zona producirá un mayor impacto biológico.

El artículo “Procesos litorales y evolución morfológica reciente de la Desembocadura del Río San Pedro” (E. Sánchez-Badorrey, M.A. Losada), recoge un estudio de la dinámica y la interacción playa-río que gobiernan en la zona de la desembocadura del Río San Pedro.

Básicamente, la hidrodinámica de la zona consiste en la existencia de transporte longitudinal neto de sedimentos hacia el sur de la playa de Valdelagrana, con la consecuente erosión progresiva de la playa de levante y deposición del sedimento en la desembocadura. El chorro de marea en la desembocadura realizaría la limpieza del sedimento desplazándolo de nuevo hasta la línea de la playa de levante, estando así el sistema en equilibrio.

Sin embargo, la situación actual de la zona es muy diferente a una situación de equilibrio, habiéndose apreciado una importante pérdida de capacidad de limpieza del estuario y un cambio progresivo de alineación en la Playa de Levante-Valdelagrana. Este hecho puede observarse en la Figura 2, imagen que recoge la intrusión de sedimento litoral en la desembocadura del Río San Pedro.



Figura 2: Sedimentos litorales en la desembocadura del Río San Pedro. (Fotografía aérea, cortesía ICMAN-UCA)

Las causas del desequilibrio existente pueden explicarse a partir de la evolución que ha ido sufriendo la zona desde los años 50, década en la que se produjo la desecación de amplias superficies de inundación en la zona del estuario. Este hecho provocó una disminución del prisma de marea de al menos un 30% para mareas medias y un 50% para mareas vivas, lo que supuso, por un lado, una reducción de la profundidad y anchura de la sección hidráulica en la desembocadura y, por otro, una pérdida de la capacidad de limpieza del estuario.

El análisis de los procesos anteriores permite explicar la evolución morfodinámica reciente de la desembocadura, caracterizada por:

1. Un régimen erosivo de la playa de Levante en difusión progresiva hacia la playa de Valdelagrana
2. La intrusión del sedimento marino en la desembocadura, y su posterior deposición en la margen derecha; y en consecuencia, el desplazamiento del cauce del río hacia la margen izquierda, la erosión de dicha margen y el aumento de la asimetría de la sección de la desembocadura.

El actual desequilibrio sedimentario de la desembocadura está afectando negativamente al Parque Natural de Los Toruños, ya que algunos caños secundarios de la zona marismeña se han obstruido y ocupado con sedimento litoral. En la Figura 3 puede apreciarse la evolución en los últimos cincuenta años de la desembocadura y la línea de costa del sur de la Playa de Valdelagrana.



Es por todo lo expuesto anteriormente que se analizarán las posibles afecciones que las distintas alternativas de Ampliación del Puerto de Cádiz puedan tener en dicha playa y, consecuentemente, en la dinámica de la desembocadura del Río San Pedro.

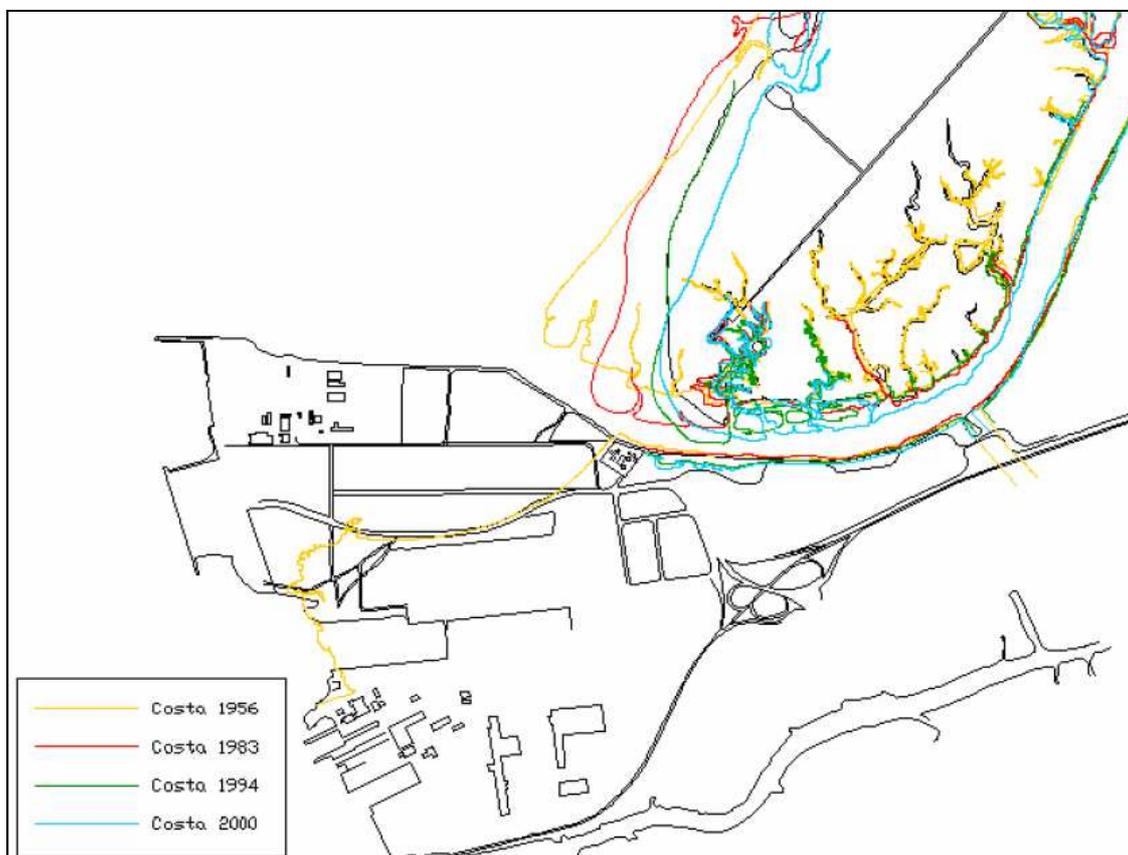


Figura 3: Evolución de la margen derecha de la desembocadura del Río San Pedro.



3. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.

3.1. Introducción.

En este apartado se exponen las bases que se han utilizado para el análisis de la influencia de la Ampliación del Puerto de Cádiz sobre la Playa de Valdelagrana.

En primer lugar se realiza una breve descripción del clima marítimo en la Bahía de Cádiz, caracterizándose el oleaje según alturas de ola y dirección. Posteriormente se indica el proceso seguido para la propagación del oleaje hasta la playa de Valdelagrana, necesario para el estudio de la forma en planta y el perfil de playa. Asimismo se realiza una breve descripción del modelo empleado para la obtención del sistema de corrientes de rotura en dicha zona.

3.2. Clima marítimo

Para obtener las características del oleaje de la Bahía de Cádiz, se va a analizar la base de datos del proyecto WANA, suministrada y calibrada por Puertos del Estado. La base de datos WANA es el resultado de un modelo numérico espectral de propagación de oleaje de tercera generación que incluye generación de oleaje por viento, refracción, disipación por fricción con el fondo y por rotura del oleaje, e interacciones no lineales. Los datos de entrada del modelo de oleaje son campos de viento a 10 m de altura procedentes del modelo numérico HIRLAM. En la ejecución de los modelos se han asimilado datos reales de viento.

Para este estudio se ha solicitado al Programa de Clima Marítimo de Puertos del Estado la información correspondiente al punto WANA 1054046, de coordenadas 36.5° N, 6.5° W, situado a una profundidad de aproximadamente 50 m en el exterior de la Bahía de Cádiz. Se han analizado los datos entre las 15:00 horas del 22 de Octubre de 1995 y las 00:00 horas del 28 de



Noviembre de 2006. La información se divide en estados de mar de tres horas de duración. Los descriptores estadísticos disponibles de cada estado de mar son los siguientes:

- Altura de ola significativa espectral (H_{m0})
- Período de pico espectral (T_p)
- Dirección del período de pico ($DirM$). medida desde el Norte en el sentido de las agujas del reloj: Procedencia del Norte= 0° , E= 90° .
- Velocidad media del viento ($VelV$)
- Dirección media de procedencia del viento ($DirV$)

Los datos son secuenciales en el tiempo, por lo que pueden utilizarse para estudios de persistencia. El total de estados de mar analizados es de 30784. El método de punteo usado es $m_i/(N+1)$, siendo N el número total de datos y m_i el número de datos perteneciente a la clase i .

La Figura 4 muestra los gráficos de dispersión de los datos de oleaje del punto WANA. La Figura 4.a. representa T_p frente a H_{m0} , la Figura 4.b. representa $DirM$ frente a H_{m0} y la Figura 4.c. T_p frente a $DirM$. Se aprecia que las alturas de ola inferiores a 2 m se pueden presentar bajo un amplio rango de periodos, mientras que al incrementarse la altura los periodos bajos dejan de estar presentes. La Figura 4.b. muestra el predominio de los oleajes procedentes de W-WSW para valores moderados y altos de altura de ola, aunque para valores bajos las direcciones probables se incrementan. Finalmente, la Figura 4.c. muestra la variabilidad en los periodos debido a la presencia de oleajes de largo periodo y oleajes generados localmente.

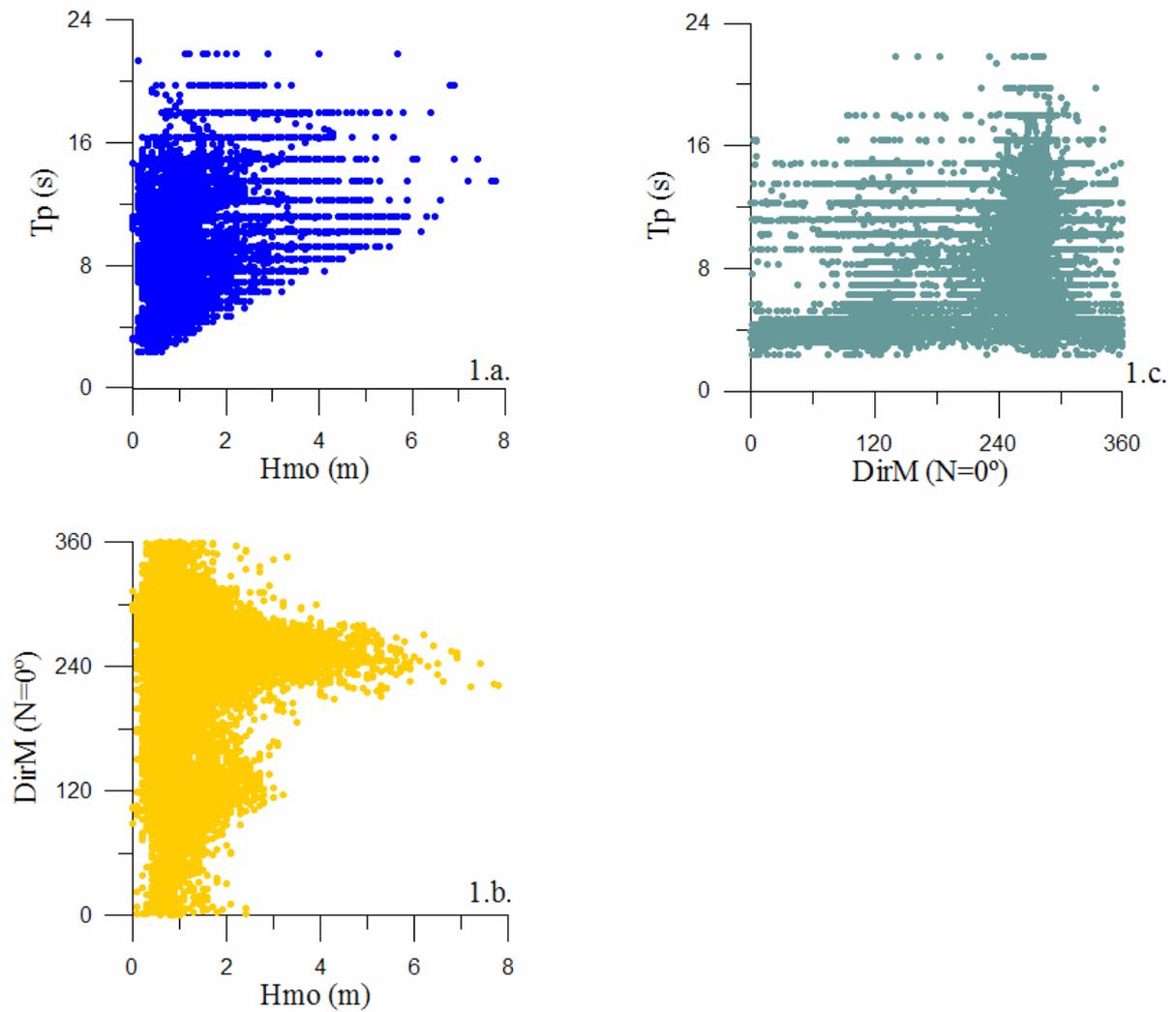


Figura 4. Gráficos de dispersión de oleaje correspondiente a los datos del punto WANA1054046.

A continuación se muestran los histogramas de altura de ola en función del periodo de pico y de la dirección media de incidencia.

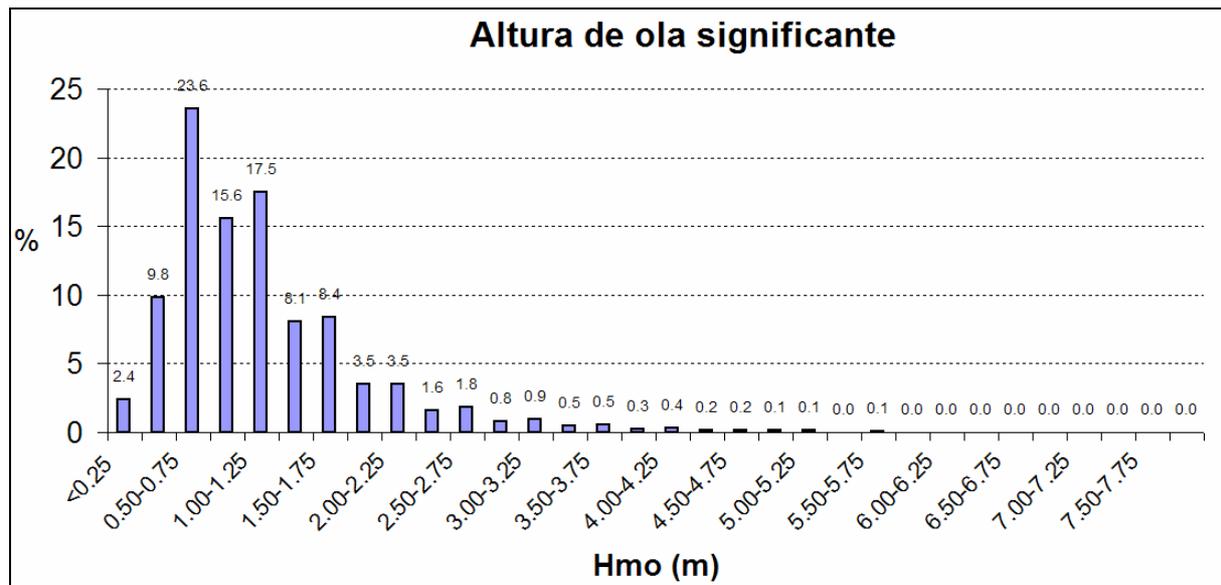


Figura 5. Histograma de altura de ola significativa espectral H_{mo} .

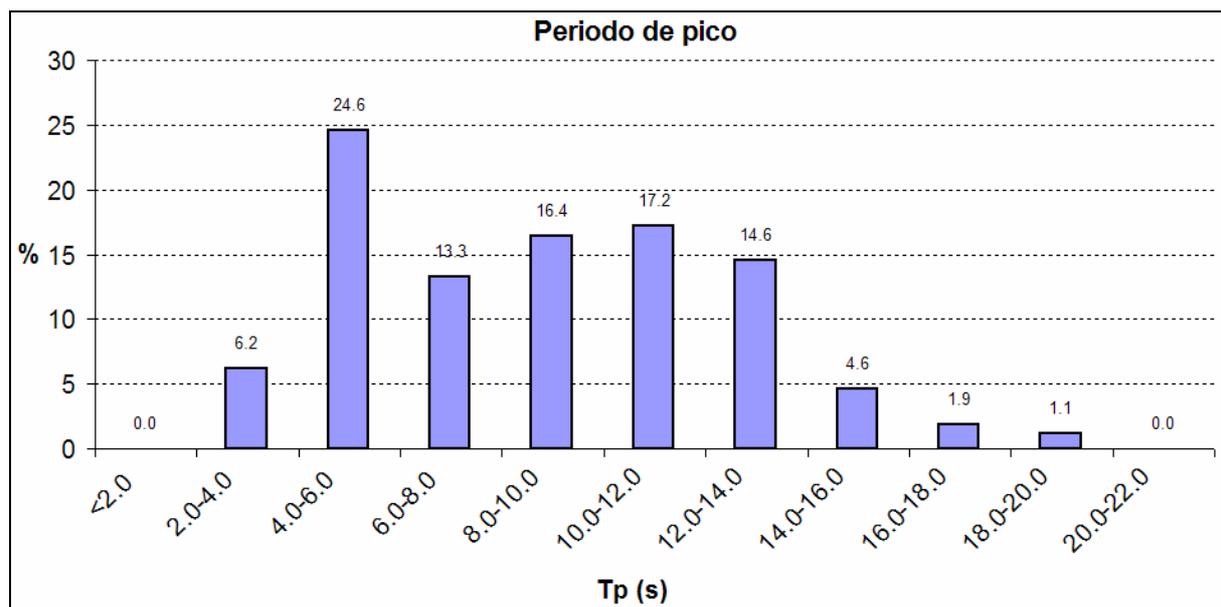


Figura 6. Histograma de periodo de pico espectral T_p .

De los datos anteriores se deduce que (1) predominan las alturas de ola inferiores a los 3 m (están presentes durante aproximadamente un 95% del tiempo) y (2) los periodos tienen una mayor variabilidad, aunque predominan los inferiores a los 14s.

En la



Tabla 1 se resumen los porcentajes de tiempo en que el oleaje procede de las diferentes direcciones. Posteriormente, en las siguientes figuras se muestran el histograma de direcciones y la rosa de oleaje para el conjunto de los datos del punto WANA.

Dirección	Sector	Porcentaje del tiempo %
N	$348.75^\circ < \theta \leq 11.25^\circ$	0.61
NNE	$11.25^\circ < \theta \leq 33.75^\circ$	0.49
NE	$33.75^\circ < \theta \leq 56.25^\circ$	0.54
ENE	$56.25^\circ < \theta \leq 78.75^\circ$	0.83
E	$78.75^\circ < \theta \leq 101.25^\circ$	1.91
ESE	$101.25^\circ < \theta \leq 123.75^\circ$	4.28
SE	$123.75^\circ < \theta \leq 146.25^\circ$	3.40
SSE	$146.25^\circ < \theta \leq 168.75^\circ$	1.52
S	$168.75^\circ < \theta \leq 191.25^\circ$	1.11
SSW	$191.25^\circ < \theta \leq 213.75^\circ$	1.25
SW	$213.75^\circ < \theta \leq 236.25^\circ$	3.95
WSW	$236.25^\circ < \theta \leq 258.75^\circ$	10.45
W	$258.75^\circ < \theta \leq 281.25^\circ$	46.71
WNW	$281.25^\circ < \theta \leq 303.75^\circ$	19.64
NW	$303.75^\circ < \theta \leq 326.25^\circ$	2.46
NNW	$326.25^\circ < \theta \leq 348.75^\circ$	0.83

Tabla 1. Sector direccional – tiempo (%).

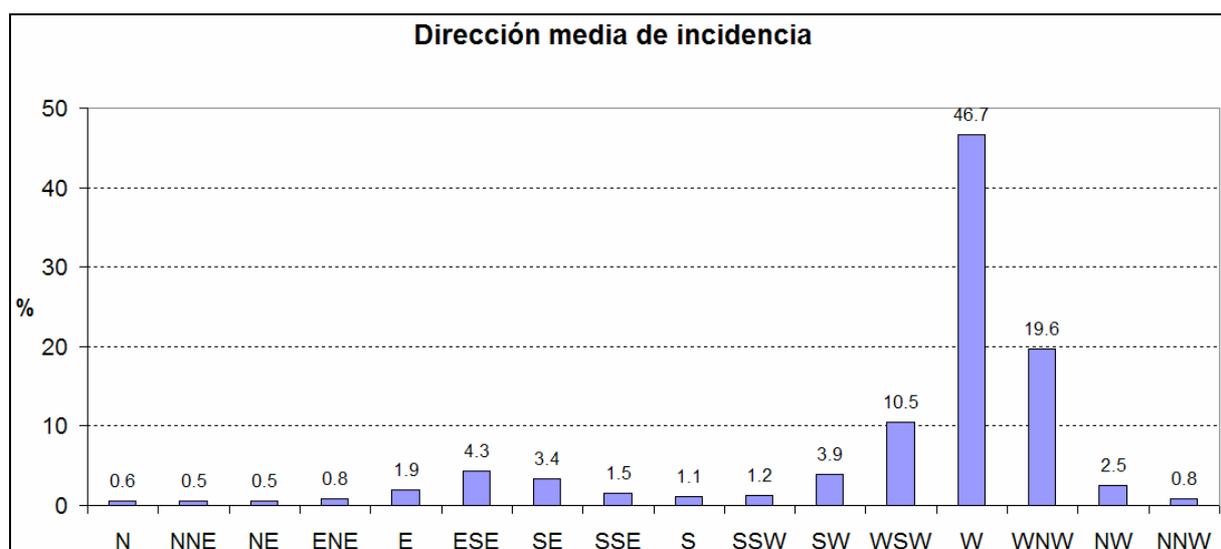


Figura 7. Histograma de dirección media de incidencia del oleaje.

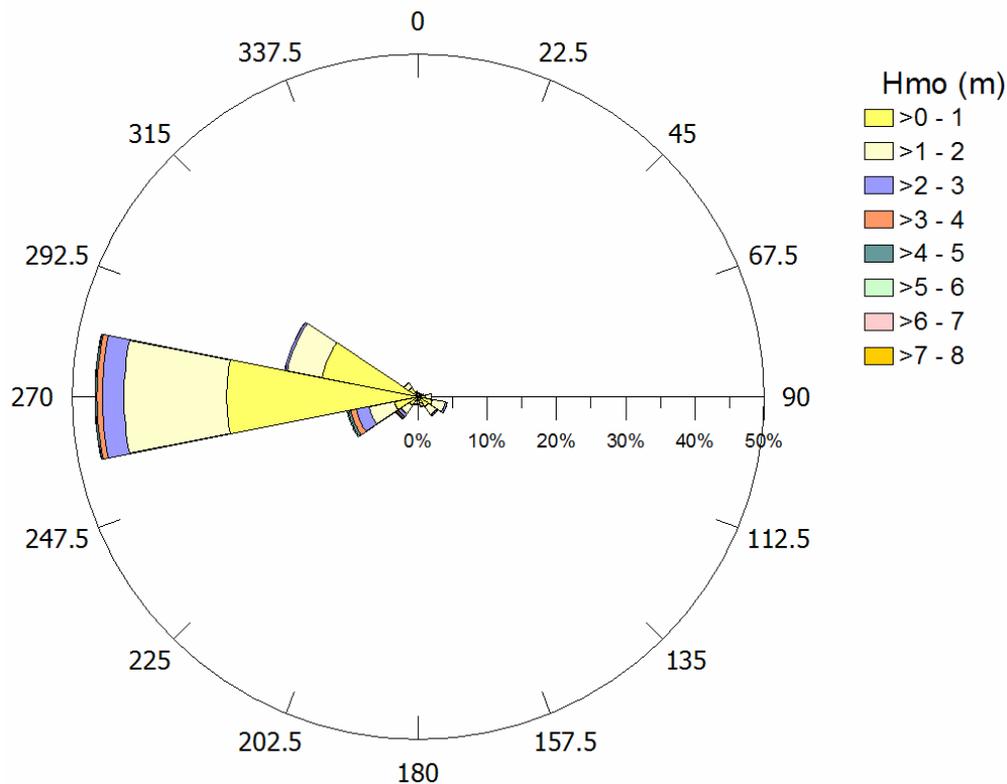


Figura 8. Rosa de Oleaje. 0=Norte, 90=Este.

De toda la información anterior se puede concluir que predominan los oleajes que proceden de los sectores WSW, W y WNW y son los que se van tener en cuenta para analizar la afección que las alternativas estudiadas tendrían sobre las playas.

3.3. Propagaciones de oleaje.

La descripción del oleaje que se ha realizado en el punto anterior corresponde a un punto exterior a la Bahía de Cádiz. Para conocer las características del oleaje en todo el área de estudio, tanto en las cercanías del puerto de Cádiz como en la Playa de Valdelagrana, se ha usado un modelo numérico de propagación de oleaje (modelo REF-DIF) que utiliza la batimetría real y que incluye los fenómenos físicos más importantes que se producen en la transformación del oleaje: asomeramiento, refracción, disipación de energía y difracción. La Figura 9 muestra un esquema de las mallas usadas en el modelo numérico. Se han empleado cuatro mallas para caracterizar la zona de estudio con las características expresadas en la Tabla 2.



Denominación	Origen		Dimensiones (m)		Orientación	Divisiones		Espaciado (m)	
	X UTM	Y UTM	X	Y		X	Y	X	Y
M1: Malla exterior	723908	4042363	12428	12000	W	349	349	35.7	34.5
M2: Malla de aproximación	736336	4045019	5350	7586	W	349	221	15.4	34.5
M3: Malla de zona portuaria	741686	4045812	4086	6793	W	349	198	11.7	34.5
M4: Malla de zona costera	745772	4045812	3244	6793	W	349	198	9.3	34.5

Tabla 2: Características de las mallas empleadas en el modelo.

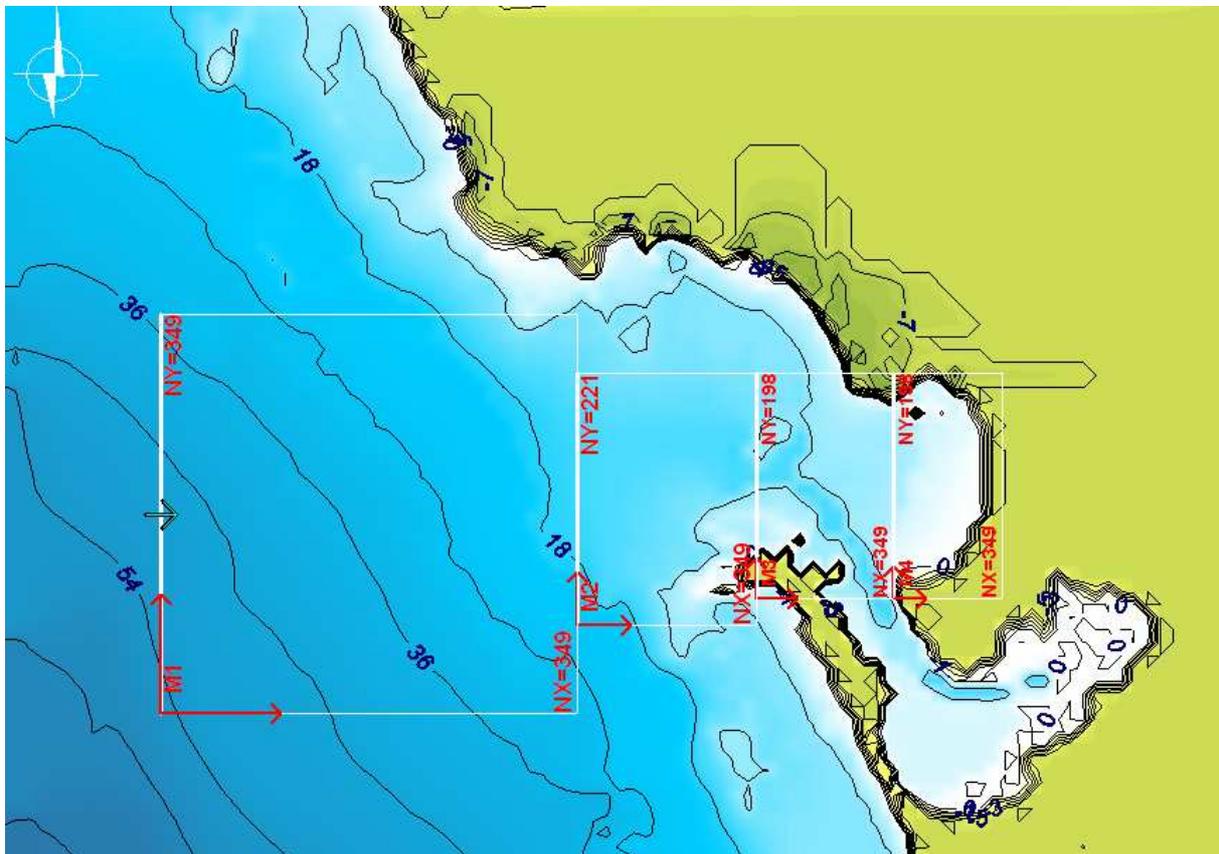


Figura 9: Esquema de las mallas definidas para el modelo REF-DIF.

Los oleajes analizados han sido los procedentes del sector W, considerándose 3 direcciones de incidencia en el borde exterior de la malla exterior. Para este estudio preliminar se han considerado una serie de estados de mar representativos de las condiciones medias en la zona, lo que se considera como una aproximación al problema real. En la Tabla 3 se muestran las características de los casos de oleaje irregular simulados con el modelo numérico.



Caso	H_s (m)	f_{pico}	f_{max}	Dirección	% tiempo
01	1	0.083	0.40	WNW	19,1460
02	3	0.083	0.40	WNW	0,4880
03	5	0.083	0.40	WNW	0,0030
04	1	0.083	0.40	W	41,8930
05	3	0.083	0.40	W	4,4660
06	5	0.083	0.40	W	0,3450
07	1	0.083	0.40	WSW	6,9700
08	3	0.083	0.40	WSW	2,8850
09	5	0.083	0.40	WSW	0,5960

Tabla 3: Características de los casos simulados de oleaje irregular. En todos los casos se han empleado 10 componentes de oleaje, $\gamma = 3.3$ y un parámetro de dispersión de $11^{\circ}25'$, y un nivel de marea de 2.00 metros.

Todas las simulaciones se han realizado para cuatro situaciones distintas:

1. Situación actual. Es decir, sin considerar ninguna de las alternativas de ampliación propuesta.
2. Alternativa exterior Norte.
3. Alternativa Dique de Levante.
4. Alternativa Cabezueta.



3.4. Modelo de corrientes de rotura

La estabilidad en planta de una playa depende en gran medida de las corrientes longitudinales que se originan como consecuencia de la rotura del oleaje, dado que son estas corrientes longitudinales las que producen el transporte de sedimento a lo largo de ella. Así, para que una determinada forma en planta esté en equilibrio es necesario que no existan corrientes longitudinales o bien que el transporte neto de sedimento sea nulo.

En este documento se analiza el sistema de corrientes generado por el oleaje de los casos de la Tabla 3. Para ello se ha empleado un modelo numérico que, a partir de la altura de ola y la dirección de procedencia del oleaje, determina el tensor de radiación, y a partir de él obtiene el campo de velocidades y de niveles basándose en las ecuaciones de Navier-Stokes. Los principales parámetros de este modelo son:

- Coeficiente de fricción de Chèzy c . Este coeficiente depende de la profundidad total y de la rugosidad asociada al tamaño de los sedimentos del fondo:

$$c(x, y, t) = 18 \log \left(\frac{2h(x, y, t)}{K_{swc}} \right)$$
 siendo h la profundidad total en metros y K_{swc} la altura de

rugosidad hidráulica de Nikuradse. Esta rugosidad toma valores entre 0 y 2, y en el caso que nos ocupa se ha adoptado un valor de $K_{swc} = 1$, valor habitual para playas con interacción ola-corriente.

- Viscosidad de remolino ε . Este parámetro se emplea para describir la turbulencia en la zona de rompientes, y depende de la velocidad media y el tamaño de malla. En nuestro caso, $\varepsilon = 5$.



3.5. Perfil de playa

Se entiende por perfil de equilibrio de una playa, el estado de equilibrio, sin cambios morfodinámicos, que alcanza el perfil de playa bajo la acción de un oleaje incidente, constante en el tiempo.

En este estudio se ha empleado la formulación del perfil de equilibrio de Dean (1977). Esta formulación es la más extendida por su sencillez, ya que determina el perfil de playa únicamente en función del tamaño del sedimento:

$$h = A \cdot x^{2/3}$$

Donde

- h: profundidad en metros,
- x: distancia en metros a la línea de costa
- A: parámetro relacionado con la velocidad de caída de grano, y por tanto, con el tamaño del sedimento:
 - $A = 0.067 \cdot w^{0.44}$ siendo w la velocidad de caída en cm/s y estando relacionada con el tamaño del sedimento (D_{50} en mm) por la expresión $w = 14 \cdot D_{50}^{1.11}$.
 De este modo, el parámetro A queda directamente relacionado con el tamaño de grano por la expresión $A = 0.21 \cdot D^{0.48}$.

La expresión del perfil de equilibrio será válida hasta una profundidad de corte o de cierre h^* a partir de la cual el perfil ya no responderá activamente a las acciones del oleaje. Dicha profundidad de corte puede obtenerse a partir de las características del oleaje incidente:

$$h^* = 1.75 \cdot H_{s12} - 57.9 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right)$$

En la formulación anterior H_{s12} representa la altura de ola significativa que sólo es excedida 12 horas al año (o equivalentemente, de probabilidad de no excedencia igual a 0.9973 en el año medio) y T_s es su periodo correspondiente.



4. DINÁMICA LITORAL ACTUAL

4.1. Introducción

En este apartado se analiza el estado actual de la dinámica litoral en el entorno del Puerto de Cádiz en general, y en la playa de Valdelagrana en particular.

En primer lugar se muestran los resultados de la propagación de oleaje realizada, y los sistemas de corrientes resultantes. Además se efectúa una evaluación del flujo medio anual de energía del oleaje en cinco puntos cercanos a la playa de Valdelagrana. Posteriormente se analiza el perfil de playa teórico obtenido a partir del tamaño de sedimento y se compara con el perfil real, a partir de los datos de batimetría disponibles.

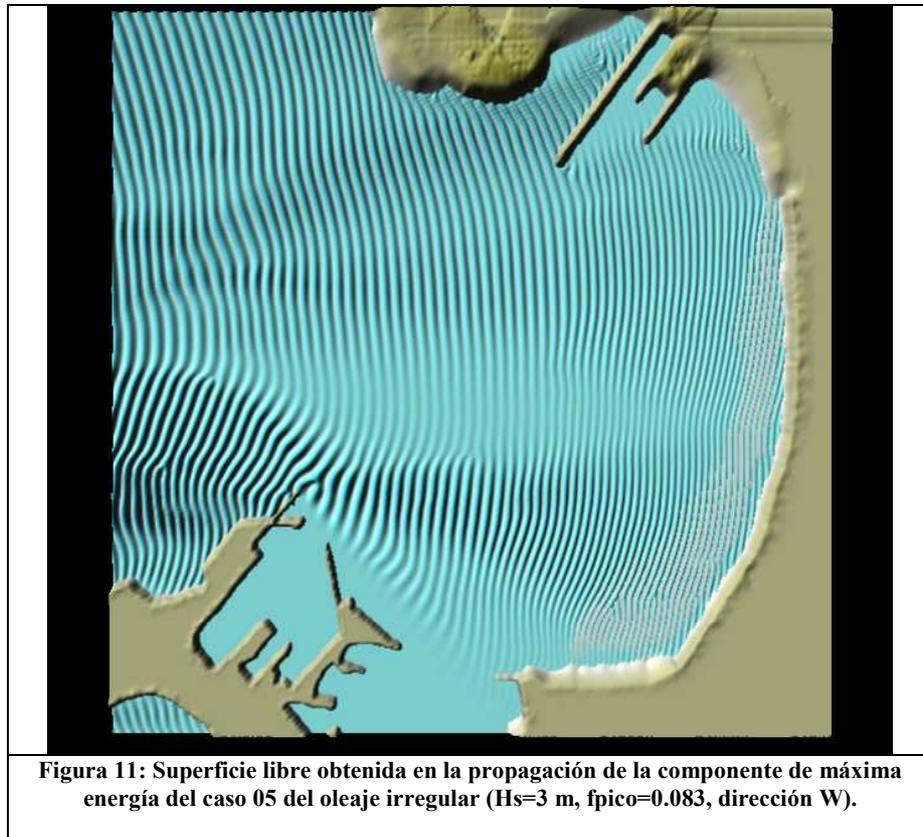
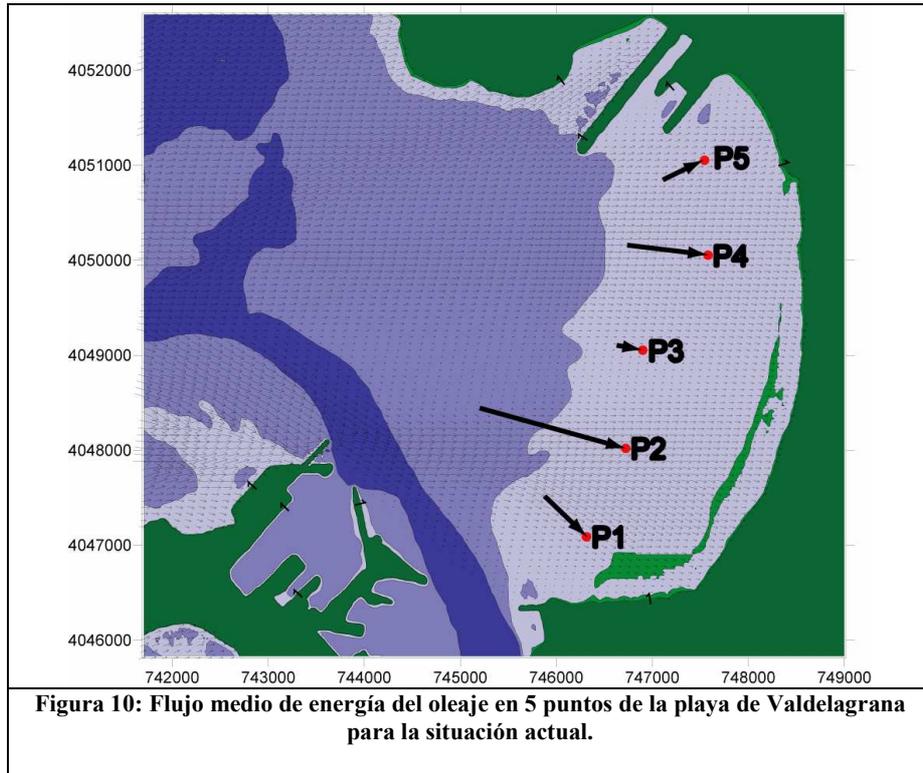
4.2. Oleaje y Sistema de Corrientes

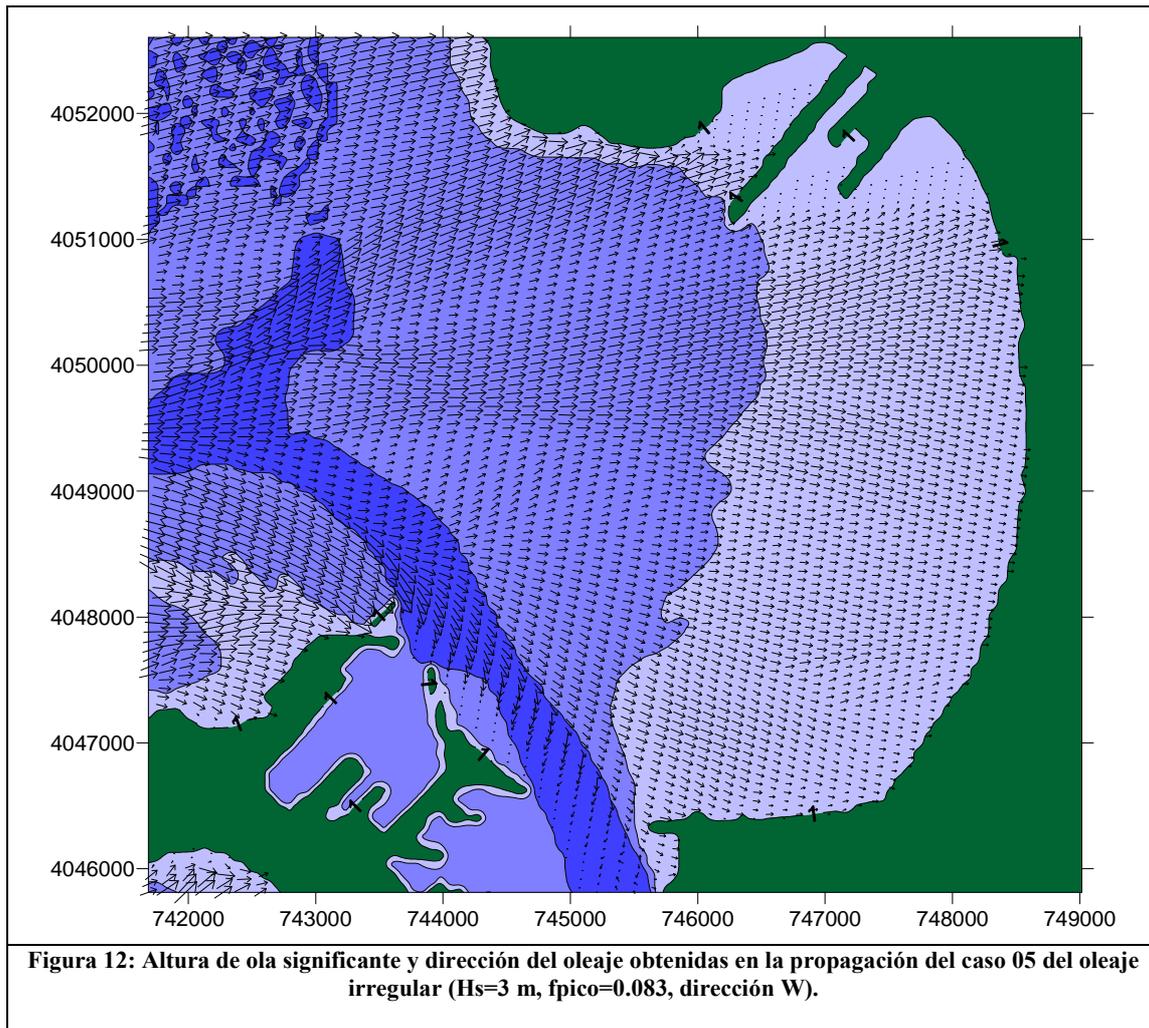
En la Figura 10 se presenta el flujo medio anual de energía del oleaje obtenido en la Situación Actual, en cinco puntos a lo largo de la playa. En ella se puede observar que en la zona del punto P2 el oleaje es más energético, y que el flujo de energía varía considerablemente a lo largo de la playa. Esta es la situación de referencia con la que posteriormente se compararán las diferentes alternativas.

En las figuras Figura 11, Figura 12 y Figura 13 se muestran los resultados obtenidos para el caso 05, de dirección W y parámetros fundamentales $H_s = 3 m$; $f_{pico} = 0.083$; $\gamma = 3.3$. En la primera se puede observar la superficie libre en un instante para ese estado de mar, en la segunda el mapa de la altura de ola significativa y la dirección del oleaje, y en la tercera los sistemas de corrientes resultantes.



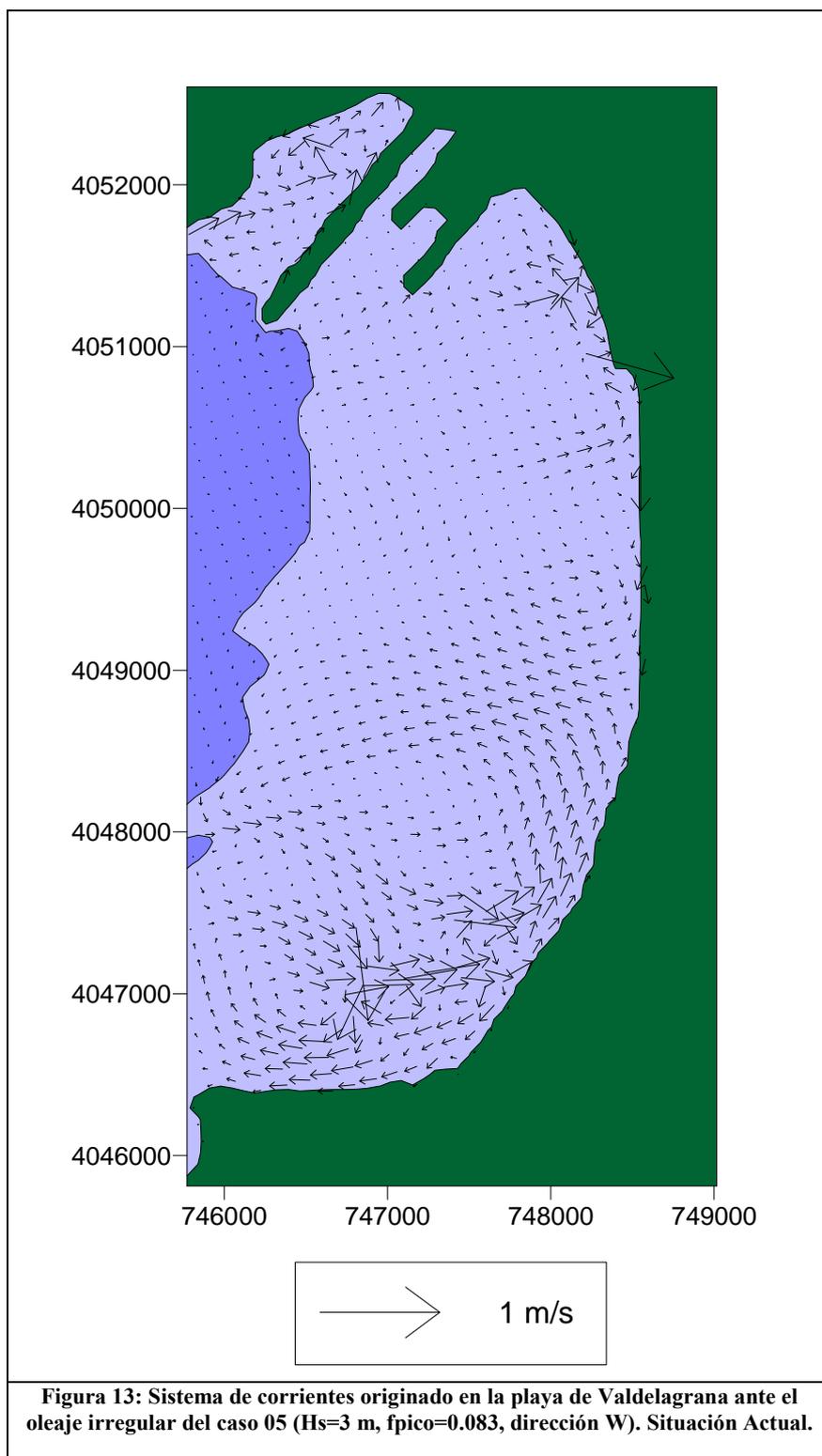
Los resultados obtenidos para el resto de los casos de oleaje de la Tabla 3 se presentan en el APÉNDICE: PROPAGACIONES DE OLEAJE.





En la Figura 13 se muestra un ejemplo de sistema de corrientes de rotura obtenido a partir de la propagación de un caso de oleaje. En esta figura puede observarse un bucle principal cuya dirección de entrada coincide con la sección de mayor flujo de energía, representada en la Figura 10 por el punto P2 a modo de ejemplo. Este bucle principal posee dos direcciones de salida hacia las secciones de menor altura de ola y por tanto menor flujo de energía (puntos P1 y P3). En la zona norte puede apreciarse el mismo patrón de comportamiento en sentido y dirección del sistema de corrientes, si bien las velocidades son menores en magnitud.

Posteriormente serán comparados los sistemas de corrientes obtenidos bajo el mismo caso de oleaje para cada alternativa.





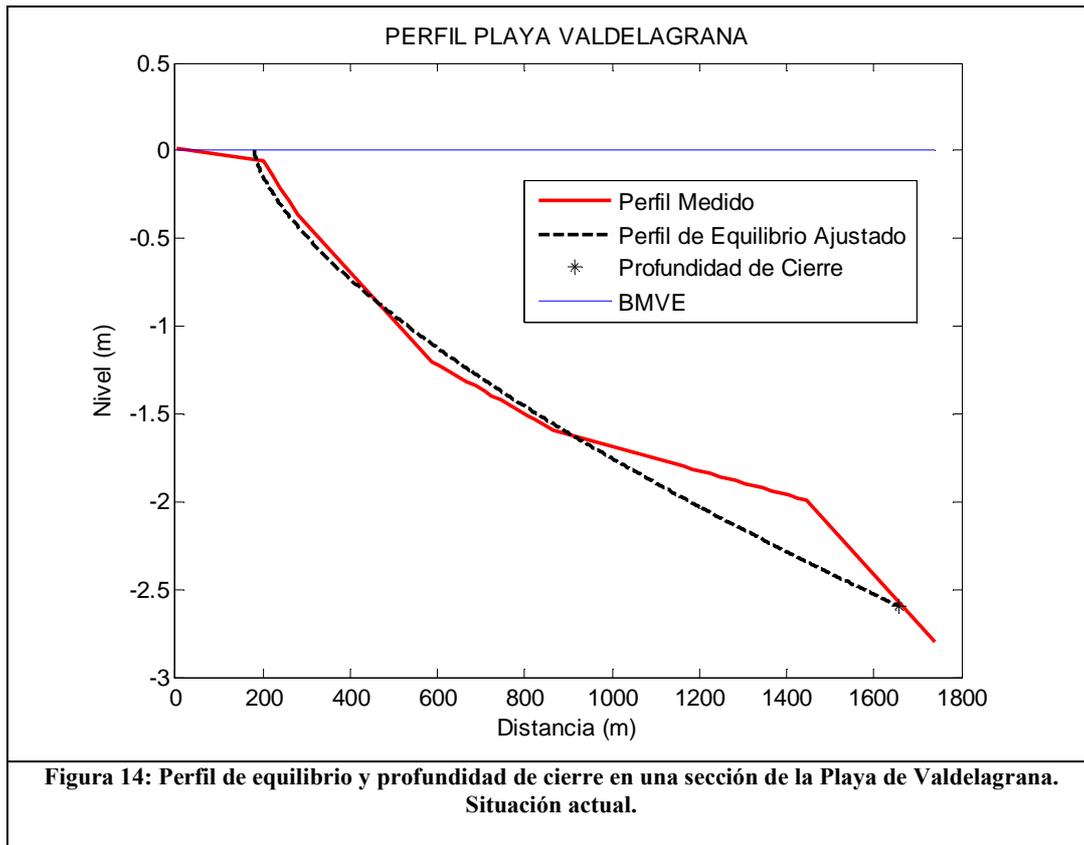
4.3. Perfil de playa.

Como se indicó en el apartado 3.5, el perfil de equilibrio puede obtenerse a partir de la formulación de Dean (1977), $h = A \cdot x^{2/3}$.

Para la obtención del perfil de equilibrio en la situación actual, se ha obtenido el valor H_{s12} del régimen medio a la profundidad $h = 50 \text{ m}$, $H_{s12} = 4.2 \text{ m}$ y su periodo correspondiente, $T = 12 \text{ s}$, y se ha propagado dicho estado de mar empleando el modelo numérico Ref-Dif.

A partir del estudio geomorfológico y de dinámica sedimentaria perteneciente al “Estudio Básico de una Terminal ro-ro para buques de pequeño calado en el El Puerto de Santa María” (Maldonado López A., Rodero Pérez J., Moreno Aranda I.), se ha obtenido que en la Playa de Valdelagrana el tamaño de sedimento está comprendido entre $300 \mu\text{m}$ y $100 \mu\text{m}$.

La Figura 14 muestra un perfil medido de la playa de Valdelagrana, cercano a la desembocadura del río San Pedro, y el ajuste realizado con el modelo teórico de Dean. Se ha empleado como parámetro de ajuste el coeficiente A , y se ha obtenido un valor de $A = 0.02$, que corresponde a un tamaño medio de arena de $D = 0.198 \text{ mm} = 198 \mu\text{m}$, valor comprendido en el intervalo de tamaños de sedimento existente en la playa



El punto origen de la línea de costa en la gráfica anterior es el nodo de coordenadas (747.700,069, 4.047.179,18).



5. AFECCIÓN DE LAS OBRAS A LA DINÁMICA LITORAL

5.1. Introducción

En este apartado se analiza la influencia que la construcción de las diferentes alternativas de ampliación del Puerto de Cádiz pudiera tener en la dinámica litoral de su entorno, y concretamente en la playa de Valdelagrana.

Las tres alternativas propuestas se muestran esquemáticamente en la fotografía aérea de la Figura 15. Las características principales de dichas alternativas son:

- **Alternativa 1: “Exterior Norte”**. Consiste en la creación de una nueva dársena al Norte de la dársena comercial del Puerto de Cádiz compuesta por una obra de abrigo exterior con la bocana orientada hacia el Este. La futura Terminal de Contenedores quedaría adosada a la Terminal de Contenedores existente.
- **Alternativa 2: “Dique de Levante”**. Consiste en la creación de una Terminal de Contenedores al Este de la dársena comercial del Puerto de Cádiz, adosada al actual dique de Levante, con la principal línea de atraque en el exterior.
- **Alternativa 3: “Cabezuela Oeste”**. Consiste en la creación de una explanada al Oeste del Bajo de la Cabezuela, adosada a la frontera Norte de la Factoría de Dragados Off-Shore, con la línea de atraque al W.

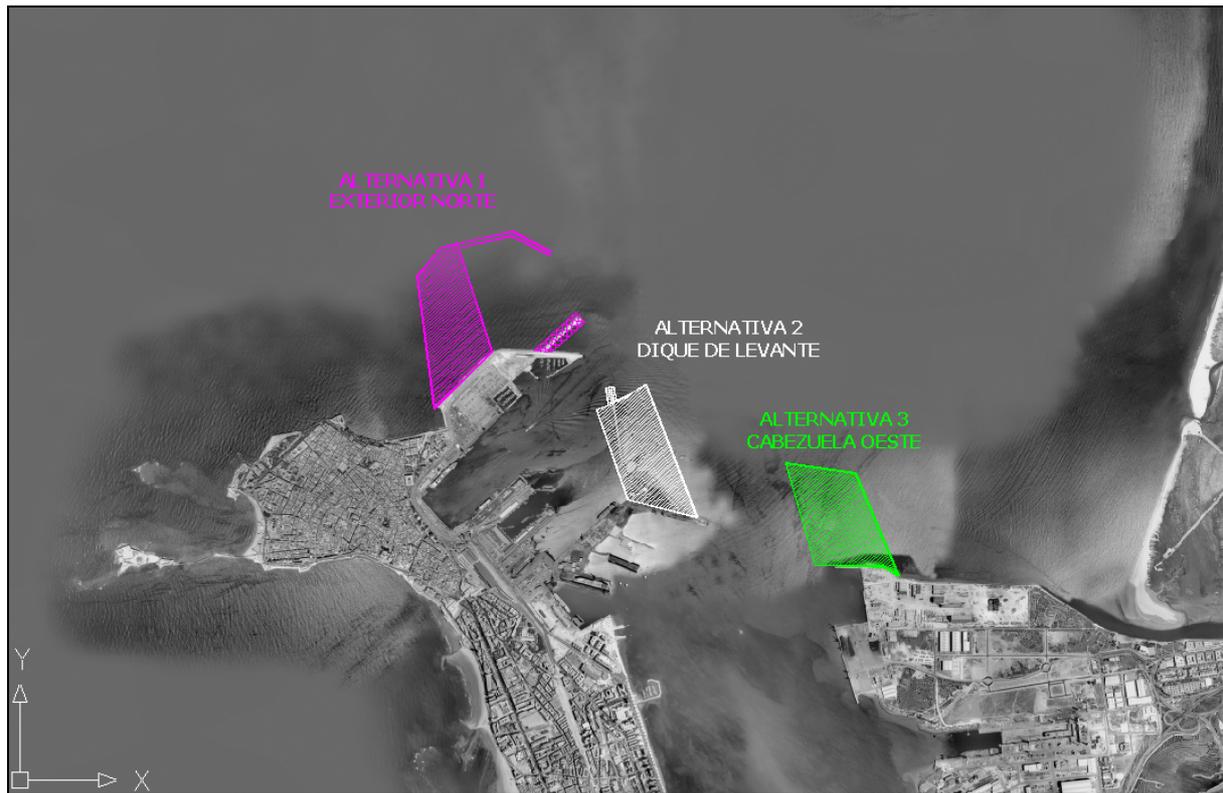


Figura 15: Fotografía aérea del área de estudio y esquema de alternativas consideradas.

5.2. Oleaje y Sistema de Corrientes.

Con objeto de analizar la posible influencia de las tres alternativas en el clima marítimo que gobierna la configuración de las playas de la zona de estudio, se ha simulado la propagación del oleaje en la situación futura (obra construida) para los mismos casos estudiados en la situación actual y bajo cada una de las alternativas.

5.2.1. *Alternativa Exterior Norte*

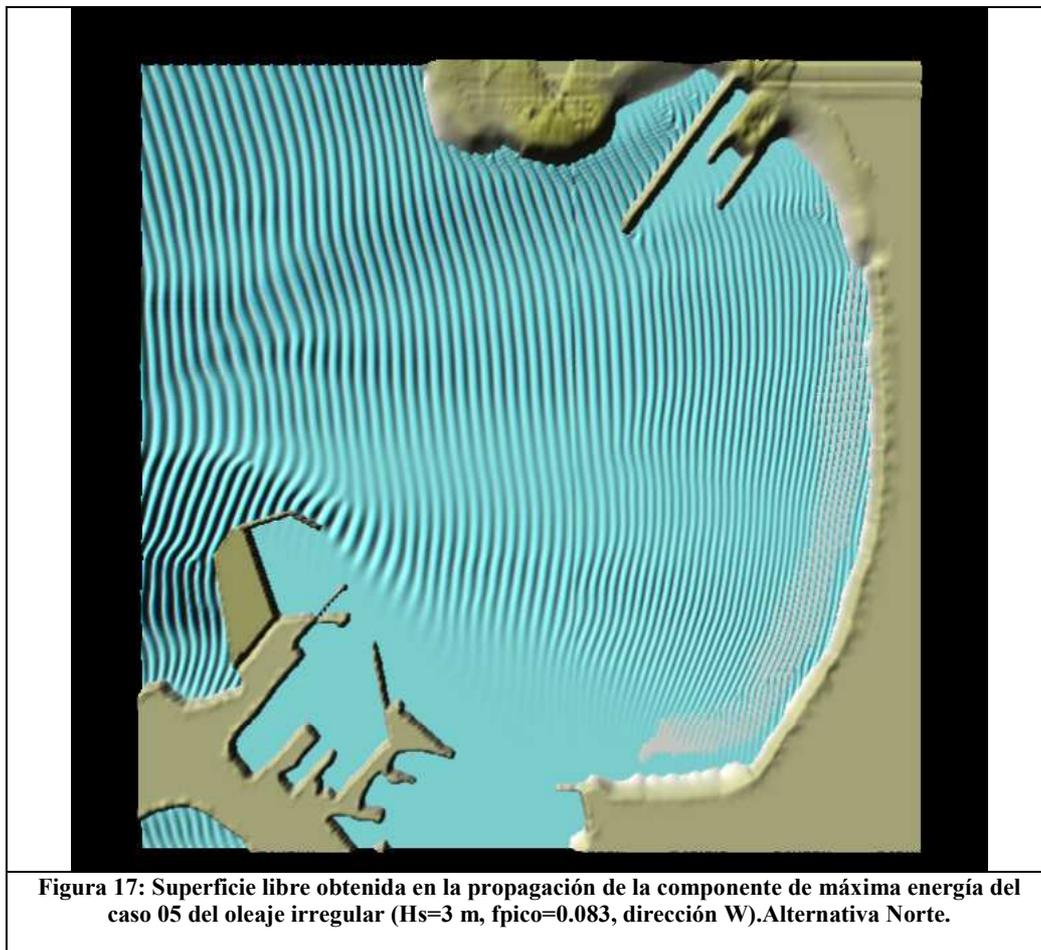
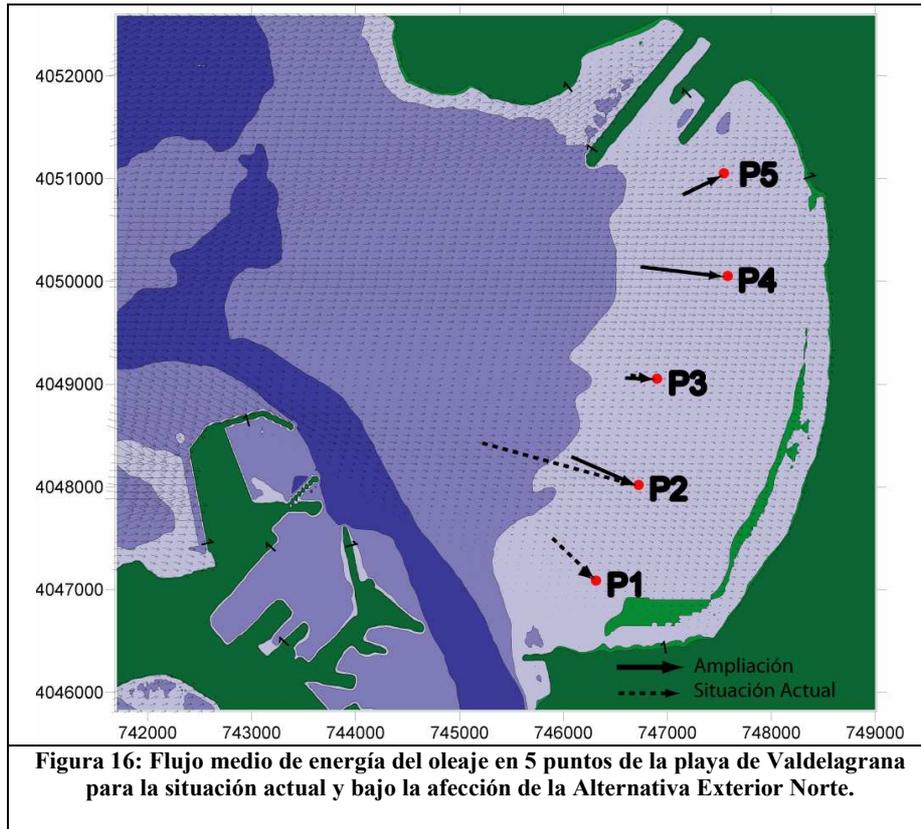
De los resultados de las simulaciones realizadas bajo la Alternativa Norte se desprenden las siguientes conclusiones:

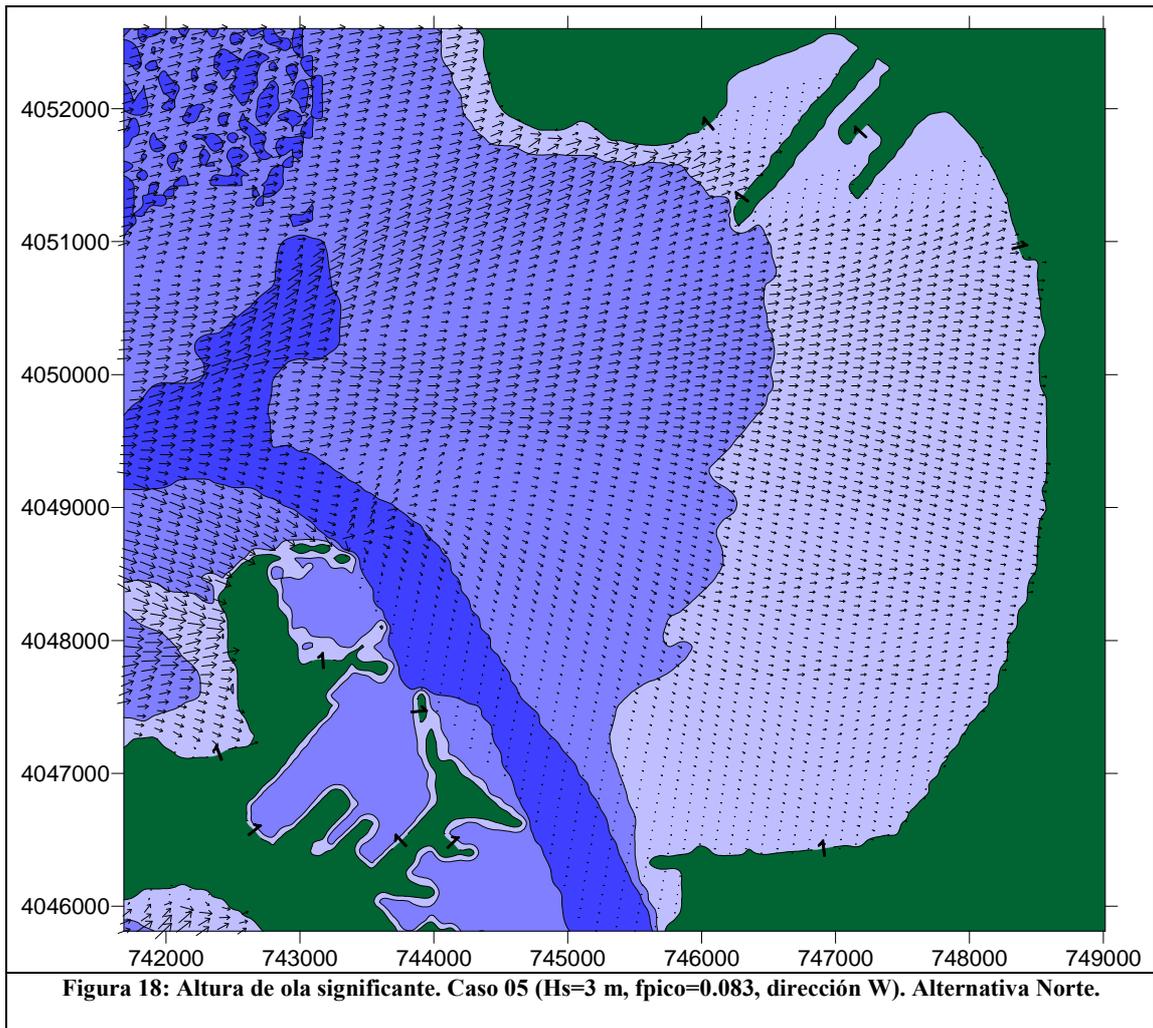
- La zona de afección de las obras depende de las características del oleaje incidente.
- La alternativa Exterior Norte influye en el oleaje que incide en la playa de Valdelagrana, afectando únicamente al extremo Sur de la playa. El extremo Norte no se ve afectado por la obra analizada.
- Lo mencionado en el punto anterior queda claramente reflejado en la Figura 16, donde se compara el flujo medio de energía que recibe la playa de Valdelagrana en cinco puntos distintos, para la situación actual y la alternativa analizada. El flujo medio de energía condiciona la forma en planta de las playas. Se observa que no hay diferencia

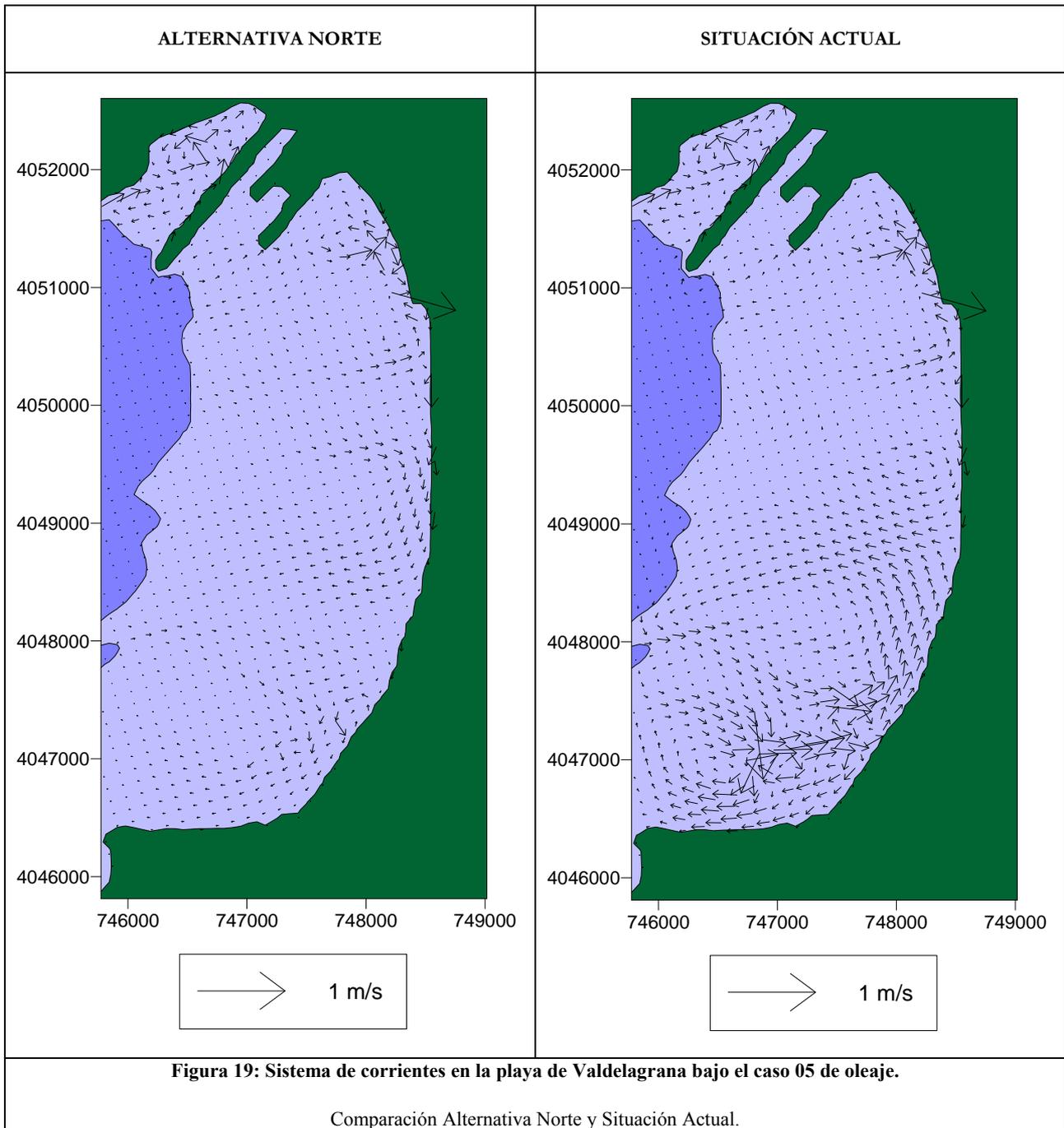


entre las situaciones analizadas para los puntos P3, P4 y P5, mientras que el flujo medio en P1 y P2 sí se ve afectado. Esto se debe al abrigo que proporciona la ampliación del puerto hacia el exterior frente a los oleajes del sector W en el extremo Sur de la playa de Valdelagrana.

- A modo de ejemplo se presentan en las páginas siguientes tres figuras con la futura situación: la Figura 17 y la Figura 18 recogen resultados de la propagación del caso 05 de oleaje irregular, procedente del W, con altura de ola significativa de 3 m y frecuencia de pico 0.083. En estas figuras se aprecia claramente la zona de afección señalada anteriormente. La Figura 19 presenta el sistema de corrientes de rotura obtenido para este caso de oleaje.
- Como se ha comentado, la construcción de la obra modificaría el flujo medio de energía en los puntos P1 y P2, lo que implica que cabe esperar alguna modificación de la forma en planta en su extremo Sur, siendo casi nulas las modificaciones en el extremo Norte. Ésta modificación se manifestaría en un avance del extremo Sur de la playa con respecto a su posición actual y un posible giro en sentido de las agujas del reloj del extremo de dicha playa.
- El sistema de corrientes de rotura ante la ejecución de la Alternativa Norte se vería afectado tanto en la zona sur como en la zona central de la playa de Valdelagrana, como puede apreciarse en la Figura 19. Debido a la disminución del flujo de energía en la zona sur de la playa (puntos P1 y P2 de la Figura 16), puede observarse una ligera variación en magnitud de las velocidades del bucle principal existente, conservándose el patrón de comportamiento en comparación a la situación actual bajo el mismo oleaje. Las direcciones de entrada y salida de los bucles de la zona norte permanecen invariables.







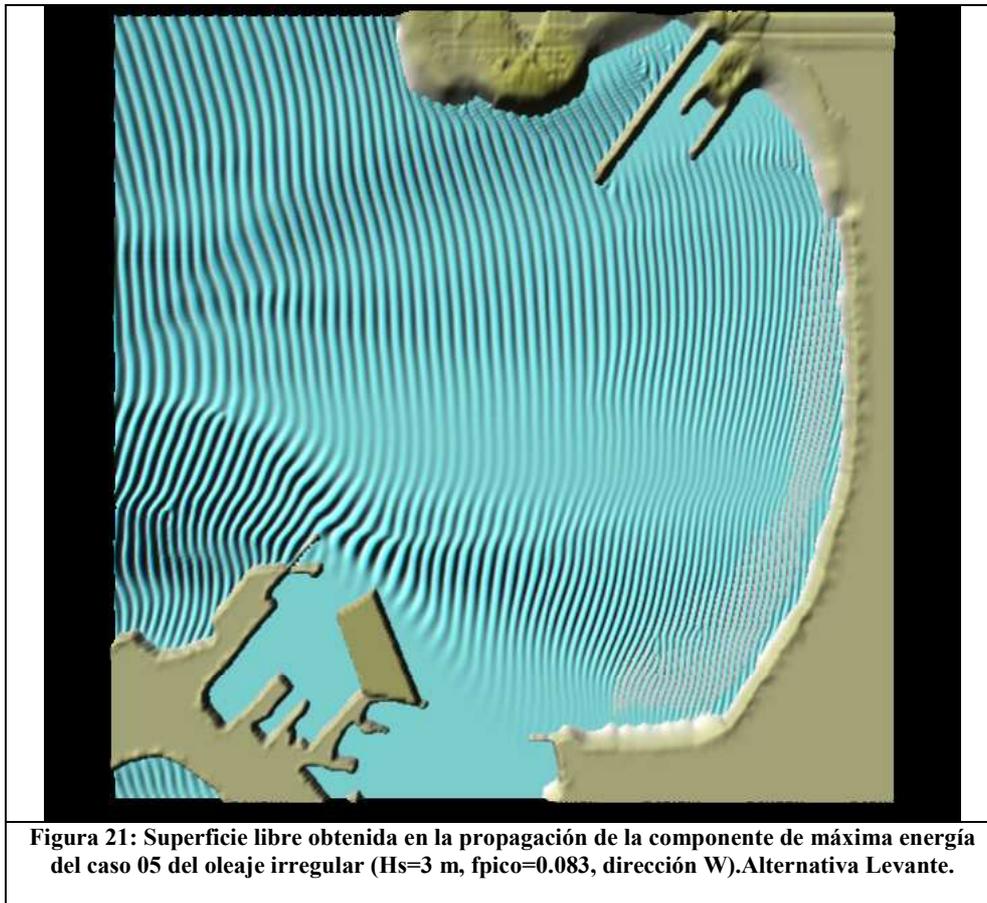
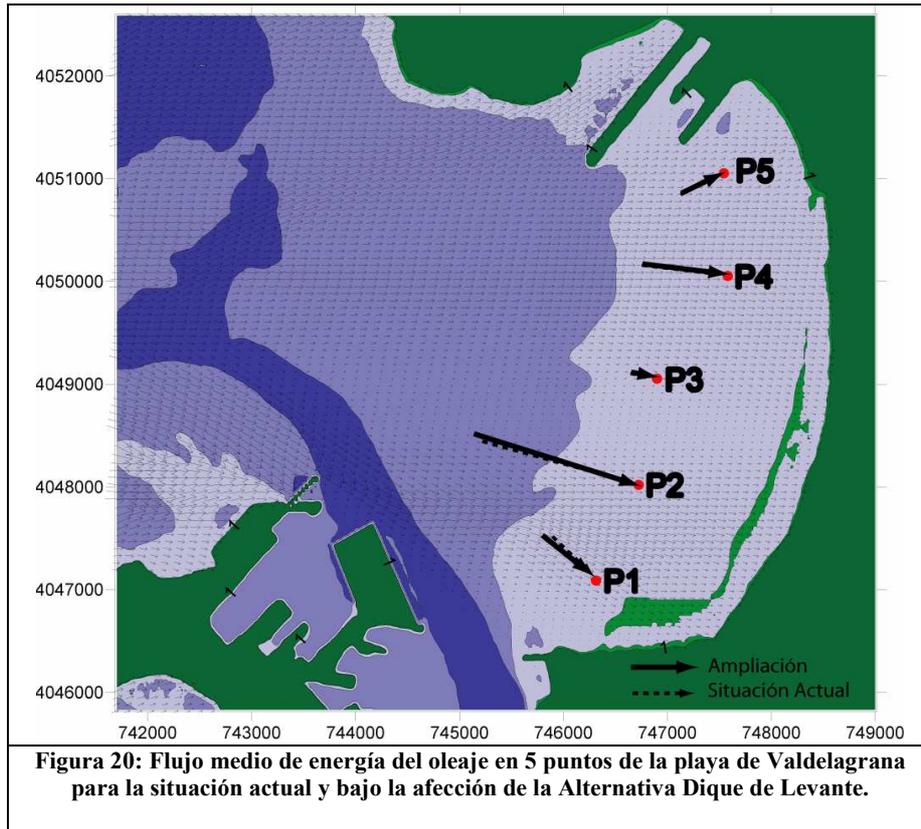


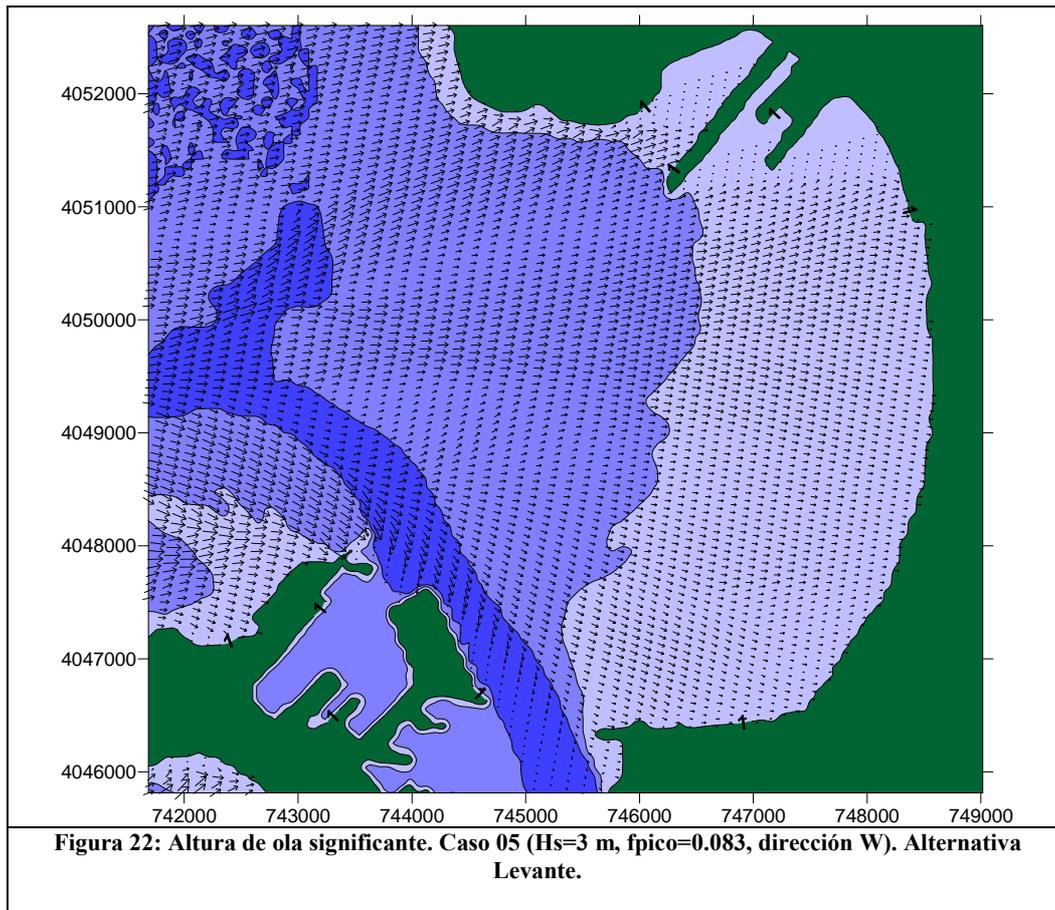
5.2.2. Alternativa Dique de Levante

Al objeto de analizar la posible influencia de la alternativa “Dique de Levante” en el clima marítimo que gobierna la configuración de las playas de la zona de estudio, se ha simulado la propagación del oleaje en la situación futura (obra construida) para los mismos casos estudiados en la situación actual.

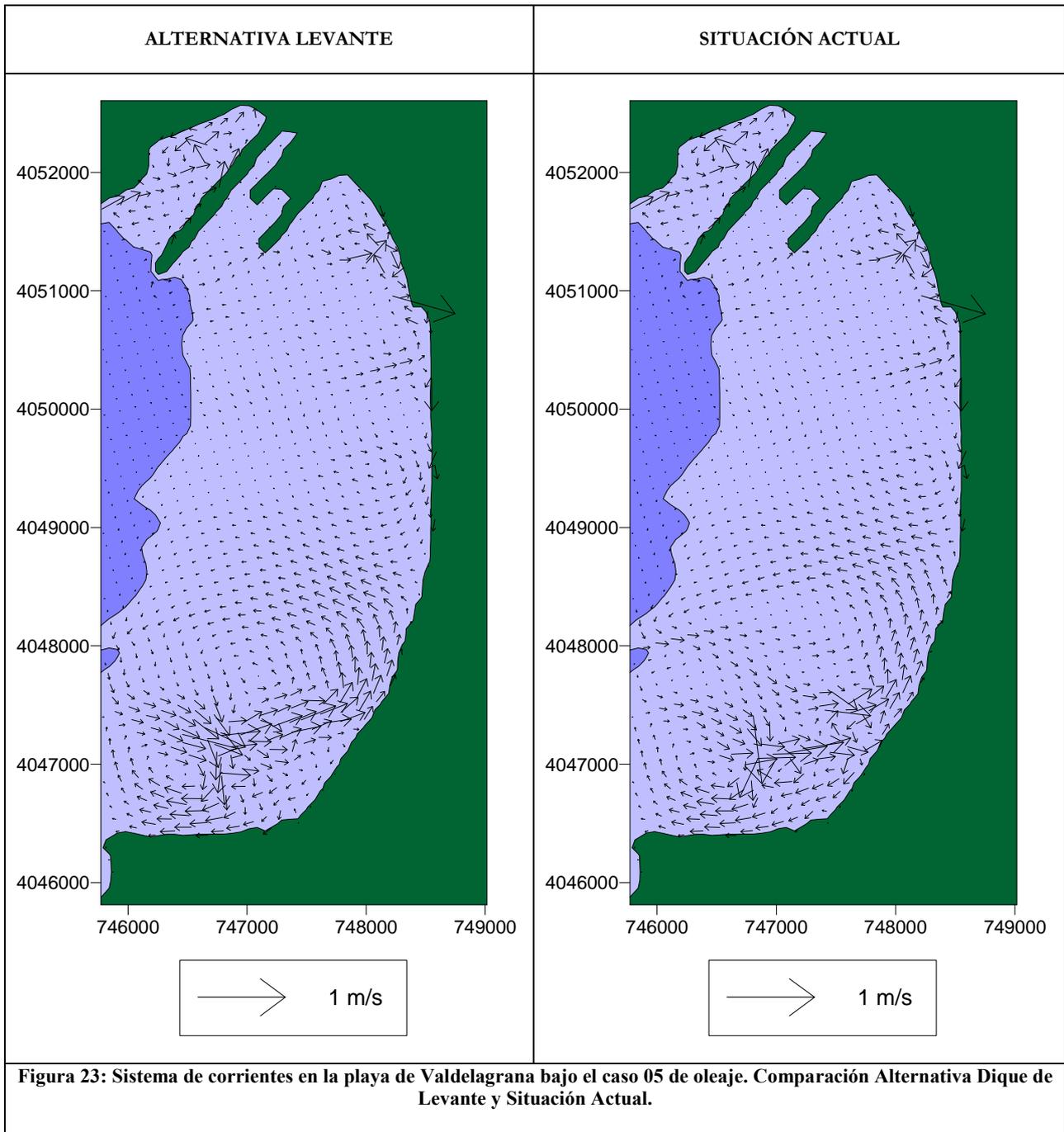
De los resultados de dichas simulaciones se desprenden las siguientes conclusiones:

- La zona de afección de las obras depende de las características del oleaje incidente.
- La alternativa Dique de Levante no influye significativamente en el oleaje que incide en la playa de Valdelagrana. Los patrones circulatorios y su magnitud en la zona de rompientes del extremo Norte de la playa de Valdelagrana no se ven afectados por la obra construida, y en el extremo Sur (puntos P1 y P2), hacia la desembocadura del río San Pedro, no son significativos.
- Lo mencionado en el punto anterior queda claramente reflejado en la figura adjunta, donde se compara el flujo medio de energía que recibe la playa de Valdelagrana en cinco puntos distintos, para la situación actual y la alternativa analizada. El flujo medio de energía condiciona la forma en planta de la playa. Se observa que no hay diferencia entre las situaciones analizadas para los puntos P3, P4 y P5, mientras el flujo medio en P1 y P2 es prácticamente el mismo.
- A modo de ejemplo se presentan en las páginas siguientes tres figuras con la futura situación: la Figura 21 y Figura 22 recogen resultados de la propagación de un caso de oleaje irregular procedente del W con altura de ola significativa de 3 m y frecuencia de pico 0.083. La Figura 23 representa el sistema de corrientes en la zona de la playa de Valdelagrana para el mismo caso de simulación.





- El sistema de corrientes de rotura ante la ejecución de la Alternativa Dique de Levante apenas se vería afectado en velocidad como puede apreciarse en el siguiente gráfico, no existiendo variación en las direcciones de entrada y salida en los bucles con respecto a la situación actual (Figura 13). La alternativa Dique de Levante no modificaría en líneas generales el flujo de energía existente en profundidades cercanas a la línea de costa y, por tanto, tampoco el sistema de corrientes existente en la actualidad.





5.2.3. *Alternativa Cabezuela*

Al objeto de analizar la posible influencia de la alternativa “Cabezuela” en el clima marítimo que gobierna la configuración de las playas de la zona de estudio, se ha simulado la propagación del oleaje en la situación futura (obra construida) para los mismos casos estudiados en la situación actual.

De los resultados de dichas simulaciones se desprenden las siguientes conclusiones:

- La zona de afección de las obras depende de las características del oleaje incidente.
- La alternativa Cabezuela influye en el oleaje que incide en la playa de Valdelagrana, afectando únicamente al extremo Sur de la playa. El extremo Norte no se ve afectado por la obra analizada.
- De nuevo se compara el flujo medio de energía que recibe la playa en cinco puntos para la situación actual y la alternativa analizada. Se observa que no hay diferencia entre las situaciones examinadas para los puntos P2, P3, P4 y P5, mientras el flujo medio en P1 sí se ve afectado principalmente en la dirección. Esto se debe al abrigo que proporcionaría la ampliación frente a los oleajes del sector W en el extremo Sur de la playa de Valdelagrana.
- El efecto de las obras se manifiesta en una reducción de la energía del oleaje incidente en la zona de la playa de Valdelagrana justo detrás de la obra propuesta. Se presentan también en este caso a modo de ejemplo figuras obtenidas de la propagación de un caso de oleaje irregular. En dichas representaciones se puede apreciar que la zona de afección se limita a un tramo de playa de escasa longitud en las cercanías de la desembocadura del Río San Pedro.

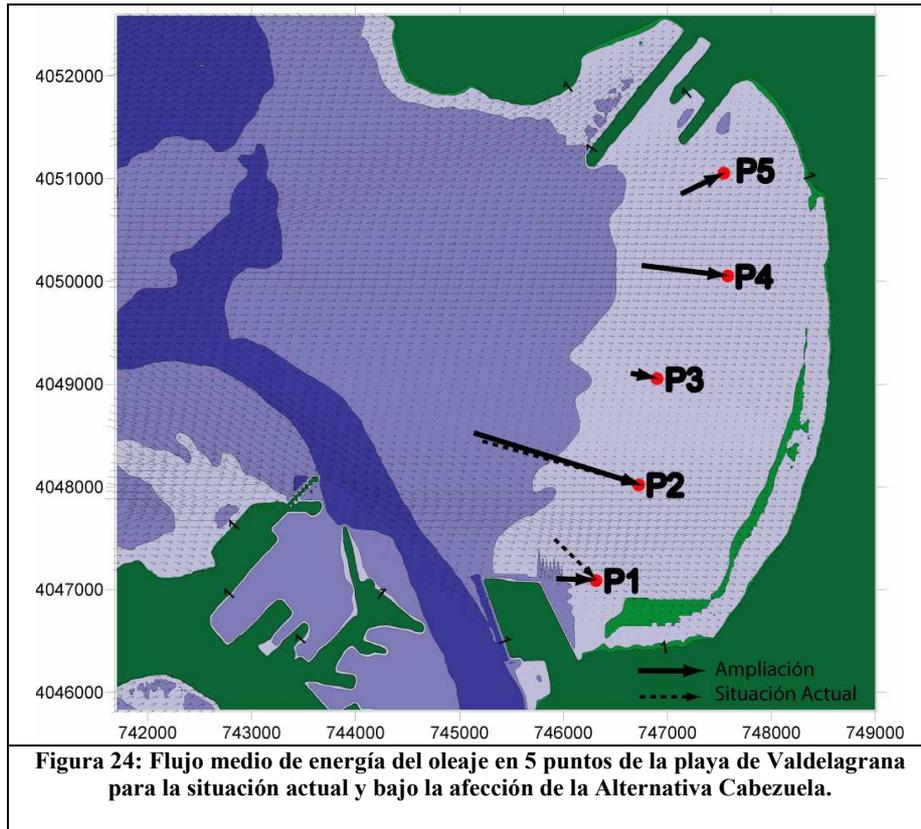


Figura 24: Flujo medio de energía del oleaje en 5 puntos de la playa de Valdelagrana para la situación actual y bajo la afección de la Alternativa Cabezueta.

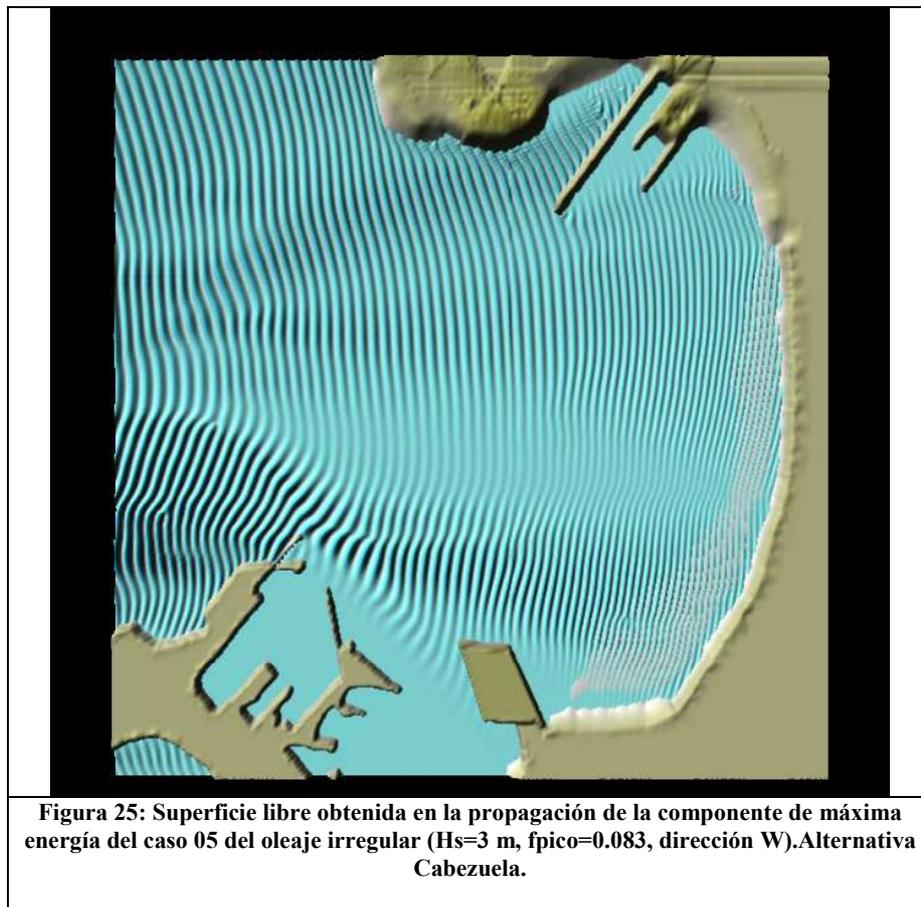
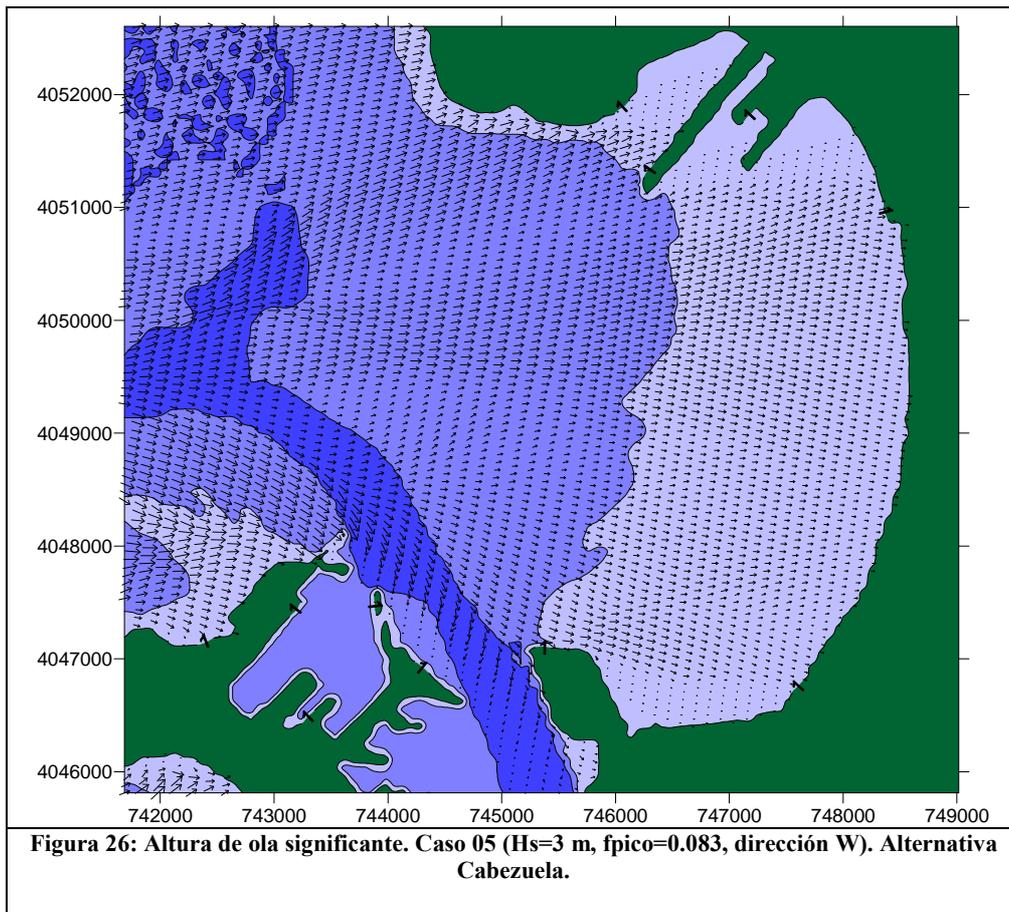
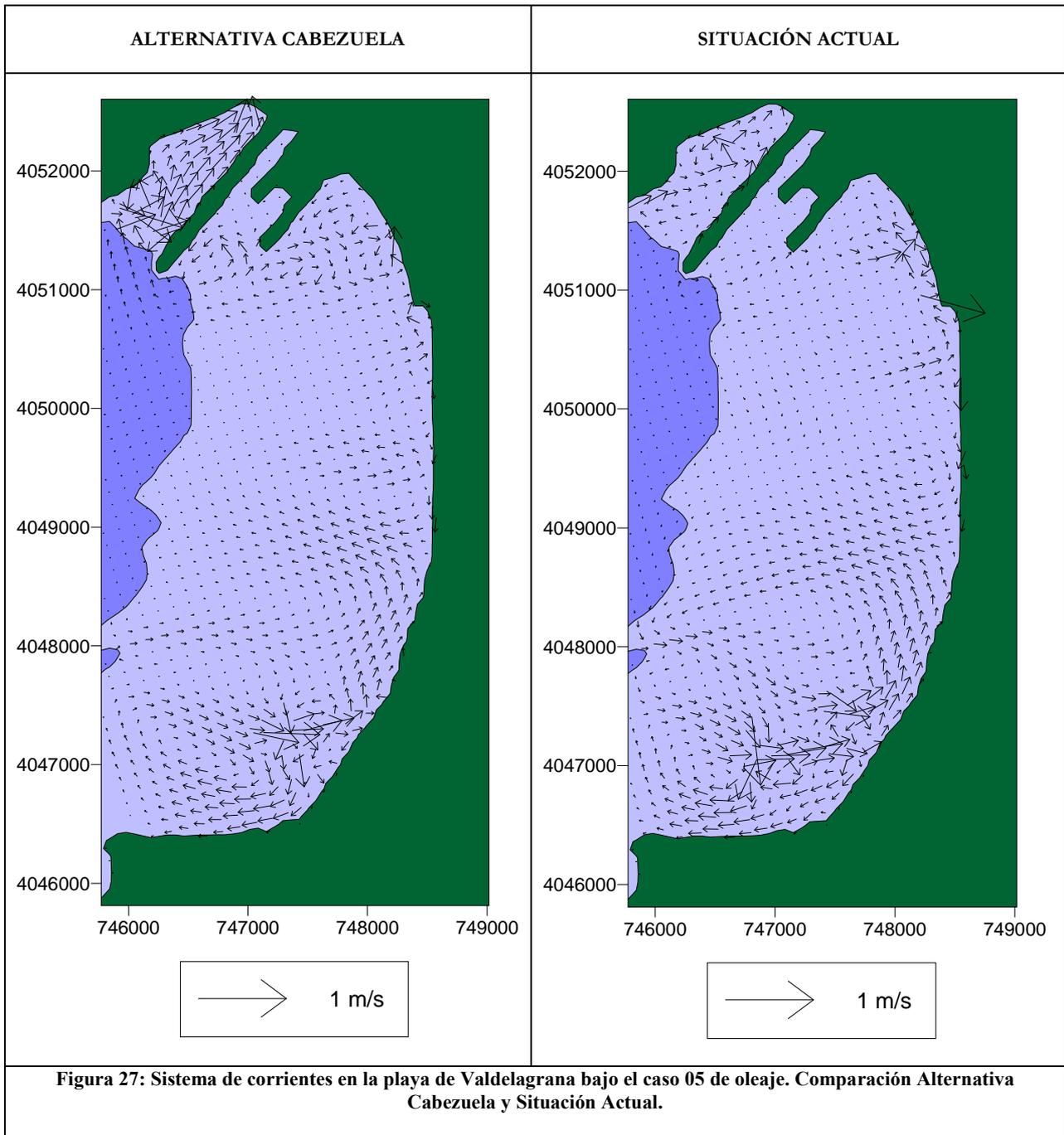


Figura 25: Superficie libre obtenida en la propagación de la componente de máxima energía del caso 05 del oleaje irregular ($H_s=3$ m, $f_{pico}=0.083$, dirección W). Alternativa Cabezueta.



- El sistema de corrientes de rotura ante la ejecución de la Alternativa Cabezuela se vería afectado ligeramente en magnitud de las velocidades en la zona sur de la playa de Valdelagrana, y de manera más consistente en las direcciones de entrada y salida del flujo. El bucle existente permanece también con dos direcciones de salida, quedando sin embargo la dirección mejor definida en la zona más meridional (Figura 27). Esto es debido al cambio de dirección media del oleaje en las proximidades de la desembocadura del Río San Pedro.





5.3. Perfil de playa

La forma del perfil de equilibrio, como ya se indicó en el apartado 3.5, depende solamente del tamaño de sedimento existente en la playa. No obstante, la profundidad de cierre o profundidad de corte sí depende de las características del oleaje, por lo que será el parámetro que se vea afectado en cada una de las alternativas. A continuación se muestran los perfiles obtenidos para cada una de las alternativas, así como una tabla que recoge las alturas de ola significativa H_{s12} tras las propagaciones para el mismo perfil de playa analizado en la situación actual (ver apartado 4.3) y las correspondientes profundidades de corte h^* .

Alternativa	H_{s12} (m)	h^* (m)
Situación actual	1.53	2.60
Norte	1.64	2.77
Levante	1.46	2.49
Cabezuela	1.47	2.50

Tabla 4: Altura de ola H_{s12} y profundidad de cierre obtenida para un perfil de playa cercano a la desembocadura del río San Pedro, en la situación actual y en las diferentes alternativas.

Como puede apreciarse, las profundidades de cierre no varían notablemente, si bien la ejecución de la alternativa Dique de Levante origina en la propagación una menor altura de ola y por tanto una menor profundidad de cierre, por lo que la afección al perfil de playa será menor. En cambio la Alternativa Norte provocaría un perfil de equilibrio de mayor profundidad, y consecuentemente, una mayor respuesta dinámica al oleaje incidente.

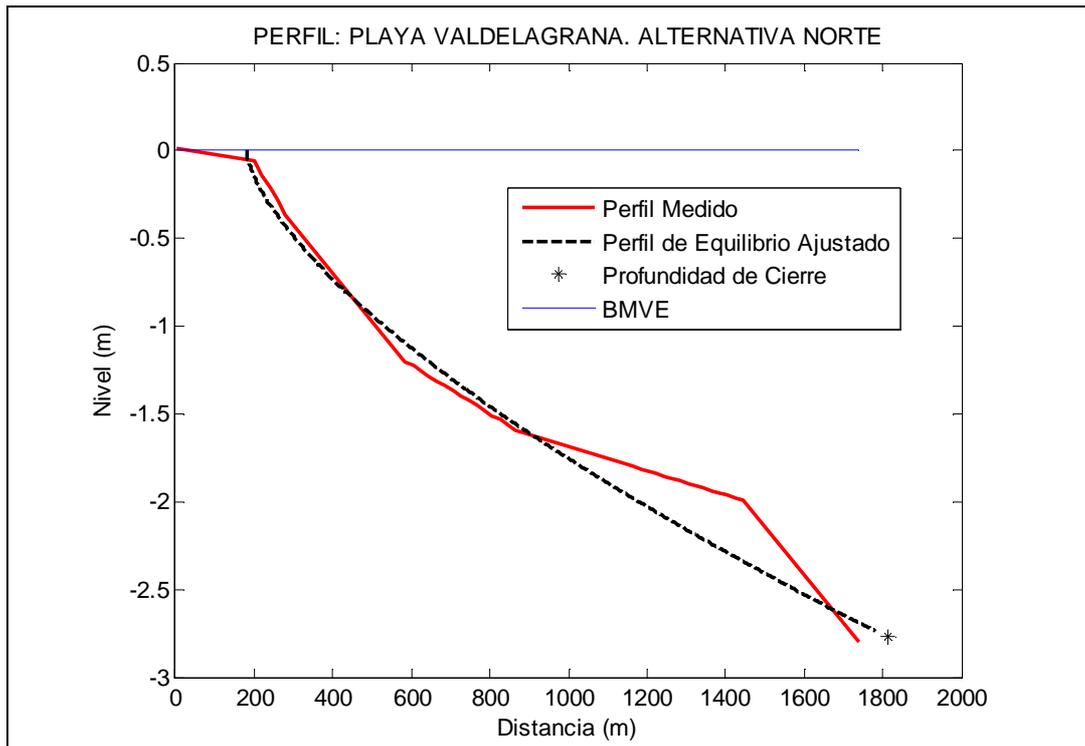


Figura 28: Perfil de equilibrio y profundidad de cierre en una sección de la Playa de Valdelagrana ante la ejecución de la Alternativa Norte.

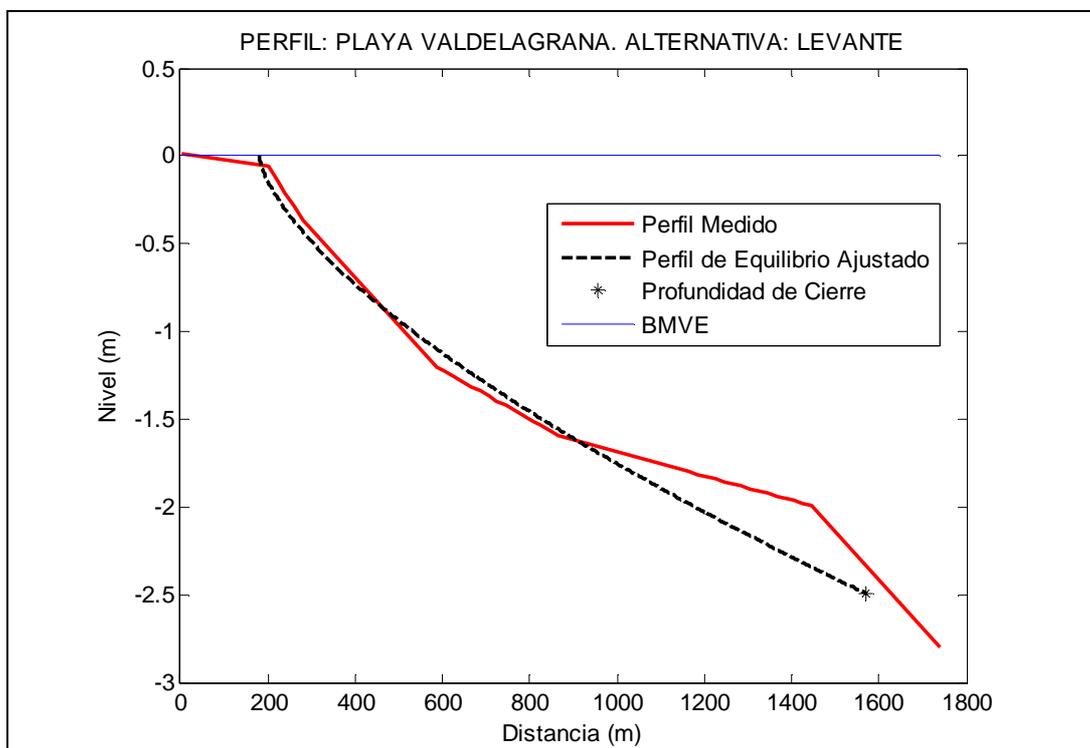
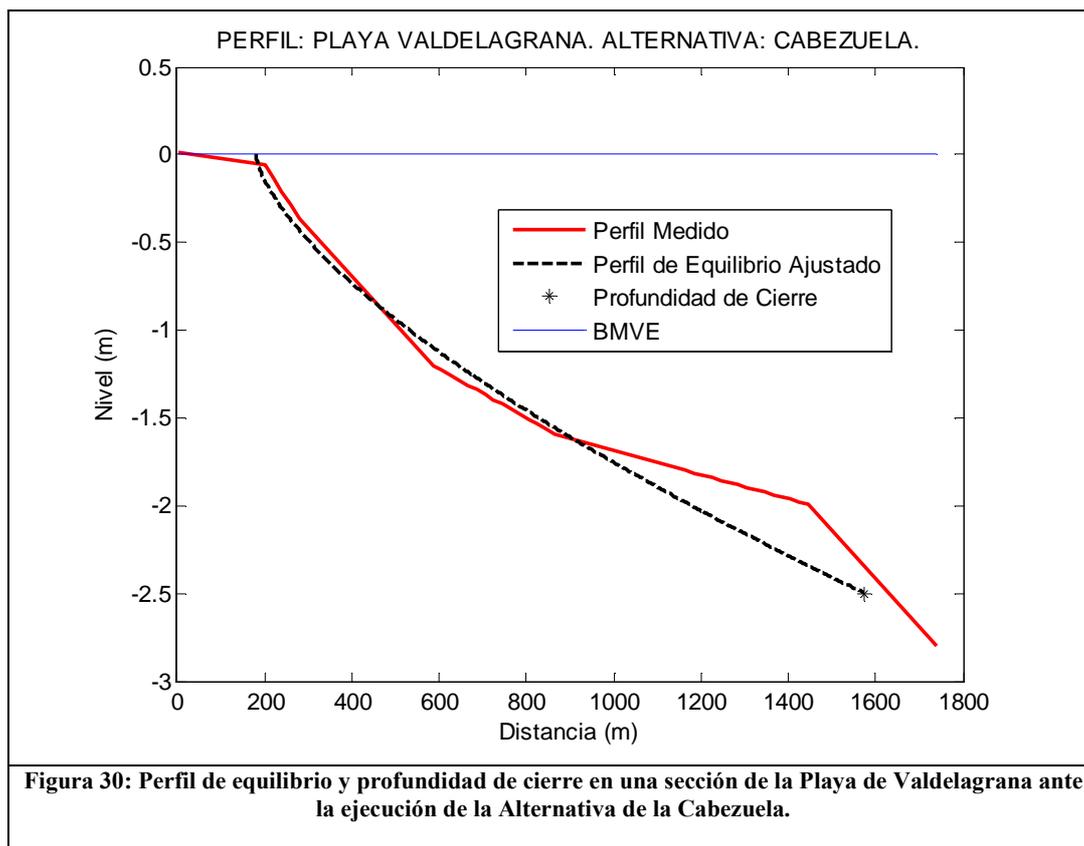


Figura 29: Perfil de equilibrio y profundidad de cierre en una sección de la Playa de Valdelagrana ante la ejecución de la Alternativa de Levante.





5.4. Conclusiones

Las principales conclusiones del análisis realizado son las siguientes:

- Los oleajes reinantes y dominantes en la zona de estudio proceden del sector W.
- Las características del oleaje y del sistema de corrientes en la playa de Valdelagrana quedan condicionados por el efecto de la batimetría existente, donde se aprecia el papel de los bajos existentes y del canal de navegación.
- El comportamiento general de la playa de Valdelagrana en la situación actual, en cuanto a dinámica y transporte sedimentario, puede resumirse en dos puntos clave:
 - Los fenómenos de acreción tienen lugar principalmente en la zona norte mientras que la erosión en la zona sur ocasiona un retroceso general de la flecha.
 - Las corrientes mareales de flujo y reflujo son las que controlan la distribución de sedimentos en la zona sur, mientras que la zona norte está más expuesta al oleaje incidente.
- Cualquier afección que suponga la progresión del régimen erosivo existente hacia la parte sur de la playa de Valdelagrana, supondrá una mayor intrusión y deposición del sedimento en la desembocadura del Río San Pedro.
- Las distintas alternativas analizadas sólo afectarían en distinto grado al extremo Sur de la playa de Valdelagrana. Al permanecer bien definida la dirección de la energía incidente del oleaje, la forma en planta de la playa, tendente a una orientación en planta perpendicular a esta dirección de incidencia, no sufrirá grandes cambios puesto que ninguna de las alternativas suponen una variación en la oblicuidad del oleaje, si bien el grado de afección es distinto para cada una de ellas.

La Alternativa Exterior Norte supone una disminución en el flujo de energía en la zona sur de la playa de Valdelagrana, provocando una clara afección al sistema de corrientes existente en lo que a magnitud de velocidades se refiere (Figura 19). Esto supondría un transporte longitudinal de material más definido hacia el sur de la playa. Este incremento de erosión provocaría un mayor depósito de sedimentos en la desembocadura del Río San Pedro, con el consiguiente refuerzo de la obstrucción del estuario y aumento del desequilibrio del sistema. La ejecución de esta alternativa supone también un aumento de la profundidad de cierre del perfil de equilibrio de la playa, con lo que se produciría una mayor respuesta dinámica al oleaje incidente al aumentar la profundidad del perfil activo.



- La ejecución de la Alternativa Dique de Levante apenas modifica el oleaje incidente en su propagación, (en concreto en su tramo final, hacia la Punta) obteniéndose una ligera disminución en los valores de altura de ola frente a la playa. Esta disminución de la altura de ola supone también un descenso del valor de la profundidad de cierre del perfil de equilibrio: en consecuencia será menor la sección de playa en la que el transporte de sedimentos transversal tiene magnitud apreciable. Esta alternativa además no modifica, prácticamente, ni la magnitud ni la dirección del flujo de energía del oleaje incidente, y por tanto, no altera la dinámica del sistema de corrientes obtenido en la playa. Como consecuencia, tampoco se afectará negativamente la dinámica sedimentaria actual de la zona de interacción Playa Valdelagrana-Desembocadura Río San Pedro.
- La Alternativa Cabezuela provoca tras la propagación del oleaje un cambio en el flujo de energía en los puntos P1 y P2, tanto en magnitud como en dirección. Esta modificación explica la bifurcación del bucle existente en el sistema de corrientes, pudiéndose observar la generación de una nueva salida de flujo y el consecuente bucle doble al sur de la playa de Valdelagrana. Estas modificaciones en el sur de la playa de Valdelagrana provocan cambios en la dinámica de sedimentos de la desembocadura del Río San Pedro. Por otro lado, la profundidad de cierre sufre también un ligero descenso, con lo que se produciría una menor respuesta dinámica al oleaje incidente al disminuir la profundidad del perfil activo.
- Así, habiéndose estudiado para cada una de las alternativas los sistemas de corrientes, la magnitud y dirección del oleaje incidente y el perfil de equilibrio en la playa de Valdelagrana, puede concluirse que la menor afección a la dinámica litoral de la zona la proporciona la alternativa Dique de Levante, pudiéndose calificar este impacto sobre el litoral como leve o inexistente, debido a los siguientes aspectos:
 - Valores de altura de ola obtenidas frente a la playa ligeramente menores que en la situación actual y que en el resto de alternativas.
 - Menor profundidad de cierre del perfil de equilibrio resultante que en la situación actual y que el resto de alternativas, y en consecuencia menor área, en la que el transporte de sedimentos transversal tiene magnitud apreciable.
 - Variación despreciable del flujo de energía del oleaje incidente, y por tanto ausencia de modificación en planta de la playa por causas debidas a la ejecución de la alternativa.
 - Ausencia de cambios en el sistema de corrientes en la playa de Valdelagrana, permaneciendo invariables el número de bucles y sus direcciones de entrada y



salida del flujo, así como las velocidades en magnitud. Este hecho descarta posibles afecciones en la hidrodinámica de la Desembocadura del Río San Pedro debidas a la ejecución de la alternativa.



6. APÉNDICE: PROPAGACIONES DE OLEAJE.

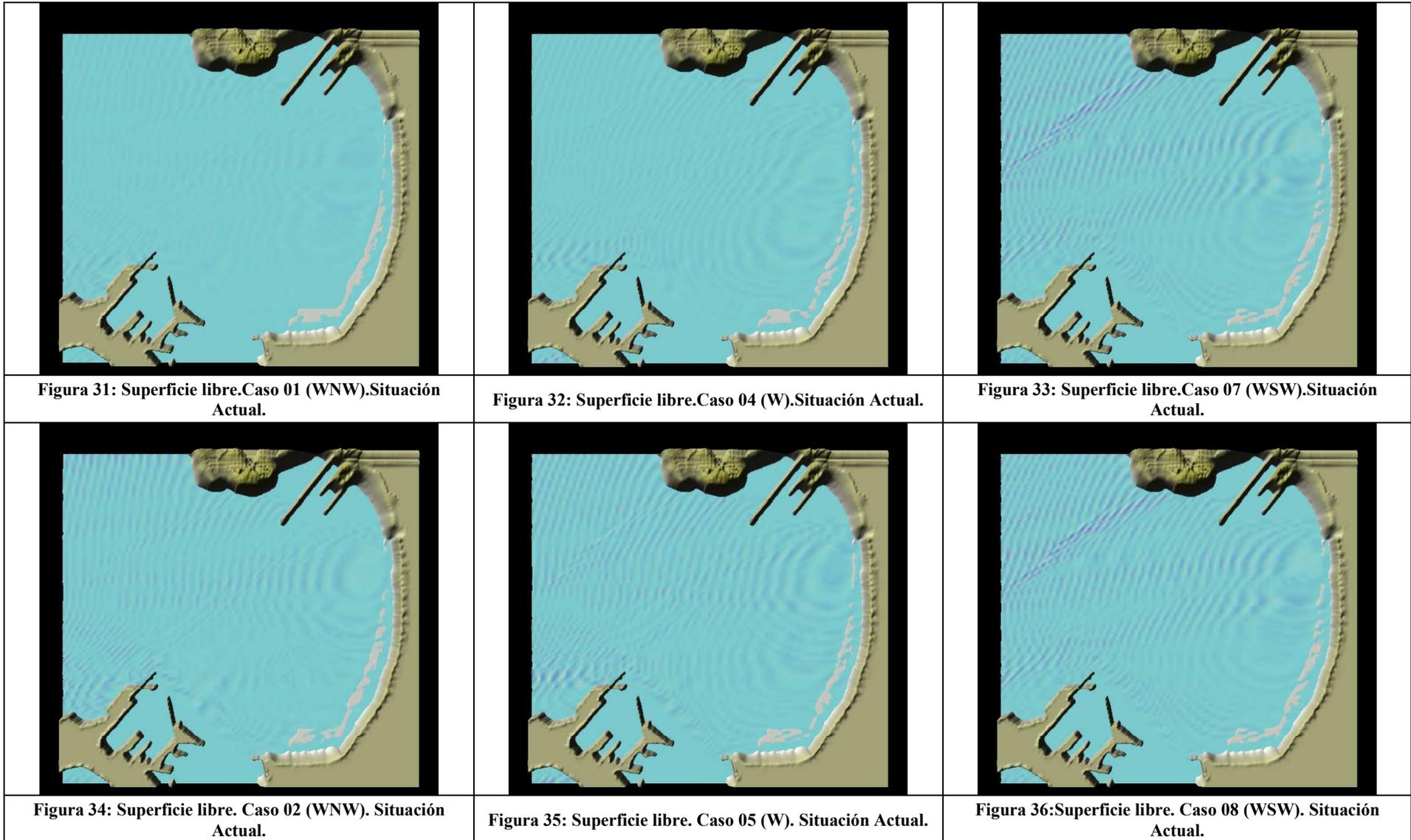
Se muestran aquí los resultados de superficie libre, de las propagaciones realizadas bajo el modelo numérico Ref-Dif. Los casos de simulación corresponden a oleaje irregular, y sus parámetros principales son los que se indican en la tabla adjunta

Caso	H_s (m)	f_{pico}	f_{max}	Dirección	% tiempo
01	1	0.083	0.40	WNW	19,1460
02	3	0.083	0.40	WNW	0,4880
03	5	0.083	0.40	WNW	0,0030
04	1	0.083	0.40	W	41,8930
05	3	0.083	0.40	W	4,4660
06	5	0.083	0.40	W	0,3450
07	1	0.083	0.40	WSW	6,9700
08	3	0.083	0.40	WSW	2,8850
09	5	0.083	0.40	WSW	0,5960

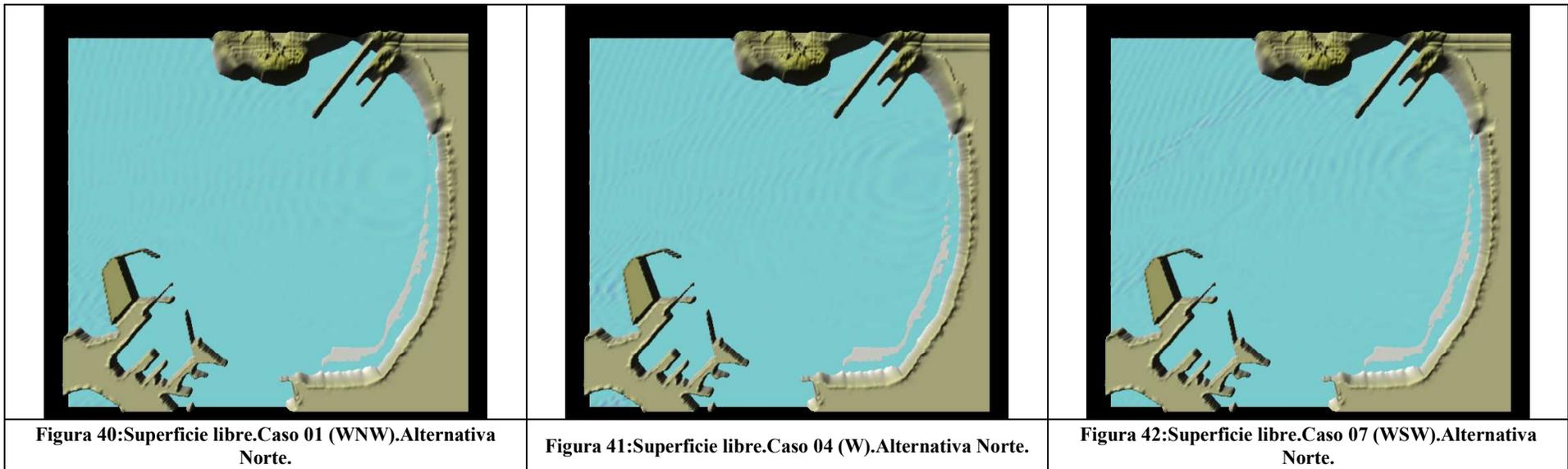
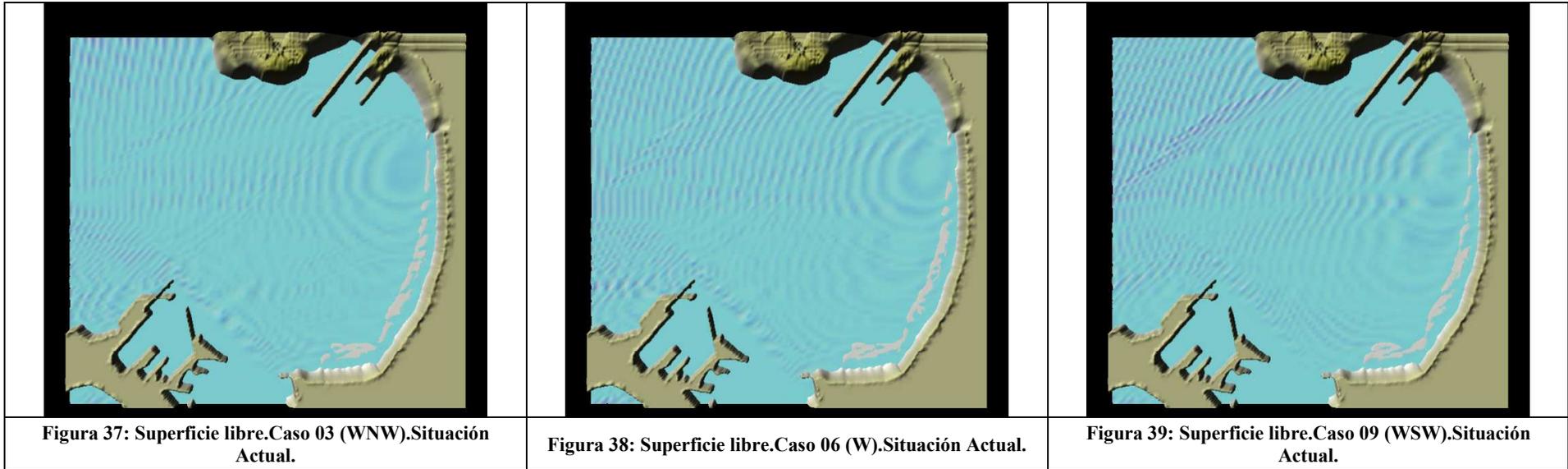
Tabla 5: Características de los casos simulados de oleaje irregular. En todos los casos se han empleado 10 componentes de oleaje, $\gamma = 3.3$ y un parámetro de dispersión de $11^\circ 25'$, y un nivel de marea de 2.00 metros.

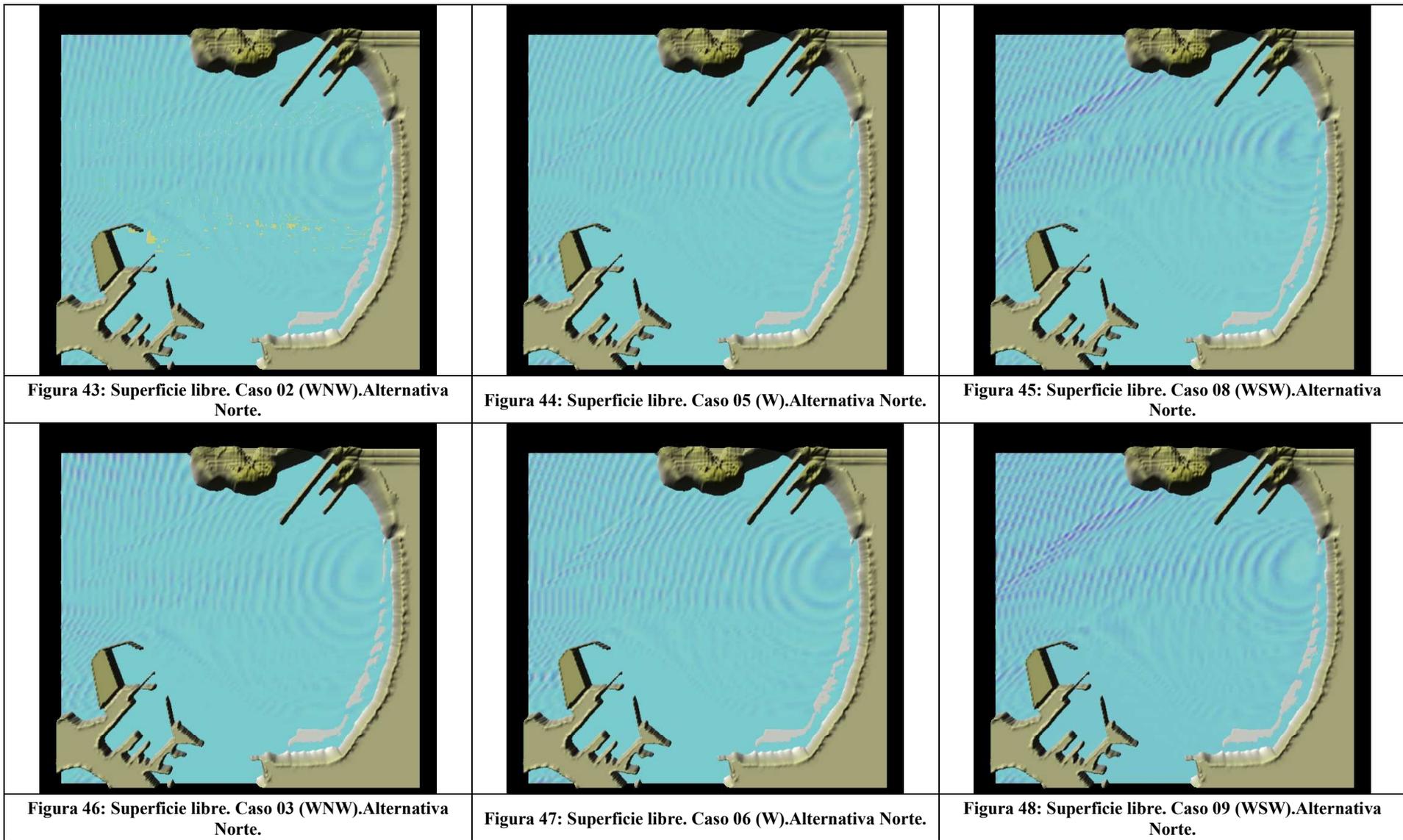
Se presentan en los siguientes apartados gráficos correspondientes a:

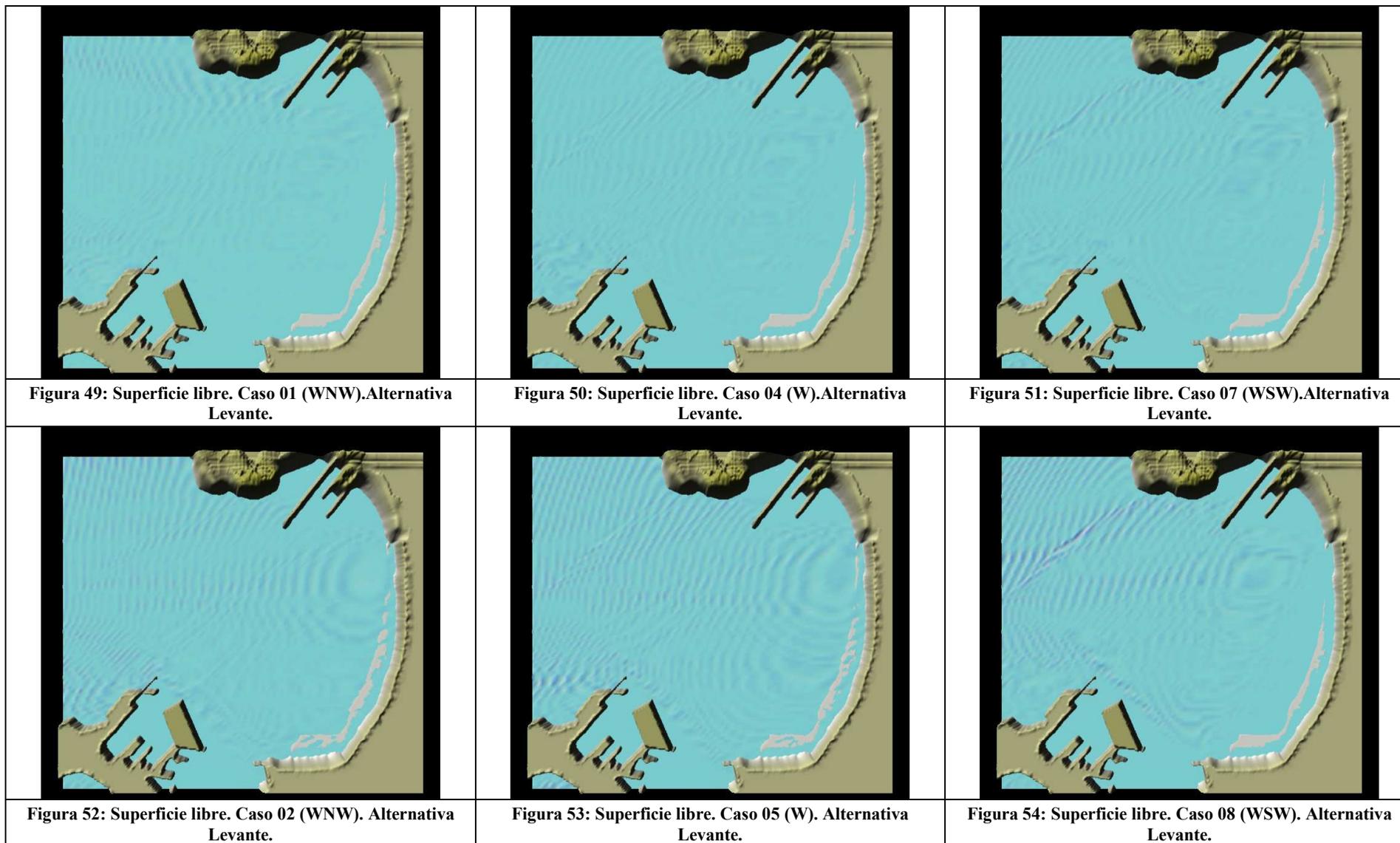
- Superficie libre obtenida tras la propagación de la componente más energética del espectro. Altura de ola significativa y dirección.
- Sistema de corrientes en la zona próxima a la playa de Valdelagrana.

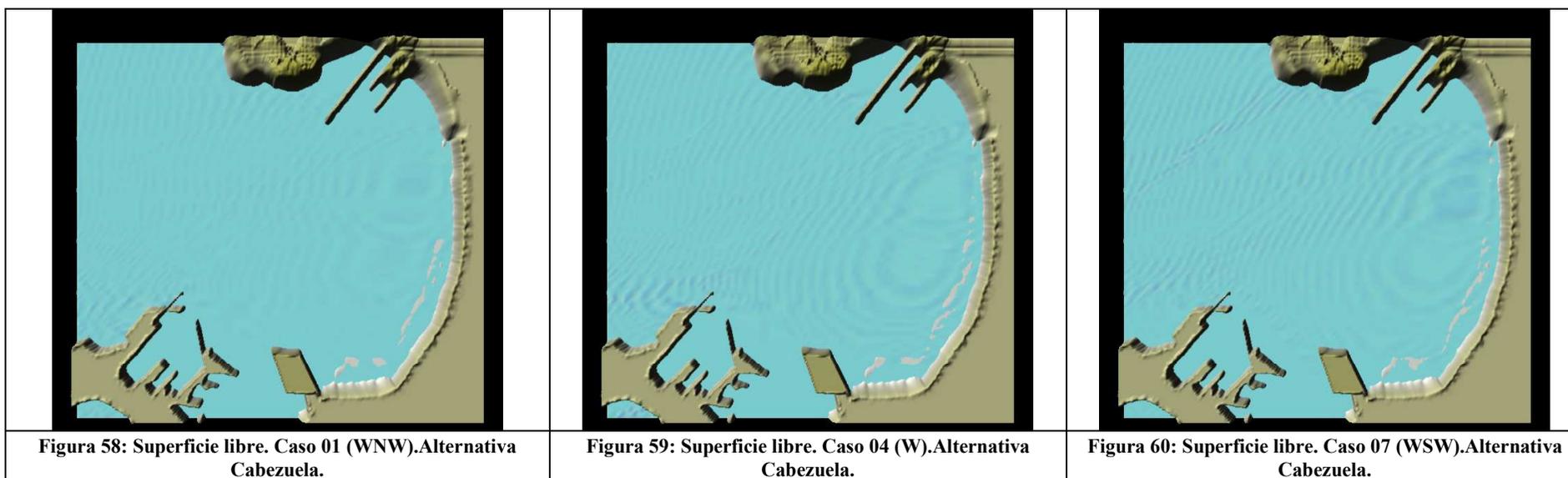
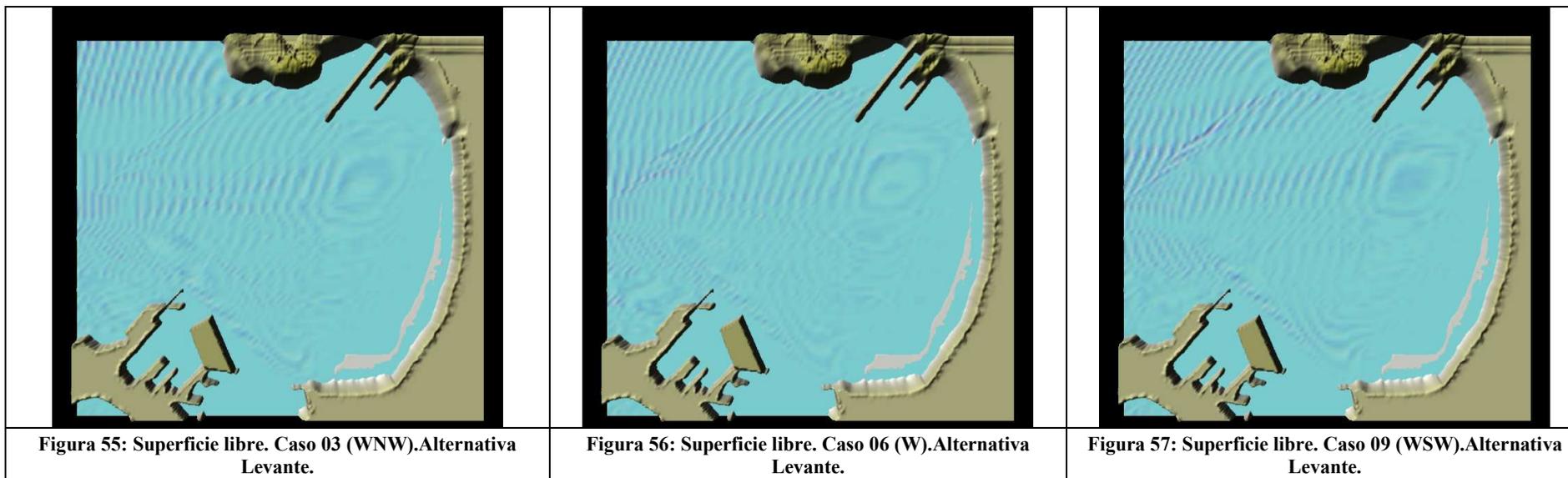


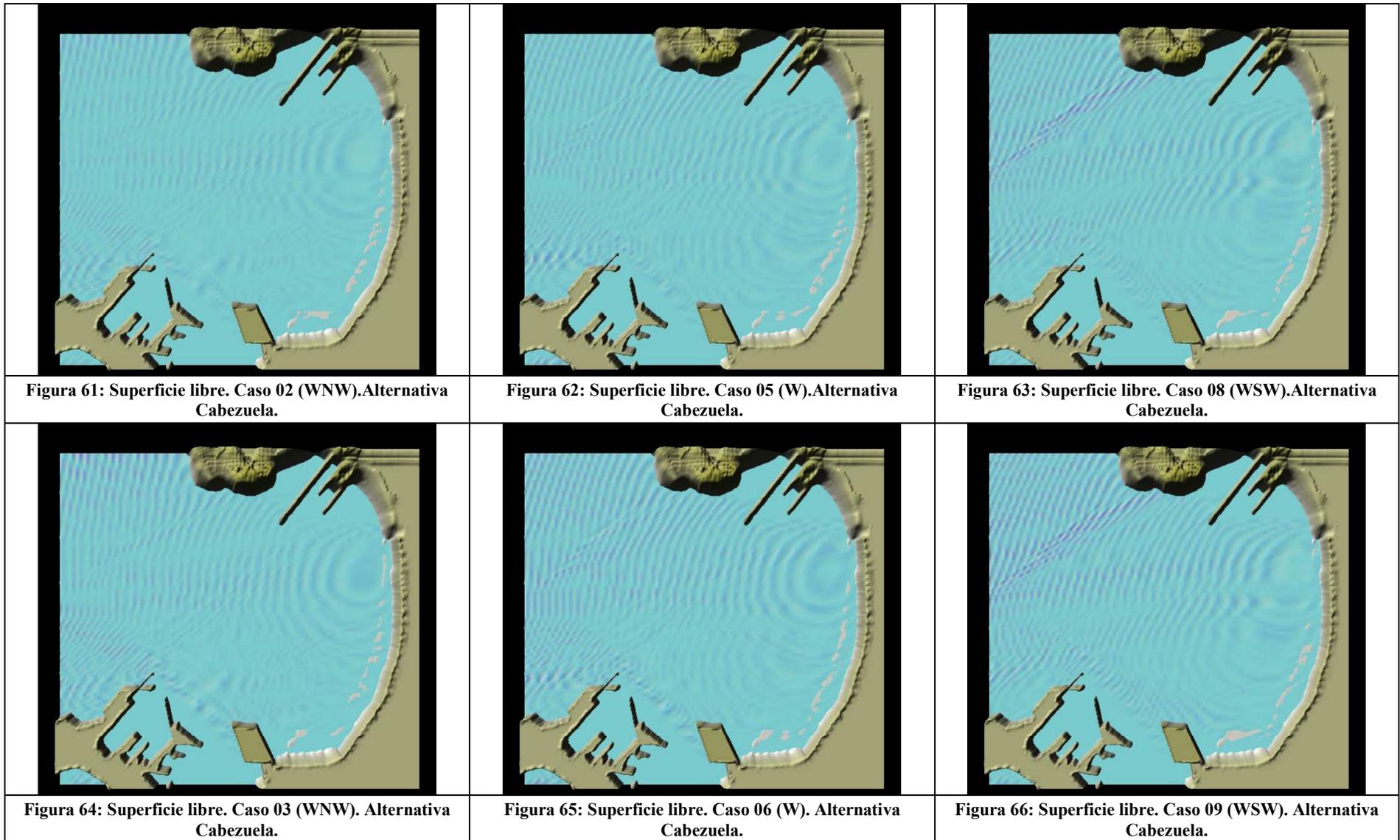












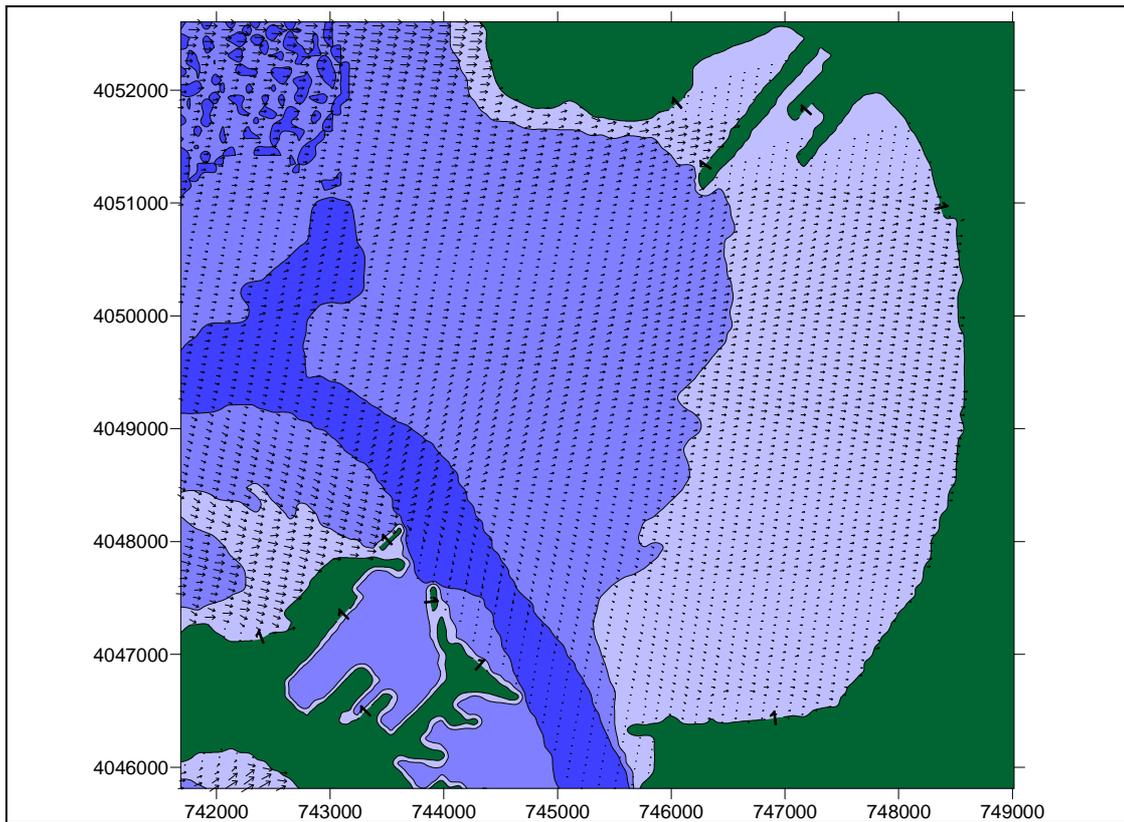


Figura 67: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 01 (WNW). Situación Actual.

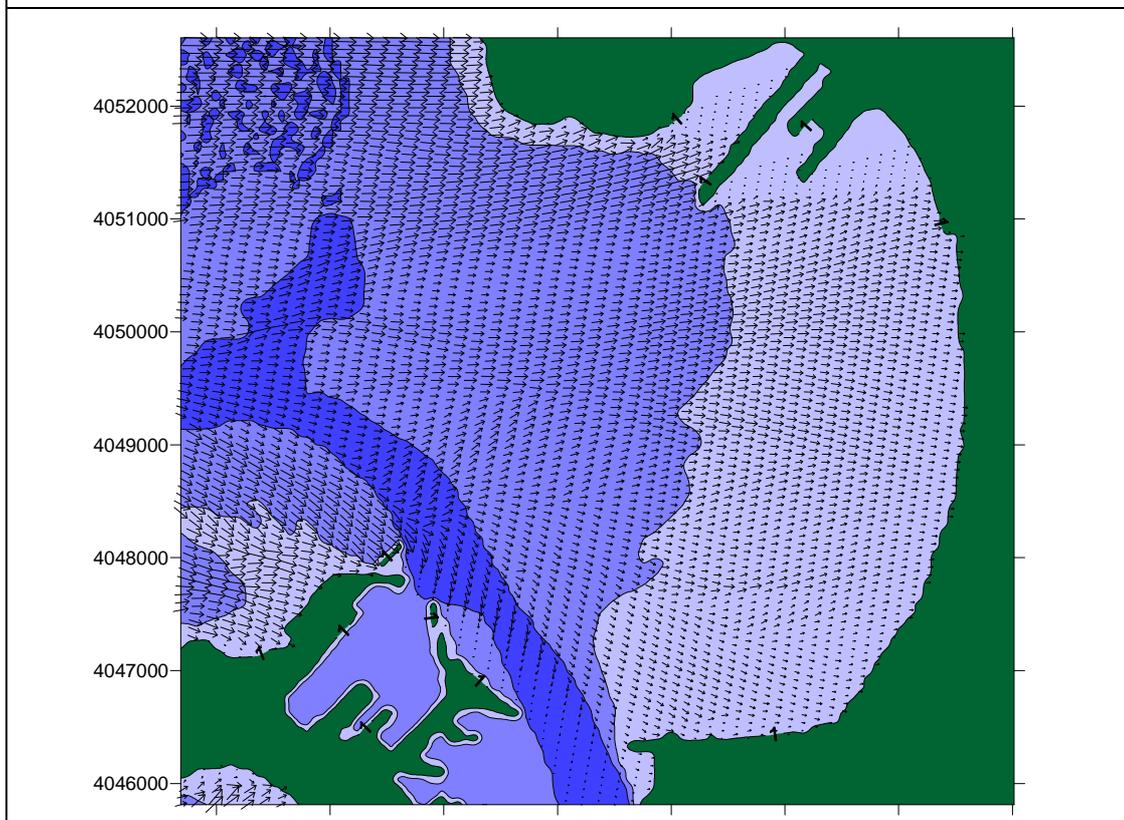


Figura 68: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 02 (WNW). Situación Actual.

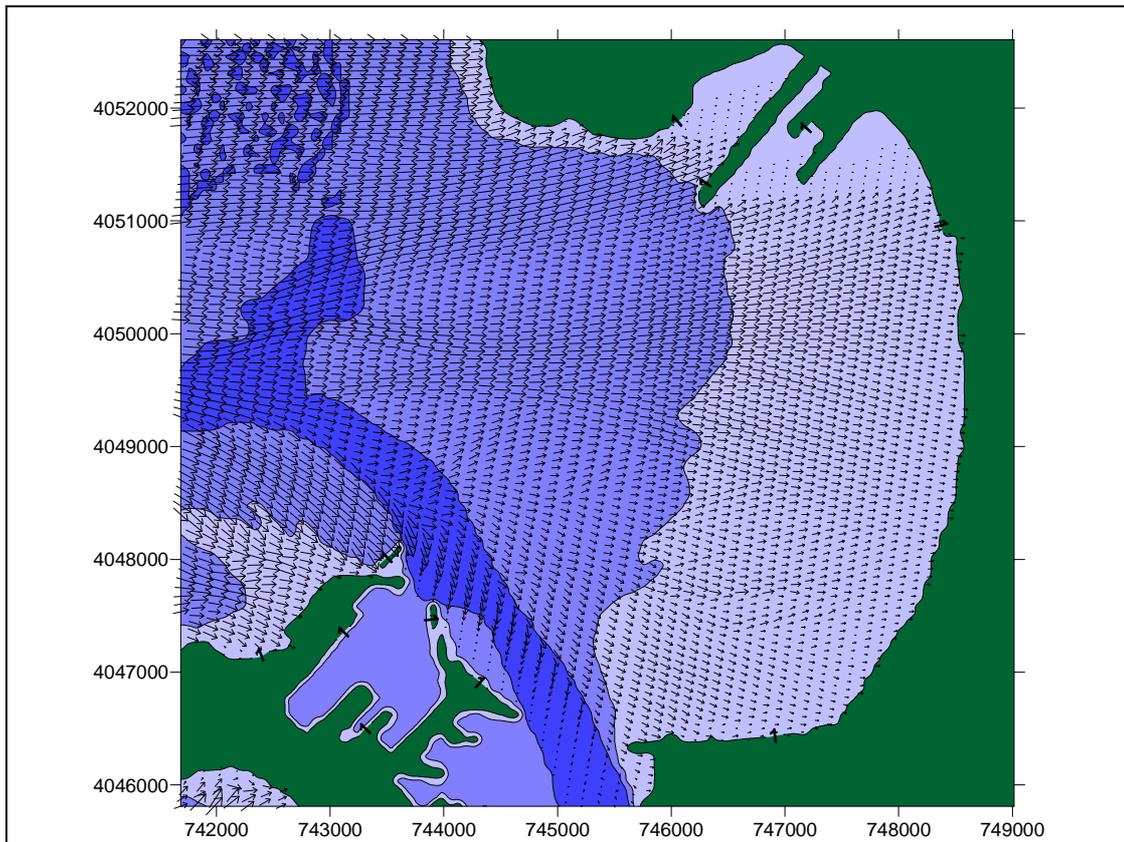


Figura 69: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 03 (WNW). Situación Actual.

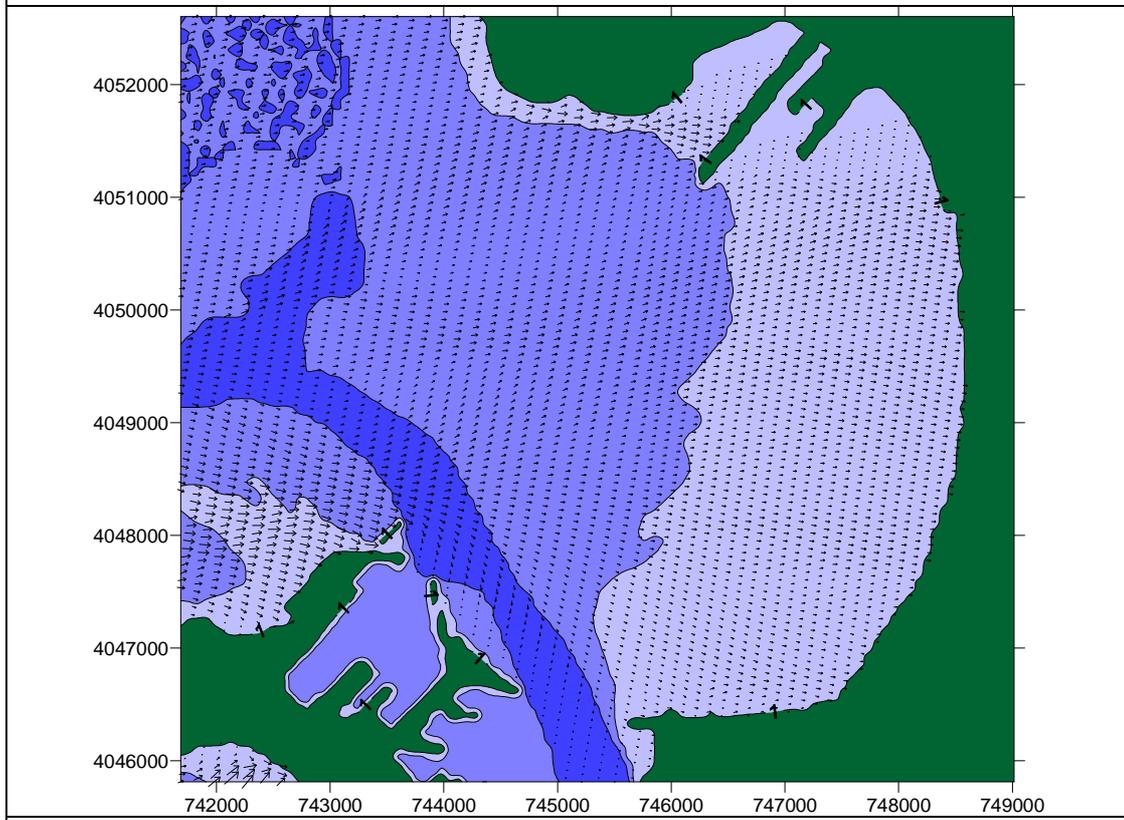


Figura 70: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 04 (W). Situación Actual.

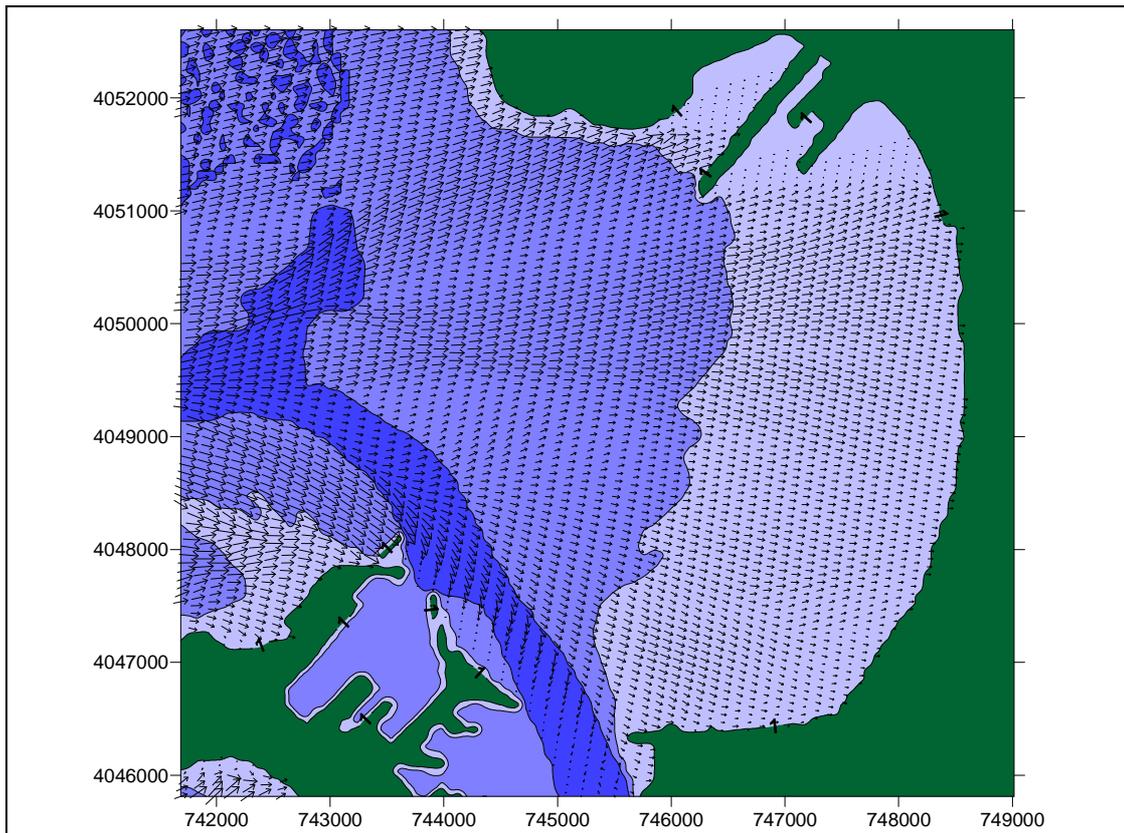


Figura 71: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 05 (W). Situación Actual.

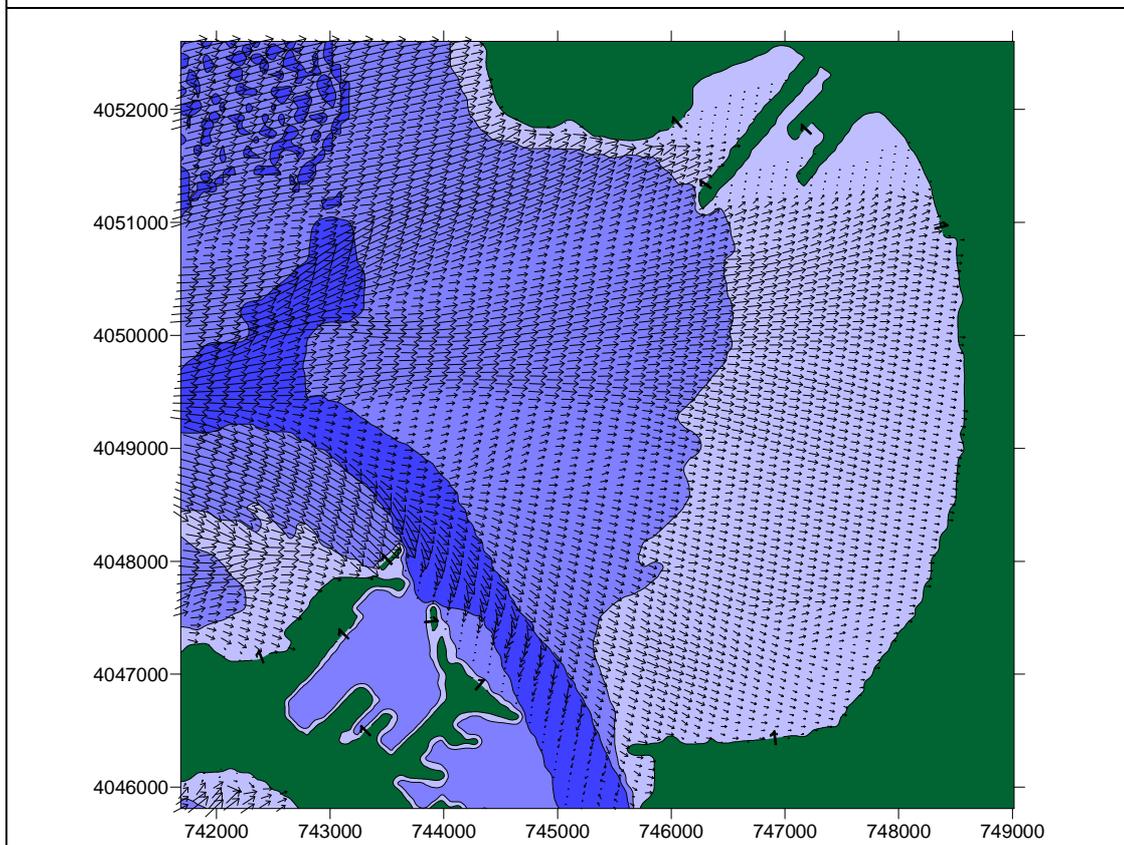


Figura 72: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 06 (W). Situación Actual.

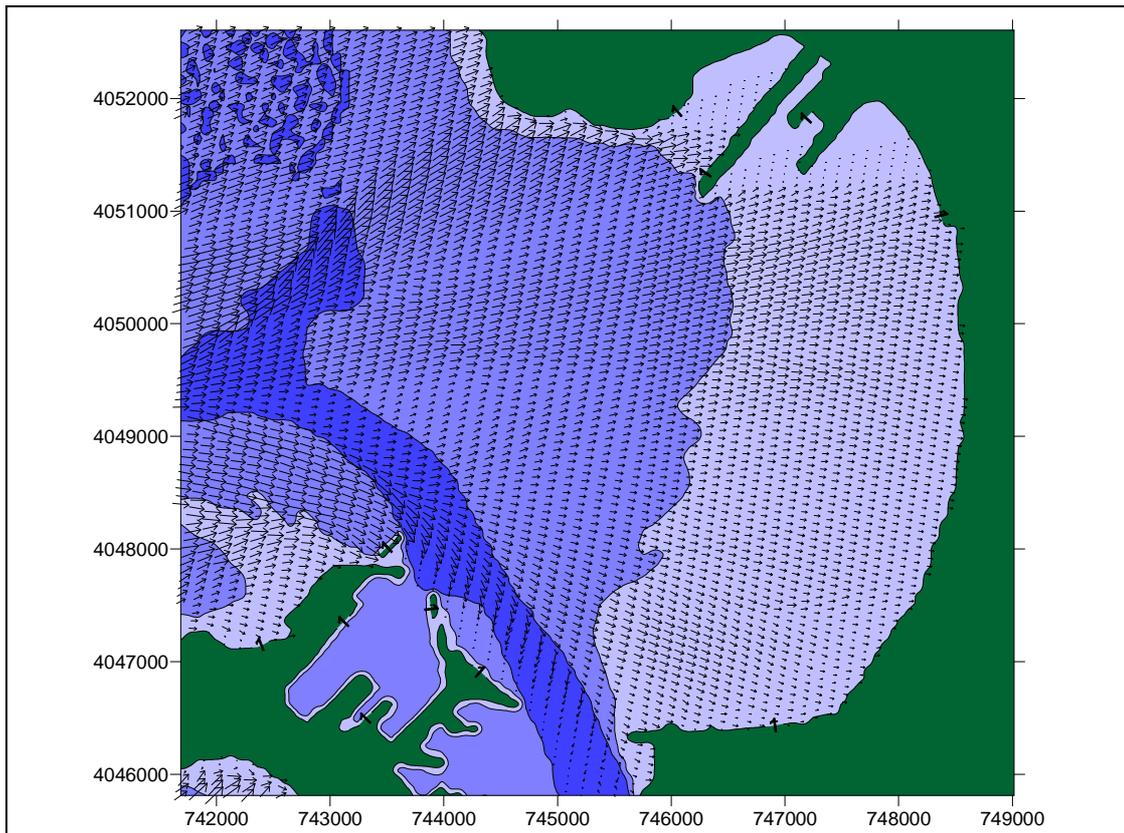


Figura 73: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 07 (WSW). Situación Actual.

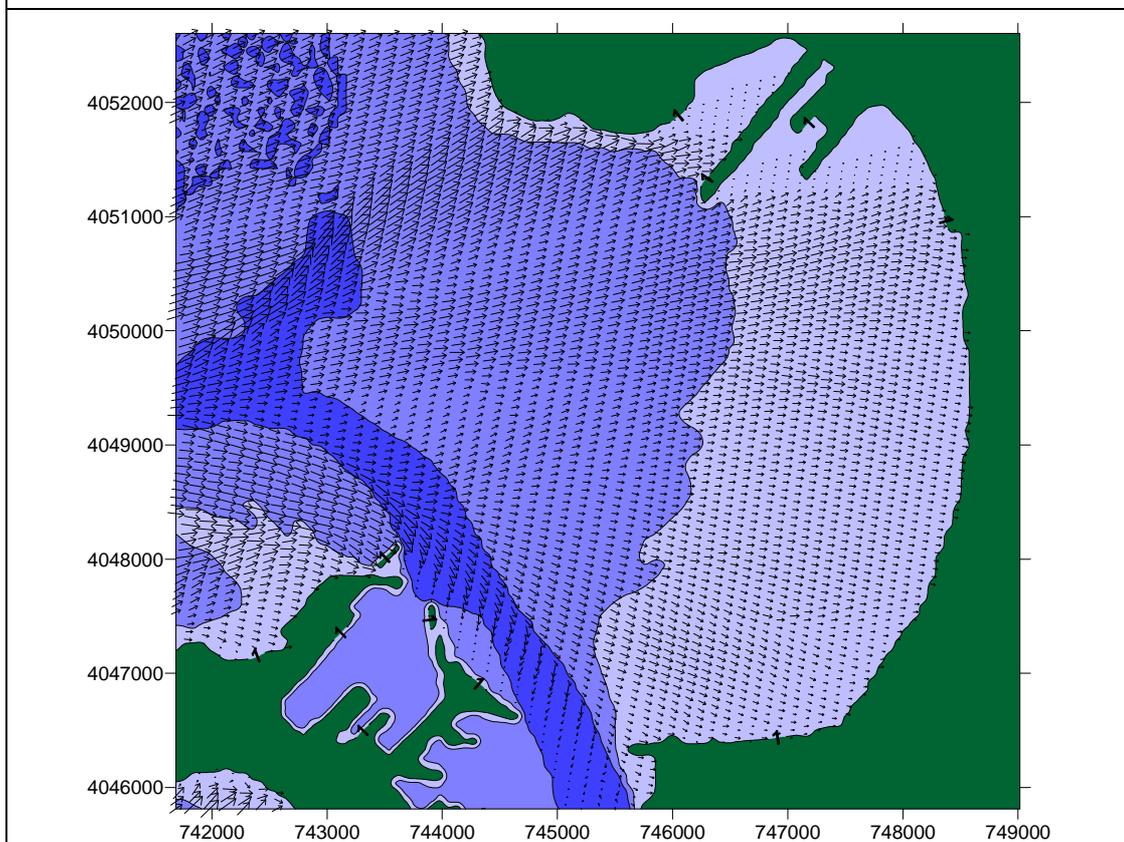
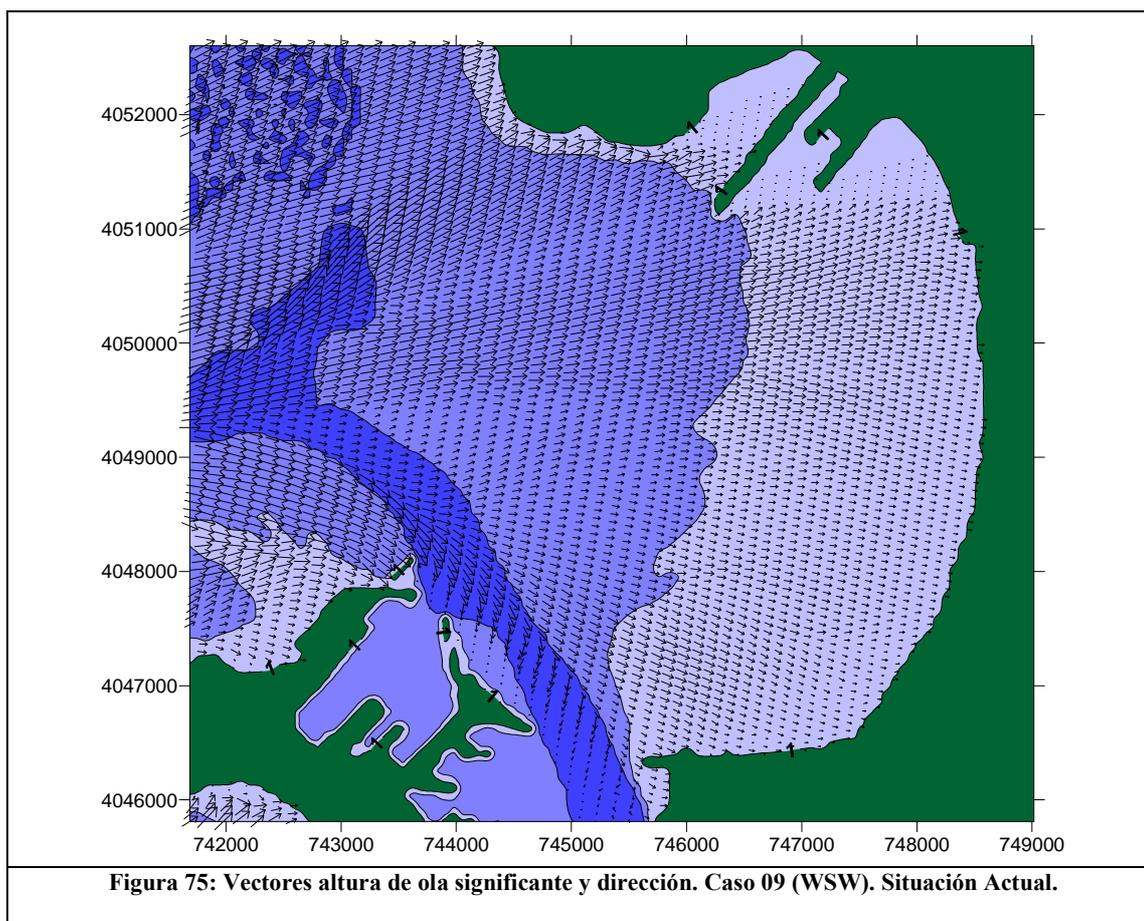


Figura 74: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 08 (WSW). Situación Actual.



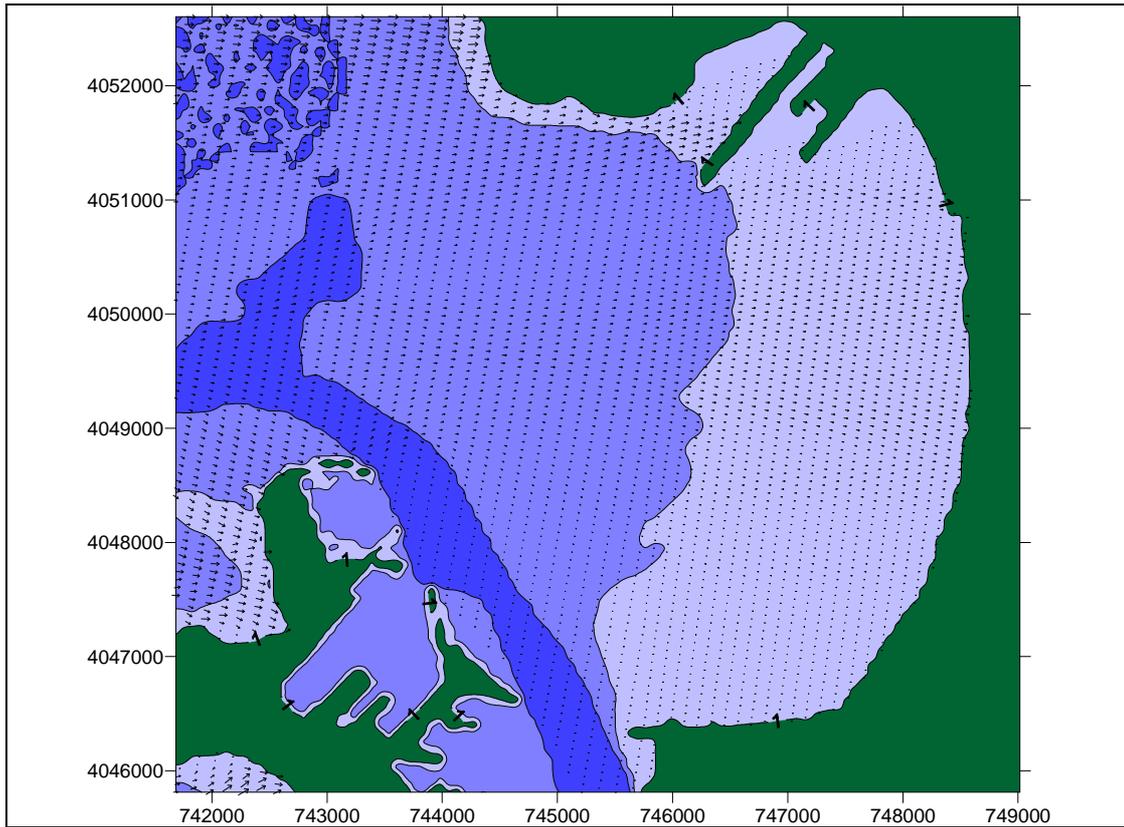


Figura 76: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 01 (WNW). Alternativa Norte.

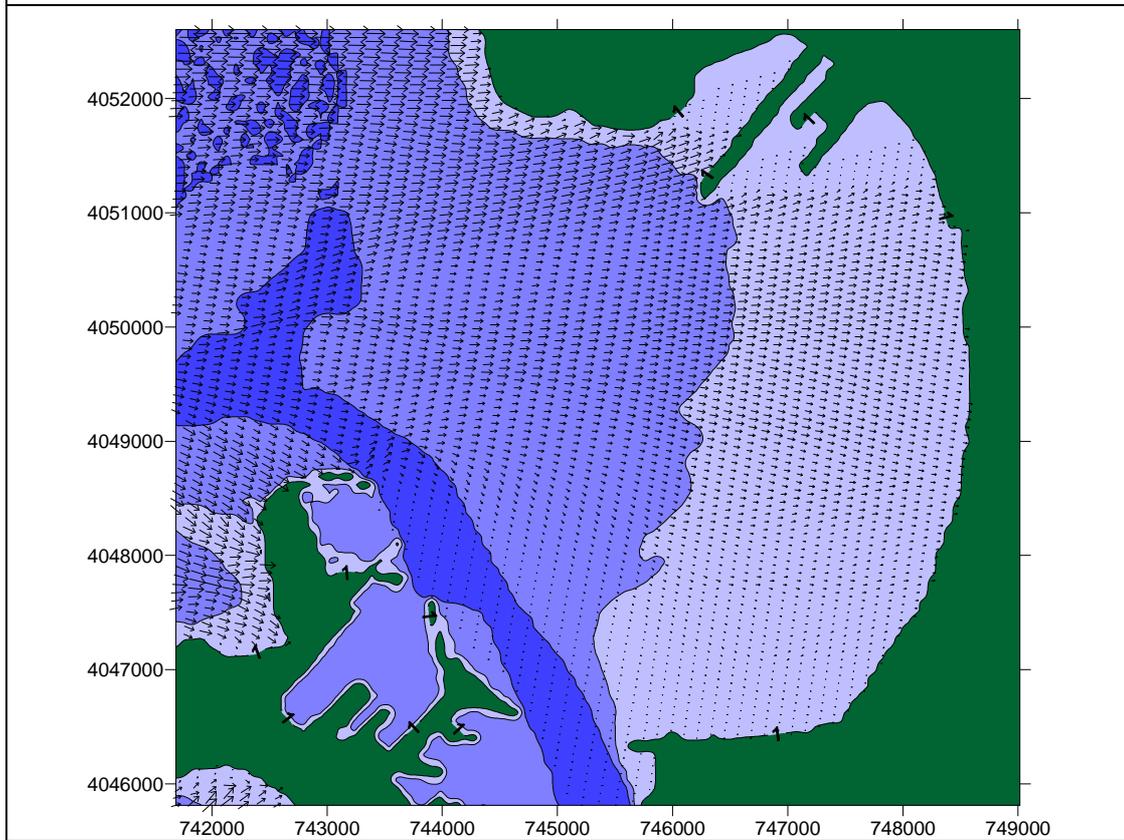


Figura 77: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 02 (WNW). Alternativa Norte.

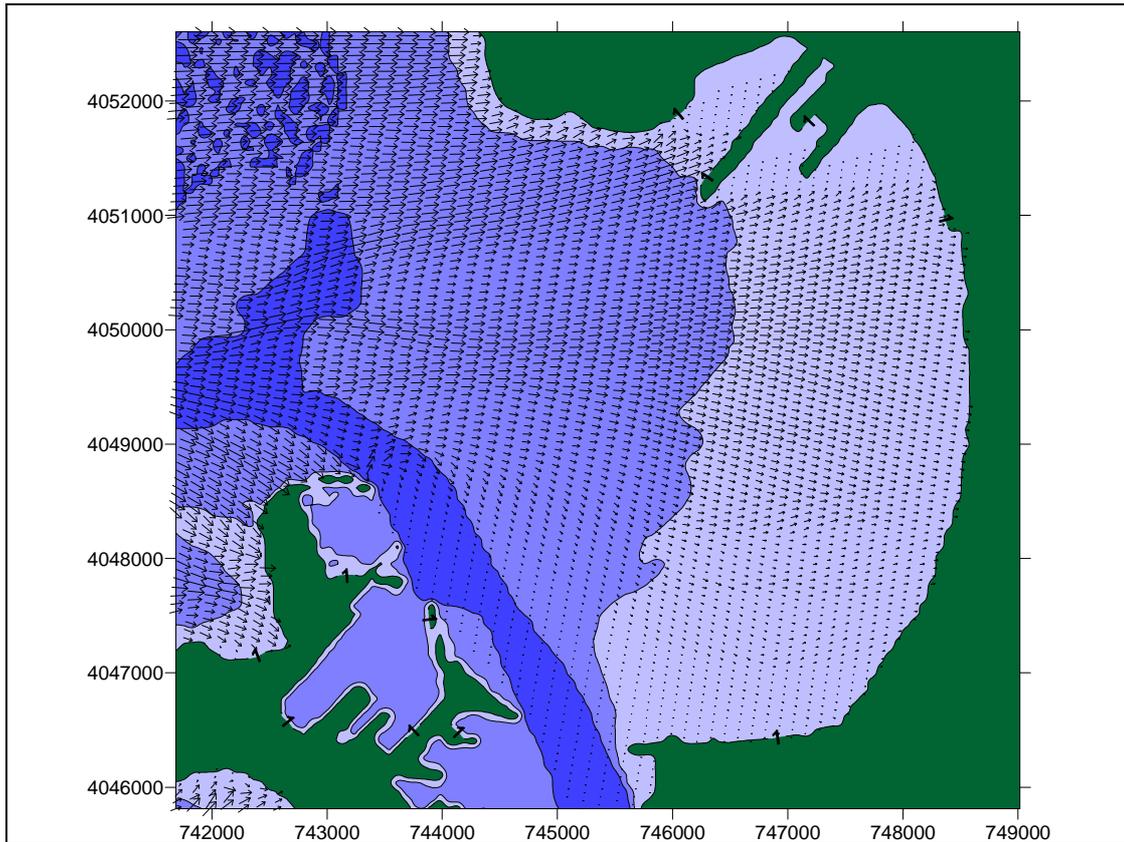


Figura 78: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 03 (WNW). Alternativa Norte.

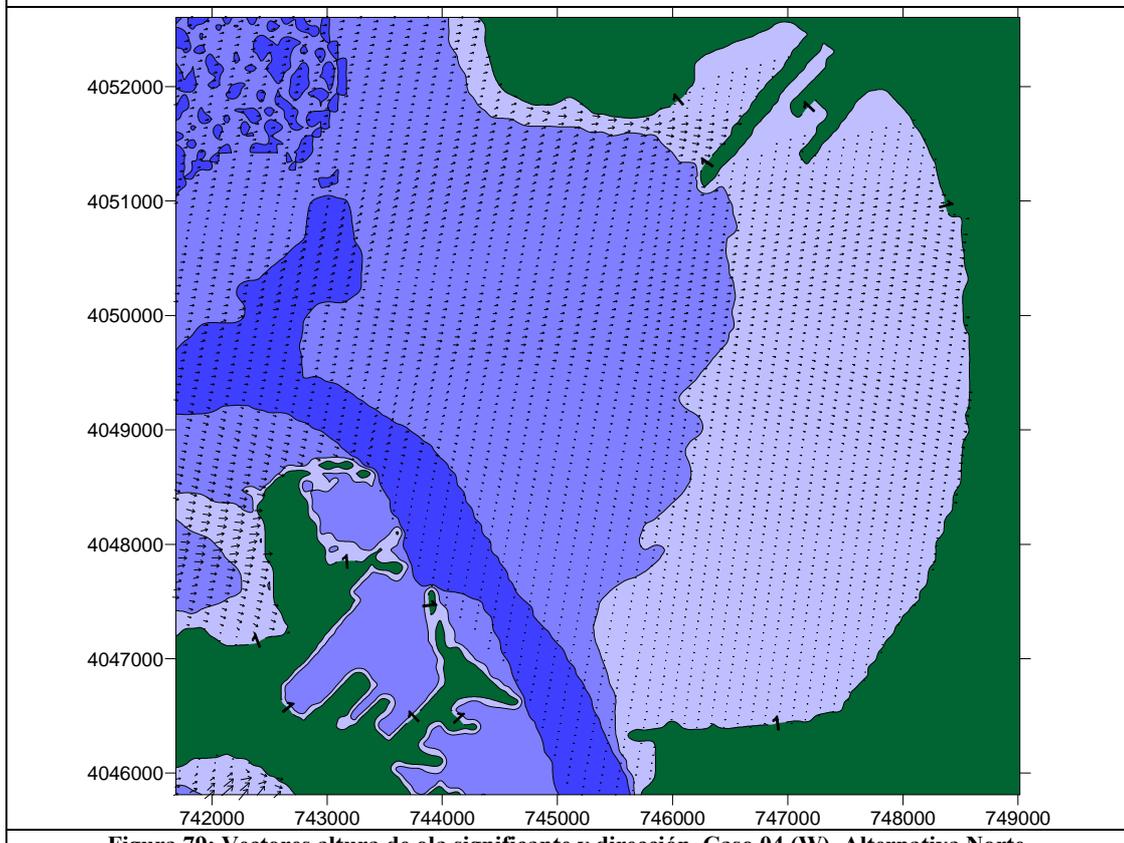


Figura 79: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 04 (W). Alternativa Norte.

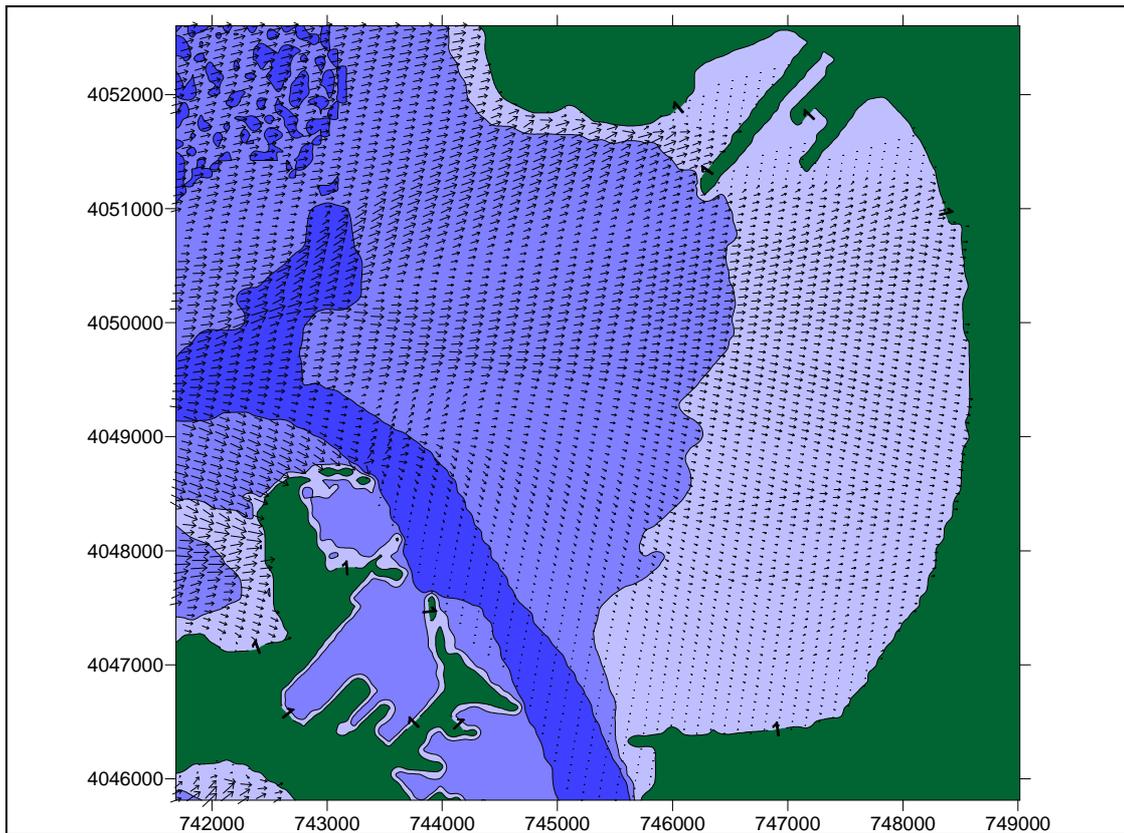


Figura 80: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 05 (W). Alternativa Norte.

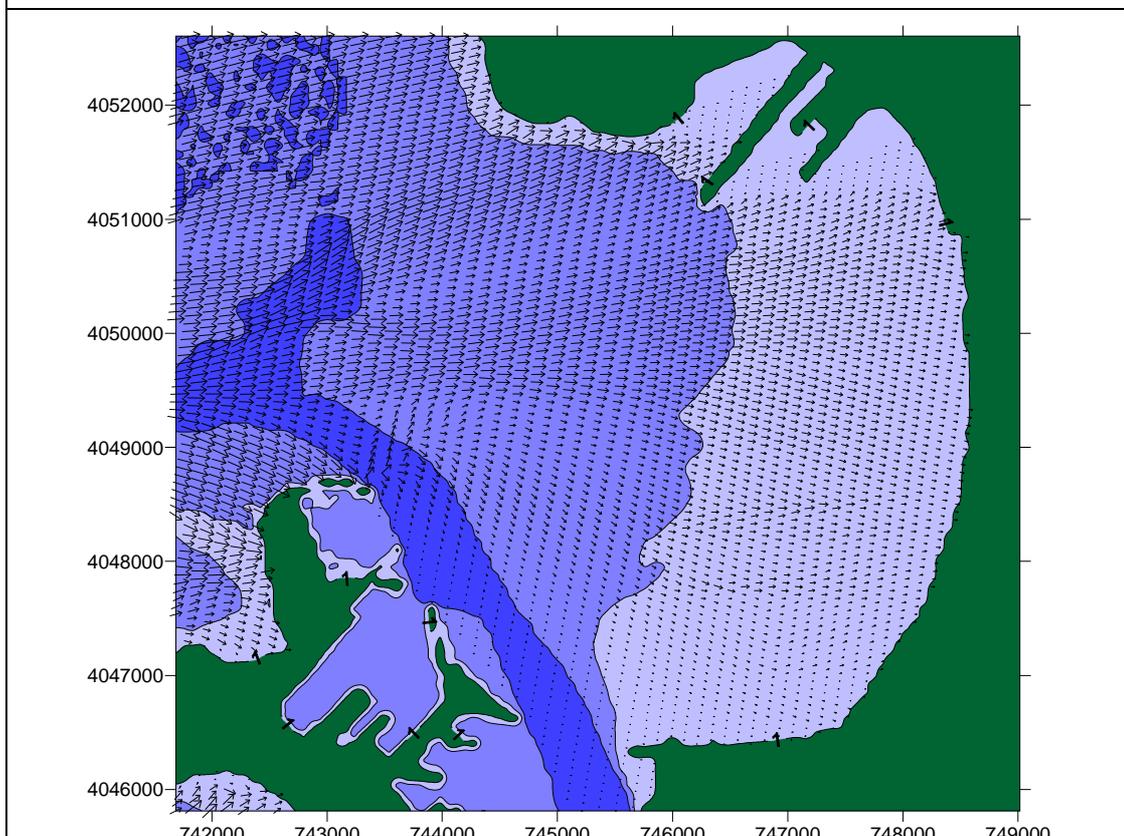


Figura 81: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 06 (W). Alternativa Norte.

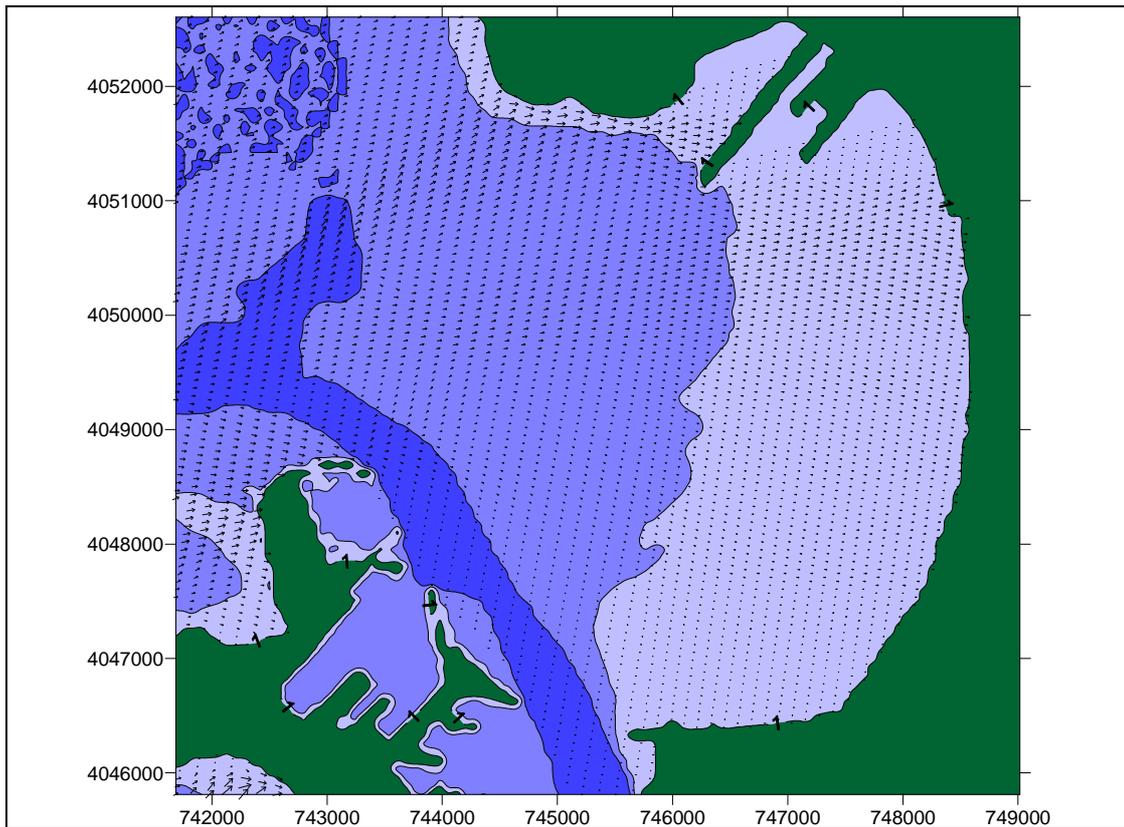


Figura 82: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 07 (WSW). Alternativa Norte.

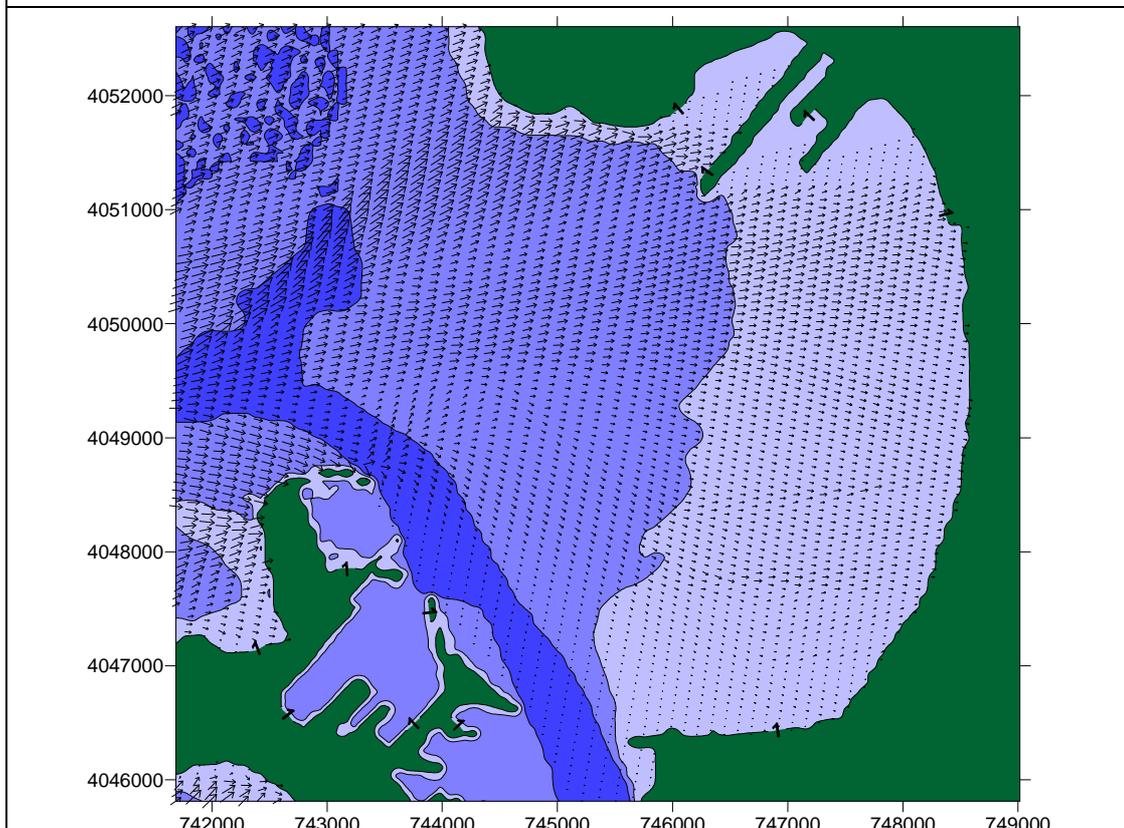
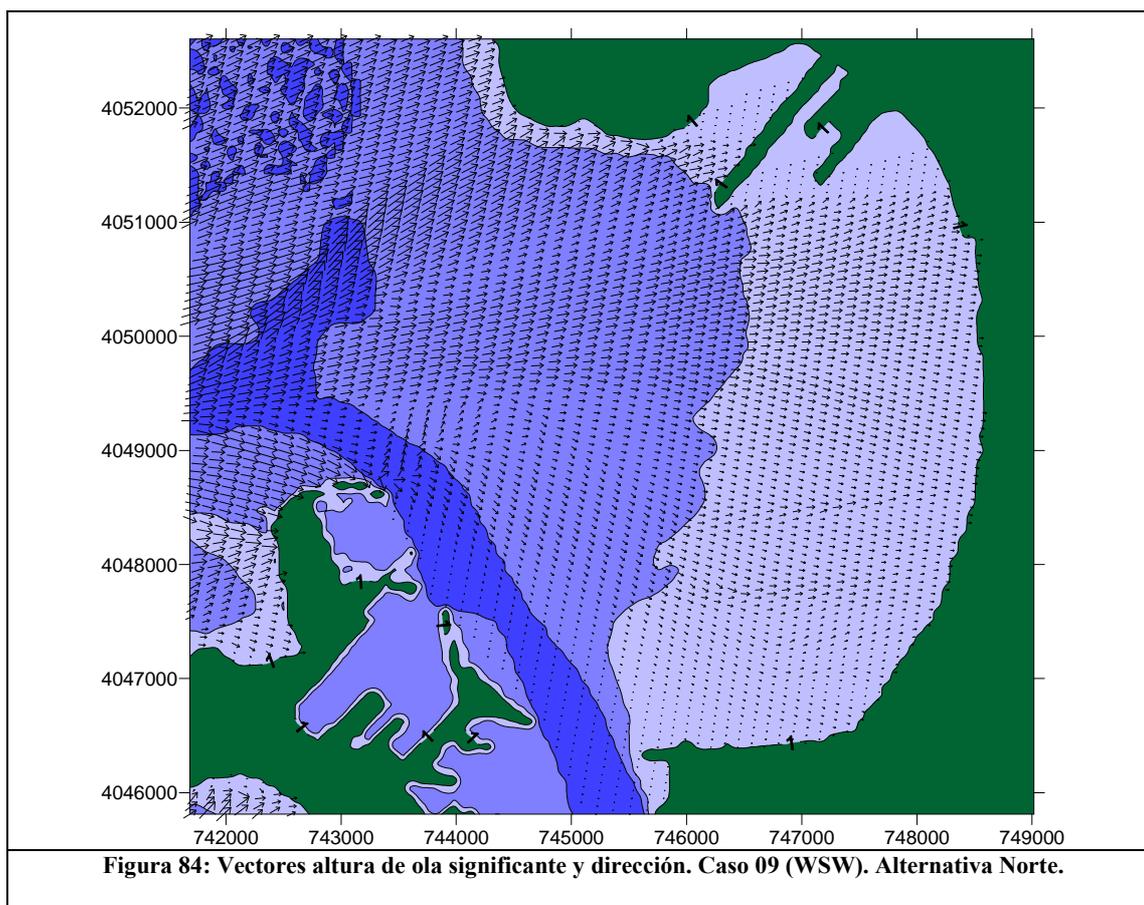


Figura 83: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 08 (WSW). Alternativa Norte.



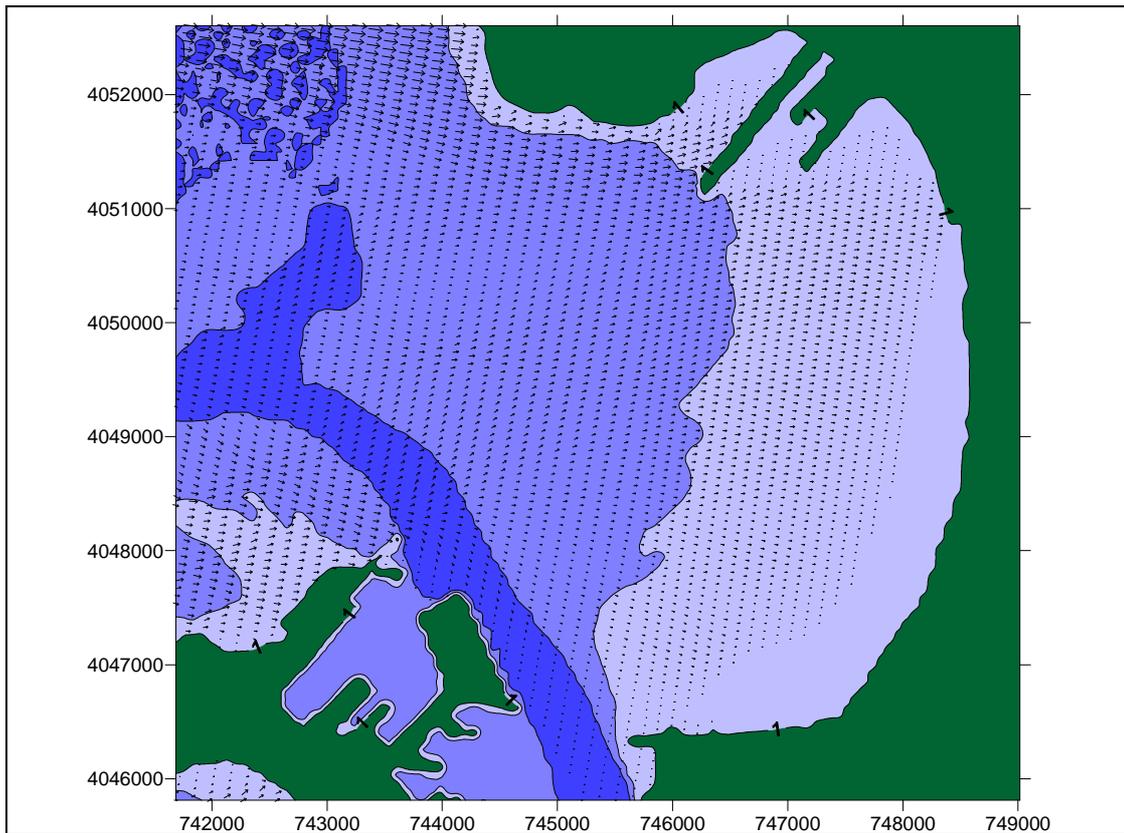


Figura 85: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 01 (WNW). Alternativa Levante.

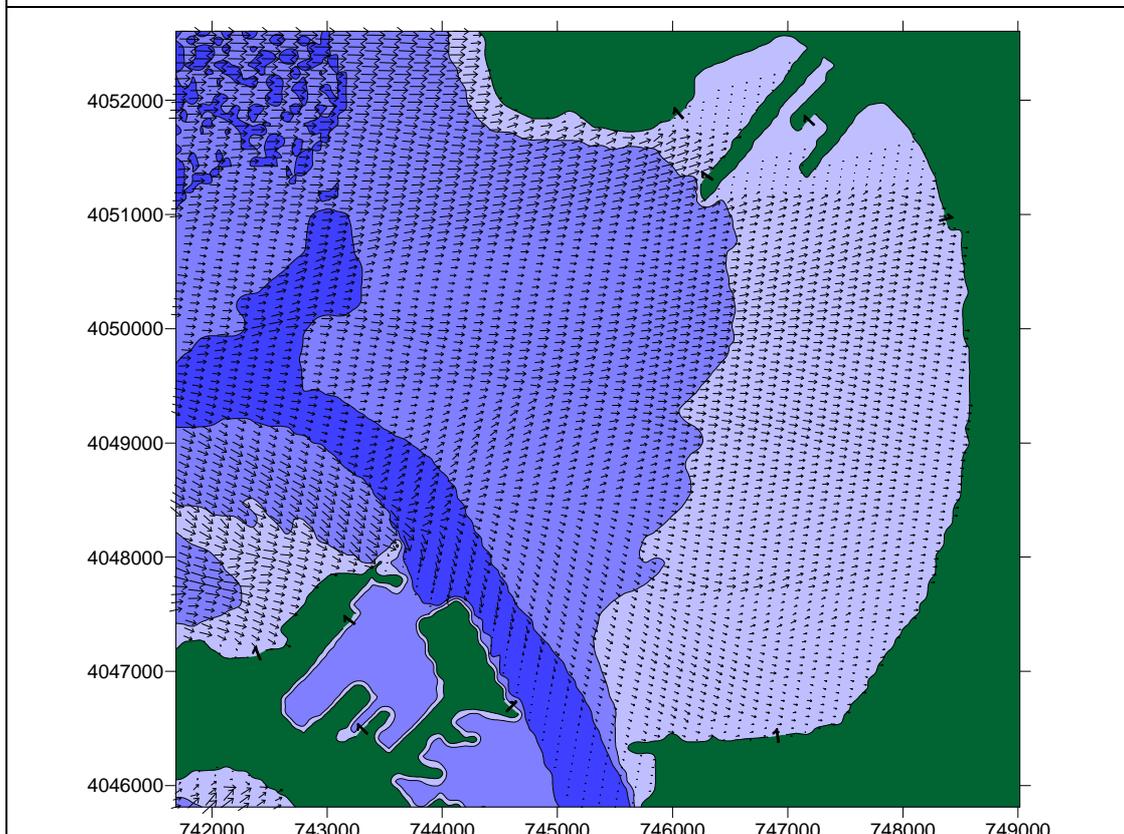


Figura 86: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 02 (WNW). Alternativa Levante.

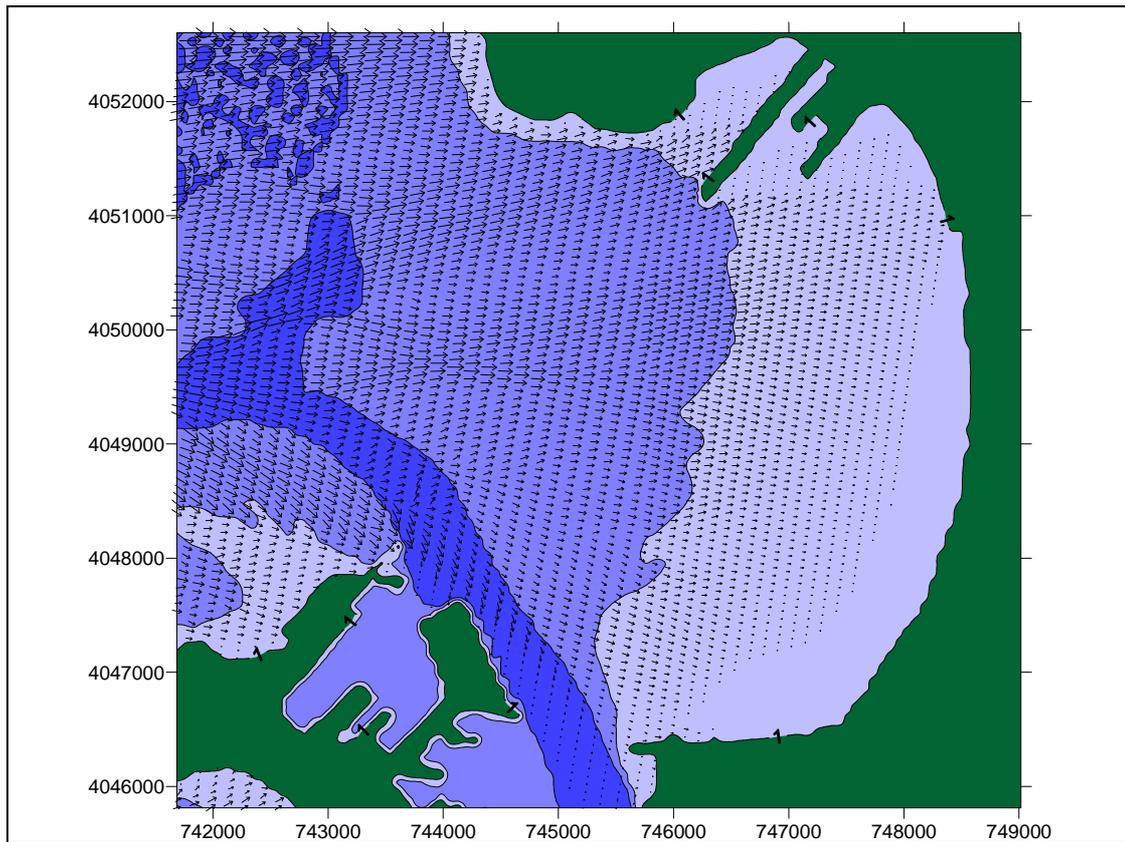


Figura 87: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 03 (WNW). Alternativa Levante.

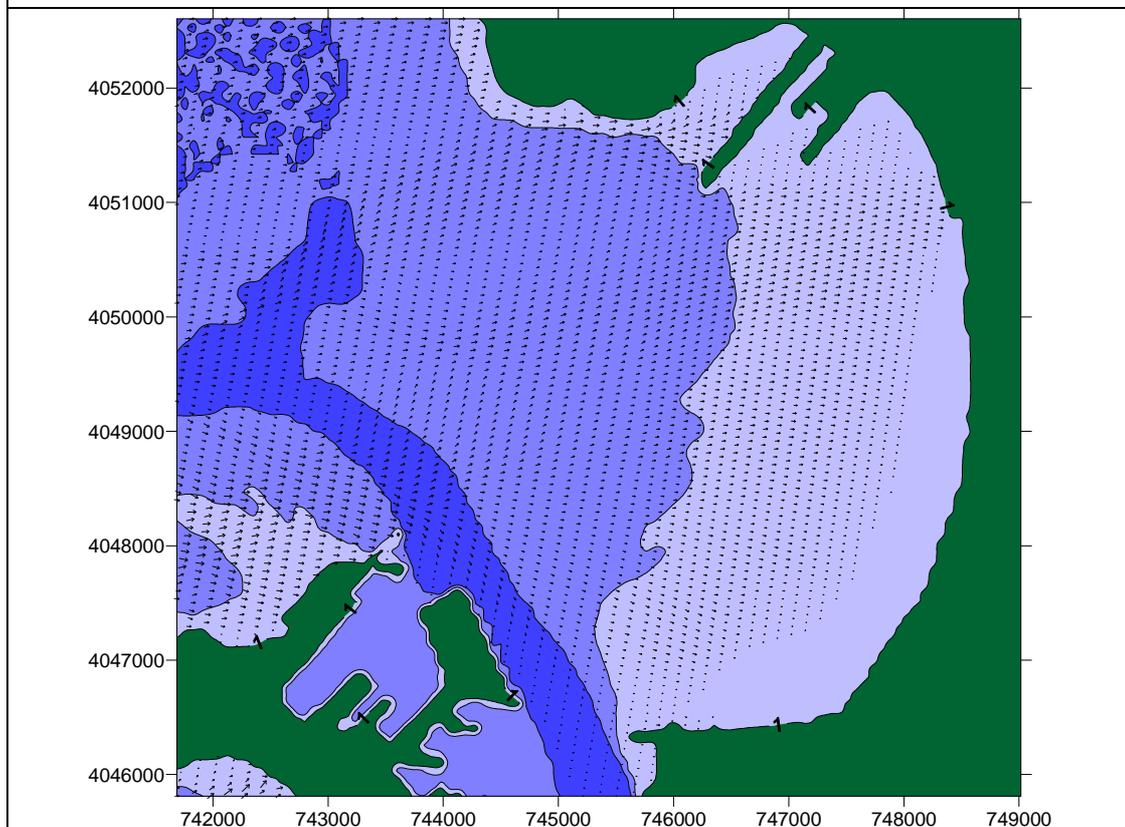


Figura 88: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 04 (W). Alternativa Levante.

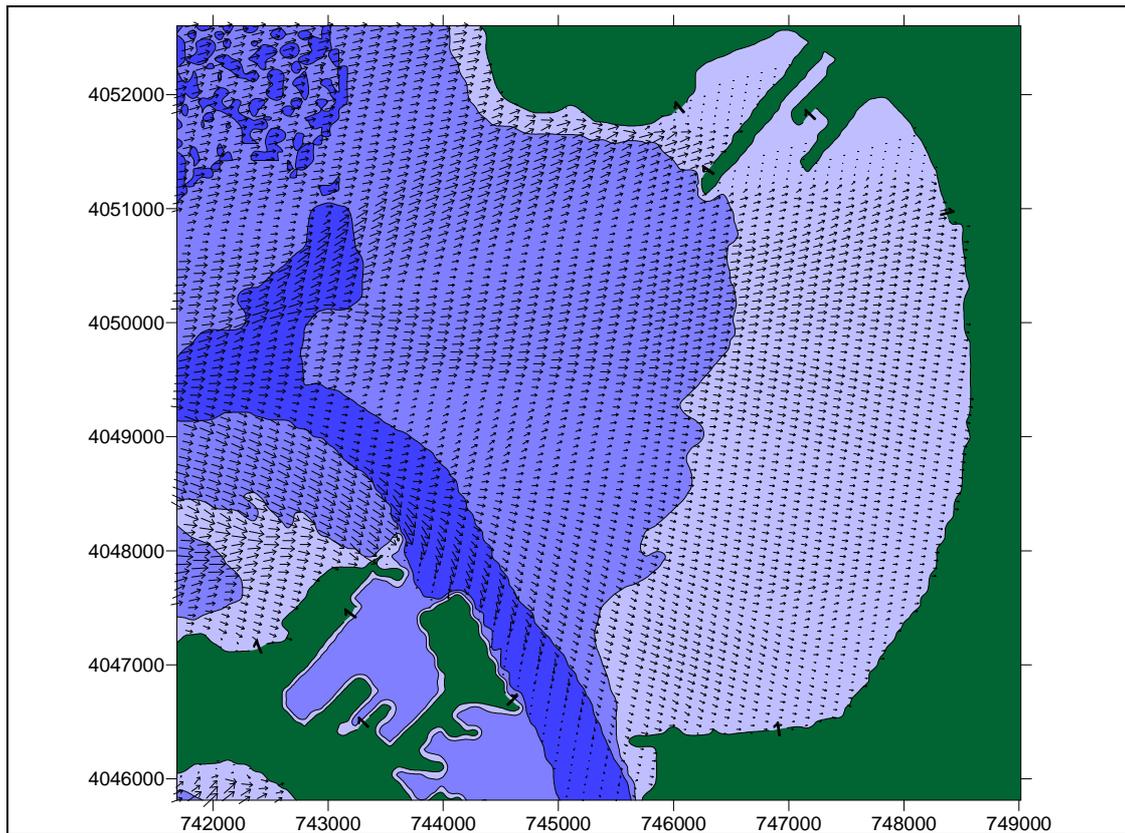


Figura 89: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 05 (W). Alternativa Levante.

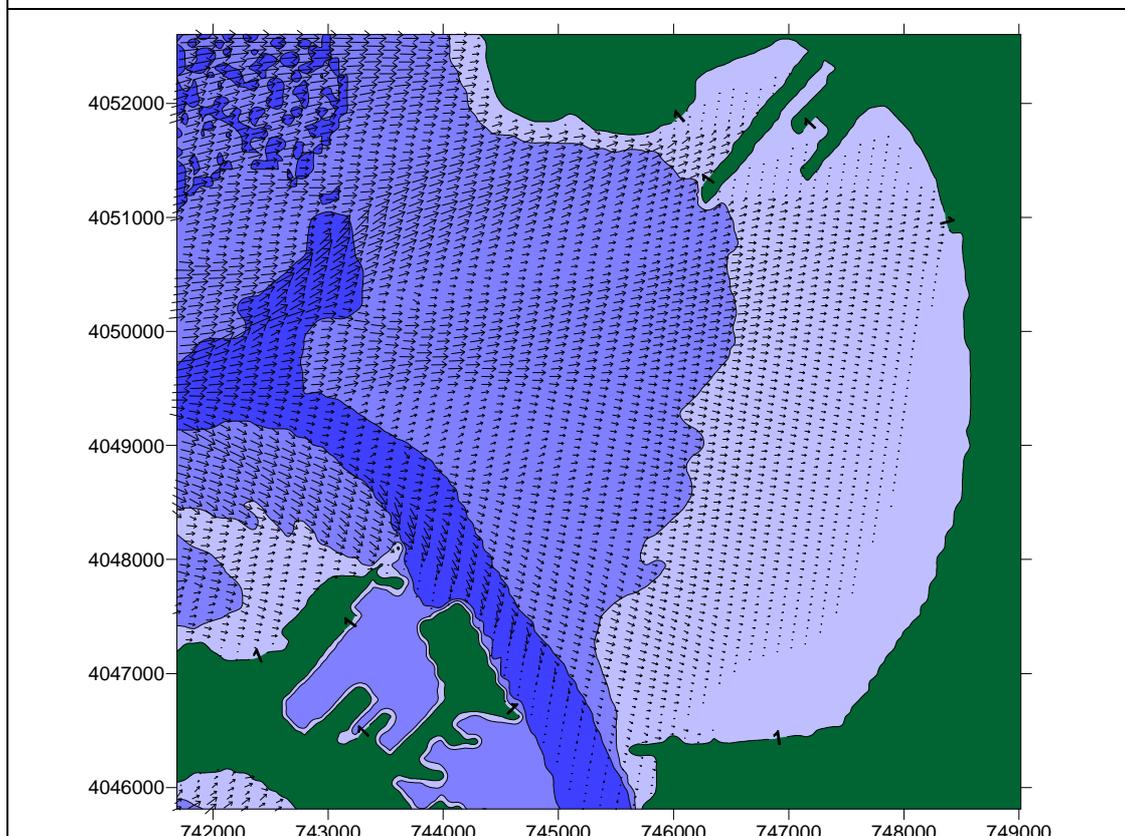


Figura 90: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 06 (W). Alternativa Levante.

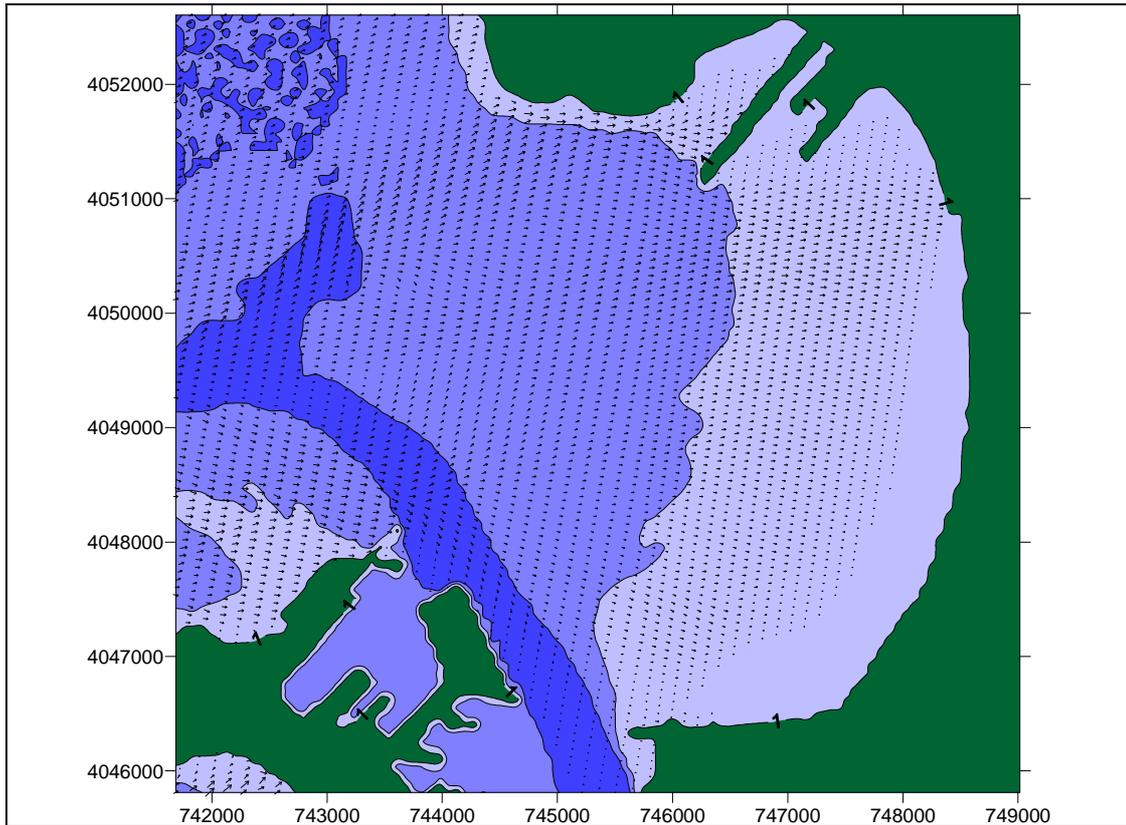


Figura 91: Vectores altura de ola significante y dirección. Caso 07 (WSW). Alternativa Levante.

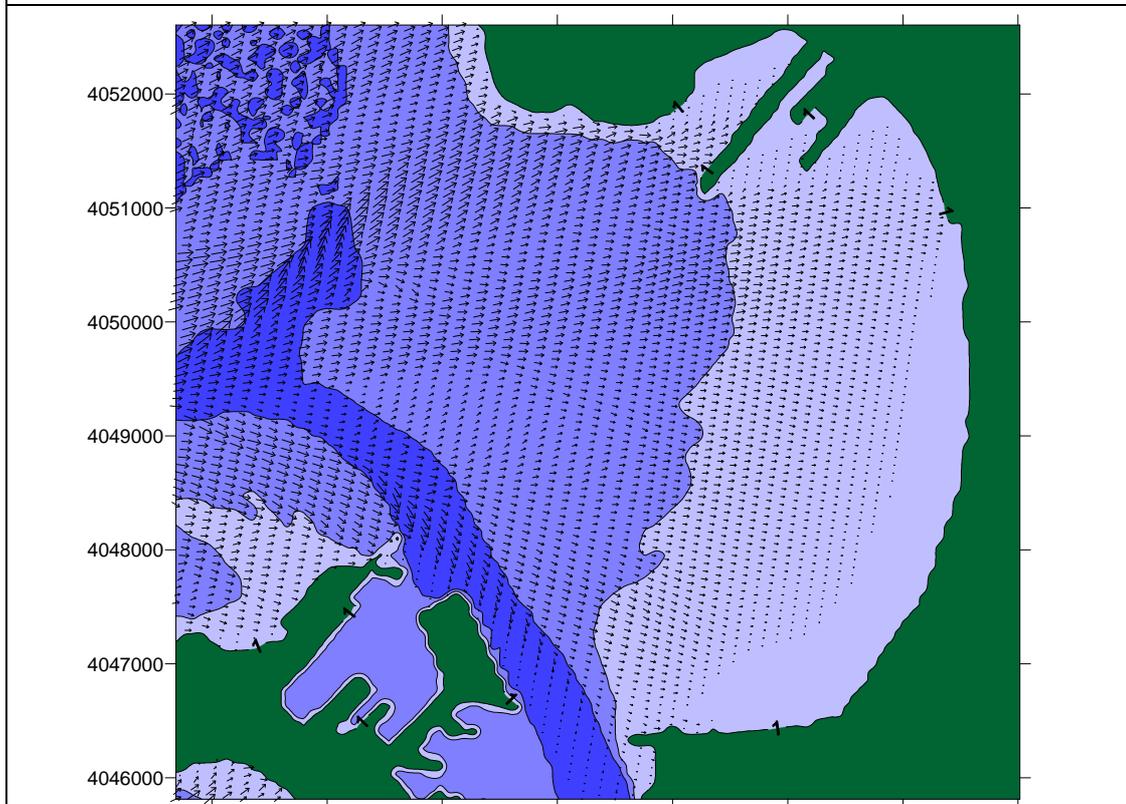
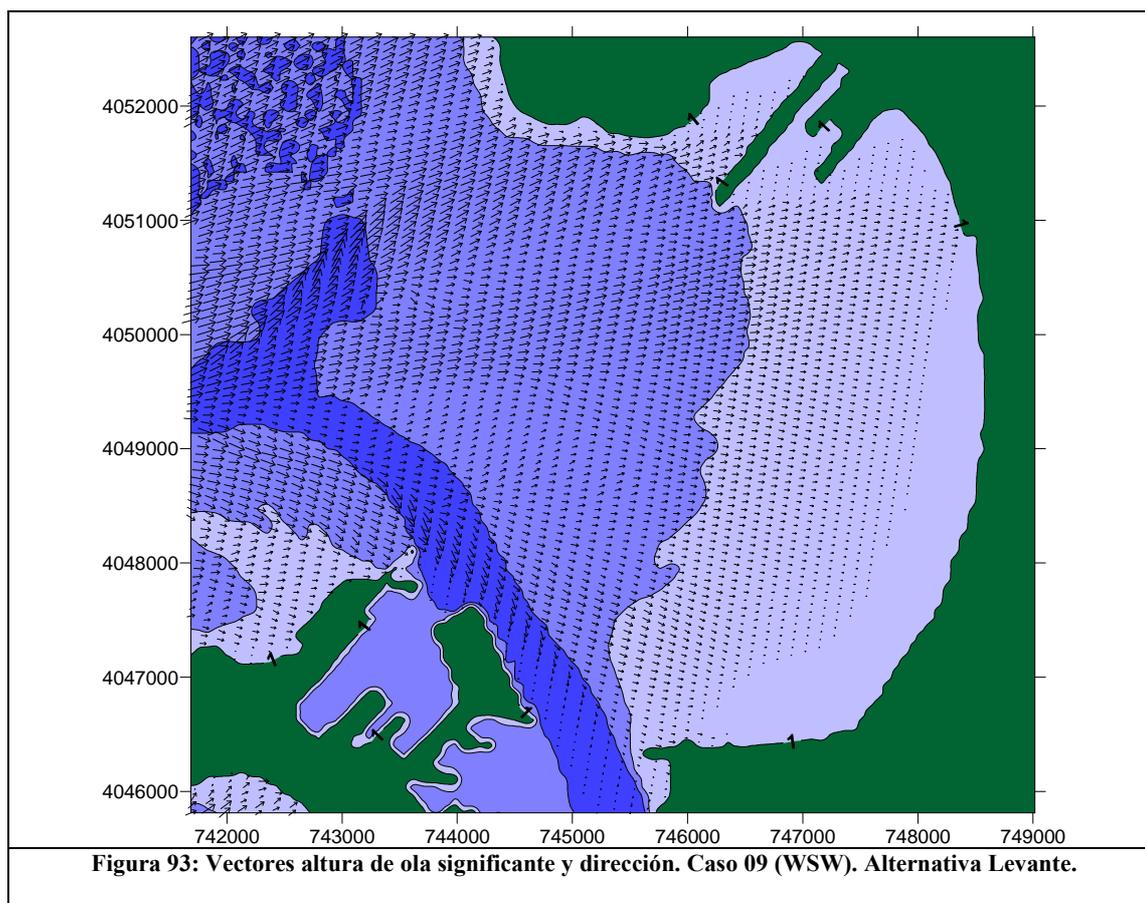


Figura 92: Vectores altura de ola significante y dirección. Caso 08 (WSW). Alternativa Levante.



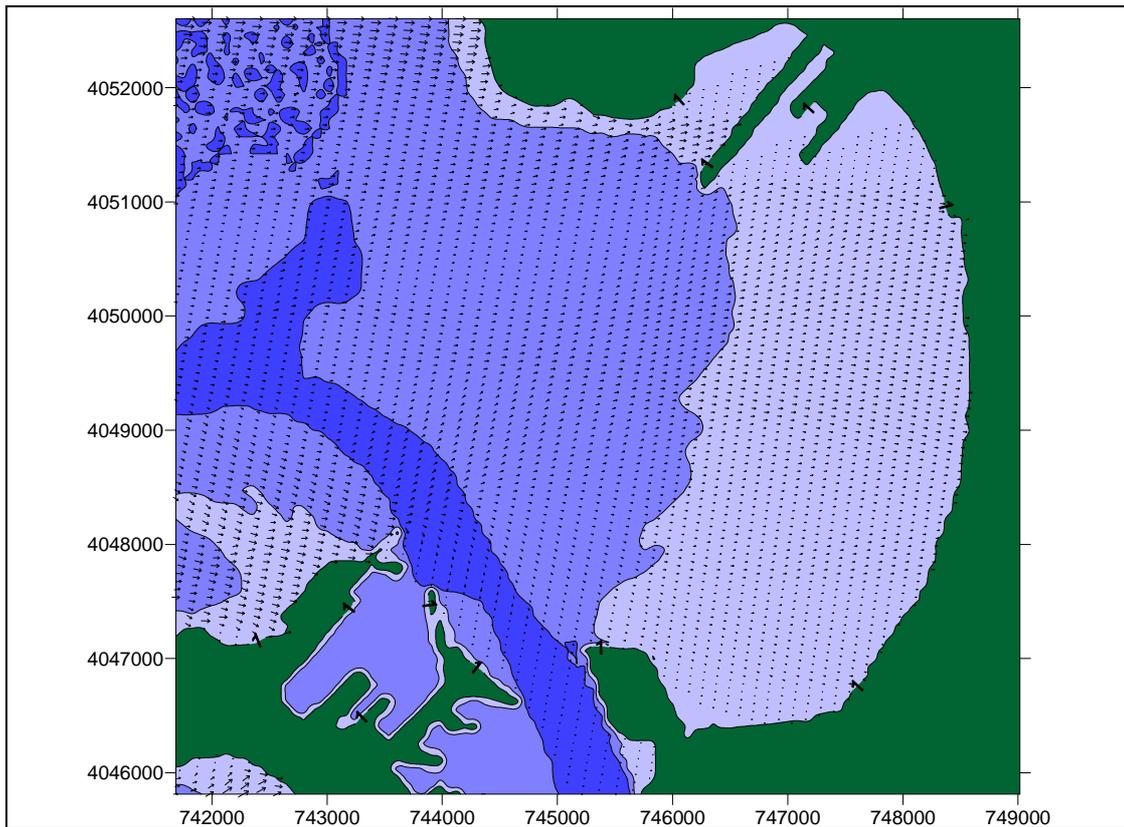


Figura 94: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 01 (WNW). Alternativa Cabezuela.

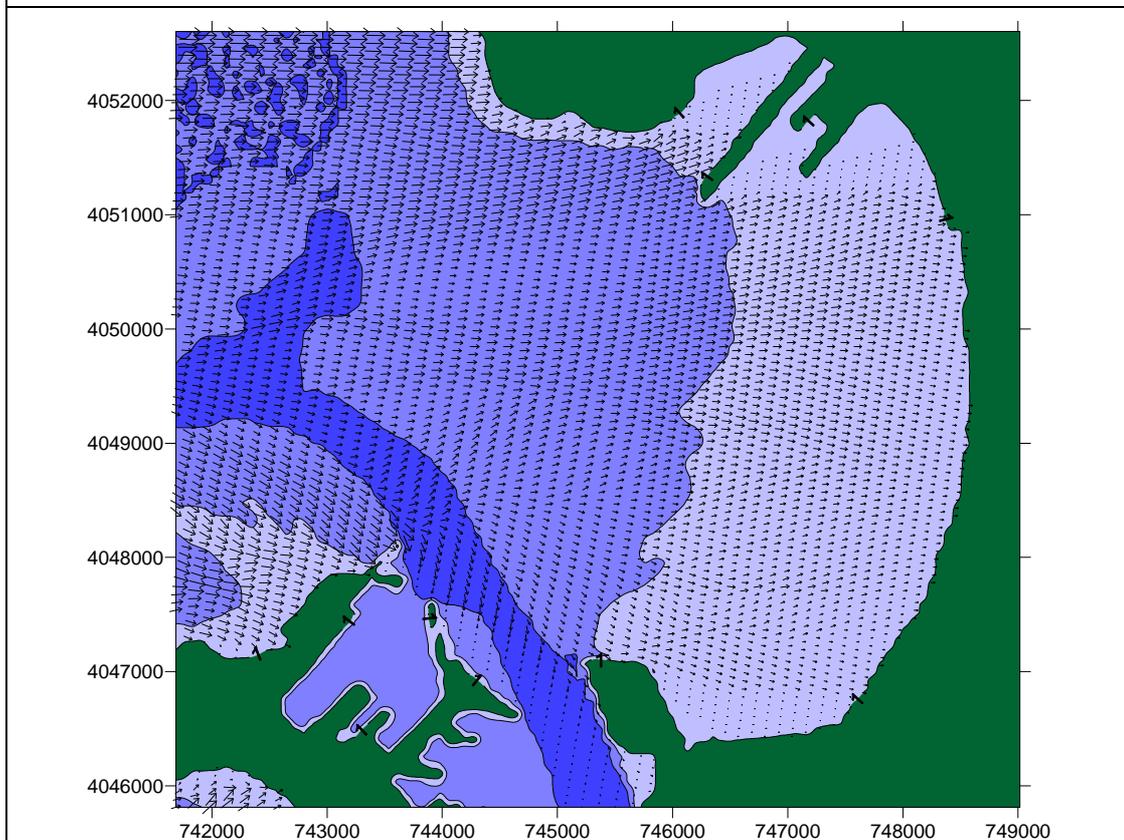


Figura 95: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 02 (WNW). Alternativa Cabezuela.

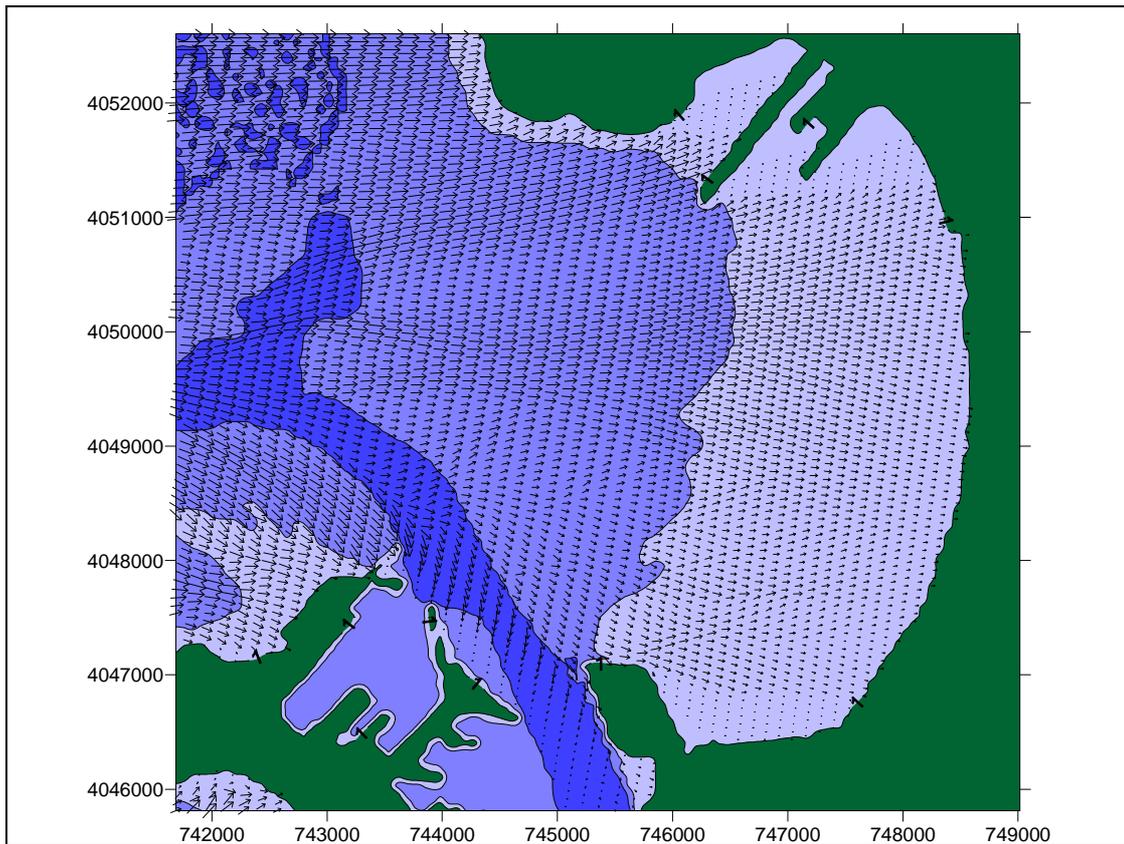


Figura 96: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 03 (WNW). Alternativa Cabezuela.

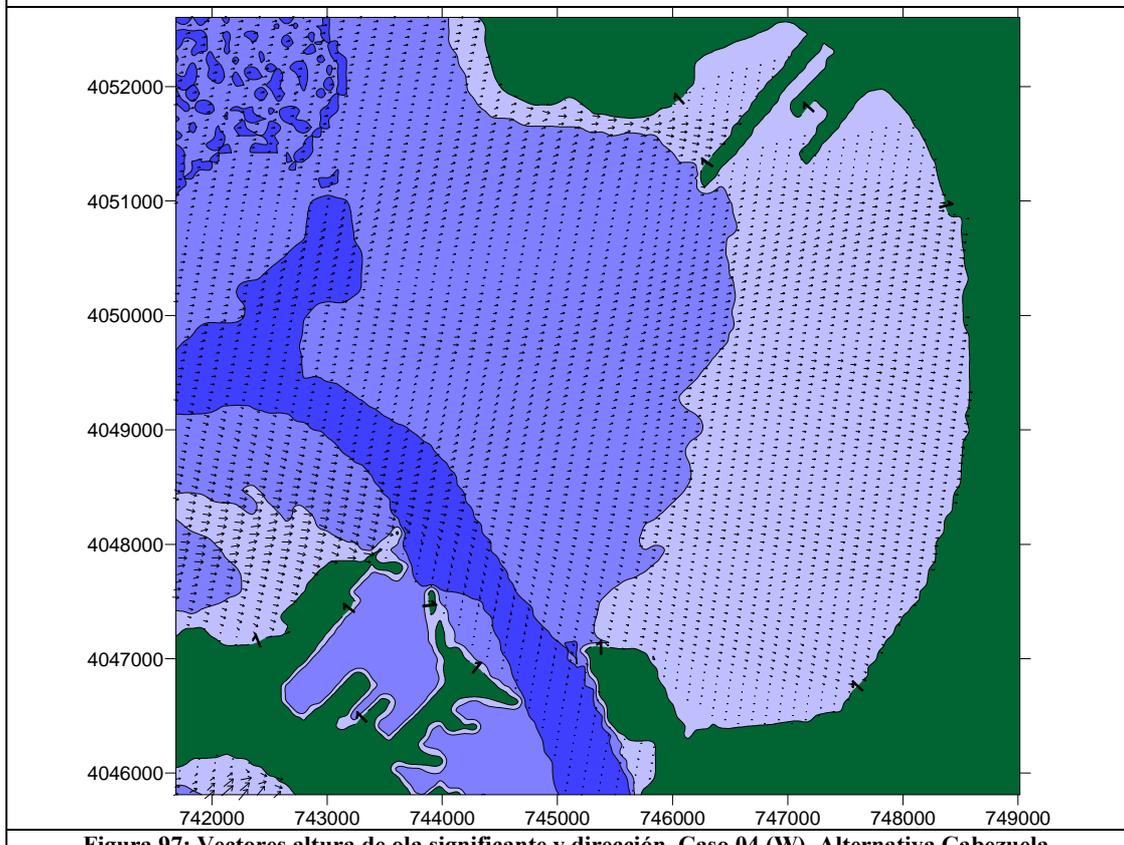


Figura 97: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 04 (W). Alternativa Cabezuela.

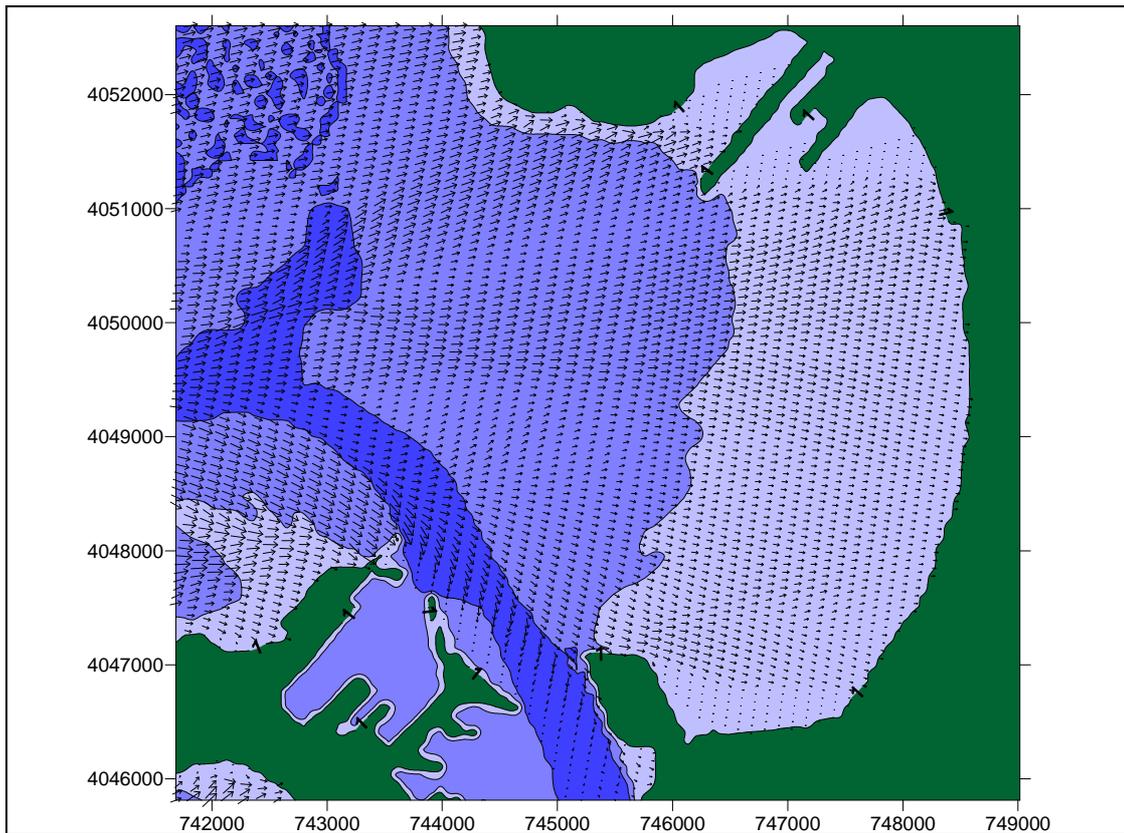


Figura 98: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 05 (W). Alternativa Cabezueta.

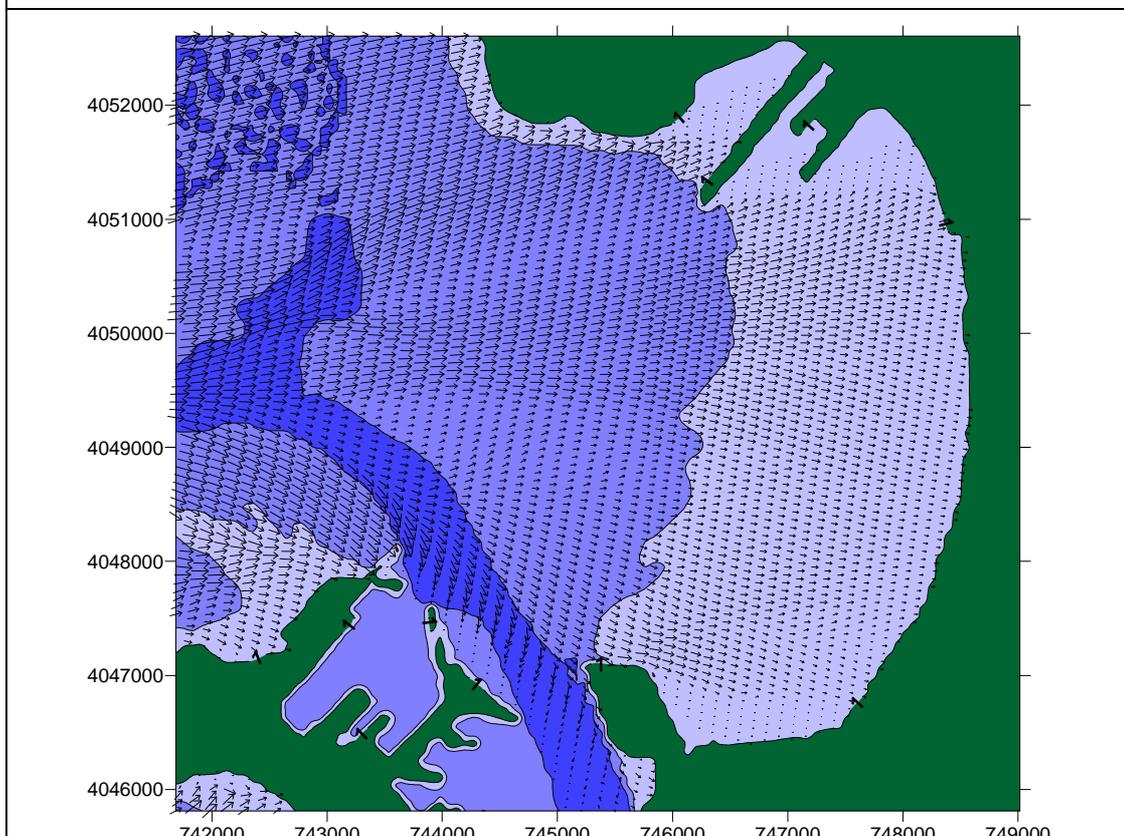


Figura 99: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 06 (W). Alternativa Cabezueta.

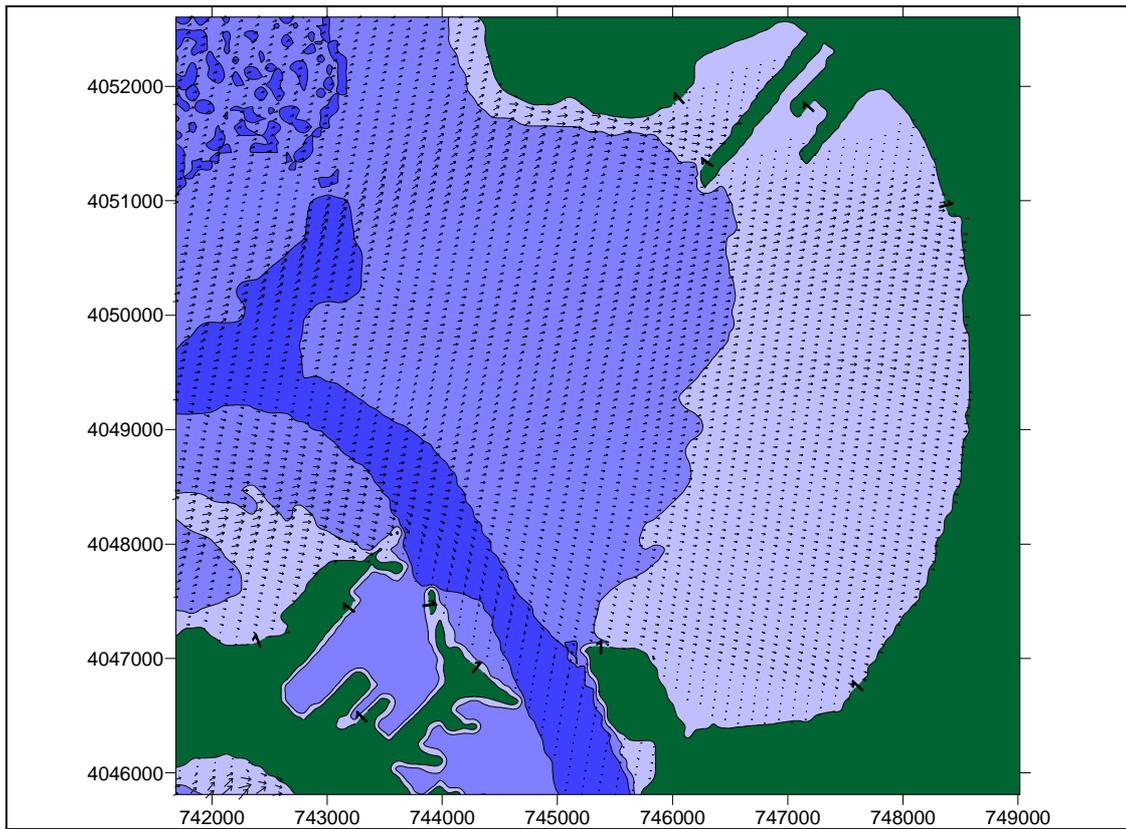


Figura 100: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 07 (WSW). Alternativa Cabezueta.

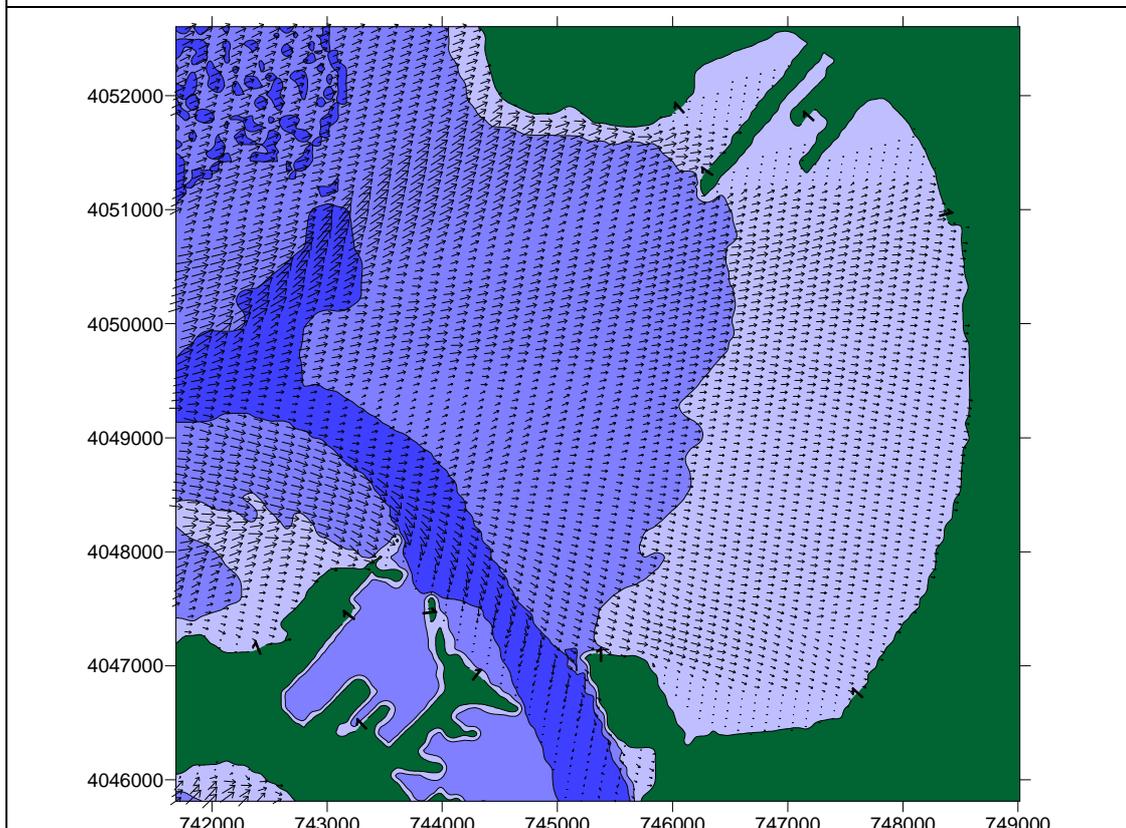
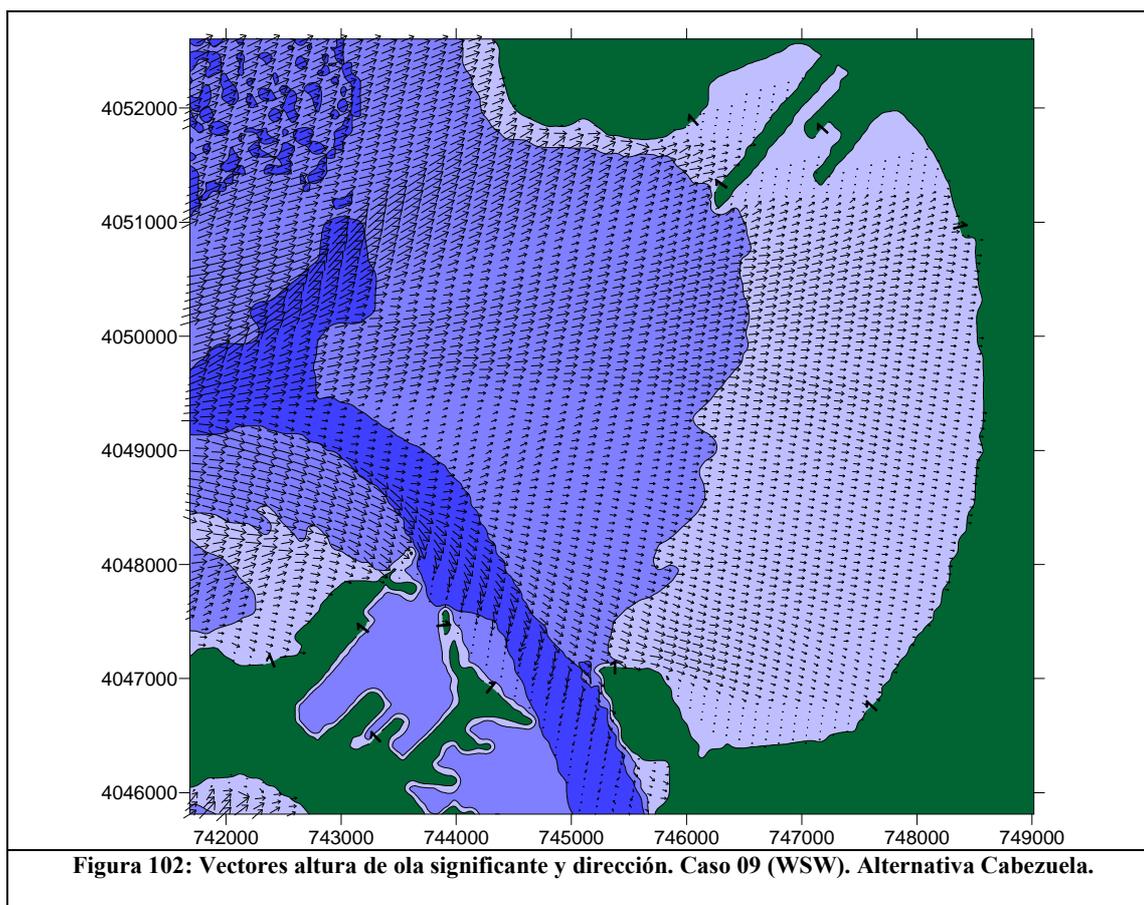
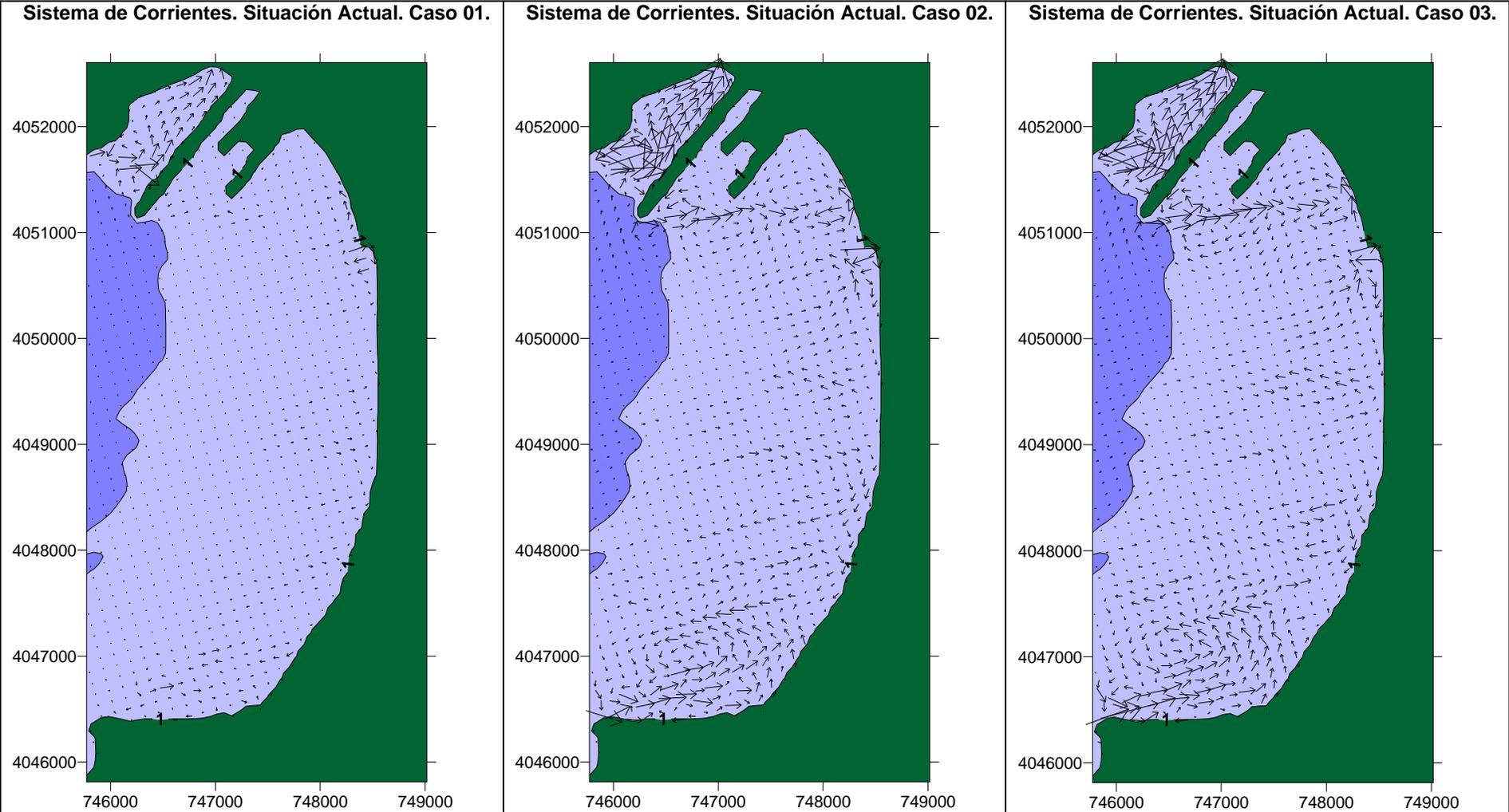
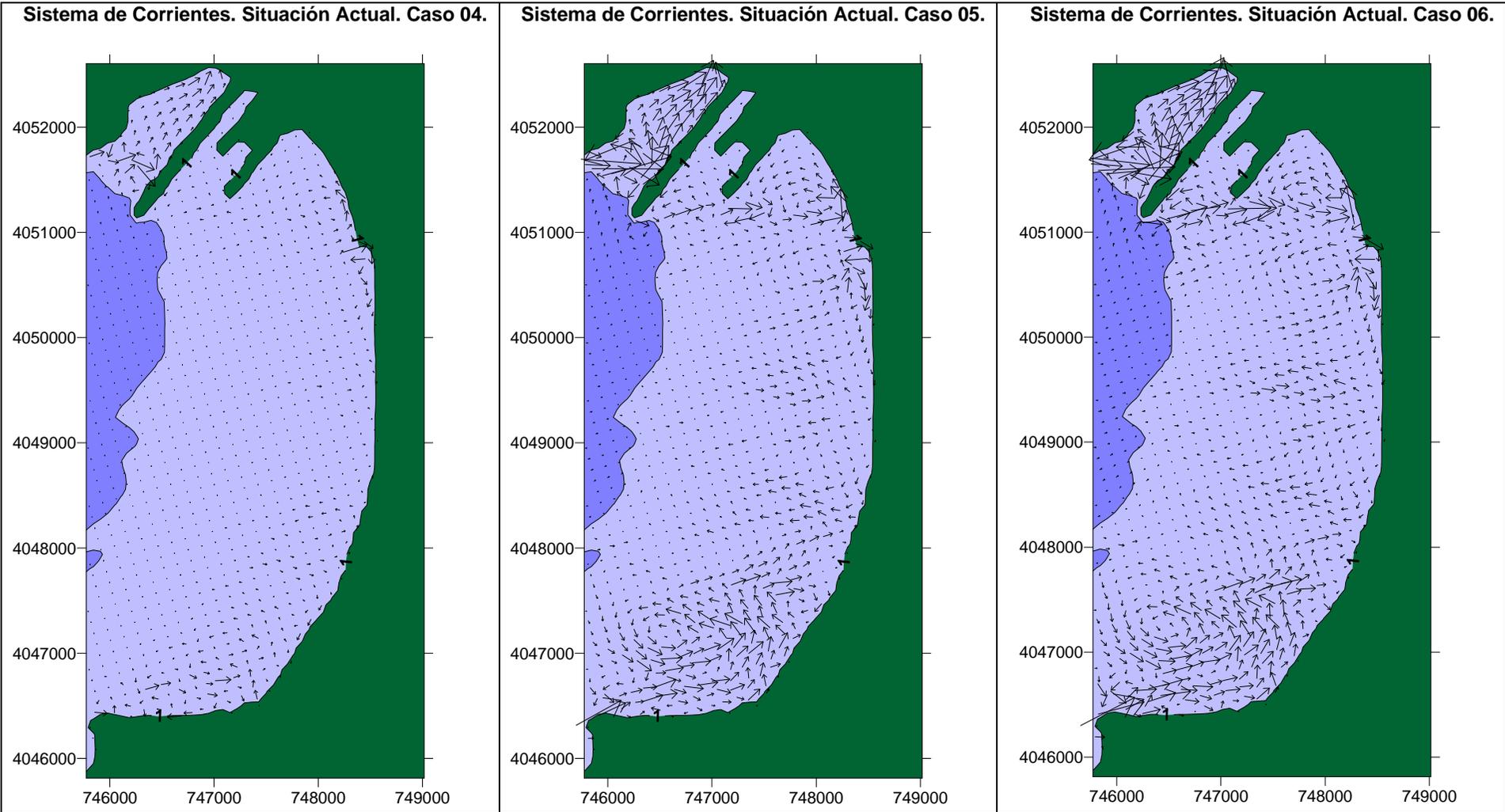
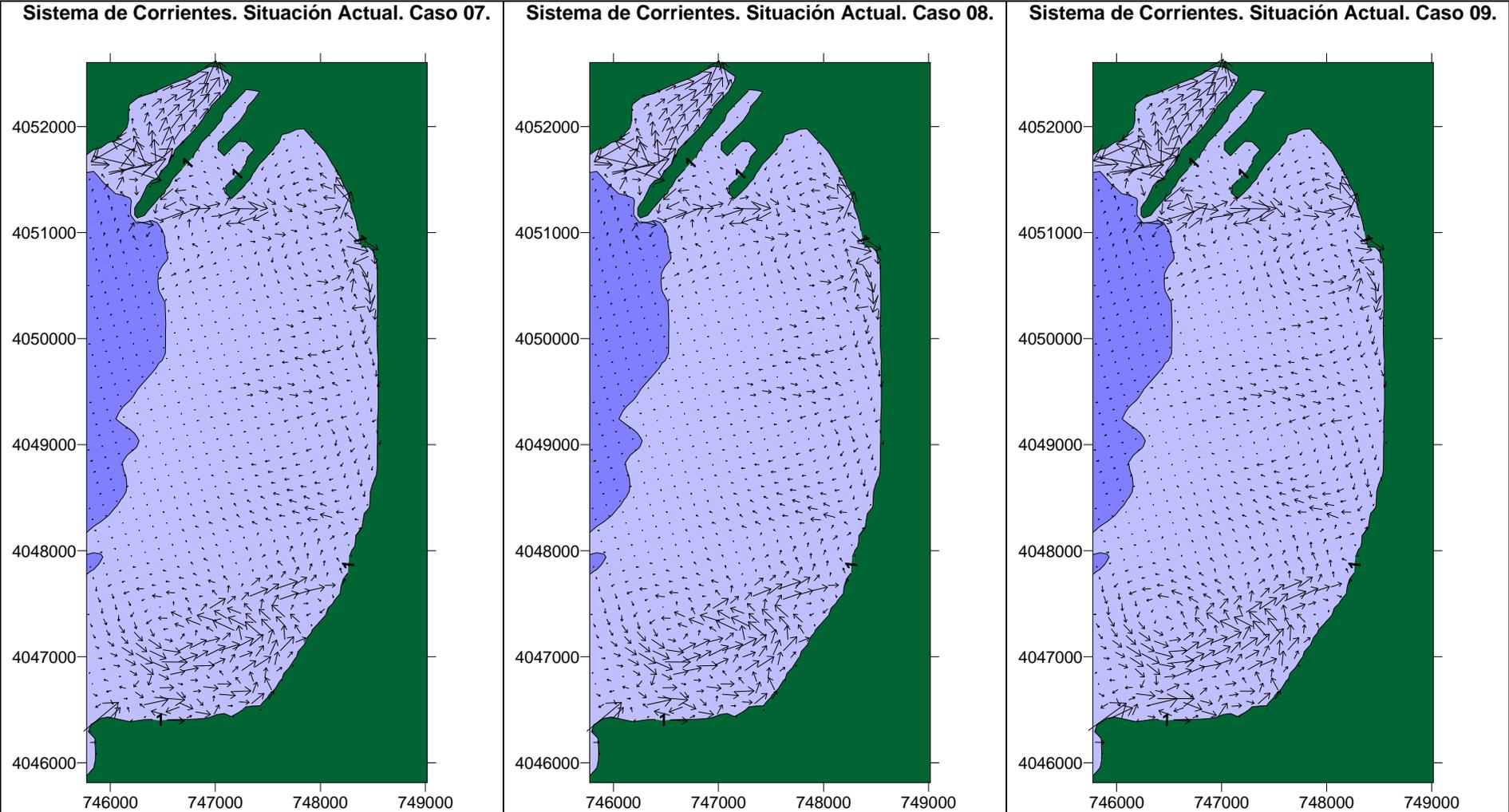


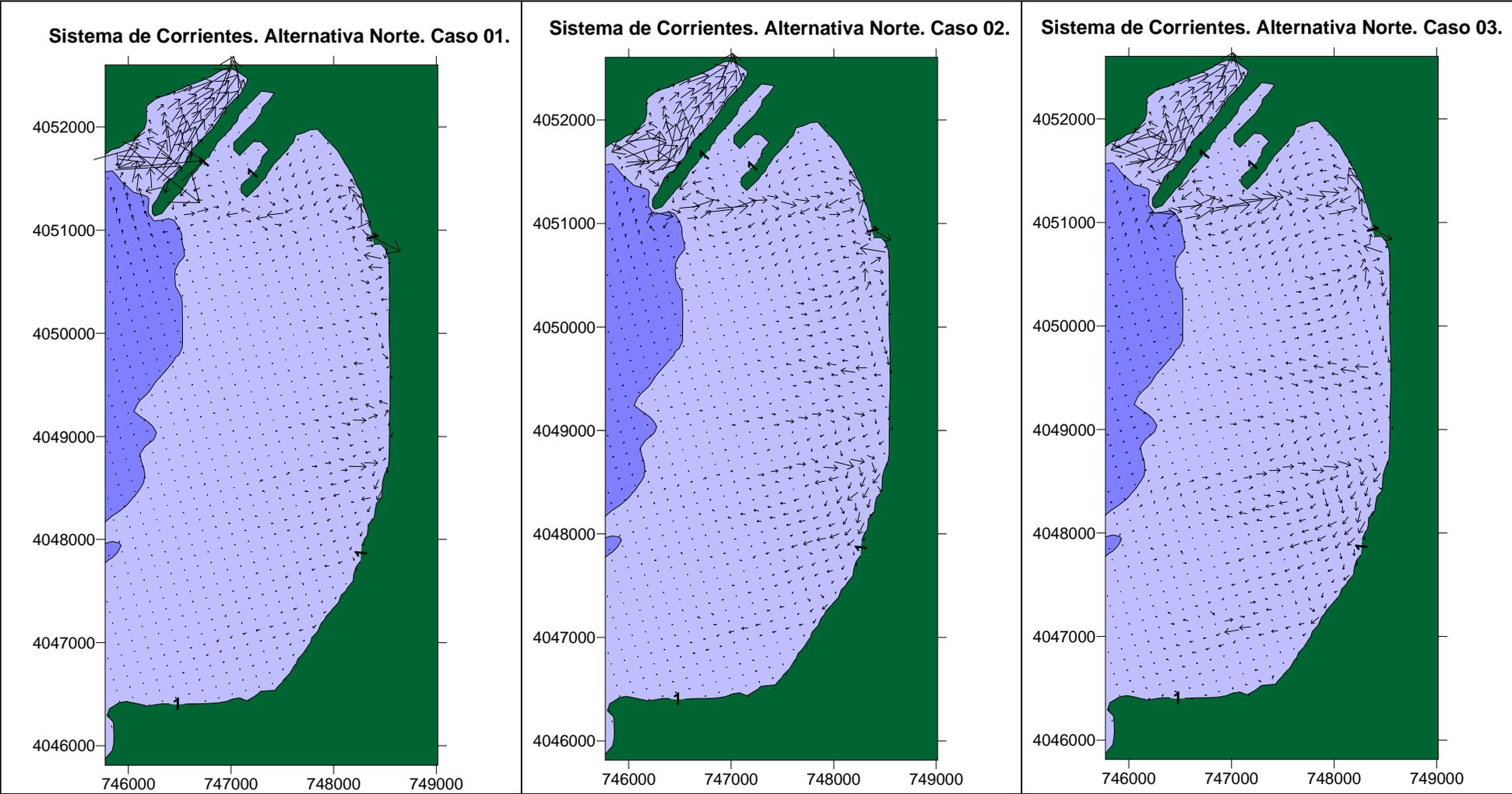
Figura 101: Vectores altura de ola significativa y dirección. Caso 08 (WSW). Alternativa Cabezueta.

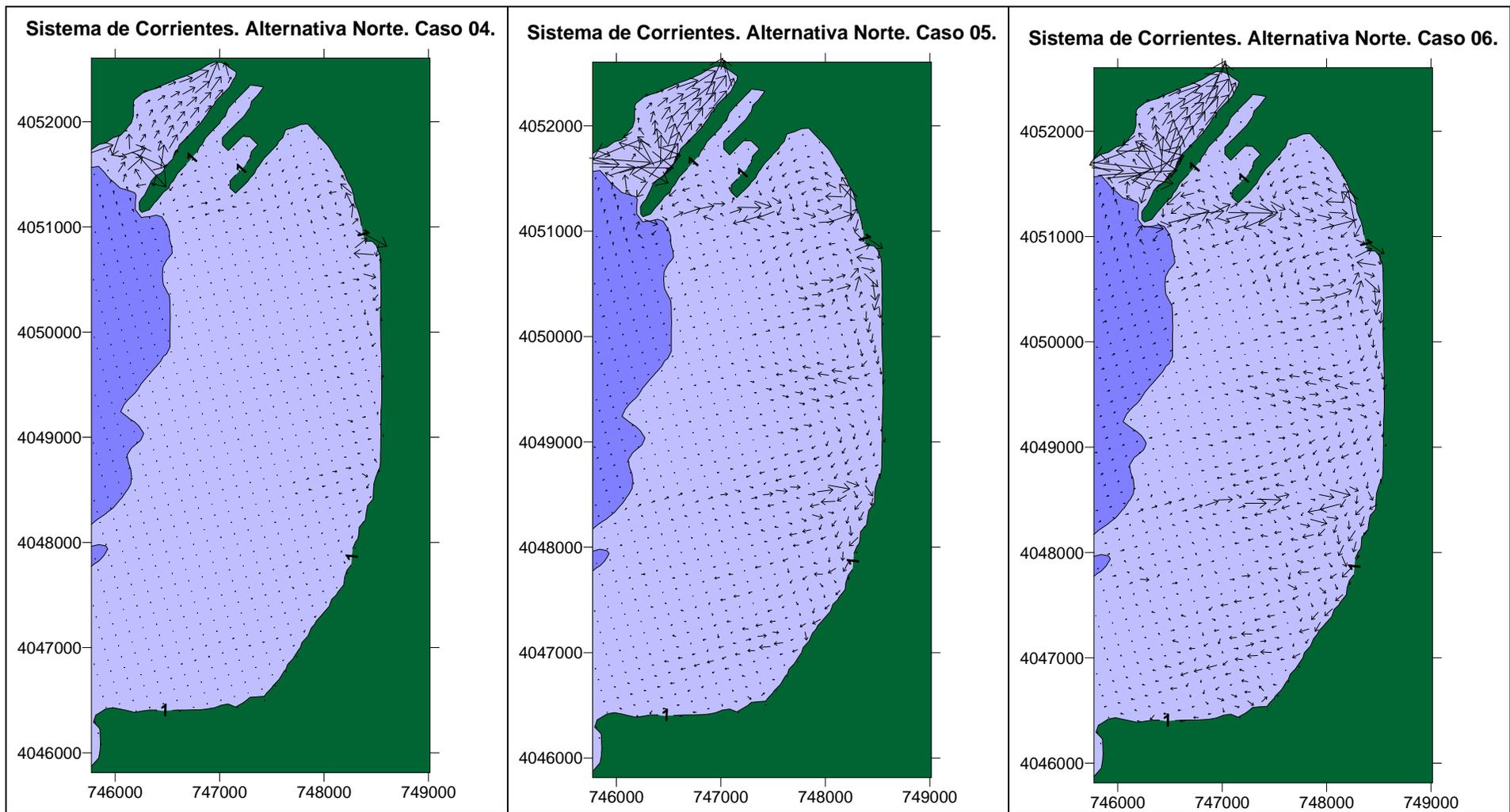


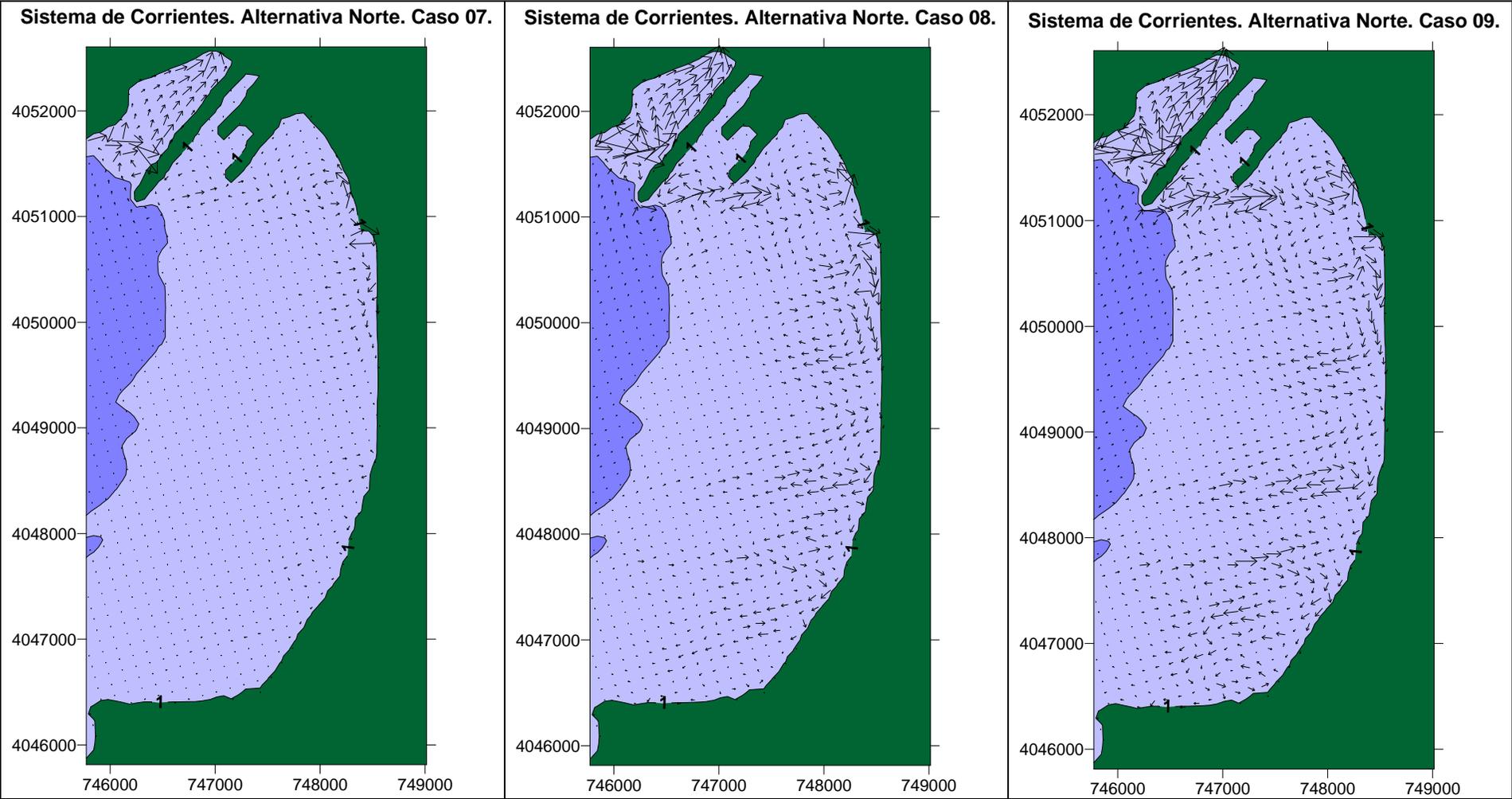












ANEXO XI

ANÁLISIS DE CORRIENTES

ÍNDICE

ÍNDICE	3
1. ESTUDIO DEL SISTEMA DE CORRIENTES	9
1.1. Introducción y objetivos.....	9
1.2. Metodología de trabajo	10
1.2.1. Simulación numérica del sistema de corrientes	10
1.2.2. Datos de campo	13
2. RESULTADOS	15
2.1. Simulaciones en la Situación Actual.....	15
2.1.1. Condiciones de Trabajo Operativas Normales	15
2.1.2. Condiciones de Trabajo Extremas	24
2.2. Alternativa de proyecto	32
2.2.1. Condiciones de Trabajo Operativas Normales	32
2.2.2. Condiciones de Trabajo Extremas	40
2.3. Campaña de medida y comparación.....	48
2.4. Conclusiones	50



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dominio y batimetría empleada en el análisis a nivel regional.....	12
Figura 2: Dominio y batimetría empleada en el análisis a nivel local. Situación Actual de la dársena del Puerto de Cádiz.....	12
Figura 3: Dominio y batimetría empleada en el análisis a nivel local. Situación Futura de la dársena del Puerto de Cádiz, según la Alternativa Dique de Levante.....	13
Figura 4: Ubicación de los puntos de medida.	14
Figura 5: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 10:10 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	16
Figura 6: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en pleamar, a las 12:55 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	17
Figura 7: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 14:40 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	18
Figura 8: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 15:50 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	19
Figura 9: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 16:55 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	20
Figura 10: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en bajamar, a las 18:40 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	21
Figura 11: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 20:10 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	22
Figura 12: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 21:25 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	23
Figura 13: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 12:30 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.	24



Figura 14: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en pleamar, a las 14:40 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.	25
Figura 15: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 16:40 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.	26
Figura 16: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 17:45 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.	27
Figura 17: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 18:40 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.	28
Figura 18: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en bajamar, a las 20:30 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.	29
Figura 19: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 22:00 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.	30
Figura 20: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 23:10 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.	31
Figura 21: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 11:10 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	32
Figura 22: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en pleamar, a las 12:50 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	33
Figura 23: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 14:40 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	34
Figura 24: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 15:55 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	35



Figura 25: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 16:55 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	36
Figura 26: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en bajamar, a las 18:40 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	37
Figura 27: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 20:10 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	38
Figura 28: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 21:20 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.....	39
Figura 29: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 12:30 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.	40
Figura 30: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en pleamar, a las 14:40 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.	41
Figura 31: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 16:40 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.	42
Figura 32: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 17:50 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.	43
Figura 33: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 18:40 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.	44
Figura 34: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en bajamar, a las 20:30 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.	45
Figura 35: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 22:00 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.	46



Figura 36: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 23:10 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.	47
Figura 37: Comparación del nivel del mar obtenido mediante simulación numérica de la serie temporal ST2 con los datos de nivel medidos in situ en el punto P2 con un ADCP de 1MHz para el intervalo de medida 17–22 Marzo 2007, correspondiente a Condiciones de Trabajo Extremas.....	49
Figura 38: Comparación de la velocidad de corriente obtenida mediante simulación numérica de la serie temporal ST2 con los datos de velocidad medidos in situ en el punto P2 con un ADCP de 1MHz para el intervalo de medida 17–22 Marzo 2007, correspondiente a Condiciones de Trabajo Extremas.	49



1. ESTUDIO DEL SISTEMA DE CORRIENTES

1.1. Introducción y objetivos

En este anejo se analiza el sistema de corrientes debido a la marea y al viento en la Bahía de Cádiz, por ser éste uno de los agentes importantes que interacciona con las infraestructuras portuarias, interfiere con las maniobras náuticas y condiciona la calidad ambiental del entorno.

Los objetivos específicos de la modelización del sistema de corrientes son:

- Obtener el campo de velocidades en toda la Bahía de Cádiz para analizar la maniobrabilidad de los buques en el canal de navegación y las áreas de maniobras.
- Analizar el intercambio de masas de agua entre la Bahía Interior y la Exterior, debido fundamentalmente a sus implicaciones ambientales en la calidad de aguas.
- Optimizar las labores de dragado relacionadas con la obra y con el mantenimiento de los canales de navegación.

Este anejo representa un avance del estudio definitivo donde se abordarán con detalle los puntos anteriores. En el presente documento se presenta la metodología de trabajo seguida para obtener el campo de velocidades en la Bahía de Cádiz, así como los resultados gráficos para dos ciclos de marea, uno con una carrera de marea de 1.3 un (coeficiente de marea de 0.6-0.7), que se consideran representativos de condiciones de trabajo operativas normales, y otro ciclo con carrera de marea de 3.2 m (coeficiente de marea de 1.0-1.1), considerado representativo de condiciones de trabajo extremas.

A su vez, se han considerado dos configuraciones geométricas distintas:

- Situación actual, caracterizada por la batimetría existente sin tener en cuenta la futura Terminal de contenedores.



- Situación futura, donde se usa la batimetría existente pero se incorpora en el contorno de la dársena comercial de Cádiz el perímetro de la futura Terminal de Contenedores. Es de destacar, que esta configuración es sólo una aproximación a la situación futura real, ya que no incorpora la nueva batimetría resultante de los dragados.

Tras las tareas de simulación, se ha realizado una comparación preliminar de la variación del nivel del mar y de la velocidad de la corriente promediada en la columna de agua con los datos obtenidos en la campaña de campo hidrodinámica realizada a tal efecto en Febrero y Marzo del año 2007.

Las corrientes en la Bahía de Cádiz pueden deberse a:

- Corrientes debidas al oleaje: se producen en la zona de rompientes y sus proximidades, y son de tres tipos:
 - transporte neto de masa de agua hacia la costa
 - corrientes longitudinales debidas a la incidencia oblicua del oleaje en rotura
 - flujos de retorno hacia el mar (rip-currents)
- Corrientes de marea: asociadas a la propagación de la onda de marea astronómica en la bahía.
- Corrientes debidas al viento.

Dada la escala espacial del problema que estamos analizando y las características del entorno, en este análisis se desprecia el posible efecto de las corrientes debidas al oleaje en el sistema circulatorio de la Bahía de Cádiz.

1.2. Metodología de trabajo

1.2.1. Simulación numérica del sistema de corrientes

En el análisis de las corrientes debidas a la marea astronómica y a los vientos locales se ha empleado un modelo numérico, debidamente contrastado, que resuelve las ecuaciones integradas en la vertical con términos de fricción por fondo y difusión turbulenta.

Este modelo resuelve, hasta el segundo orden de aproximación, las ecuaciones de continuidad y de conservación de la cantidad de movimiento, utilizando un esquema de diferencias finitas en un dominio rectangular. El modelo empleado es capaz de simular la oscilación del nivel del mar y las



velocidades de corriente promediadas en la columna de agua como respuesta a la tensión tangencial ejercida por el viento, los gradientes de presión sobre la superficie del mar, las fuerzas de Coriolis o el tensor de radiación del oleaje. Además, el modelo tiene en cuenta la fricción con el fondo y las zonas del dominio que quedan inundadas o secas según el nivel del mar.

El análisis se ha realizado a dos escalas espaciales distintas:

1. **A nivel regional** (véase Figura 1). Se ha usado una malla rectangular de elementos cuadrados de $\Delta x = \Delta y = 60$ m. Se ha analizado la propagación de la onda de marea en la Bahía de Cádiz, usando como condiciones de contorno en las fronteras Norte y Sur, datos de niveles del mar proporcionados por el programa WXTide32 en los puntos:
 1. Bajo Salmedina: $6^{\circ}28.00'W$, $36^{\circ}44.00'N$
 2. Conil: $6^{\circ}05.00'W$, $36^{\circ}17.00'N$
2. **A nivel local**. Se ha usado una malla rectangular de elementos cuadrados de $\Delta x = \Delta y = 30$ m. Se han simulado las corrientes inducidas por la onda de marea y se ha añadido el efecto de los vientos locales. A su vez, se ha tenido en cuenta el efecto de las dos pilas centrales del Puente José León de Carranza, incluyendo la fuerza de arrastre ejercida por las dos pilas en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento a través de su contribución en el término de la tensión tangencial. La onda de marea se ha simulado a partir de los niveles y corrientes en los contornos del dominio, extraídos de las simulaciones a nivel regional. En esta fase de la simulación se han analizado dos situaciones diferentes:
 - a. Situación Actual de la dársena de Cádiz (véase Figura 2), caracterizada por la batimetría existente sin tener en cuenta la futura Terminal de contenedores.
 - b. la Situación Futura, una vez construida la Terminal de Contenedores según la Alternativa Dique de Levante, propuesta en el presente informe (véase Figura 3), sin incluir la futura batimetría resultante de los dragados.

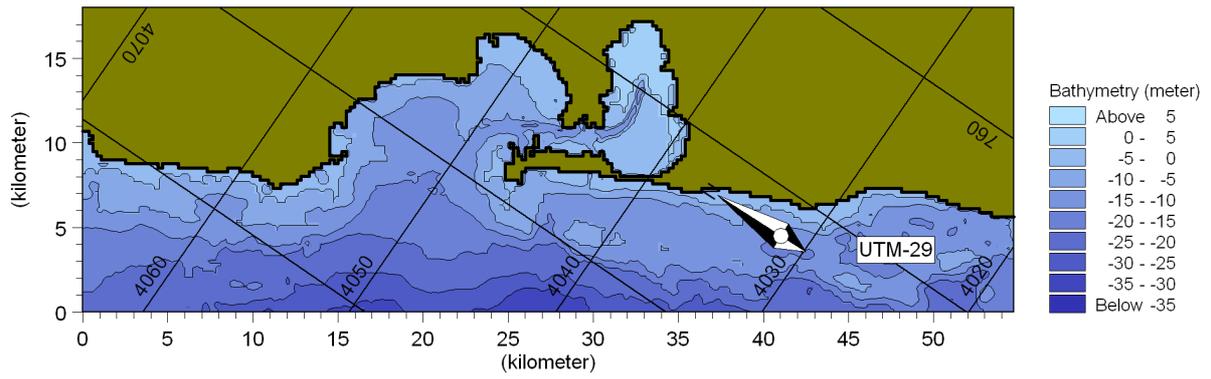


Figura 1: Dominio y batimetría empleada en el análisis a nivel regional.

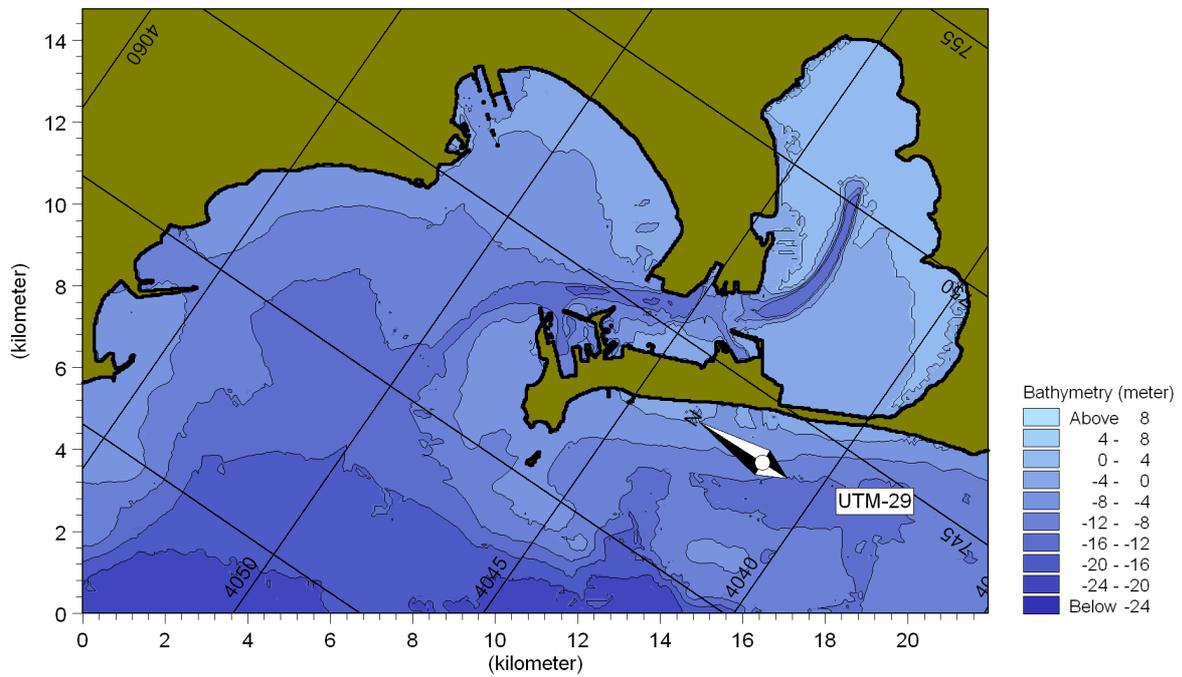


Figura 2: Dominio y batimetría empleada en el análisis a nivel local. Situación Actual de la dársena del Puerto de Cádiz.

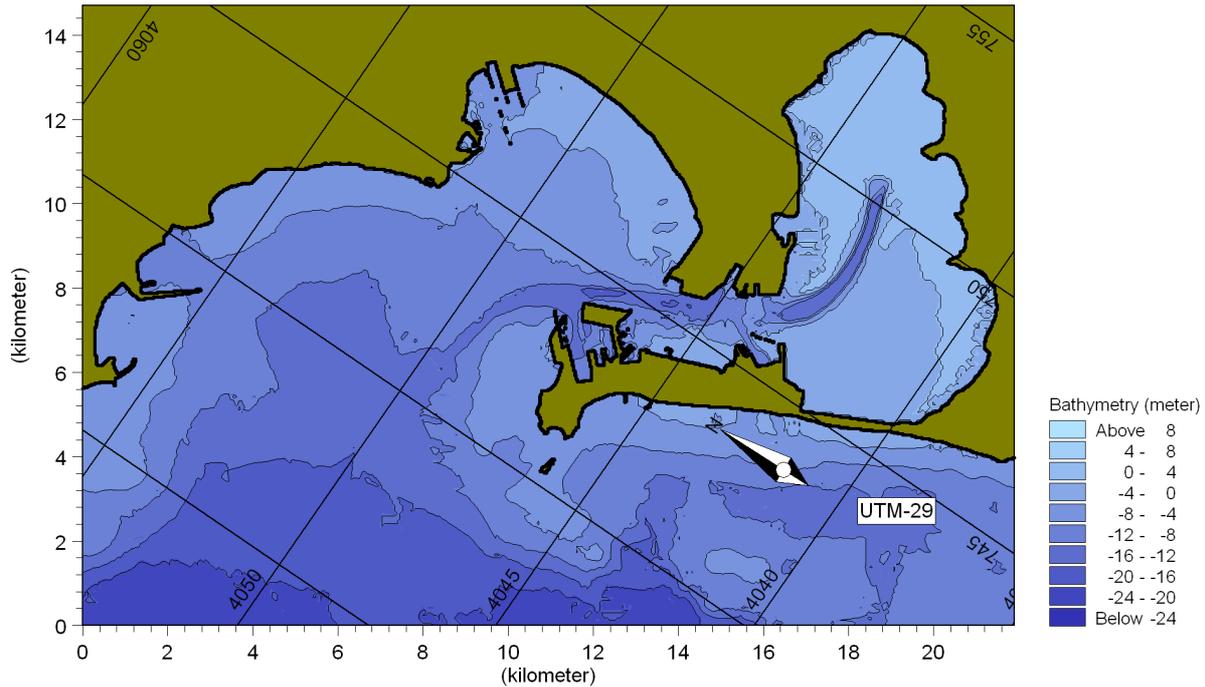


Figura 3: Dominio y batimetría empleada en el análisis a nivel local. Situación Futura de la dársena del Puerto de Cádiz, según la Alternativa Dique de Levante.

Se ha simulado el sistema de corrientes en la zona de estudio bajo Condiciones de Trabajo Operativas Normales y bajo Condiciones de Trabajo Extremas:

- Para el análisis de las **Condiciones de Trabajo Operativas Normales** se han simulado dos ciclos de marea de coeficientes de marea 0,6-0,7 correspondientes a las condiciones existentes los días 14/02/2007 y 15/02/2007 (Serie temporal ST1, que coincide con la campaña de campo hidrodinámica realizada).
- Por otra parte, para el análisis de las **Condiciones de Trabajo Extremas** se han simulado dos ciclos de marea de coeficientes de marea 1,0-1,1 correspondientes a las condiciones existentes los días 17/03/2007 y 18/03/2007 (Serie temporal ST2, que coincide con la campaña de campo hidrodinámica realizada).

1.2.2. Datos de campo

Por otro lado, se dispone de las medidas obtenidas en campo de niveles y velocidades en la columna de agua en tres puntos diferentes (en el Anejo de la Campaña de Campo Hidrodinámica se presentan más detalles):

- P1, situado en el canal de navegación a la altura del actual Dique de Levante (véase Figura 4). En este punto se instaló un perfilador de corrientes AWAC de 1MHz con módulo AST (Acoustic Surface Tracking).



- P2, situado en el canal de navegación principal de la bahía, a la altura del morro del Dique de San Felipe (véase Figura 4). En este punto se instaló un perfilador de corrientes ADCP de 1 MHz.
- P3, situado junto a la bocana de la Dársena de la Zona Franca (véase Figura 4). En este punto se instaló un ADCP de 2 MHz.

Parte de estos datos se han usado para la validación de los resultados del modelo numérico usado.

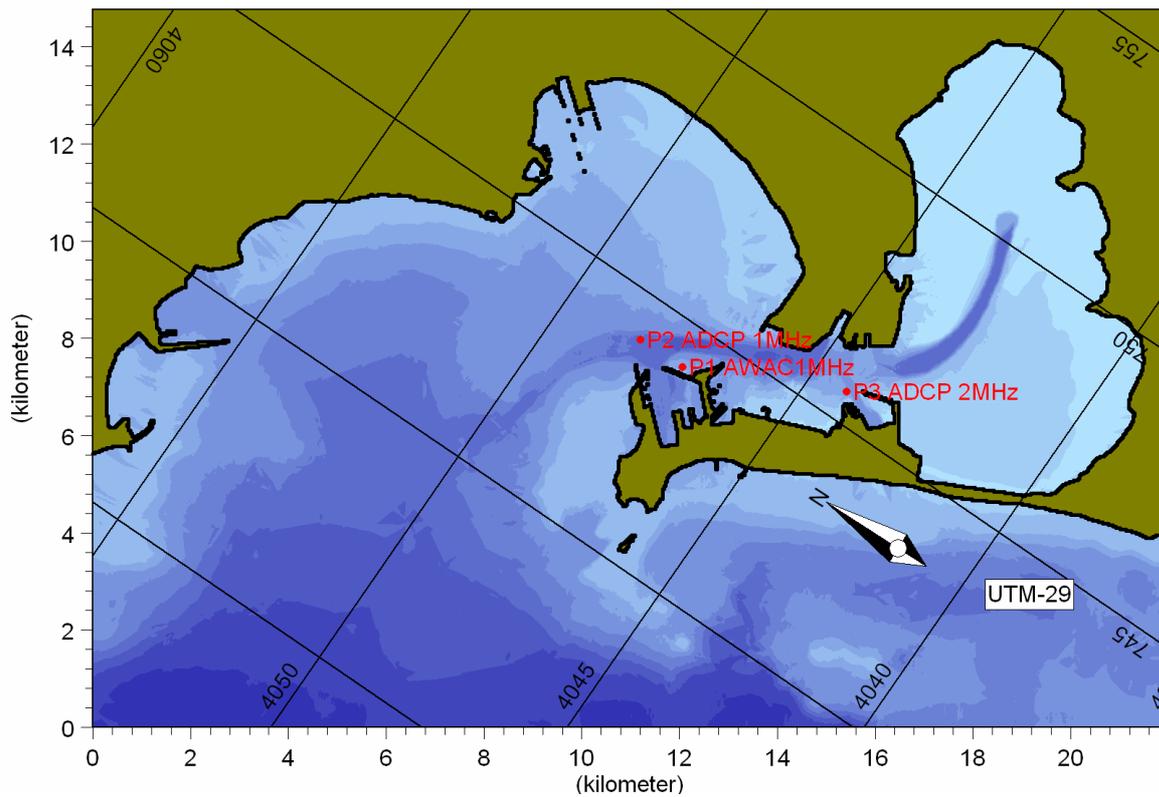


Figura 4: Ubicación de los puntos de medida.



2. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con el modelo numérico en la Situación Actual y en la Situación Futura según la Alternativa Dique de Levante, sólo a nivel local. Se presentan las series temporales del nivel medio del mar y los campos de velocidades promediadas en la columna de agua en ocho fases diferentes de la onda de marea.

2.1. Simulaciones en la Situación Actual

2.1.1. Condiciones de Trabajo Operativas Normales

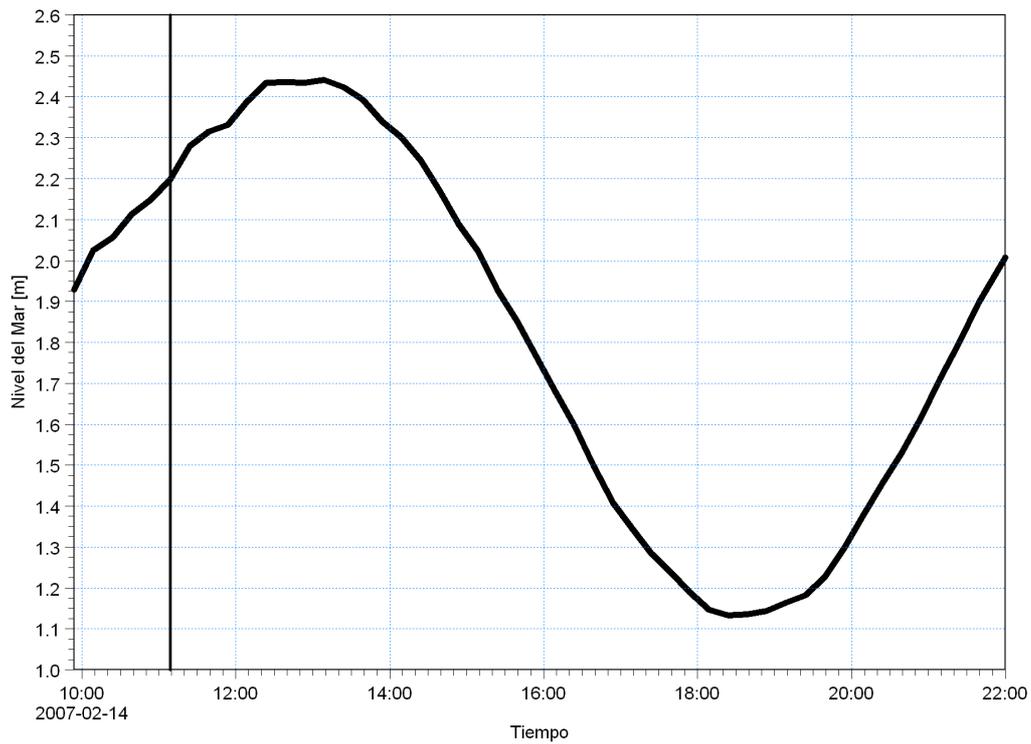
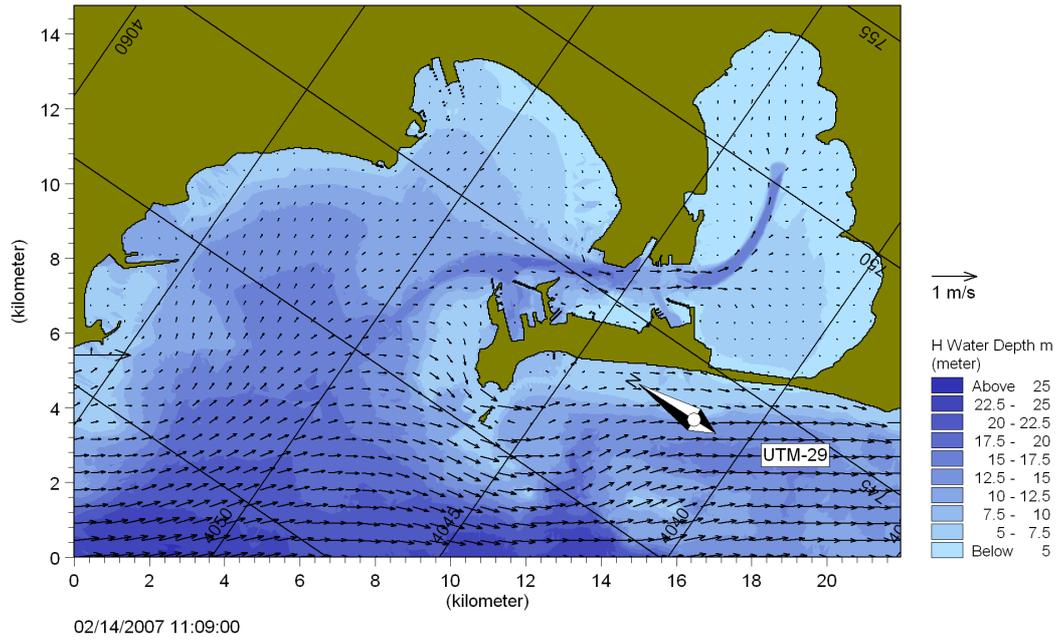


Figura 5: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 10:10 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

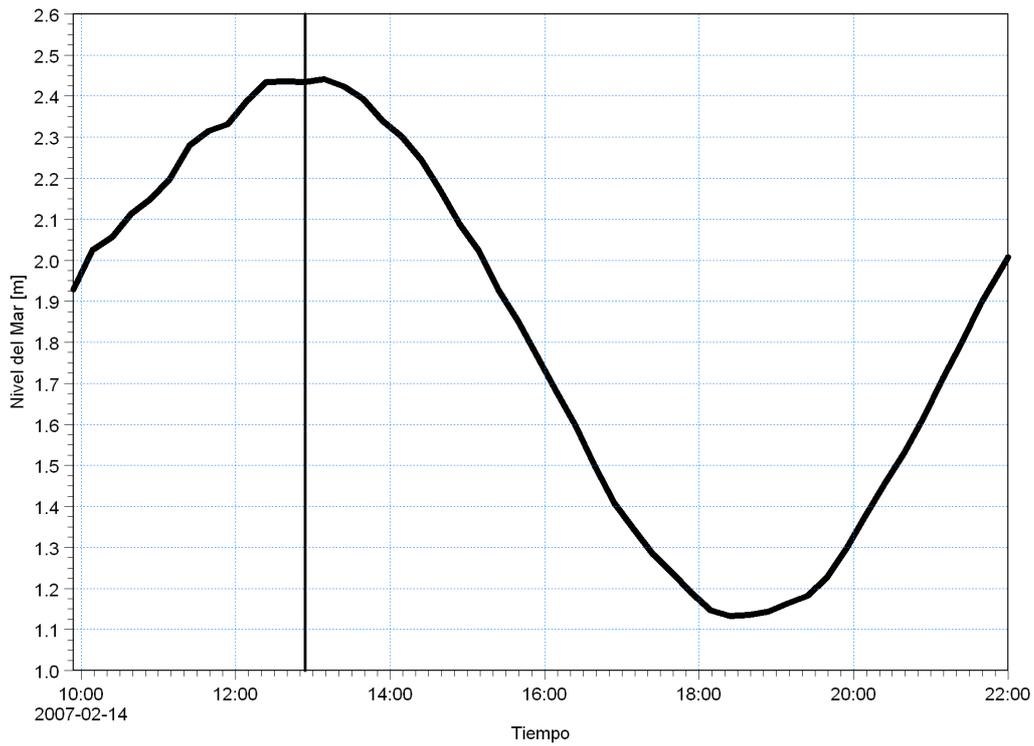
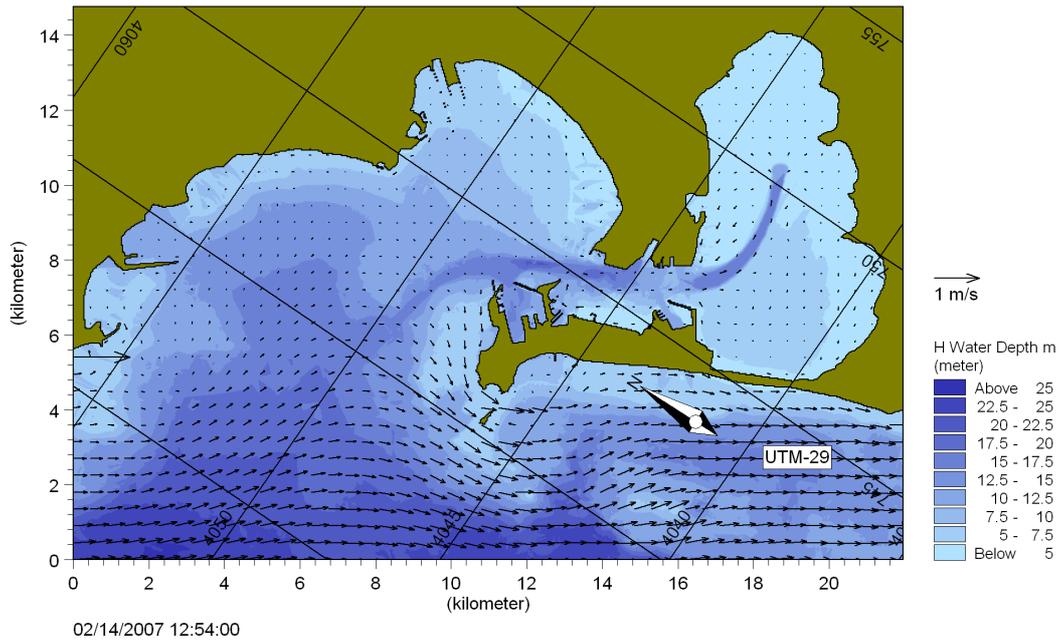


Figura 6: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en pleamar, a las 12:55 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

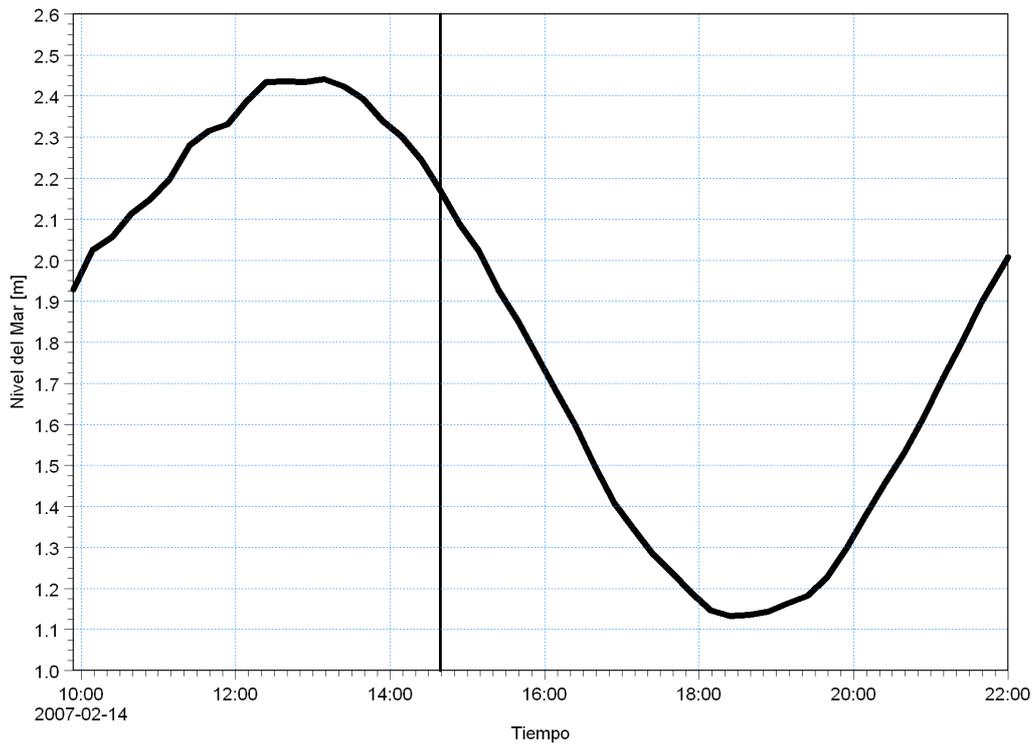
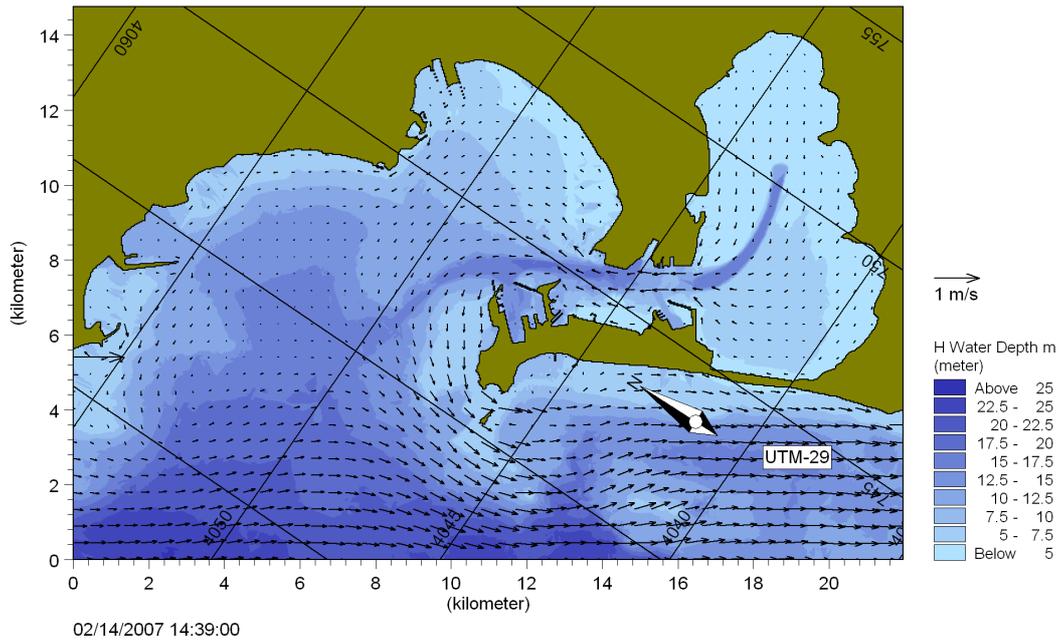


Figura 7: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 14:40 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

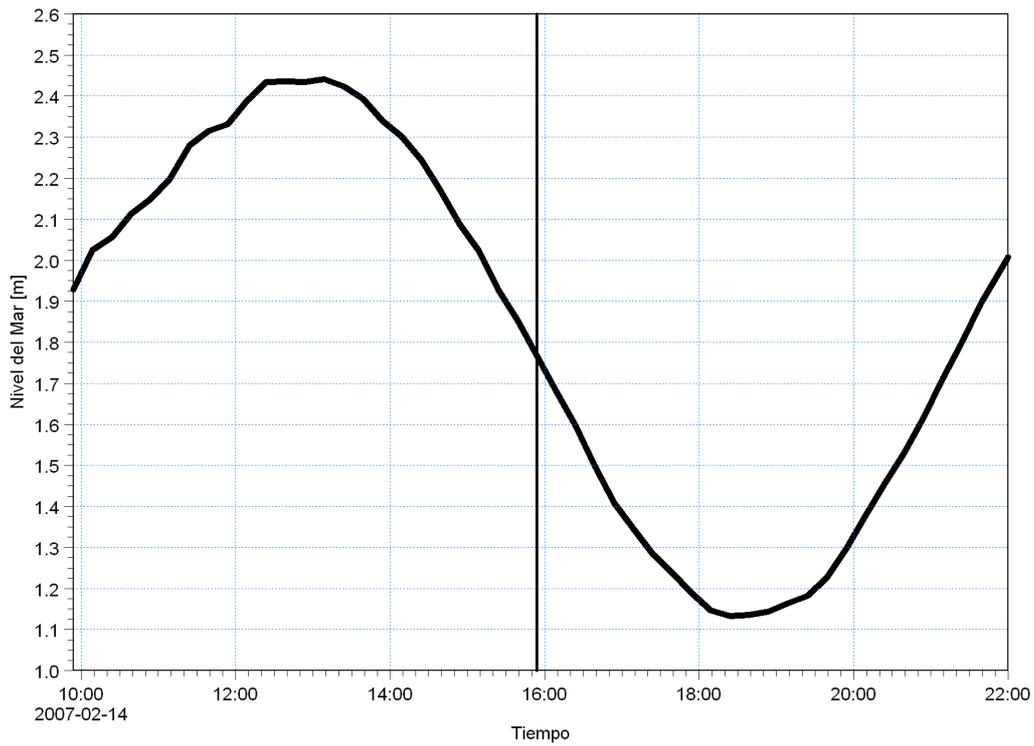
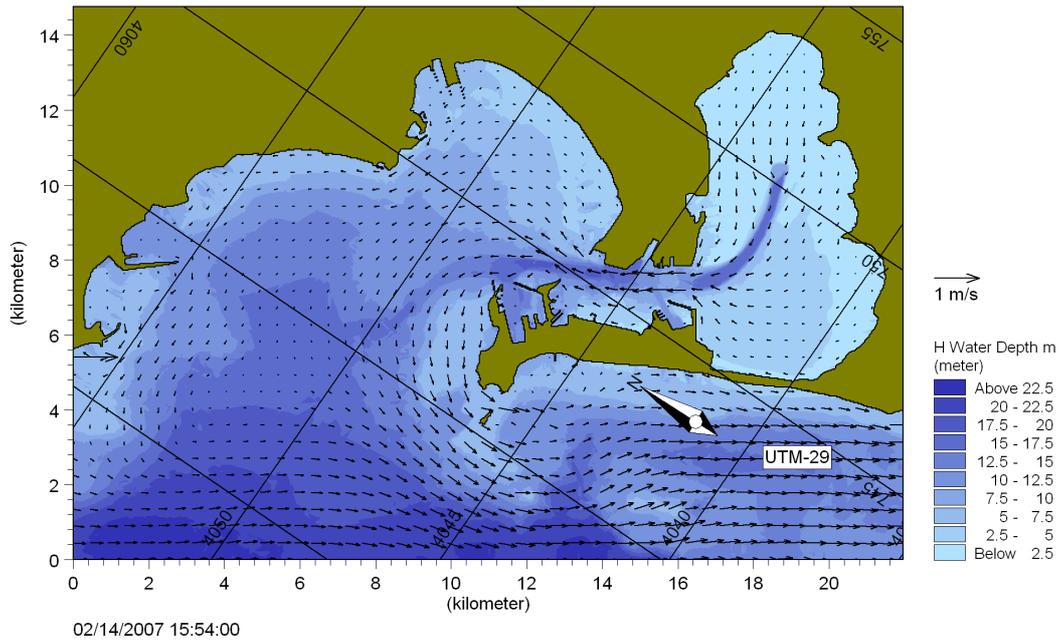


Figura 8: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 15:50 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

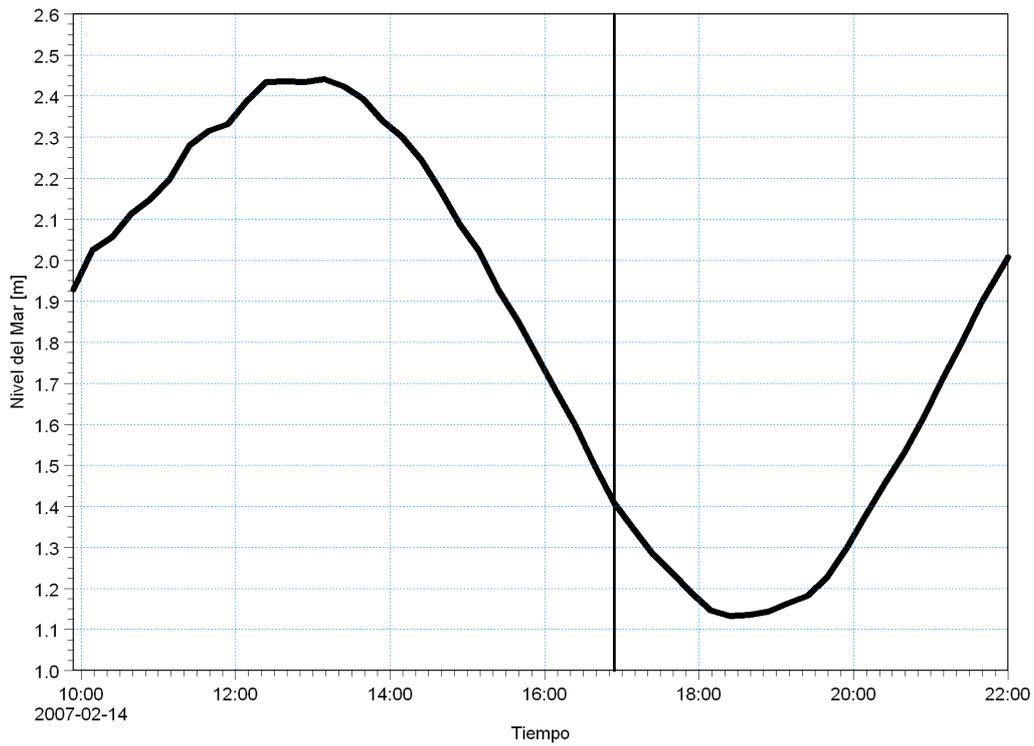
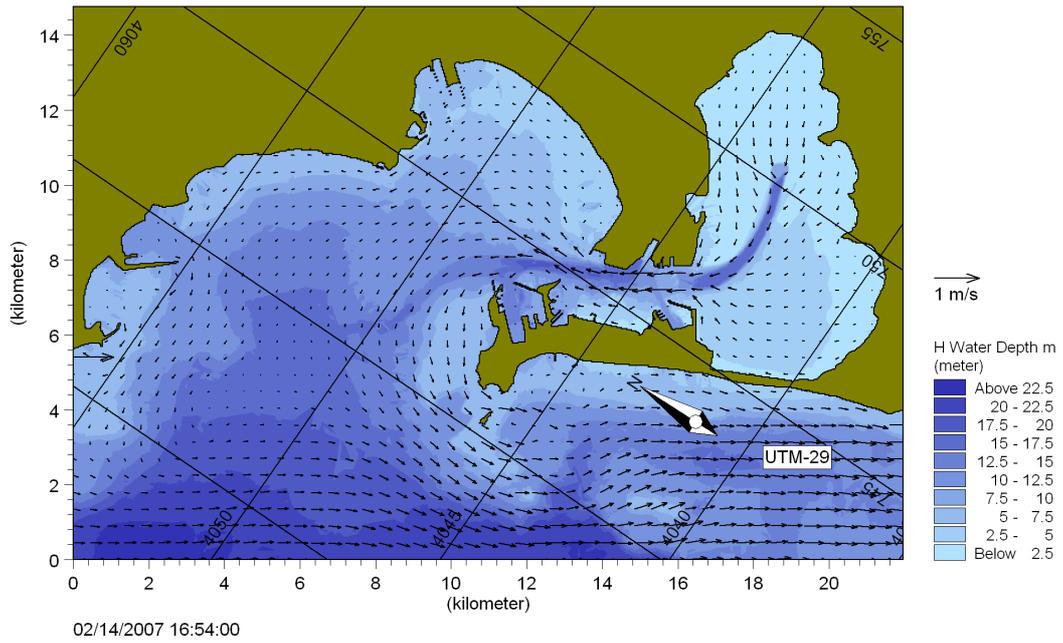


Figura 9: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 16:55 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

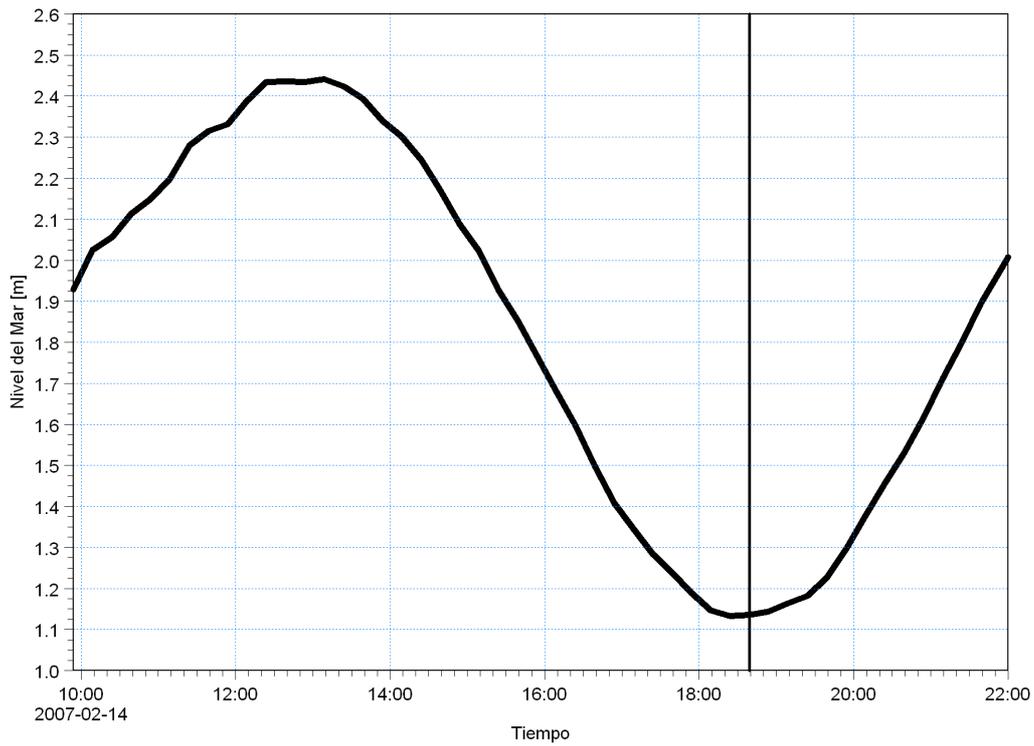
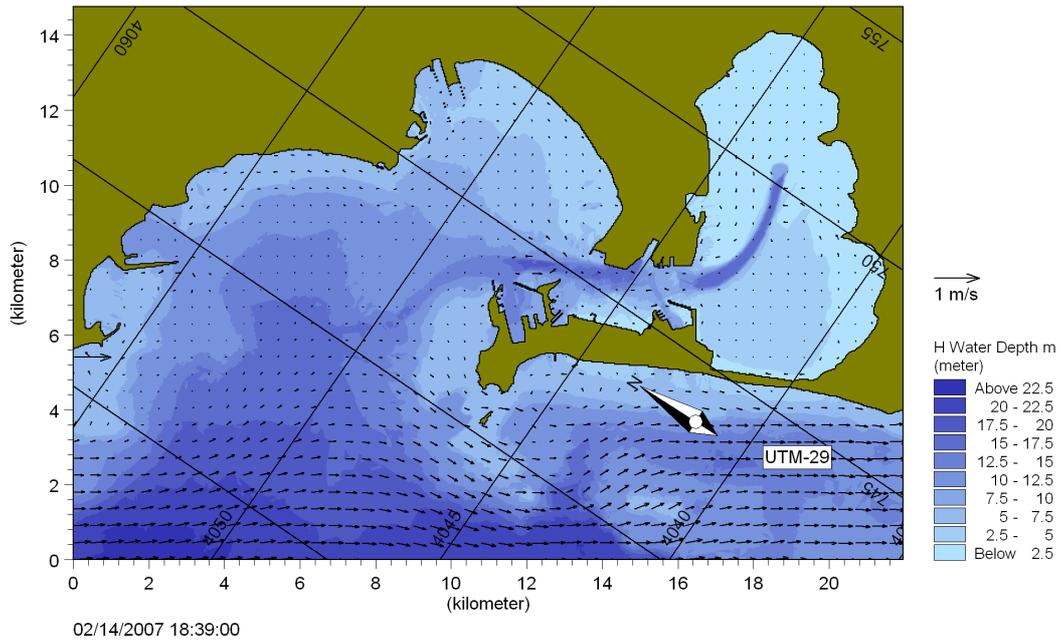


Figura 10: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en bajamar, a las 18:40 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

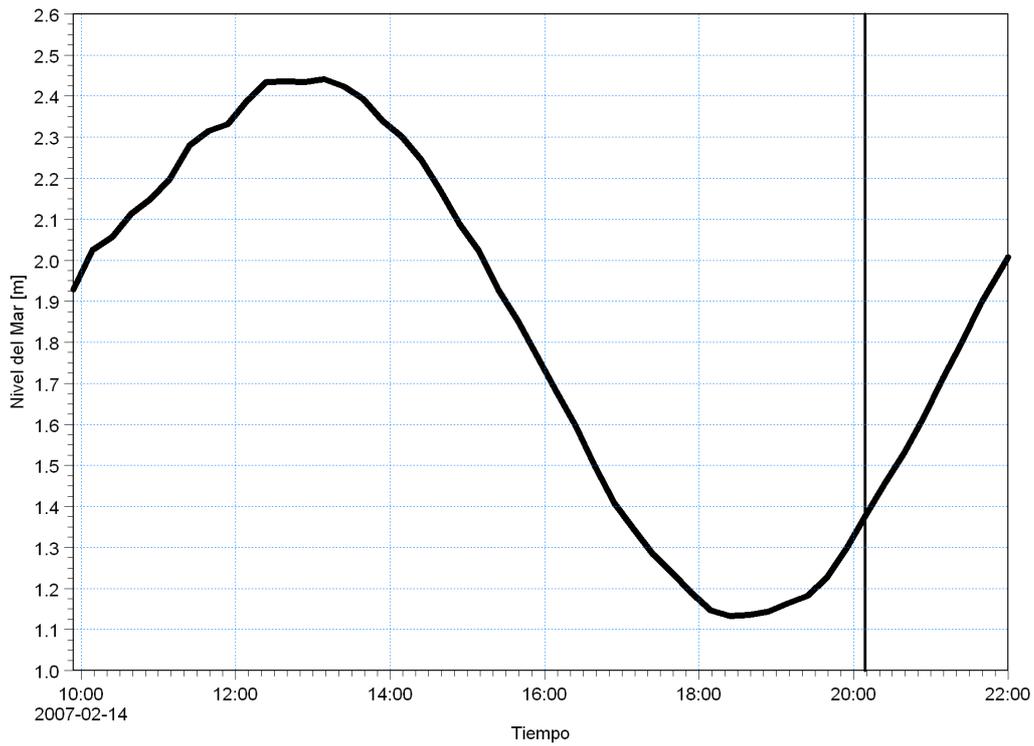
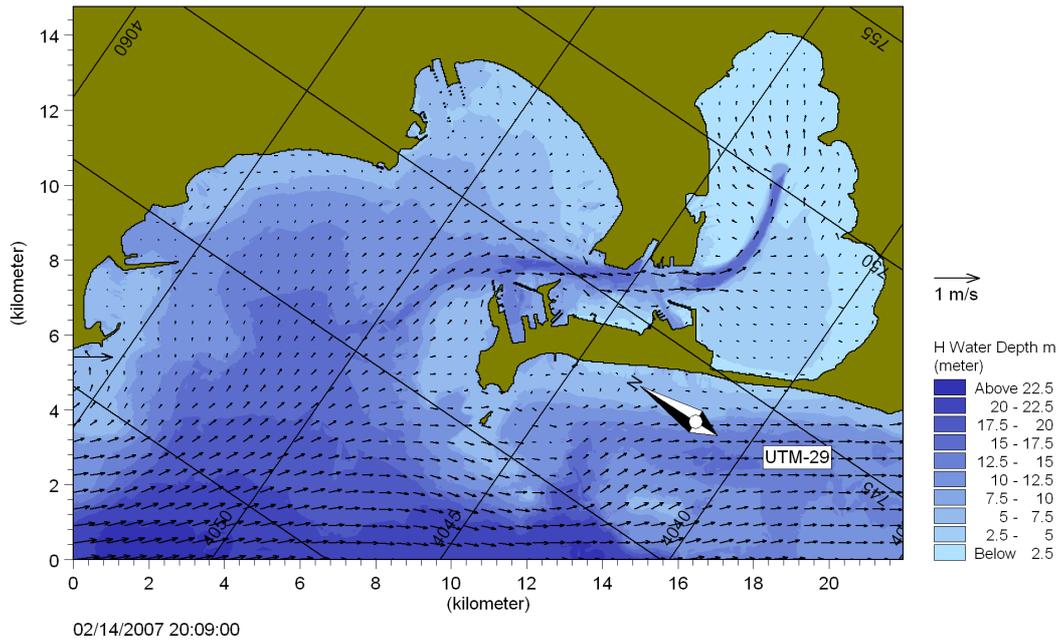


Figura 11: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 20:10 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

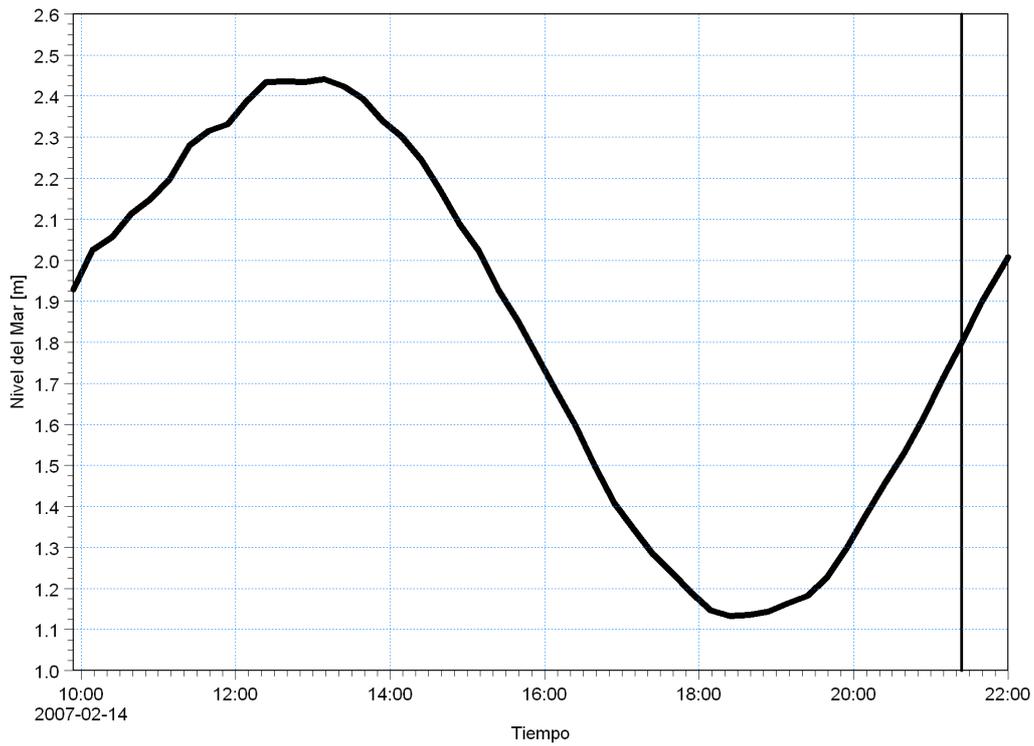
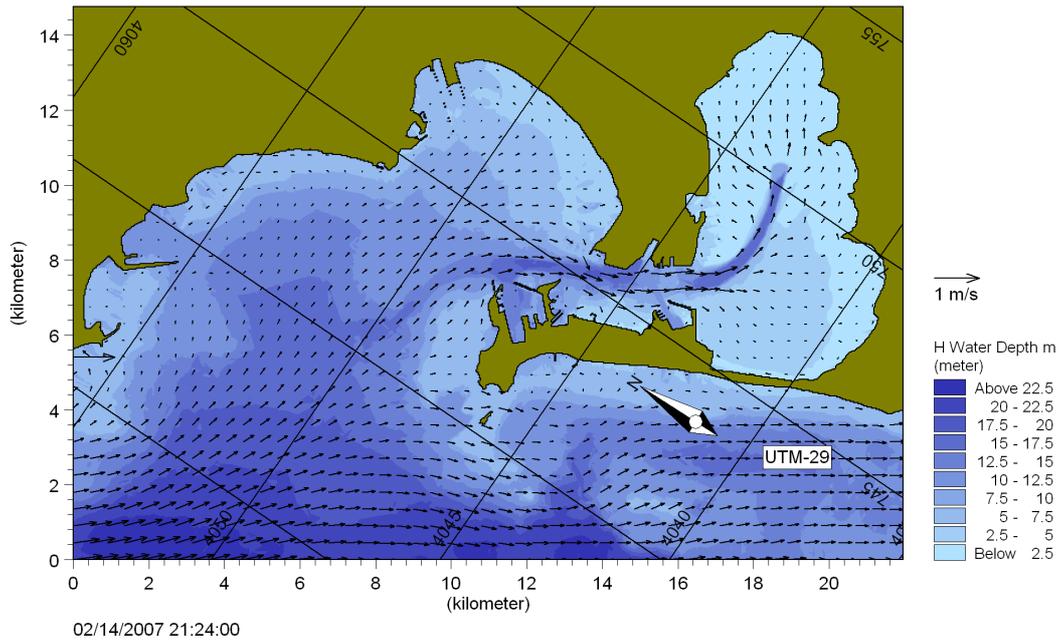


Figura 12: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 21:25 del 14-02-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.



2.1.2. Condiciones de Trabajo Extremas

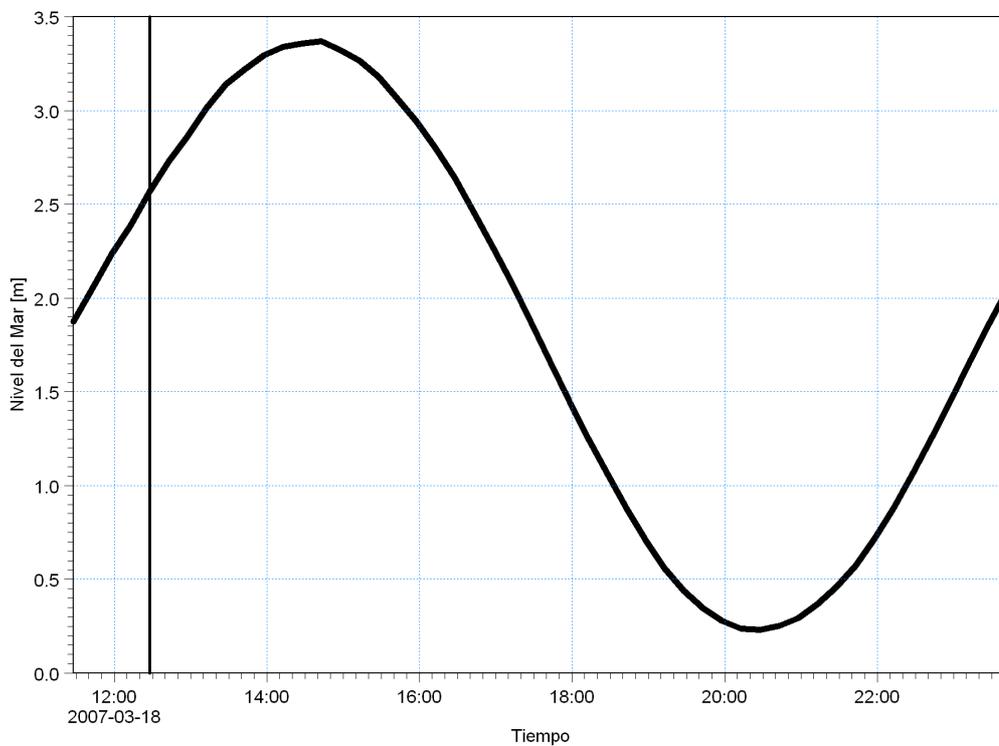
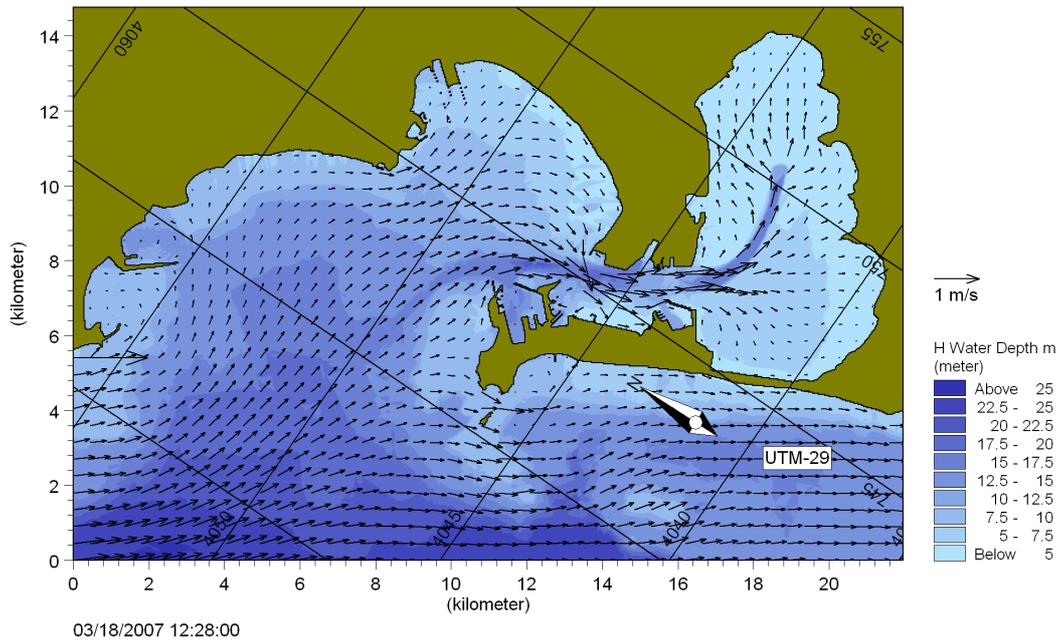


Figura 13: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 12:30 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.

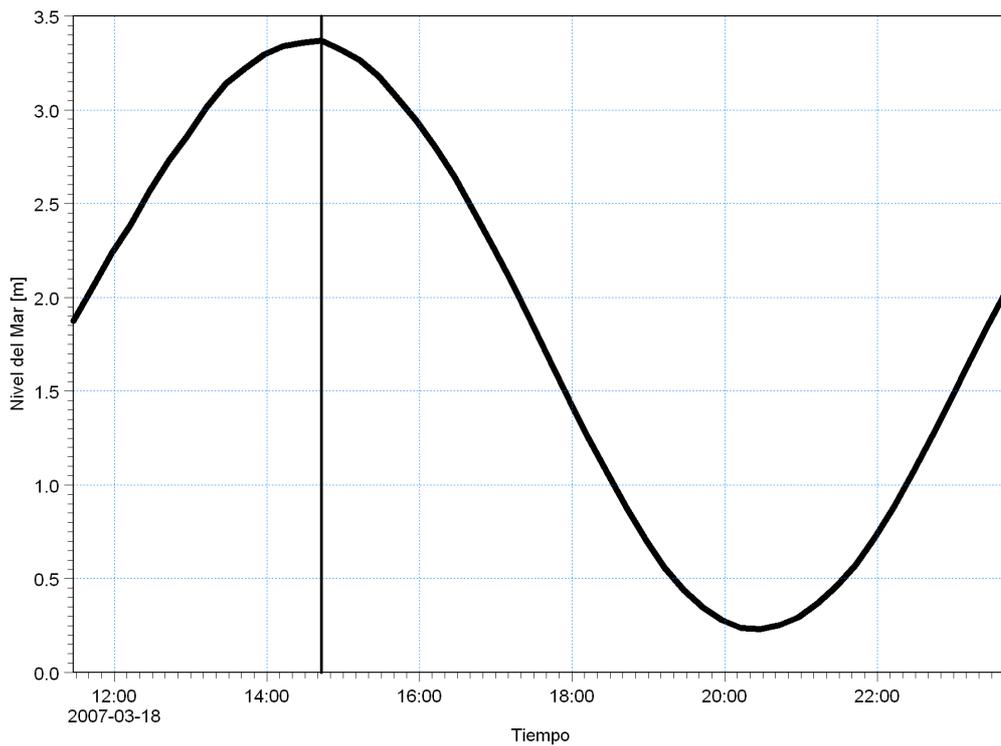
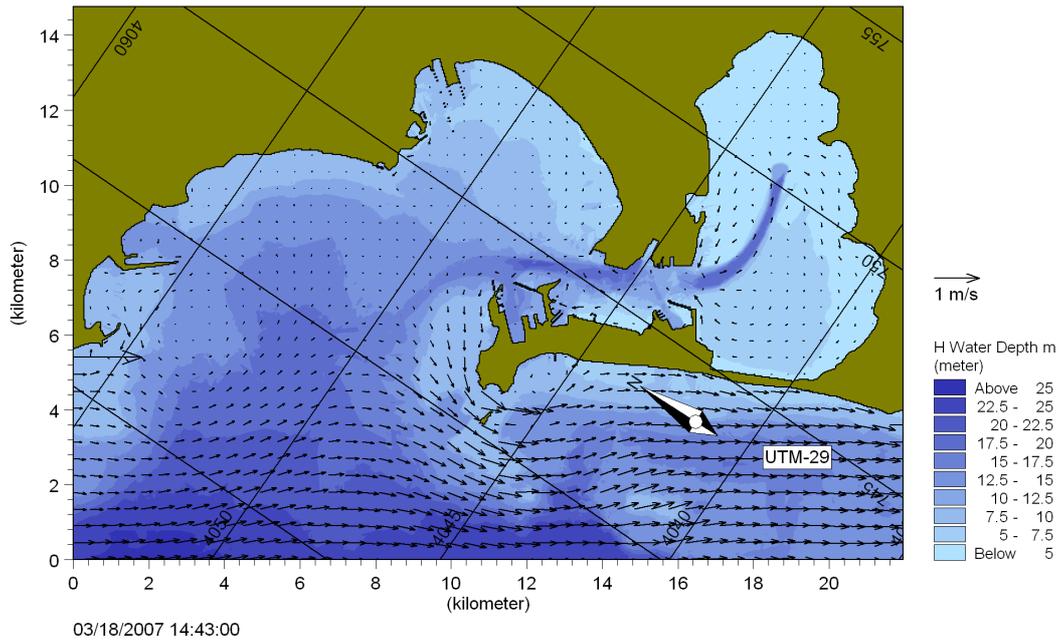


Figura 14: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en pleamar, a las 14:40 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.

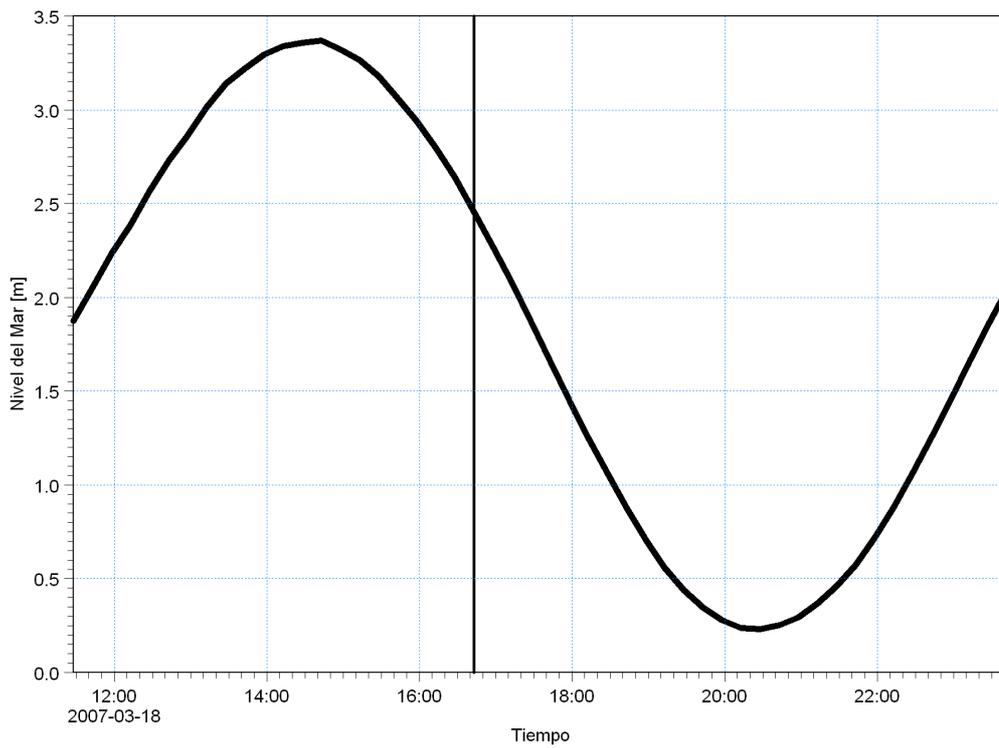
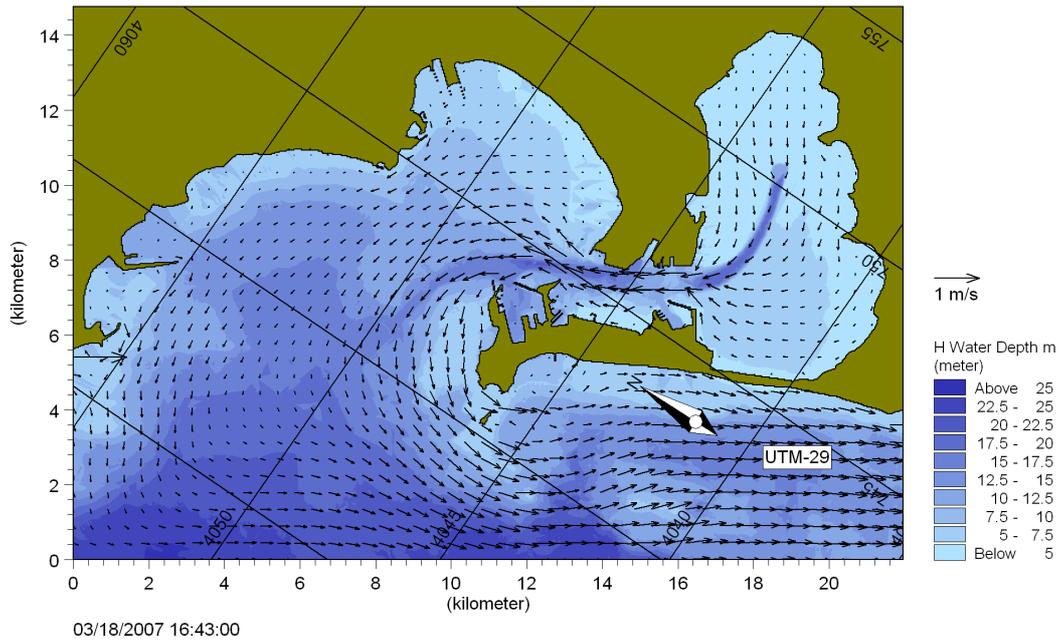


Figura 15: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 16:40 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.

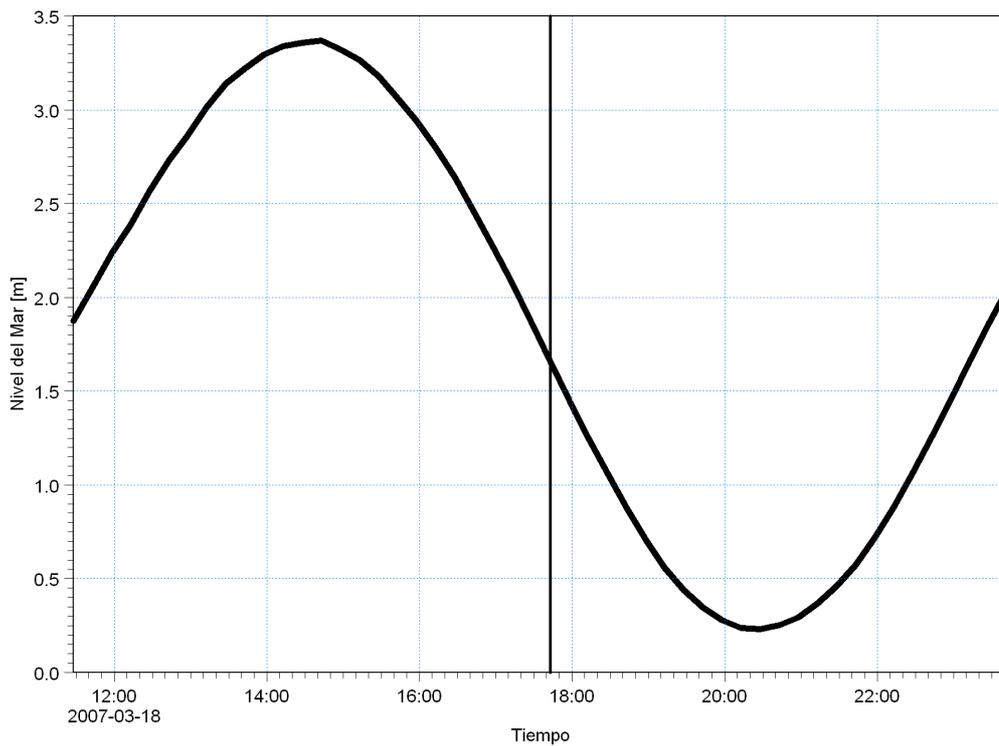
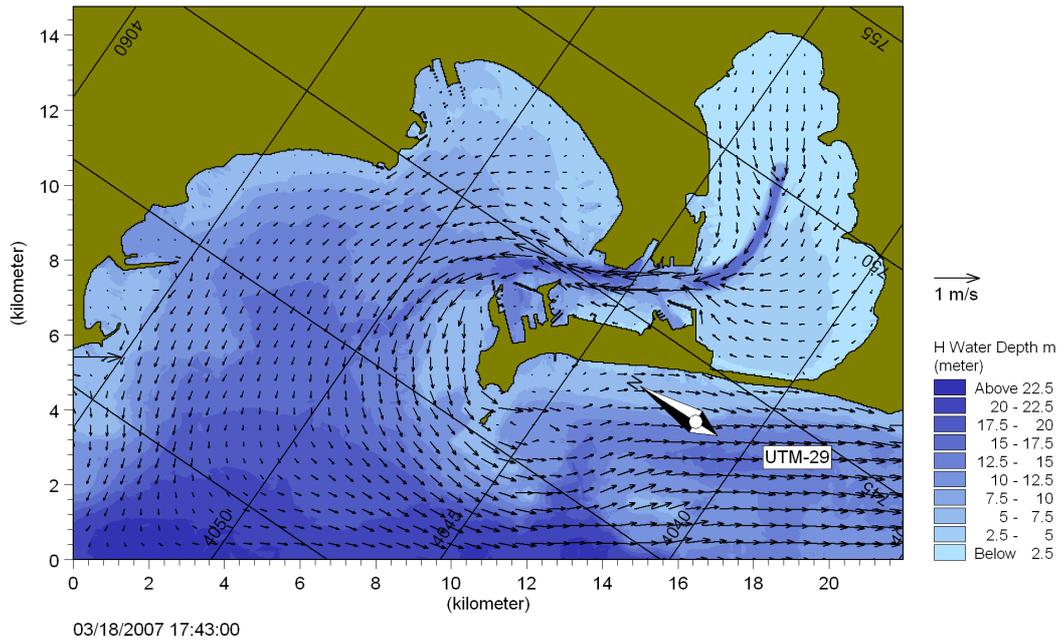


Figura 16: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 17:45 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.

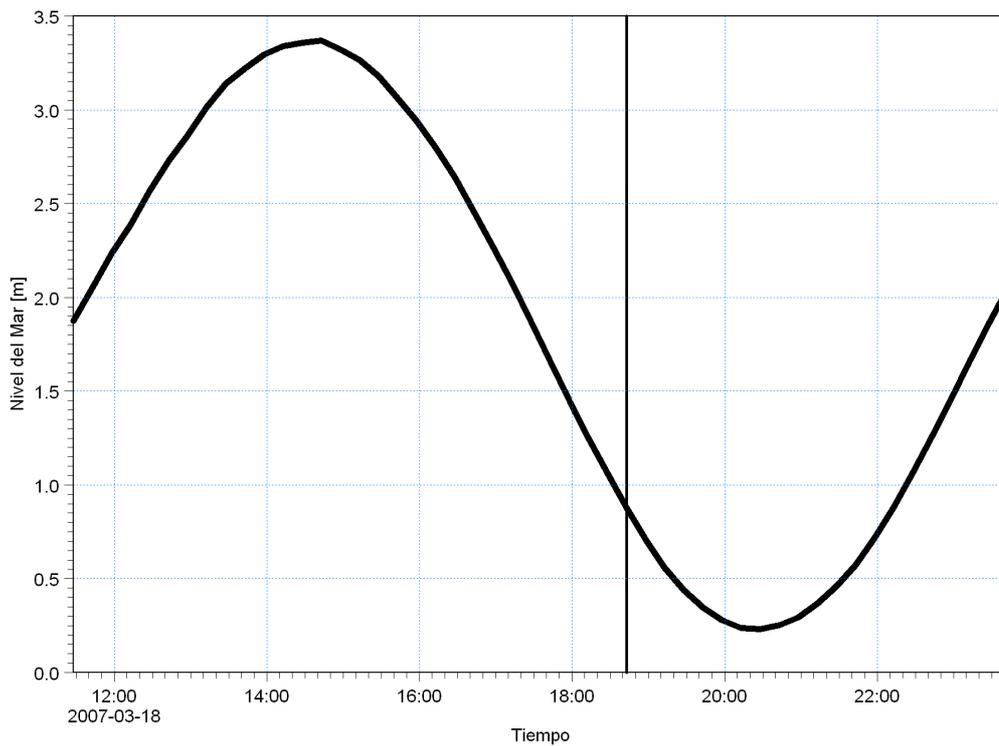
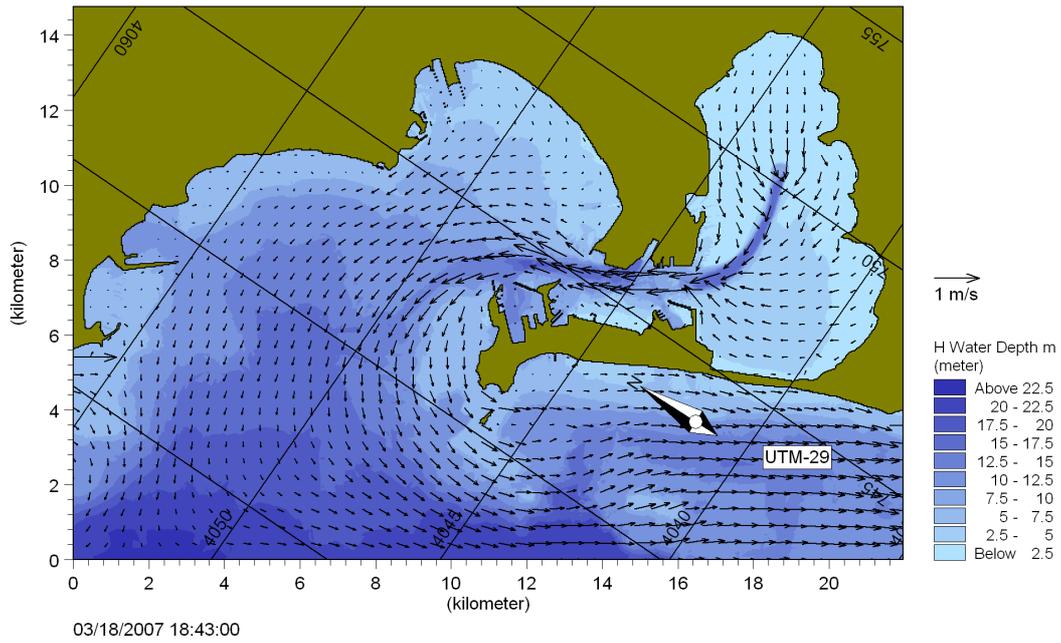


Figura 17: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 18:40 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.

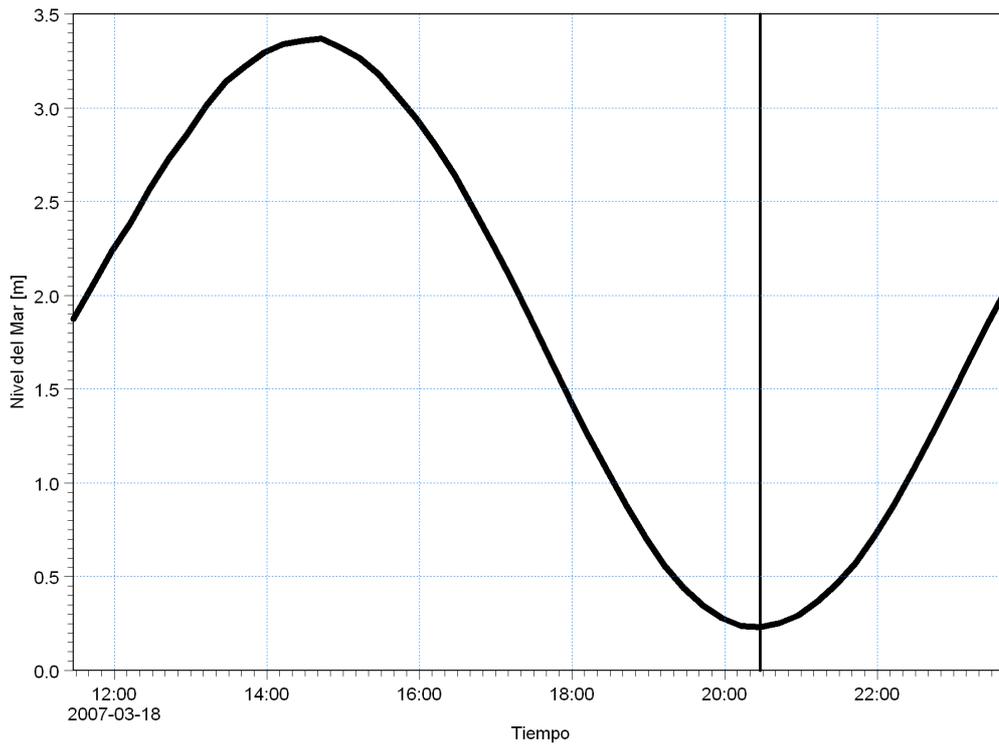
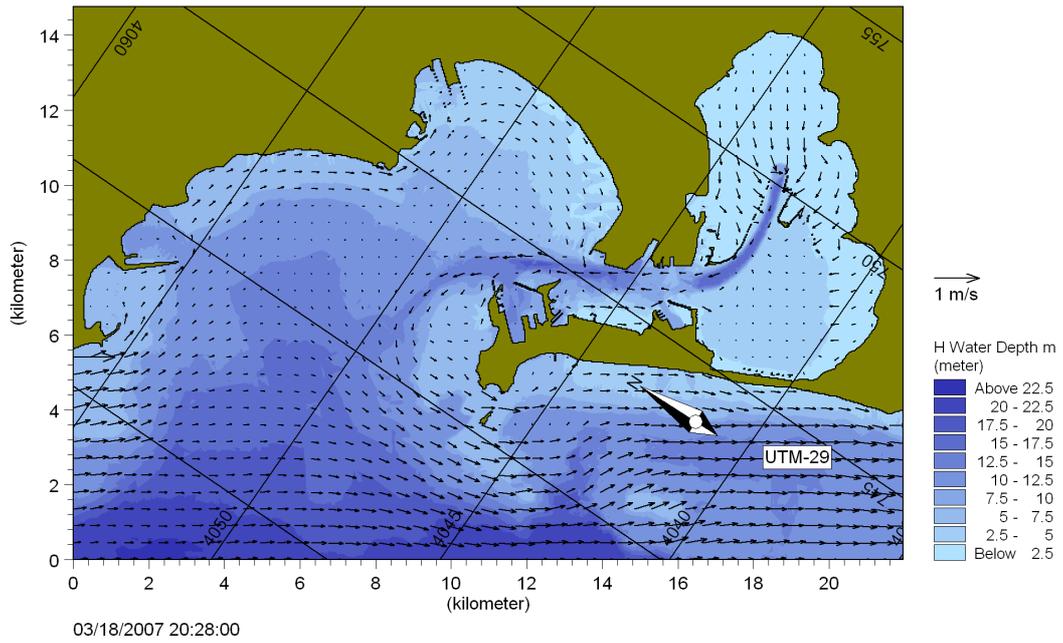


Figura 18: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en bajamar, a las 20:30 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.

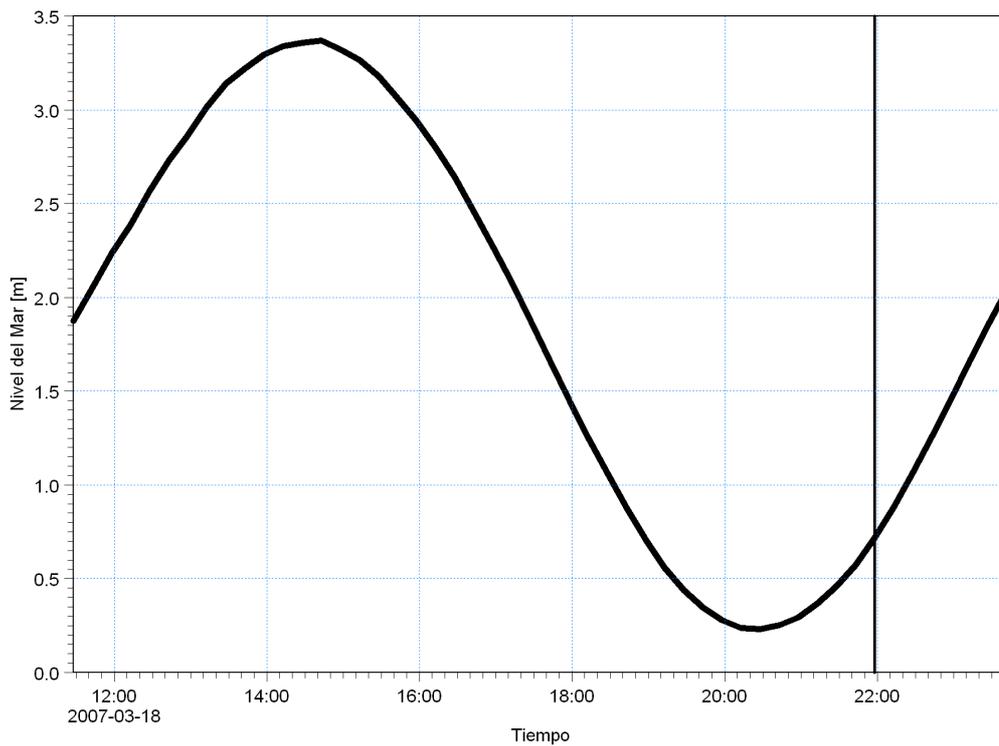
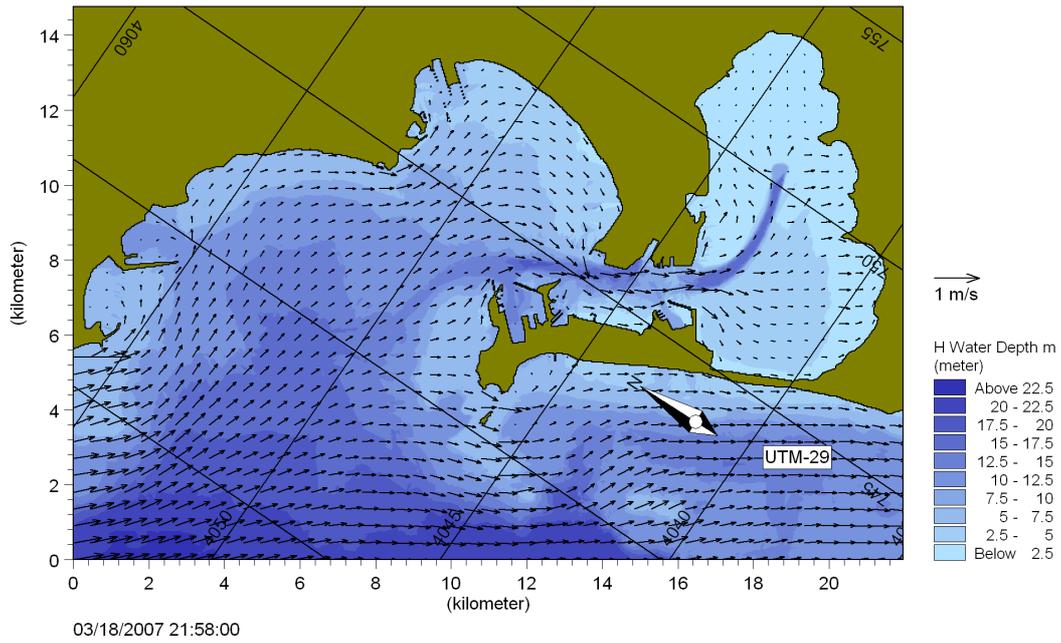


Figura 19: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 22:00 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.

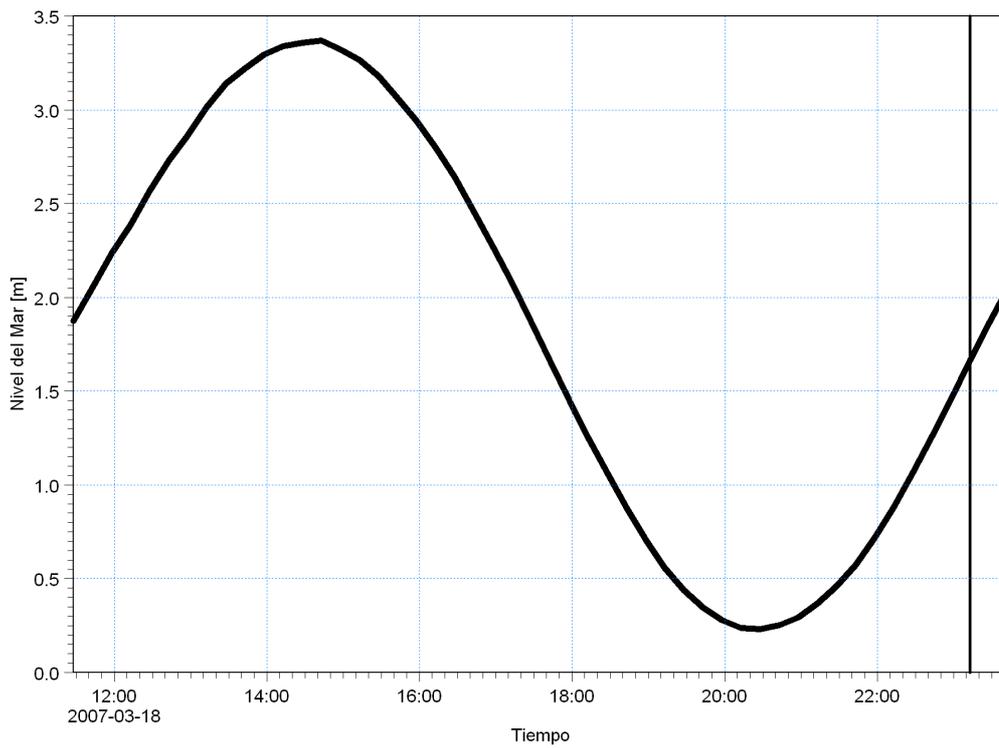
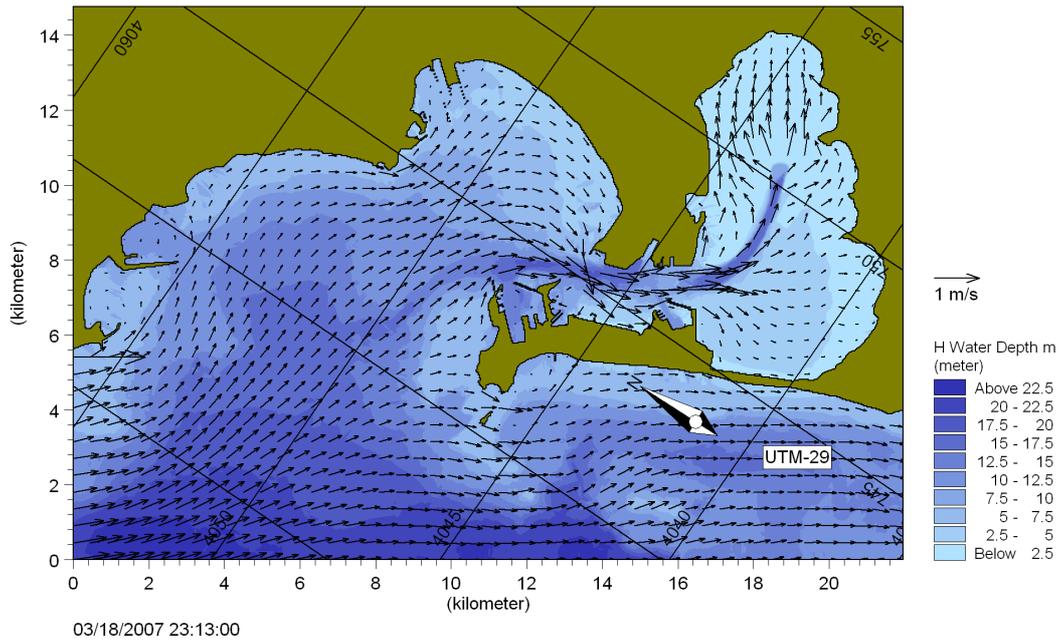


Figura 20: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 23:10 del 18-03-2007. Situación Actual, Condiciones de Trabajo Extremas.



2.2. Alternativa de proyecto

2.2.1. Condiciones de Trabajo Operativas Normales

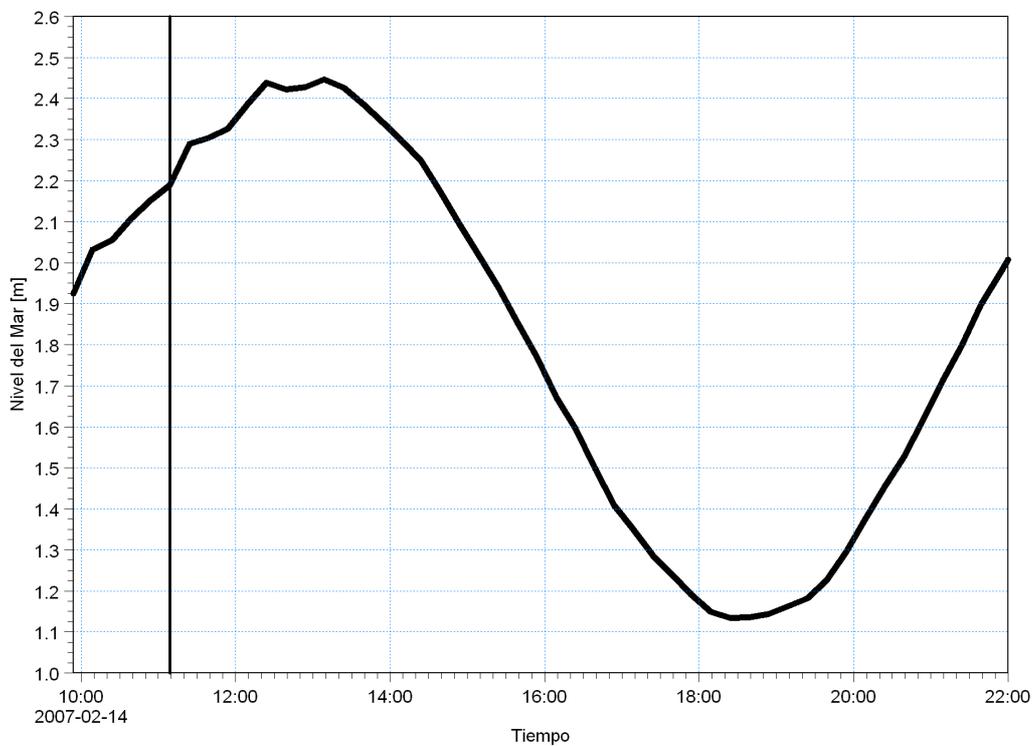
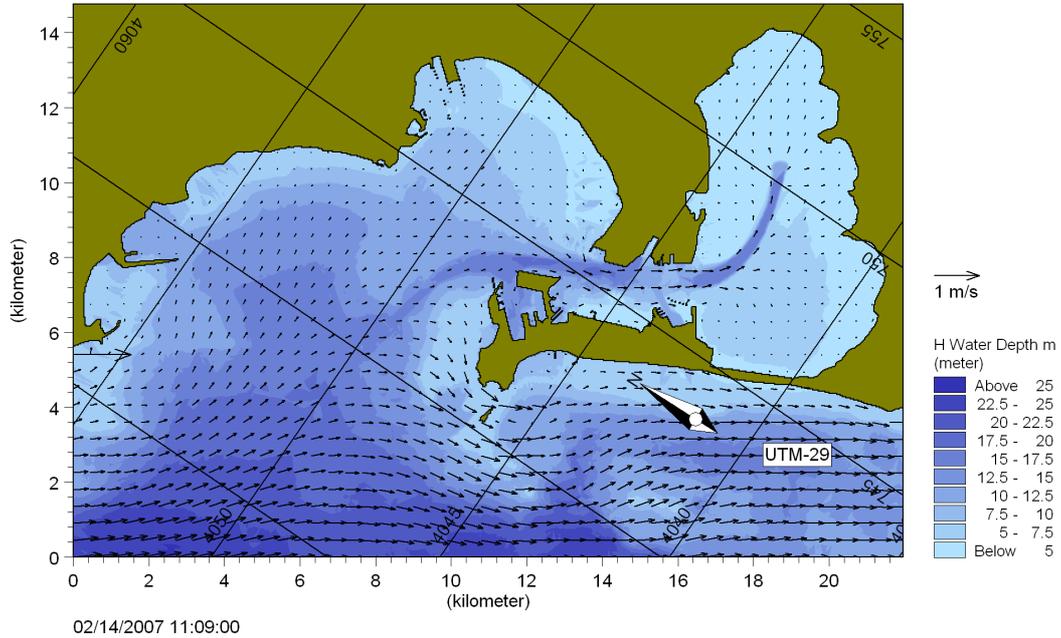


Figura 21: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 11:10 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

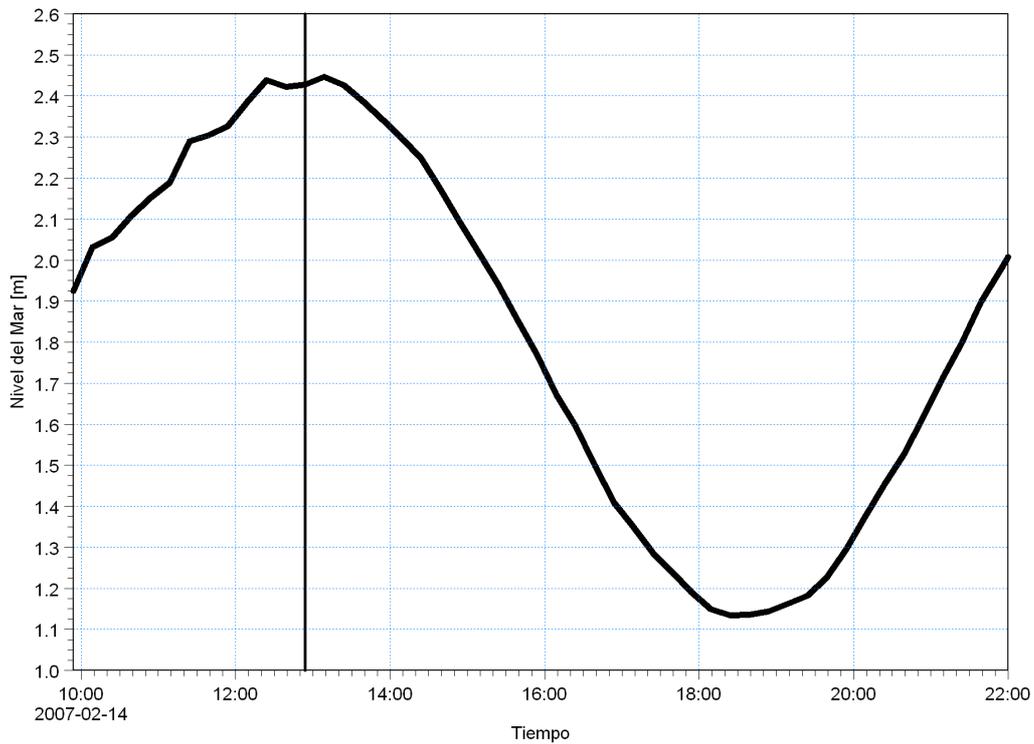
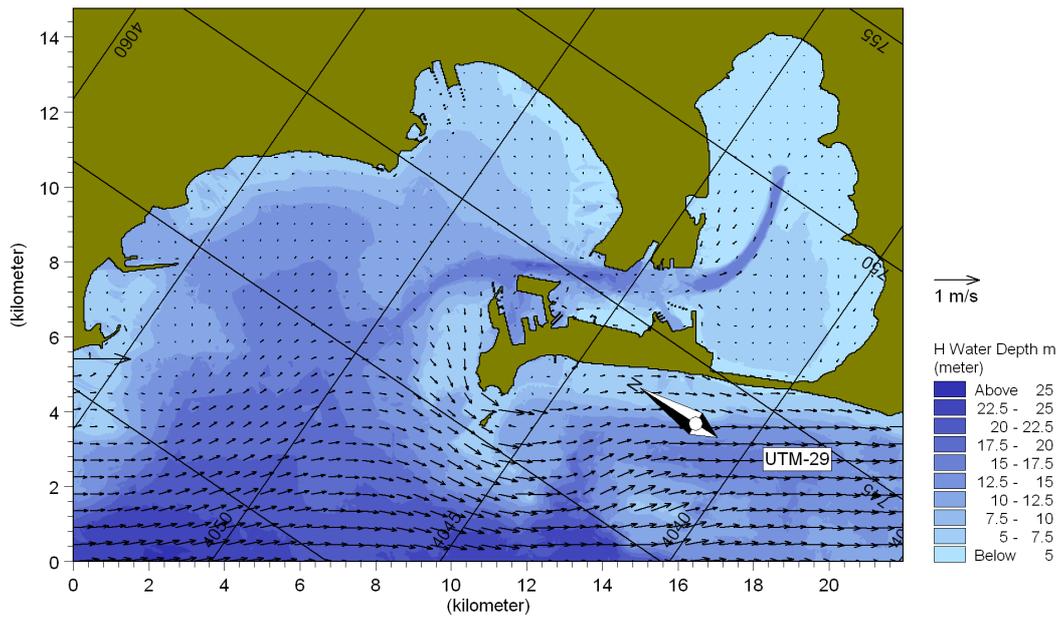


Figura 22: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en pleamar, a las 12:50 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

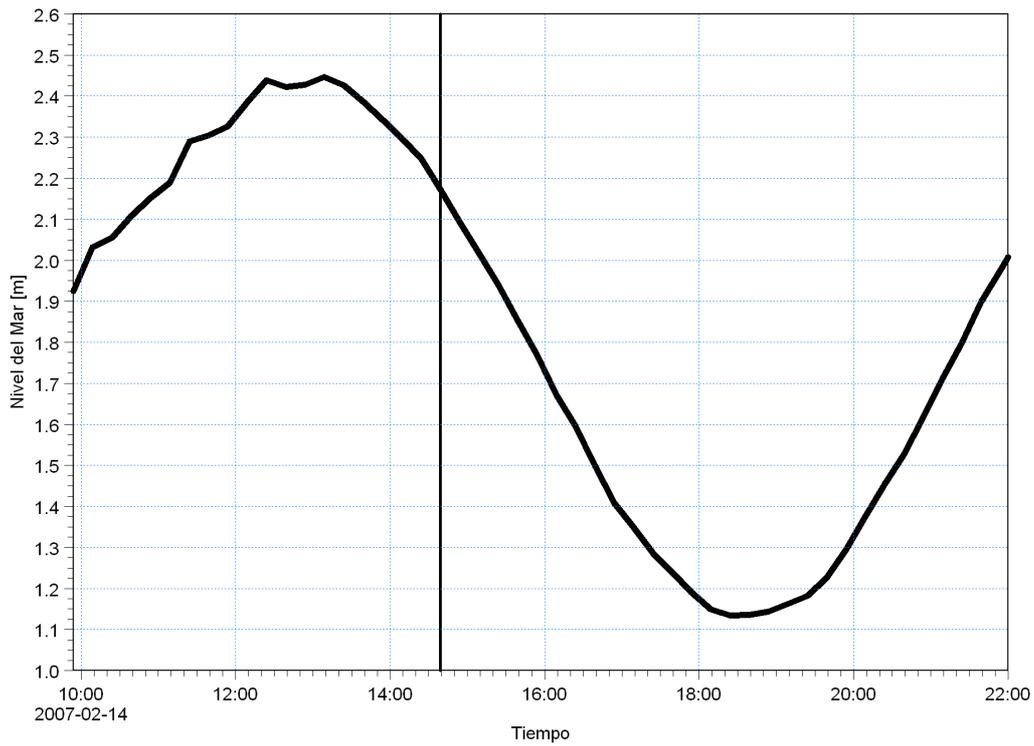
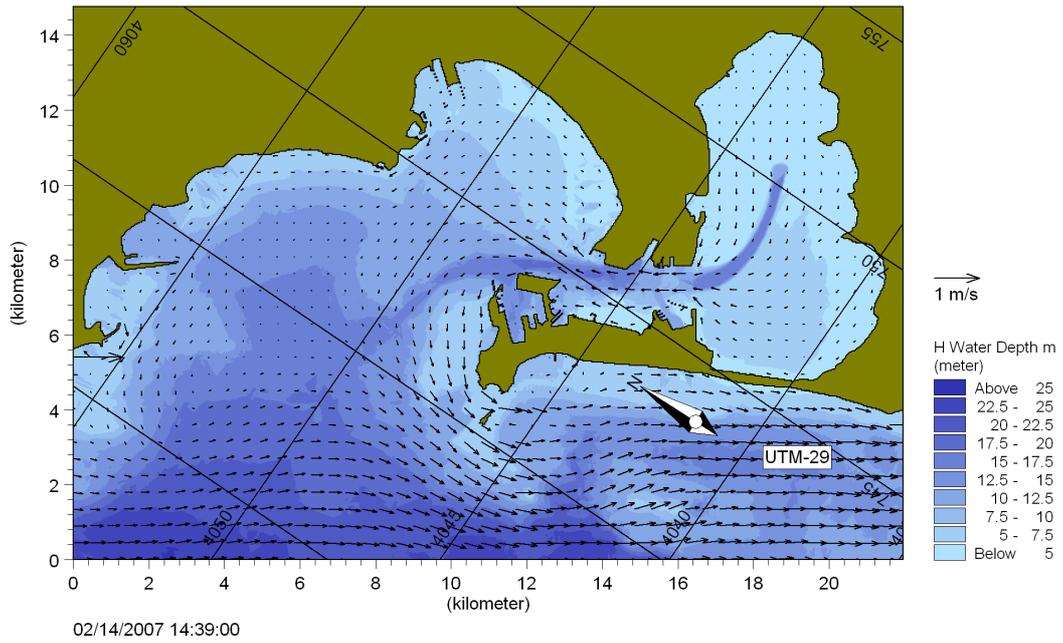


Figura 23: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 14:40 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

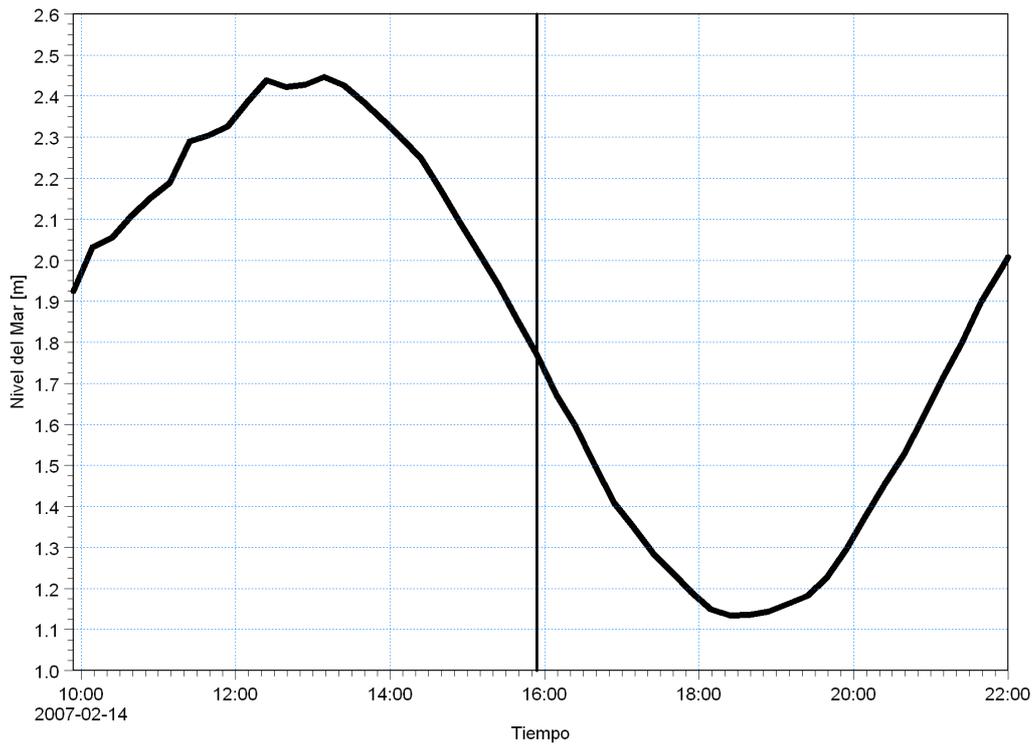
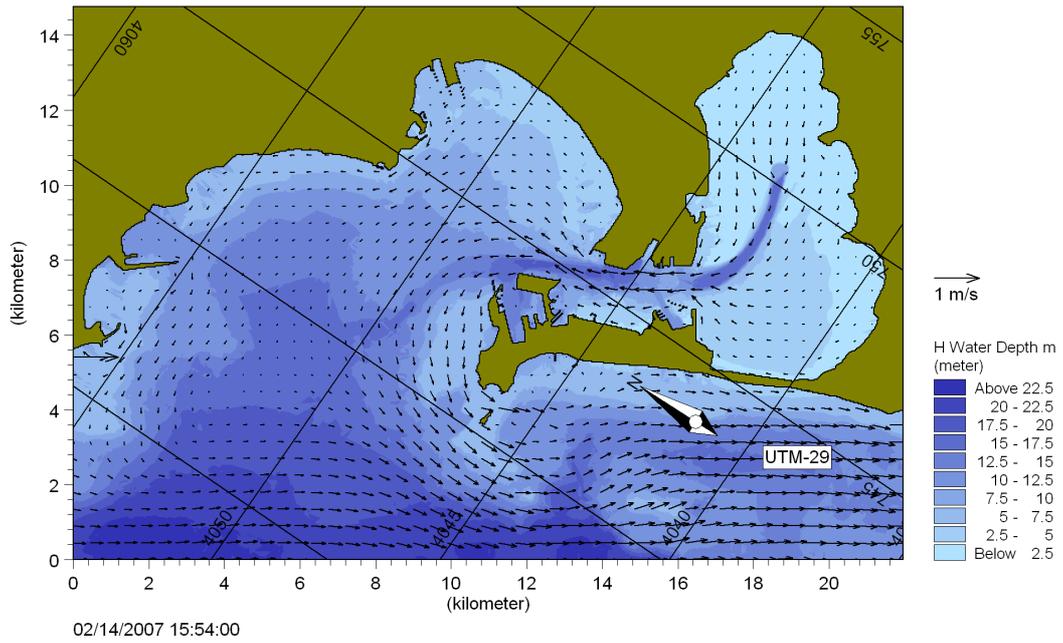


Figura 24: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 15:55 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

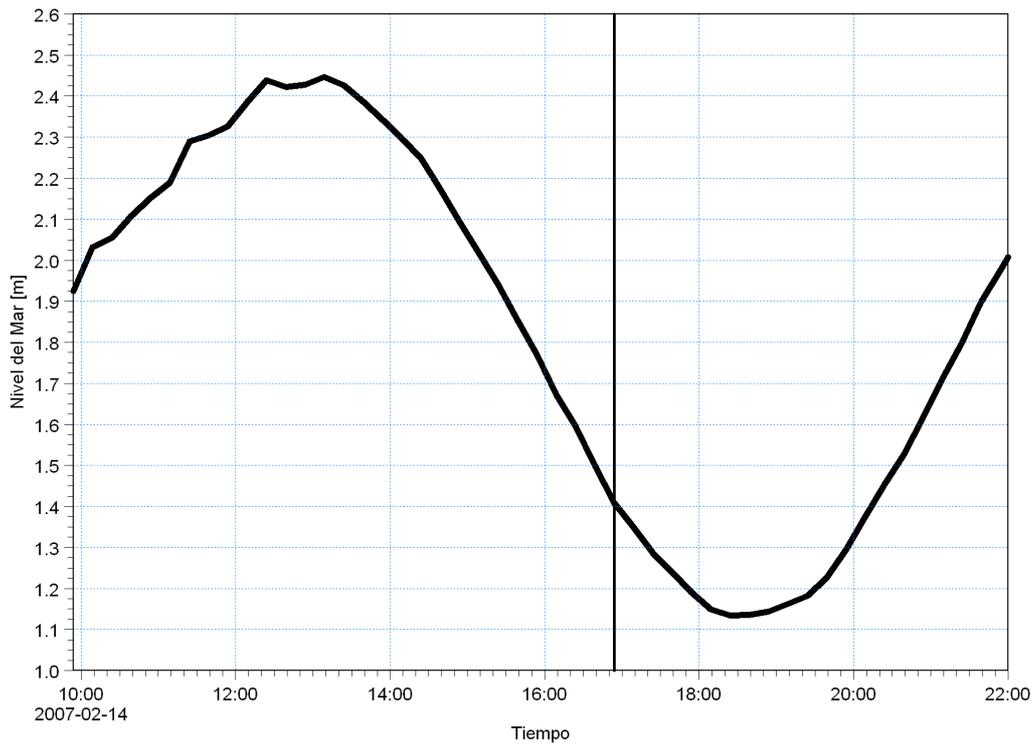
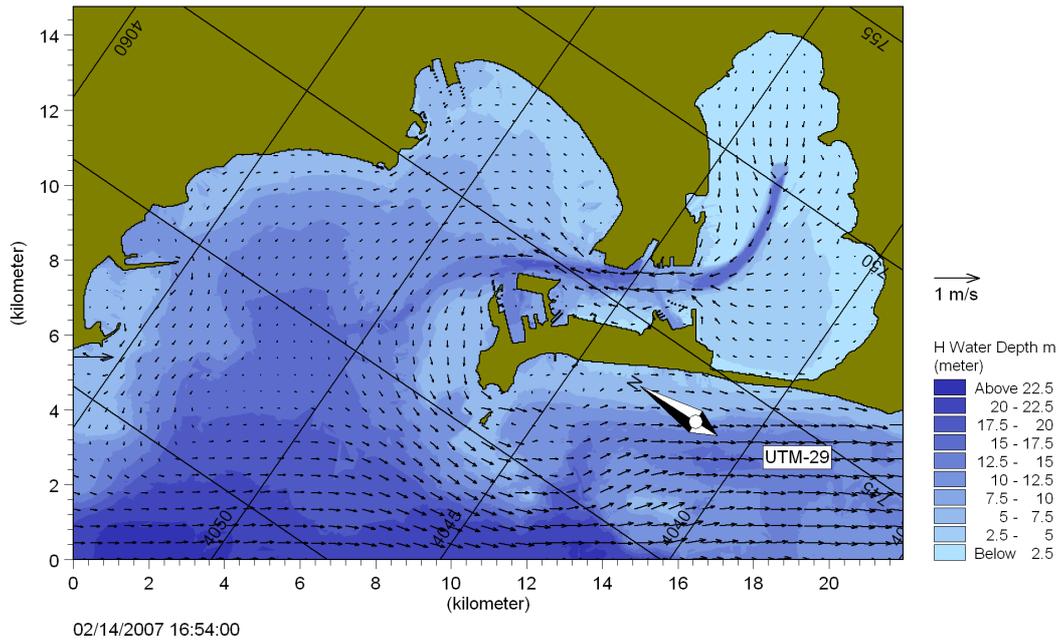


Figura 25: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 16:55 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

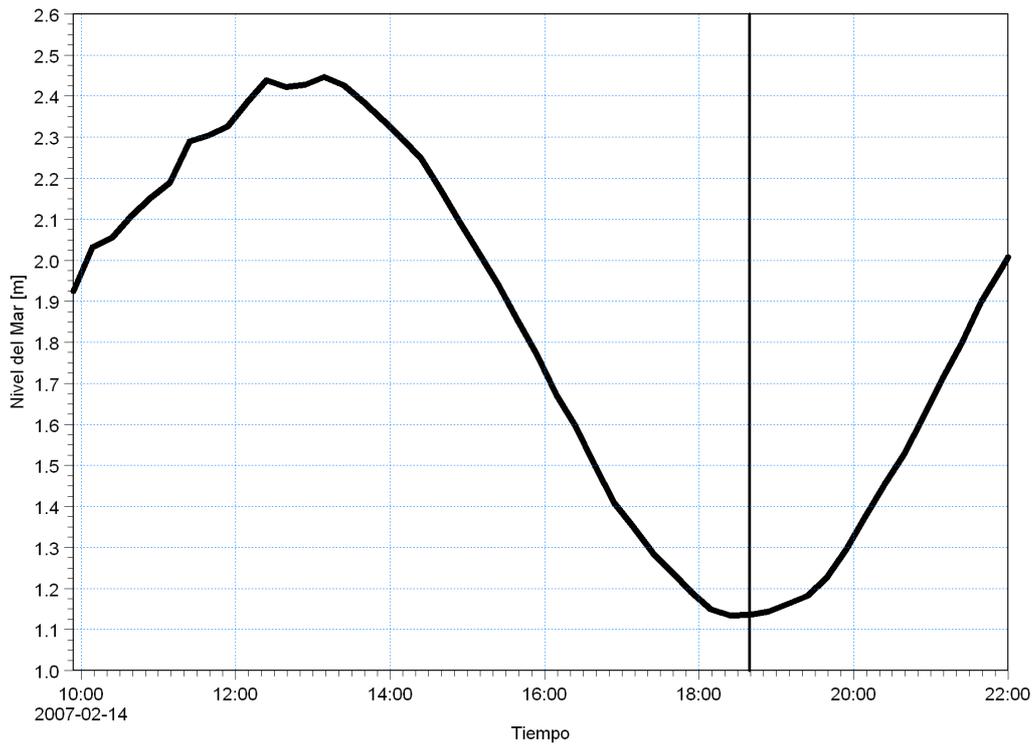
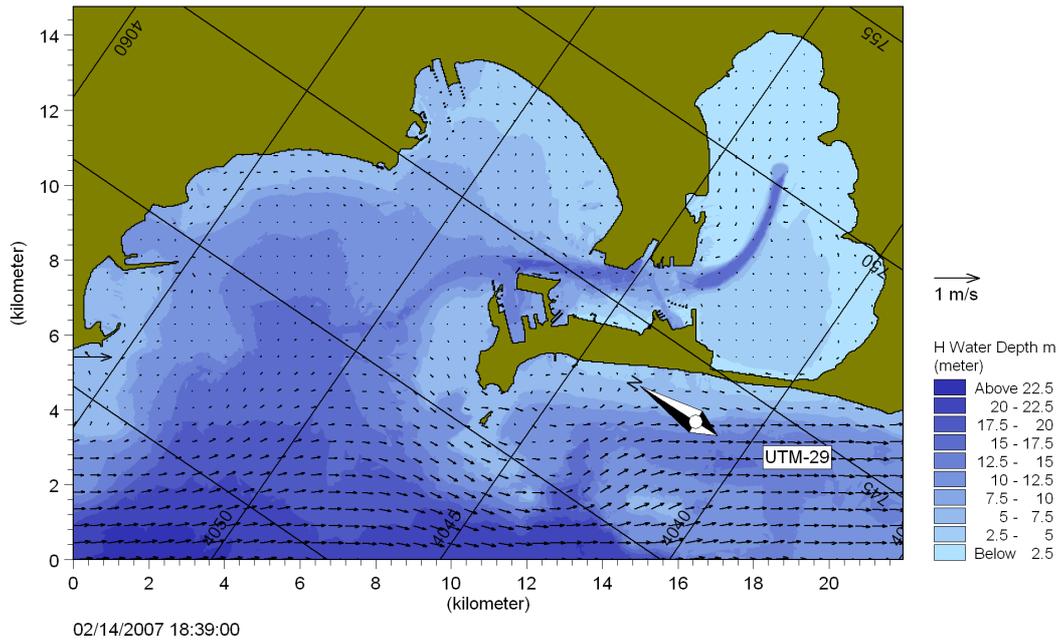


Figura 26: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en bajamar, a las 18:40 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

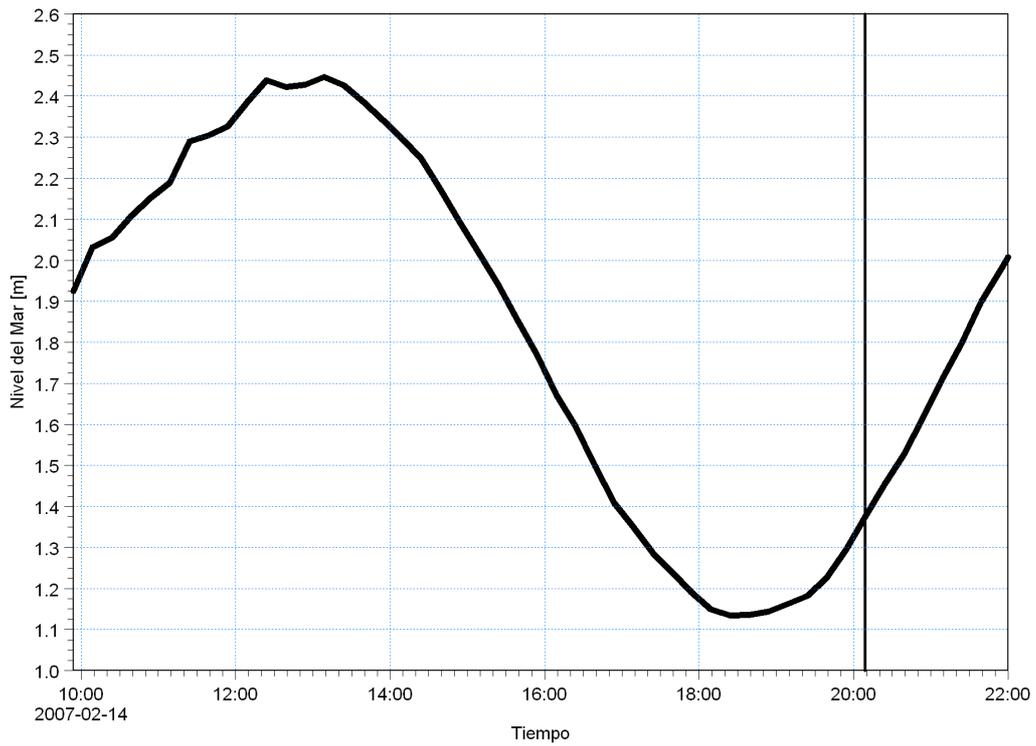
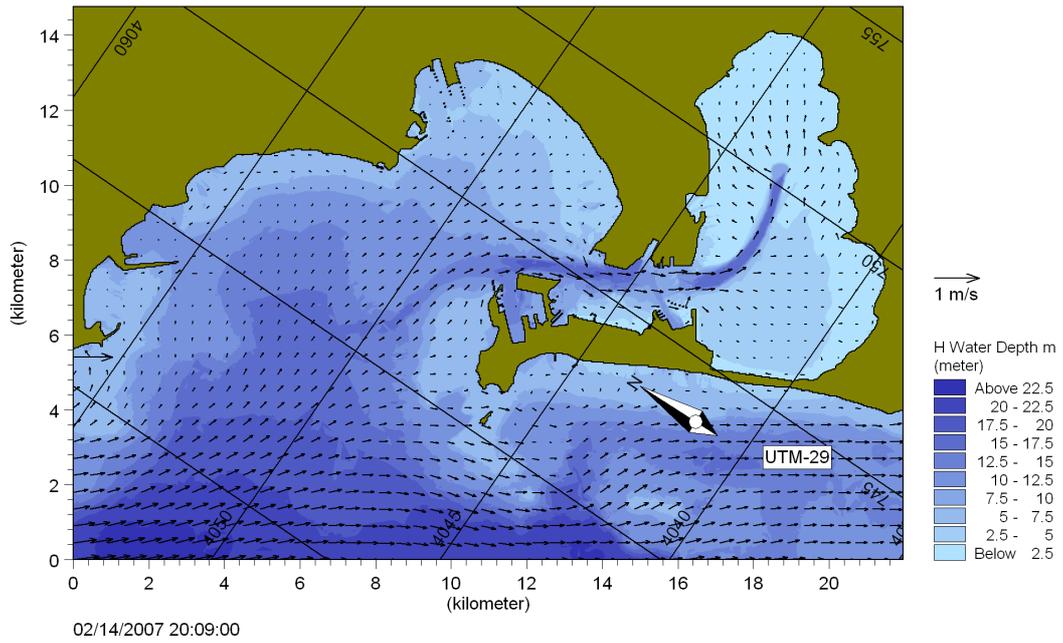


Figura 27: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 20:10 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.

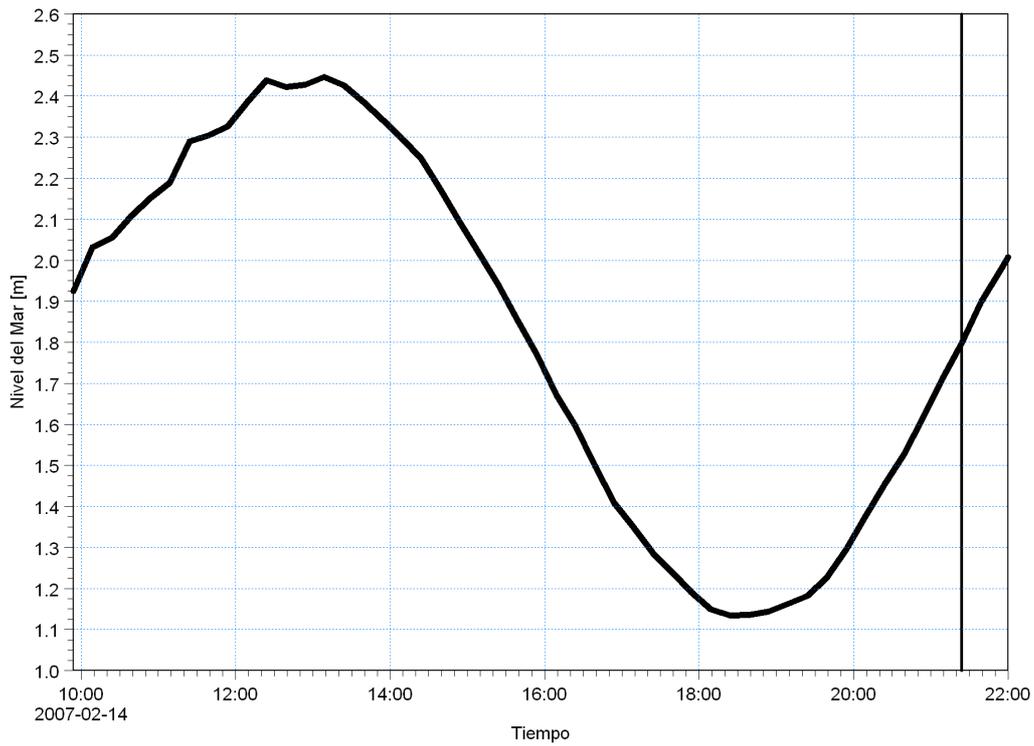
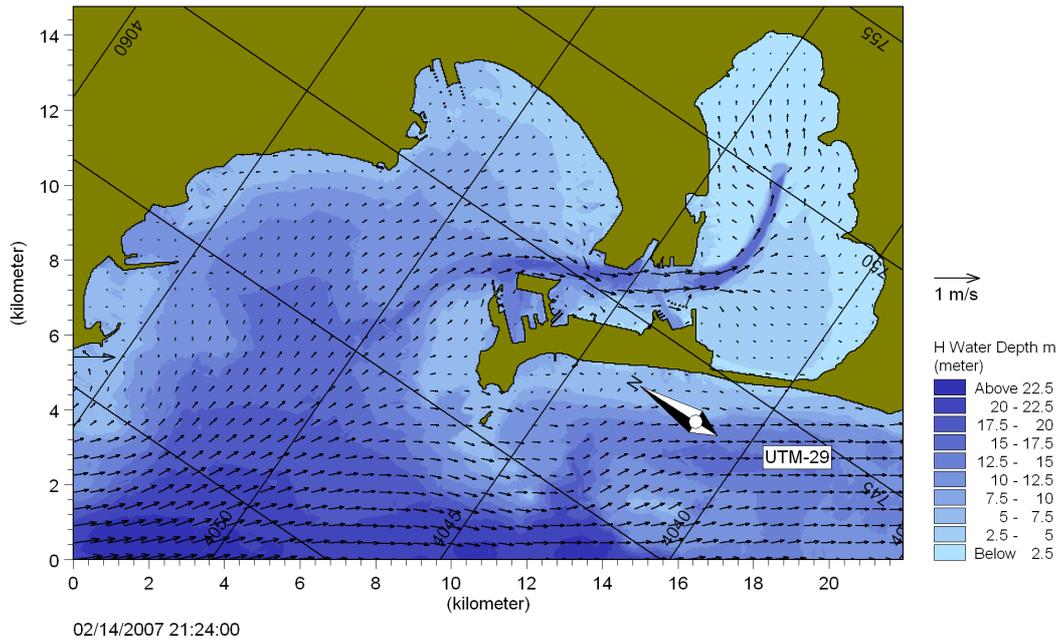


Figura 28: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 21:20 del 14-02-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Operativas Normales.



2.2.2. Condiciones de Trabajo Extremas

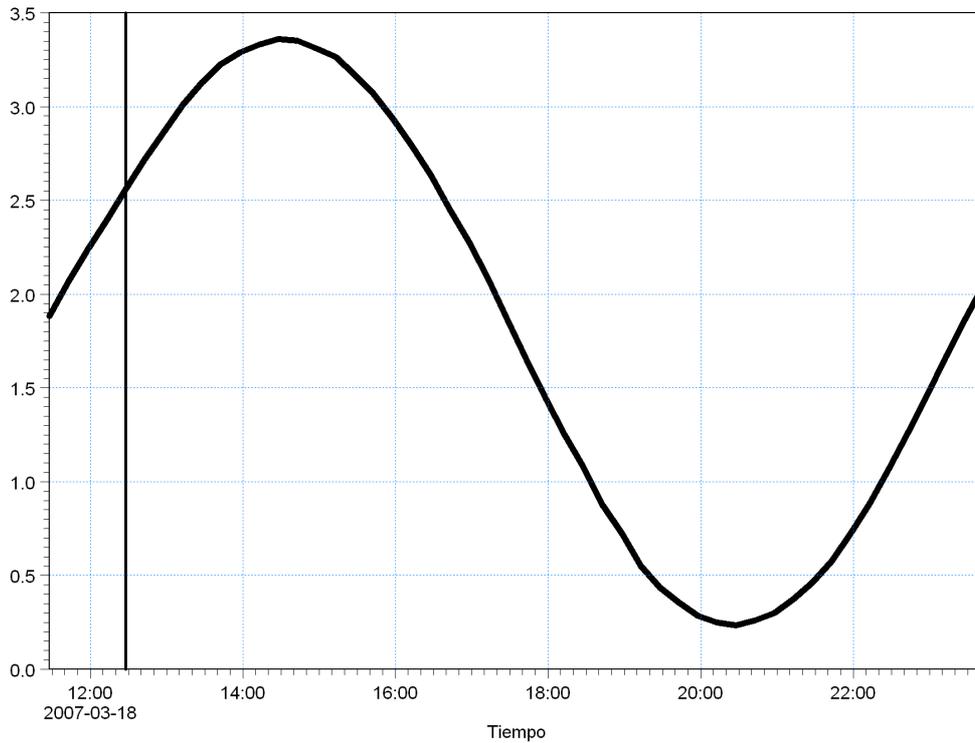
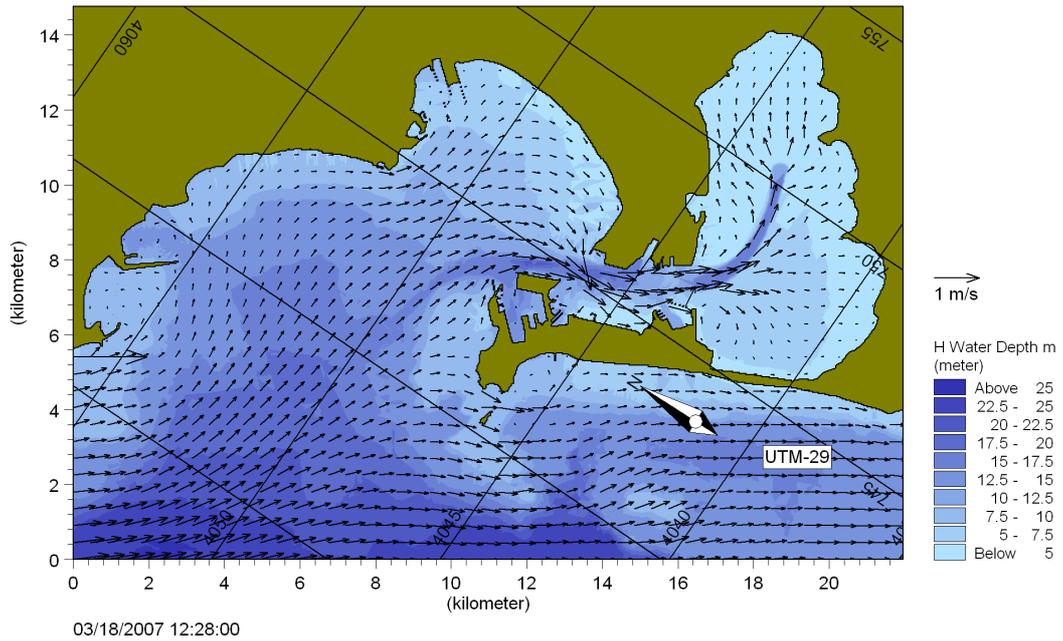


Figura 29: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 12:30 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.

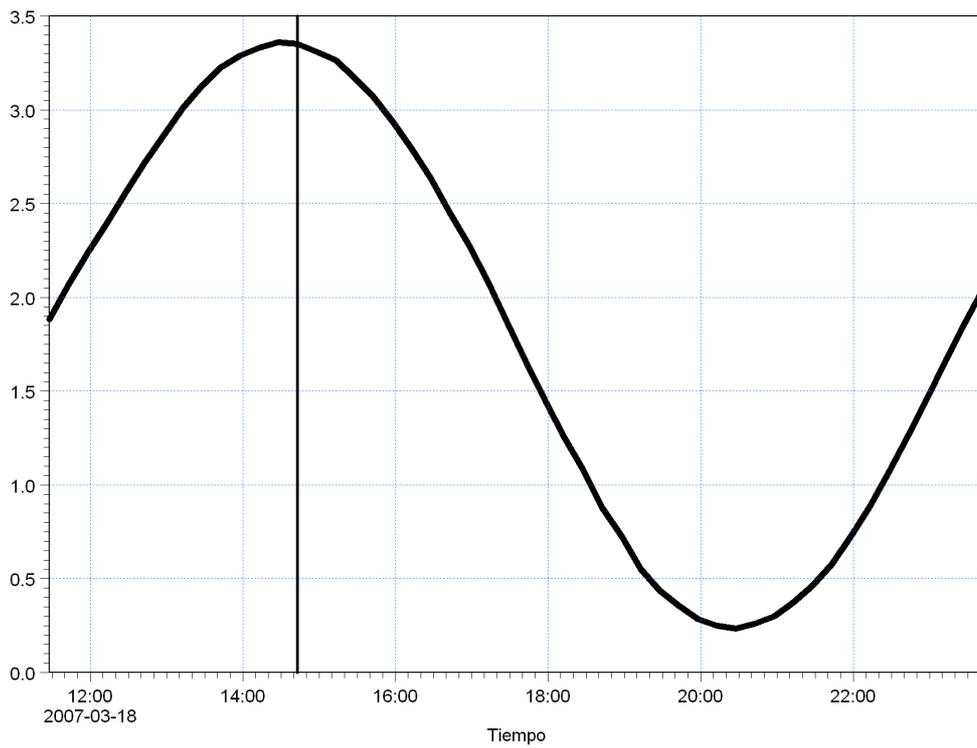
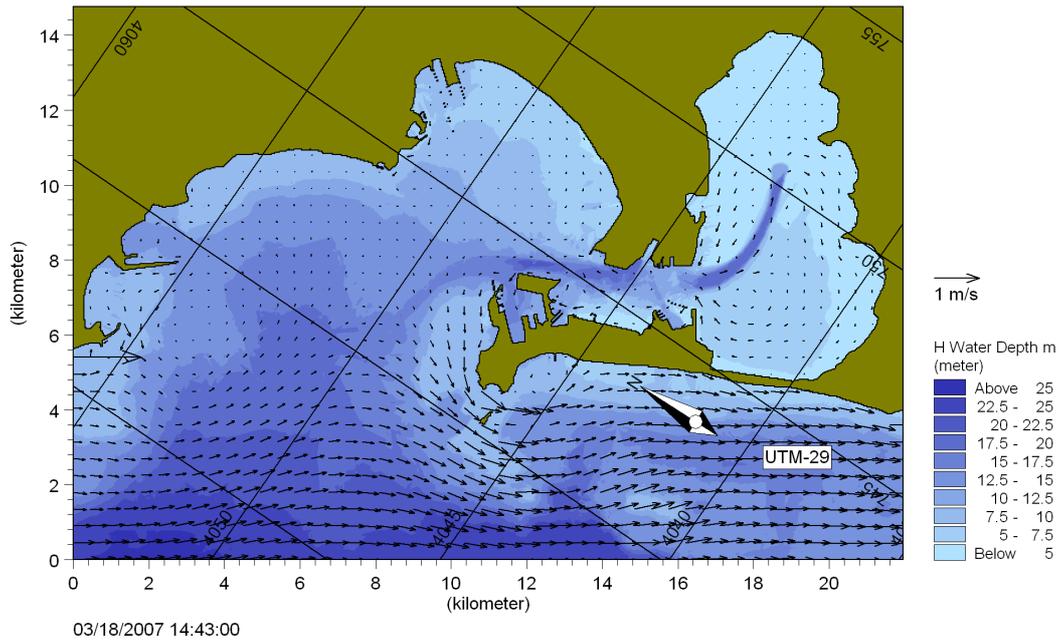


Figura 30: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en pleamar, a las 14:40 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.

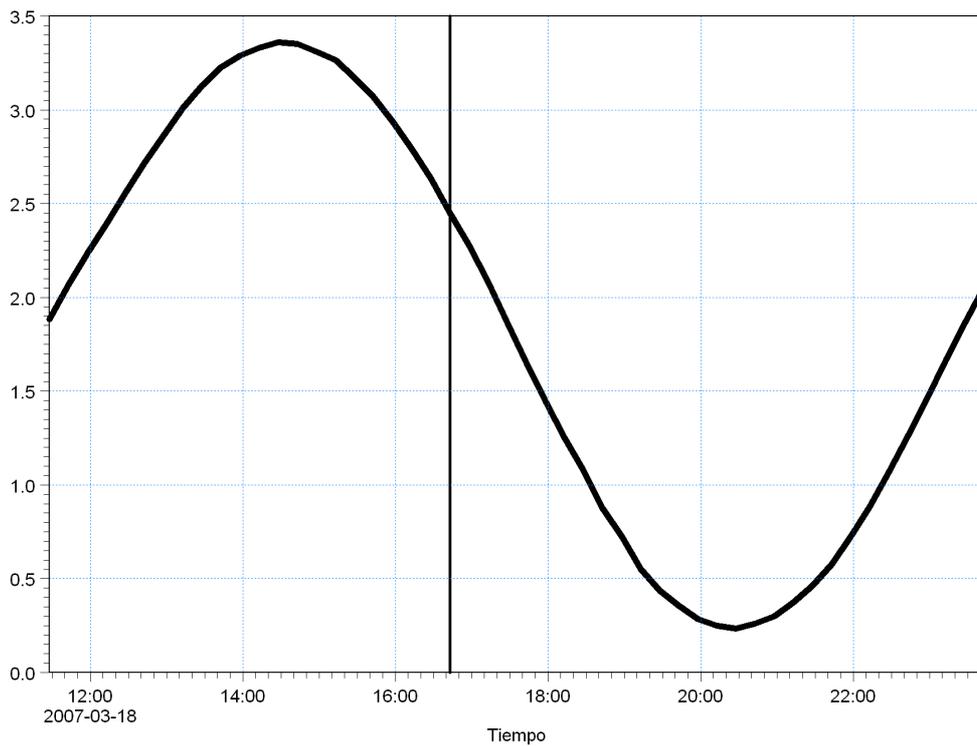
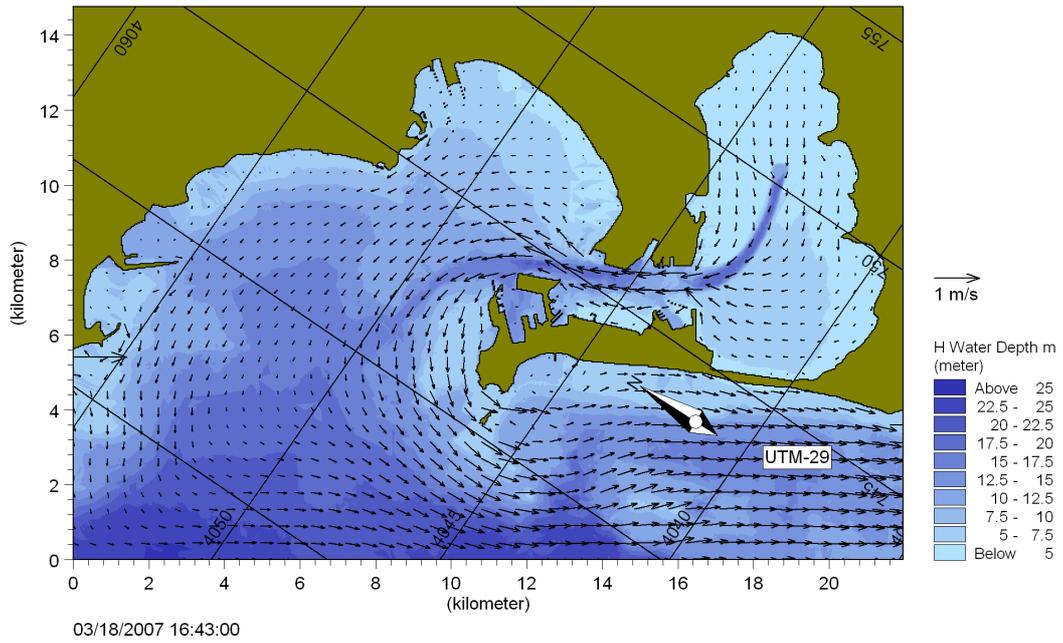


Figura 31: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 16:40 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.

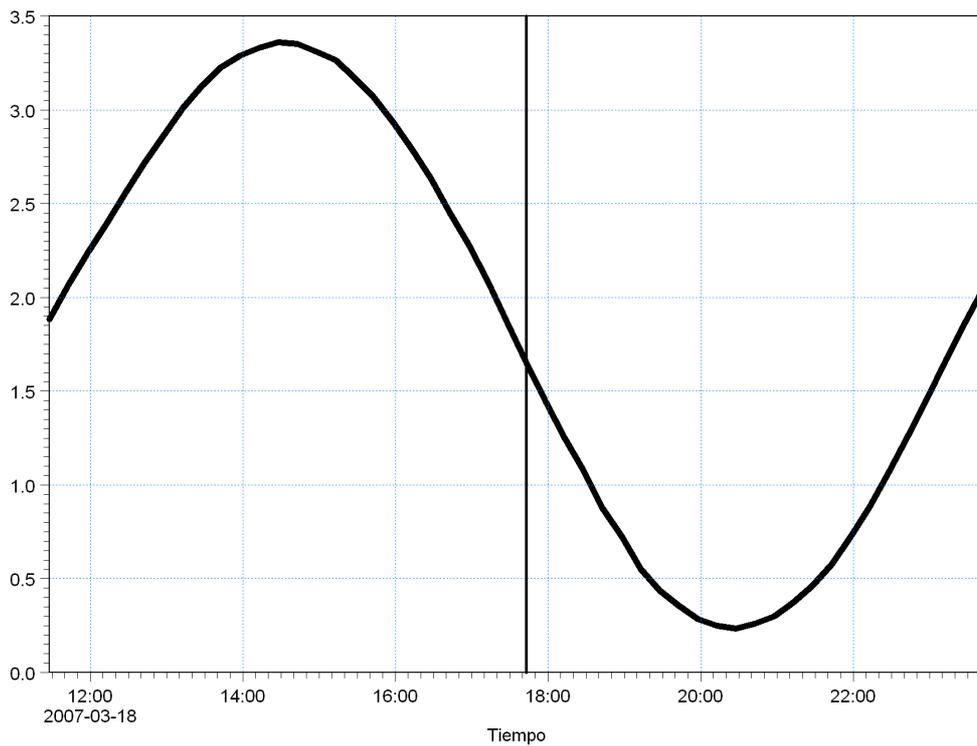
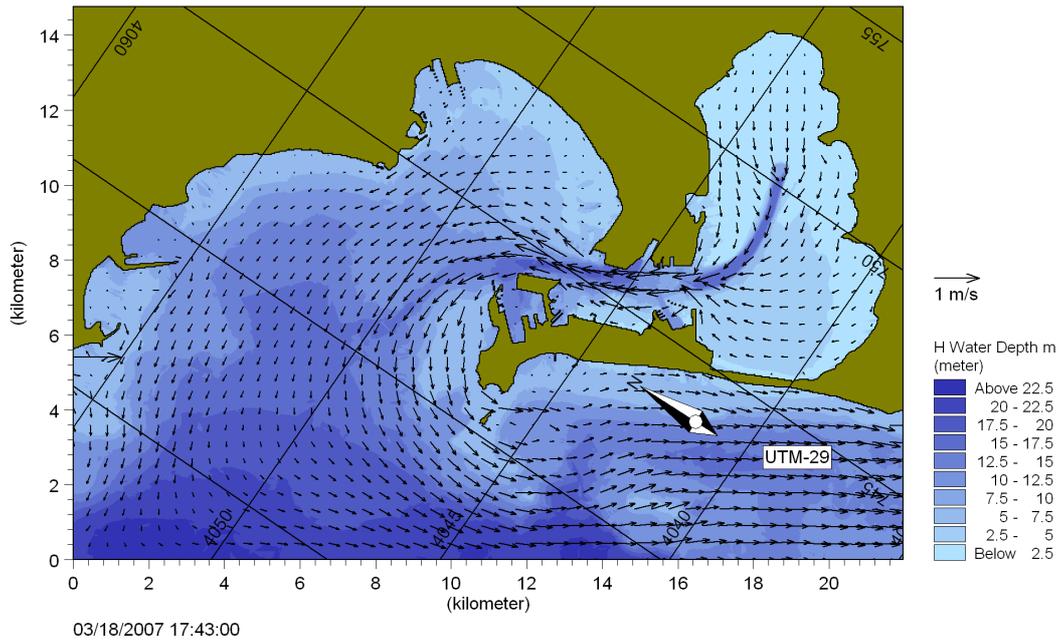


Figura 32: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 17:50 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.

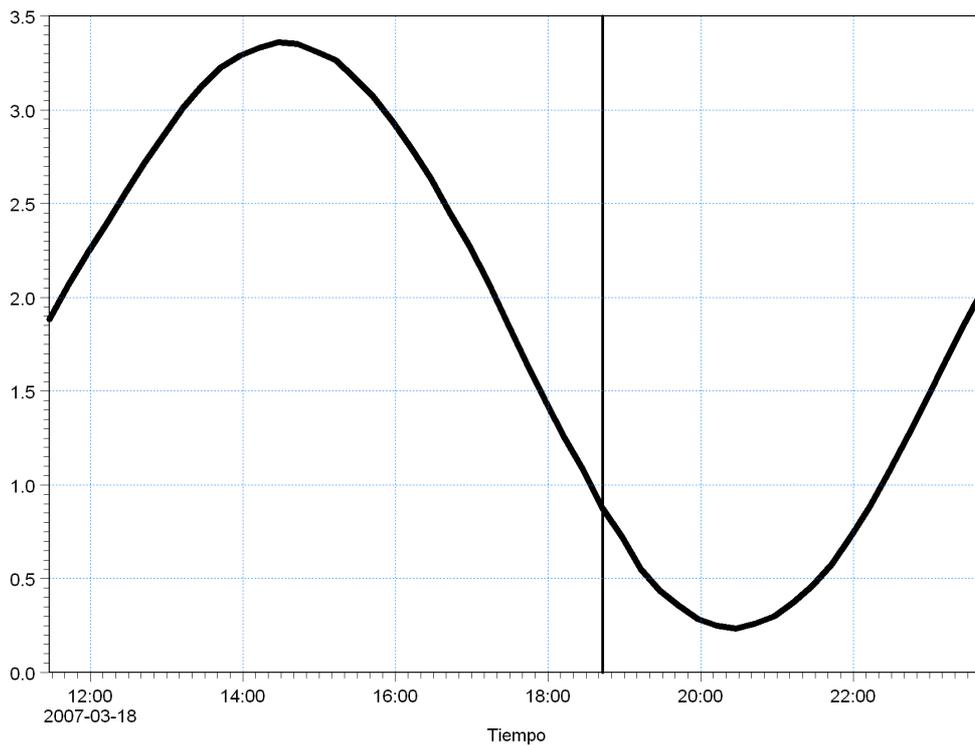
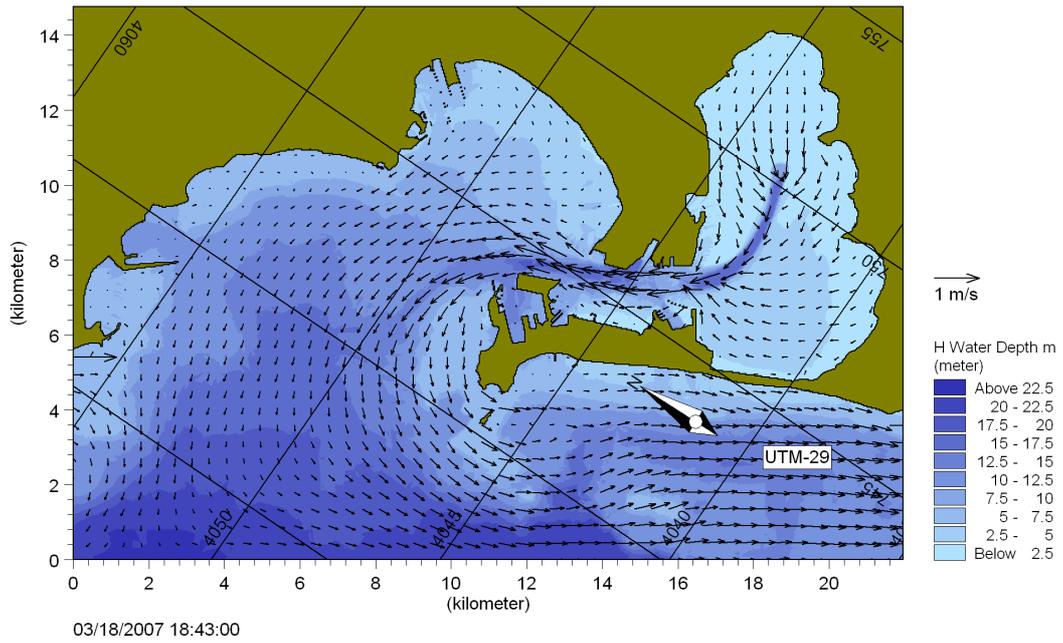


Figura 33: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en vaciante, a las 18:40 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.

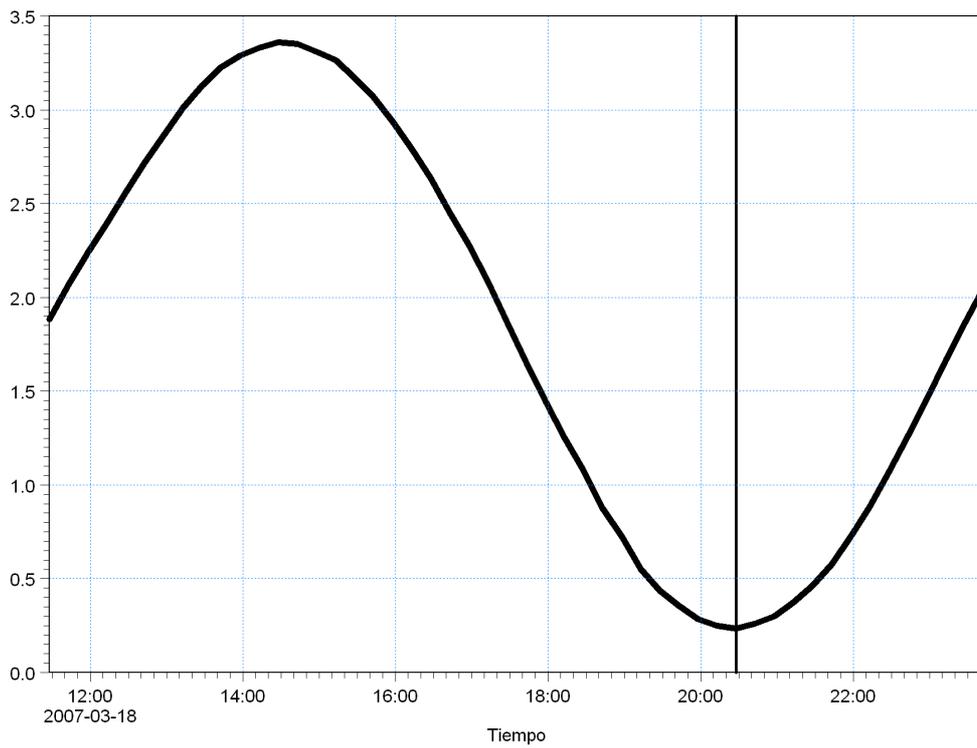
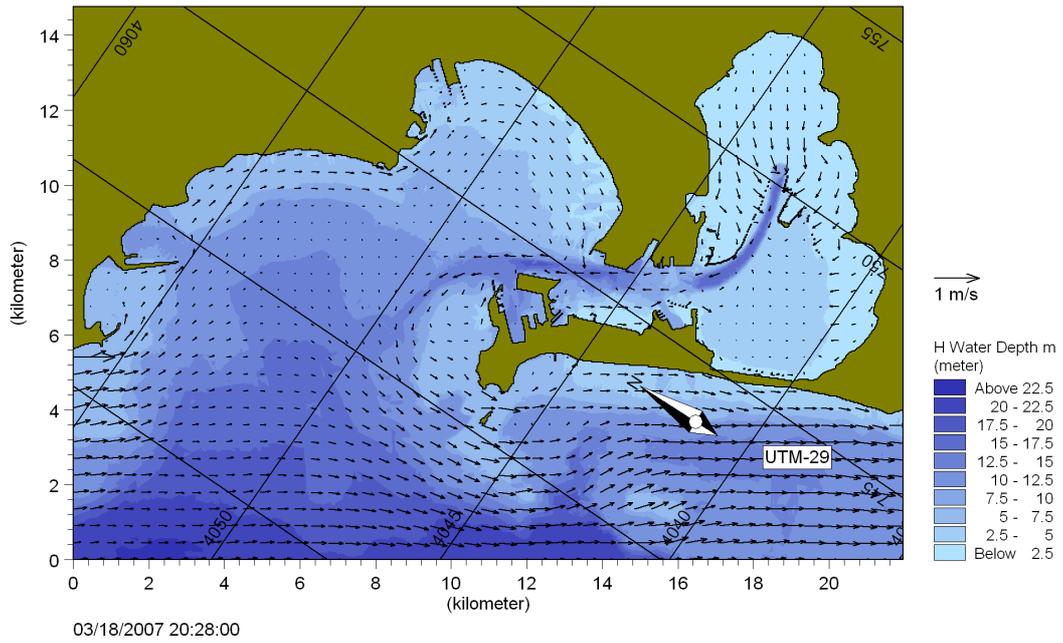


Figura 34: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en bajamar, a las 20:30 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.

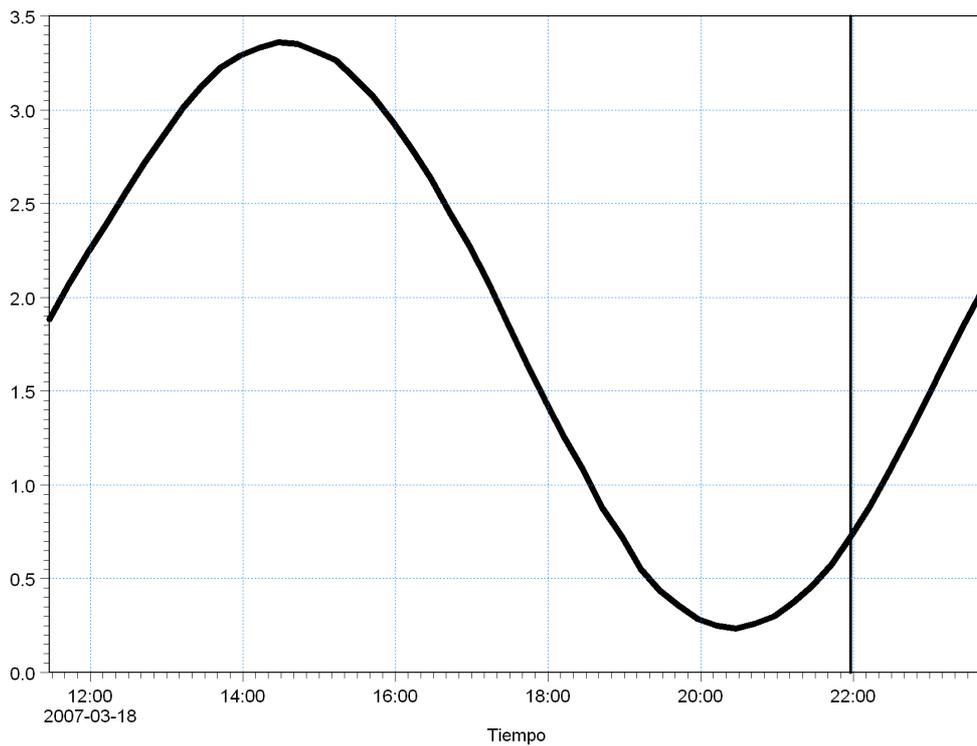
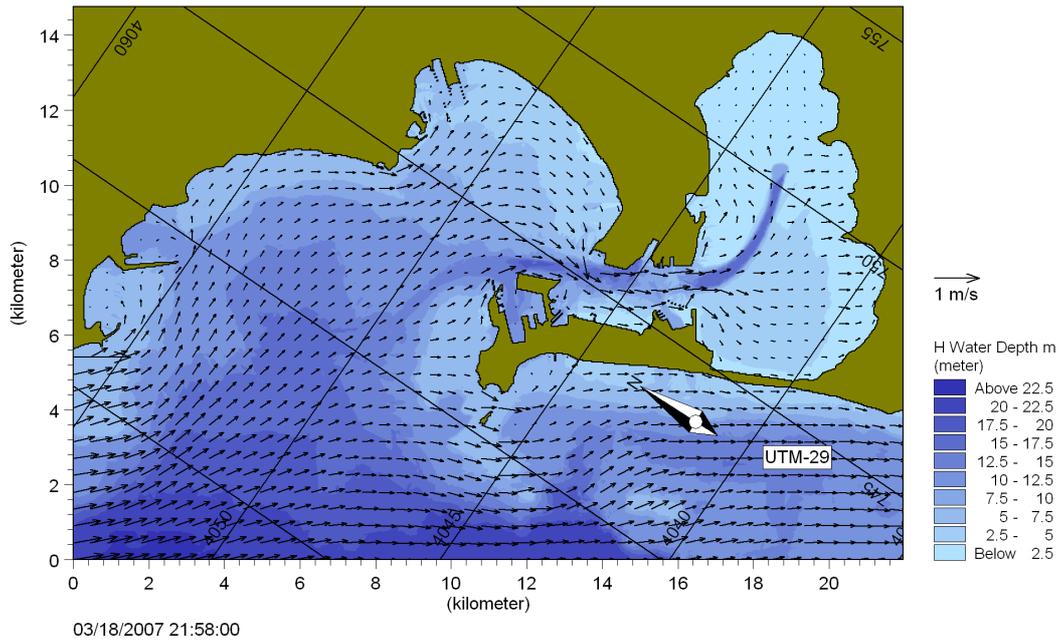


Figura 35: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 22:00 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.

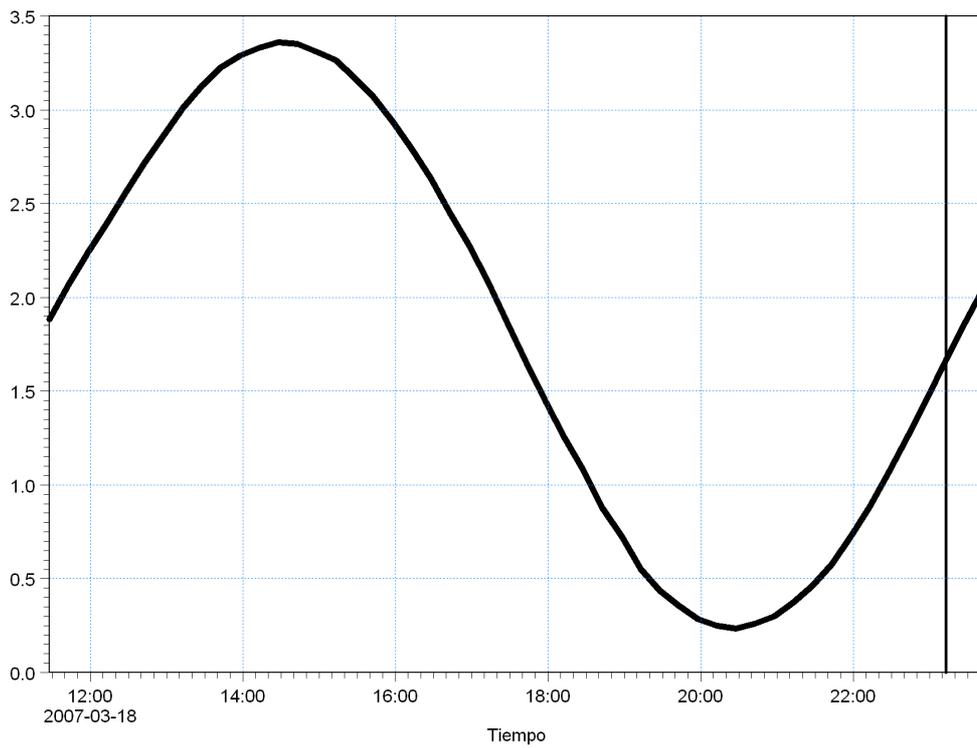
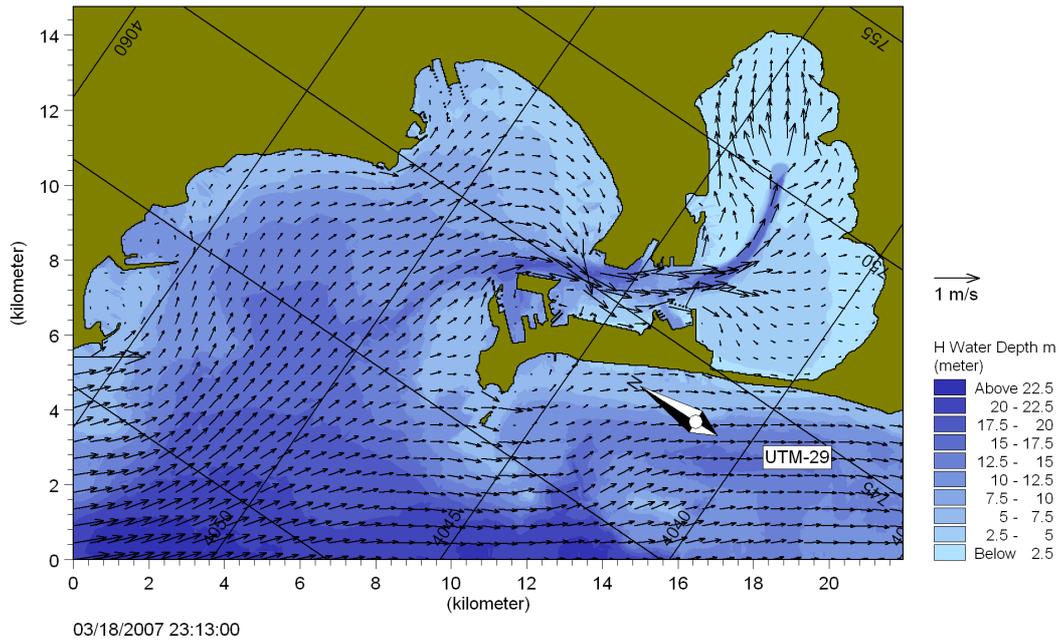


Figura 36: Campo de niveles y de velocidades de corrientes promediadas en la columna de agua en llenante, a las 23:10 del 18-03-2007. Alternativa de Proyecto, Condiciones de Trabajo Extremas.



2.3. Campaña de medida y comparación

De modo ilustrativo y como medida de la bondad de la simulación numérica realizada, se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos por el modelo y las mediciones en el punto P2, entre el 18 y el 19 de Marzo de 2007. En la Figura 37 se presenta la comparación entre la serie temporal del nivel medio del mar medido y simulado donde se muestra que los resultados del modelo se ajustan bien a los datos medidos reales, pero donde se aprecia un ligero desfase temporal. Esto puede ser debido a las simplificaciones que introduce el modelo y probablemente a los errores que introduce el uso de las condiciones de contorno empleadas en el modelo regional. Sin embargo, se puede concluir que los resultados obtenidos por el modelo se ajustan a la realidad con un nivel de exactitud lo suficientemente adecuado para los objetivos de este estudio.

En la Figura 38 se compara la serie temporal del módulo de la velocidad horizontal de la corriente promediada en la columna de agua simulado y medido en el punto P2. Los resultados son menos buenos que para el caso de los niveles del mar, sin embargo siguen siendo satisfactorios tanto en magnitud como en tendencia

Por lo tanto, se puede concluir que los resultados obtenidos por el modelo se ajustan a la realidad con un nivel de exactitud lo suficientemente adecuado para los objetivos de este estudio. En un estudio posterior, el modelo se comparará y se calibrará con los demás datos obtenidos en la campaña de campo.

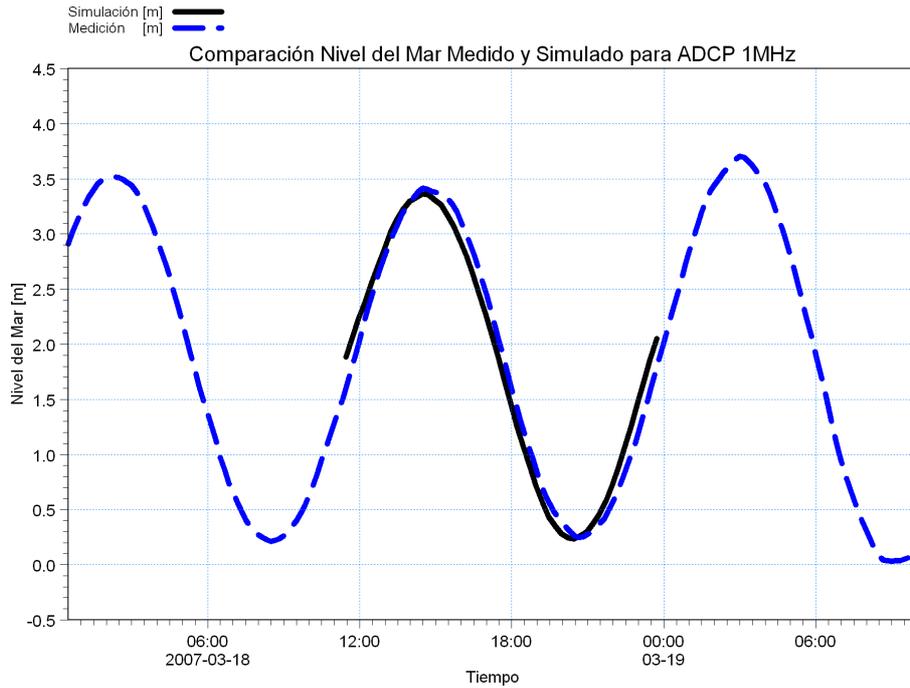


Figura 37: Comparación del nivel del mar obtenido mediante simulación numérica de la serie temporal ST2 con los datos de nivel medidos in situ en el punto P2 con un ADCP de 1MHz para el intervalo de medida 17–22 Marzo 2007, correspondiente a Condiciones de Trabajo Extremas

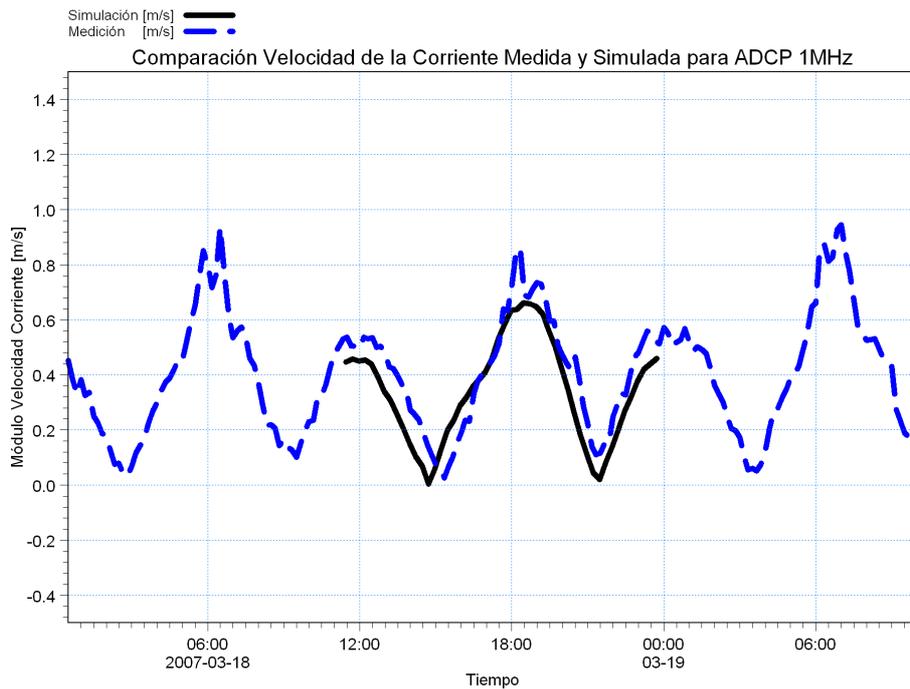


Figura 38: Comparación de la velocidad de corriente obtenida mediante simulación numérica de la serie temporal ST2 con los datos de velocidad medidos in situ en el punto P2 con un ADCP de 1MHz para el intervalo de medida 17–22 Marzo 2007, correspondiente a Condiciones de Trabajo Extremas.



2.4. Conclusiones

Las principales conclusiones preliminares que se desprenden de este estudio son:

1. El modelo empleado es capaz de simular satisfactoriamente el comportamiento de la onda de marea y sus corrientes asociadas en una geometría complicada como la de la Bahía de Cádiz.
2. A la luz de los resultados obtenidos, no se aprecian diferencias significativas entre los sistemas de corrientes en la Situación Actual y en la Situación Futura incluyendo la Alternativa de Proyecto.
3. Las trayectorias de las corrientes de llenante y de vaciante siguen la forma del canal de navegación.
4. Las velocidades máximas de corriente se producen en el Estrecho de Puntales, en las proximidades de los Muelles de la Cabezuela.

El presente estudio es de carácter preliminar, y será ampliado y profundizado en un documento posterior, en el que se tendrán en cuenta los dragados del canal de navegación principal asociados a la ampliación del Puerto, se comparará y se calibrará el modelo con los demás datos obtenidos en la campaña de campo, y se profundizará en las implicaciones ambientales del sistema de corrientes en el intercambio de masas de agua entre la Bahía Exterior y el Saco Interior.



ANEXO XII

CAMPAÑA DE CAMPO AMBIENTAL.



Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales
Centro Andaluz de Medio Ambiente
Universidad de Granada



Dpto. Ecología y Gestión Costera
Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía
Consejo Superior Investigaciones Científicas

INFORME DE CAMPAÑA

DÁRSENA 2007

**DPTO. DE ECOLOGÍA Y GESTIÓN COSTERA
INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS DE ANDALUCÍA
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS**

Cádiz, 2007

ÍNDICE

1.- Presentación de la campaña y del proyecto en que se enmarca	3
2.- Campaña para estudio de los macroinvertebrados bentónicos y contaminantes en el sedimento.....	5
2.1.- Macroinvertebrados Marinos Bentónicos	6
2.2.- Contaminantes: Metales	12
3.- Campaña del medio pelágico.....	17
3.1.- Muestreo en continuo de parámetros hidrológicos superficiales	19
3.2. - Muestreo de los parámetros hidrológicos en la columna de agua.....	26
3.3. - Muestreo de las variables biogeoquímicas en la columna de agua.....	28
3.3.1. Nutrientes inorgánicos.....	28
3.3.2. Sólidos en suspensión: Orgánicos e inorgánicos.....	30
3.3.3. Carbono y nitrógeno orgánicos disueltos.....	31
3.3.4. Alcalinidad y presión parcial de CO ₂	32
3.3.5. Partículas Transparentes Exopoliméricas (TEPs)	34
3.3.6. Clorofila total y Fraccionada.....	35
3.3.7. Fitoplancton.....	38
4.- Bibliografía	38

1. Resumen de la campaña ambiental. Conclusiones

La campaña DÁRSENA se desarrollo en aguas de la Bahía de Cádiz en los días 20 y 22 de Febrero de 2007 a bordo del barco “Antonio Vidal”, perteneciente al Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (CSIC). Esta campaña se ha realizado a través del convenio establecido entre la Universidad de Granada y el ICMAN-CSIC para el “Estudio de alternativas para la ampliación de la dársena portuaria de Cádiz”. El principal objetivo de esta campaña es describir las características del medio químico y biológico de la zona marina contigua y al este de la dársena comercial del puerto de Cádiz.

La campaña interdisciplinar que se ha llevado a cabo ha consistido en dos muestreos bien diferenciados. El primero de ellos, con 12 estaciones de muestreo, se desarrolló para la identificación de los organismos bentónicos y la concentración de metales pesados en el mismo sustrato; y el segundo muestreo, se ha desarrollado para el estudio de parámetros hidrológicos y biogeoquímicos de la columna de agua.

La conclusión general de los datos recogidos y analizados en la campaña de campo apunta a que la zona del saco externo de la bahía que coincide con el área de futura expansión del dique de levante presenta síntomas evidentes de degradación y es el área menos sensible desde la perspectiva medioambiental de aquellas que fueron analizadas en el estudio. Los elementos que evidencian esta conclusión son:

- 1) La fauna bentónica presentó en el conjunto del área analizada valores bajos de biomasa y de riqueza específica. Estas características, baja biomasa y riqueza específica, son especialmente evidentes en el bentos del sector sur, que coincide con el área cercana a la planta Delta.
- 2) Los sedimentos analizados tienen concentraciones bajas de contaminantes que no superan la mitad de las previstas en la categoría I de la ROMs excepto para el cadmio. Dentro de ese marco general de valores bajos de contaminantes, las mayores concentraciones de metales se encontraron en los sedimentos cercanos a la planta Delta.

El muestreo del ciclo mareal en el sistema pelágico mostró síntomas evidentes de estancamiento en la masa de agua de la región cercana a la planta Delta. Frente a la importante renovación que ocurre en la zona de la canal y al norte de la misma, las

aguas cercanas a la planta Delta no son tan sensibles al ciclo mareal. Por tanto, esta zona concentra elementos y propiedades de influencia humana que no se renuevan con la rapidez que lo hacen otras zonas de la bahía ante el forzamiento que impone la marea.

2. Campaña para estudio de los macroinvertebrados bentónicos y contaminantes en el sedimento

El día 20 de Febrero de 2007 se realizó a bordo del barco “AntonioVidal” la visita a las 12 estaciones de muestreo que se presentan en el mapa de la Figura 2.1. En estas estaciones, cuya información se describe en la Tabla 2.1, se obtuvo sedimento de la parte superficial del sustrato gracias a una draga de tipo cuchara (ver fotografías Figura 2.2), cuyas dimensiones son de 16,5 x 17,5 cm (288,75 cm²).

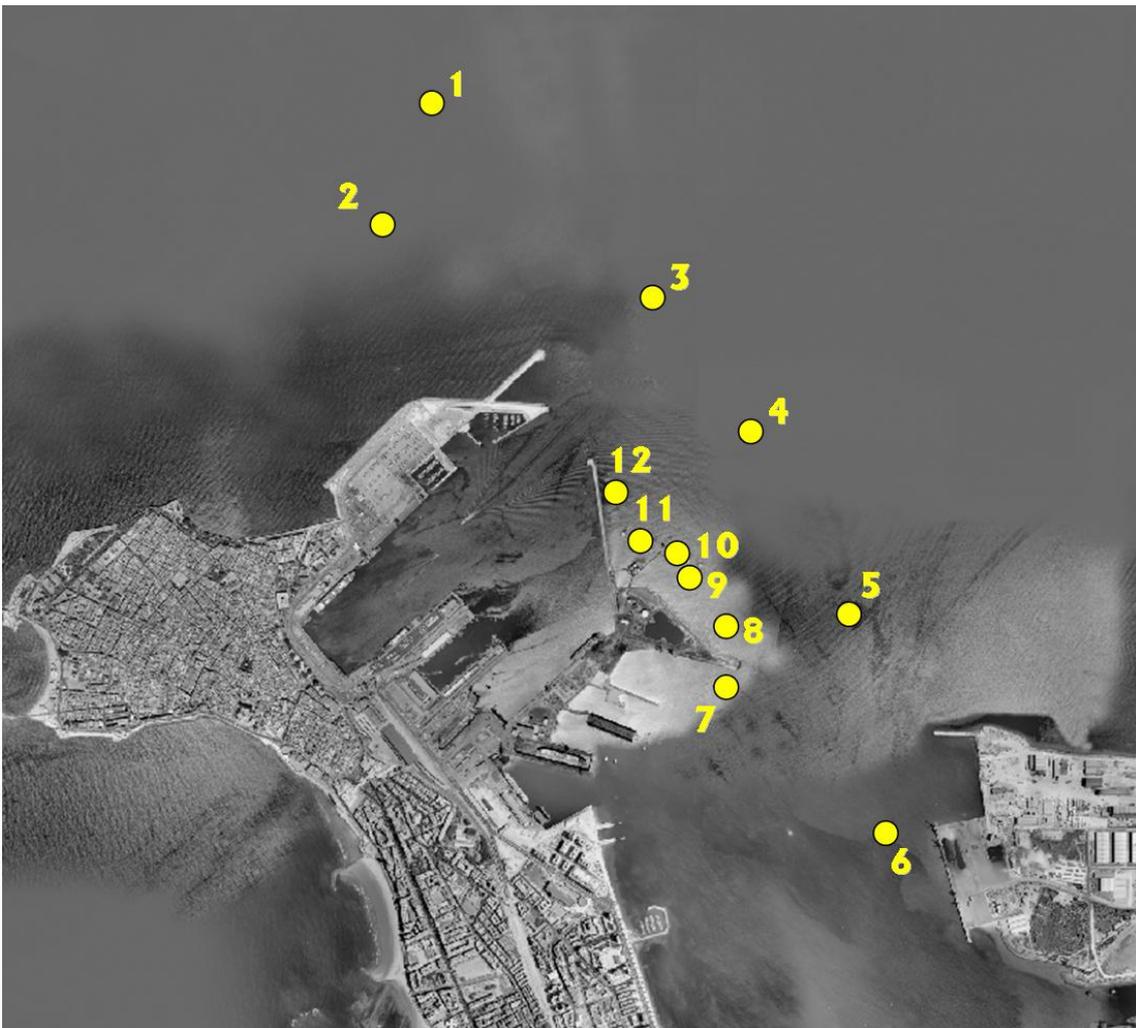


Figura 2.1. Estaciones de muestreo de macroinvertebrados marinos y de contaminantes.

Estación	Hora	Latitud	Longitud	Prof	Bent	Met
----------	------	---------	----------	------	------	-----

/bidón	Local					
1 - 2	11:39	36° 33.40'	6° 17.09'	9.6	X	X
2- 3	11:49	36° 33.11'	6° 17.27'	9	X	X
3 - 5	12:06	36° 32.9'	6° 16.3'	8.7	X	
4- 7	12:16	36° 32.5'	6° 16.0'	8	X	X
5 - 11'	12:35	36° 32'	6° 15.6'	7	X	X
6-12	12:47	36° 31.40'	6° 15.5'	12.9	X	X
7- 10	13:06	36° 31.8'	6° 16.1'	9.7	X	X
8 - 13	13:23	36° 31.9'	6° 16.1'	9.5	X	X
9 - 8	13:45	36° 32.12'	6° 16.15'	9.8	X	X
10 - 14	13:54	36° 32.15'	6° 16.2	13	X	X
11 - 15	14:06	36° 32.2'	6° 16.4'	7.1	X	X
12 - 6	14:16	36° 32.35'	6° 16.48'	7.1	X	X

Tabla 2.1. Estaciones de muestro del medio bentónico. X: Representa si existe muestra de macroinvertebrados (Bent) o metales (Met).

2.1. Macroinvertebrados Marinos Bentónicos

En cada estación de muestreo, se largaba por la borda la draga hasta recoger sedimento de forma aleatoria hasta tres veces (Fig. 2.2.B). El sedimento de cada replica se depositaba en un bidón etiquetado de 25 litros (Fig. 2.2.D). Una vez en el laboratorio, cada replica se lavaba suavemente con agua sobre una torre de tamices de 6,3, 3,15, 1,25 y 0,5 milímetros de luz de malla (Fig. 2.2.E.F). A continuación, se recogía el material biológico retenido en cada tamiz (Fig. 2.2.G), y se guardaba en botes de vidrio con formol al 10% para su posterior análisis en la lupa (Fig. 2.2.H). Este análisis consistía en: 1) separación e identificación de especies (o grupo zoológico, si no era posible la identificación exacta); 2) recuento del número de individuos de cada especie o grupo. Una vez concluido este análisis, se procedió a tomar fotografías de cada especie con una lupa binocular (Figura 2.3).



Figura 2.2. Fotografías ilustrativas de distintas fases del muestreo de bentos en la Bahía de Cádiz. (Fotos realizadas por A. Arias)

En total, se han identificado los grupos zoológicos y especies de macroinvertebrados que muestra la Tabla 2.2, en la que se indica el número de individuos recolectados en cada caso.

ESTACIONES

FAUNA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL
EQUINODERMOS													
OFIUROIDEOS	25		1	14	2	2	1	2	1	9	5	13	75
ANÉLIDOS													
POLIUQUETOS													
No identificados	16		17	31	21	8	4	9	7	21	11	9	154
<i>Glycera rouxi</i>	3		1										4
MOLUSCOS													
BIVALVOS													
No identificados												2	2
<i>Corbula giba</i>	6					1	4		2			7	20
<i>Abra alba</i>							1						1
<i>Scrobicularia plana</i>	4												4
GASTERÓPODOS						3				1			4
CRUSTÁCEOS													
ANFÍPODOS													
No identificados	12	17			2				2	1	2		36
<i>Corophium sp.</i>	1			2			2	8					13
<i>Perioculodes sp.</i>							3	7					10
<i>Gammarus sp.</i>				7									7
<i>Ampelisca sp.</i>				2									2
TANAIDOS	1									1			2
ISÓPODOS													
No identificados	3												3
<i>Cyathura carinata</i>						2		1					3
CUMÁCEOS													
<i>Iphinoe trispinosa</i>	16		1	1	1		2	3			2		26
PAGÚRIDOS		9				1		1					11
DECÁPODOS													
<i>Illia nucleus leachi</i>					1								1
<i>Liocarcinus depurator</i>		1											1
Nº TOTAL	87	27	20	57	27	17	17	31	12	33	20	31	379

Tabla 2.2. Numero de individuos identificados en cada estación.



Figura 2.3. Fotografías del material biológico encontrado en la estación 7 para diferentes tamices (Fotos realizadas por A. Arias)

En la Figura 2.4, que representa el número total de individuos por estación, así como en número de individuos muestreados en todas las estaciones, se observa que la estación 1, situada en la zona exterior de la bahía (Figura 2.1), es la que mayor abundancia de macroinvertebrados presenta.

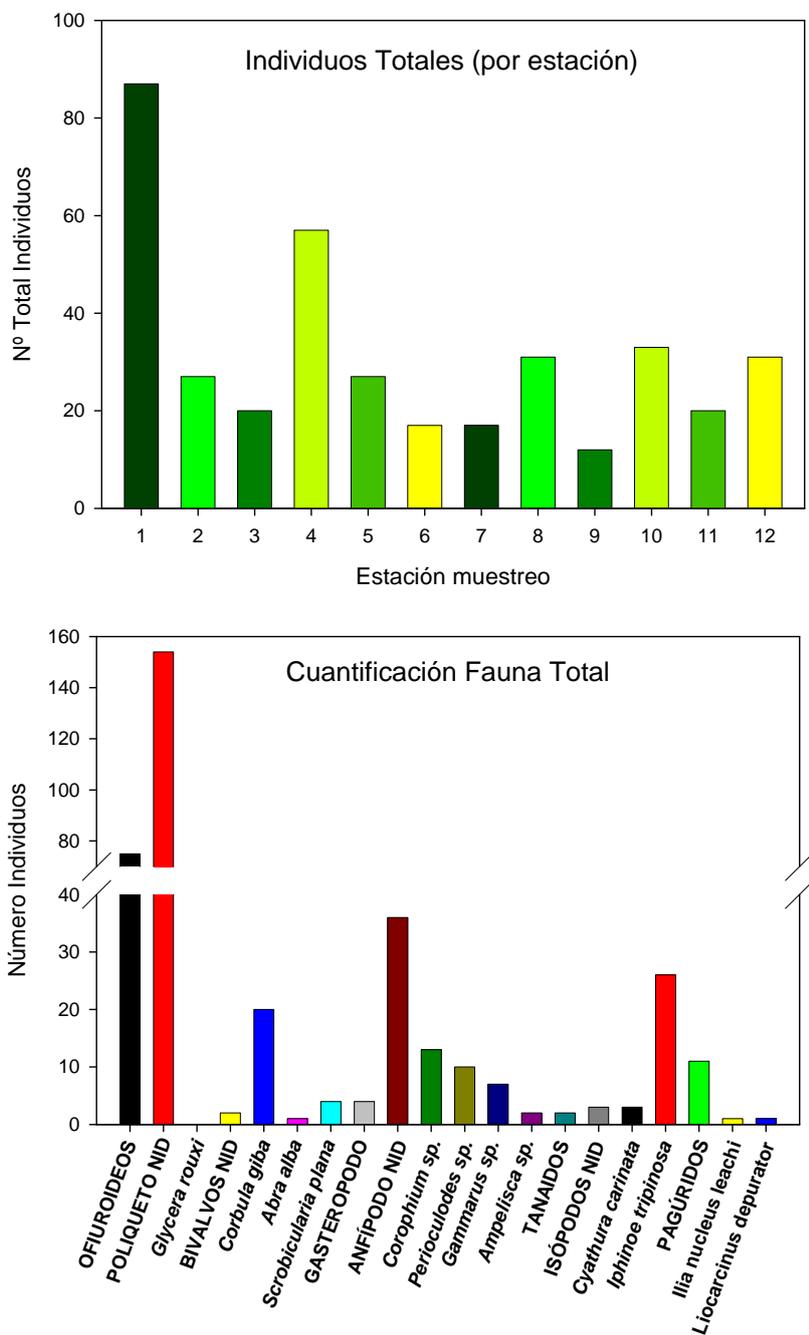


Figura 2.4. Superior: Número total de individuos recolectados en cada estación de muestro. El número de individuos se refiere a tres replicados de draga, que equivalen a una superficie total de 0.0288 m². Inferior: Número total de individuos por especie o grupo considerado en el toda el área muestreada.

Además de presentar los resultados de forma conjunta, en la Figura 2.5 aparecen los resultados de los individuos identificados para cada estación.

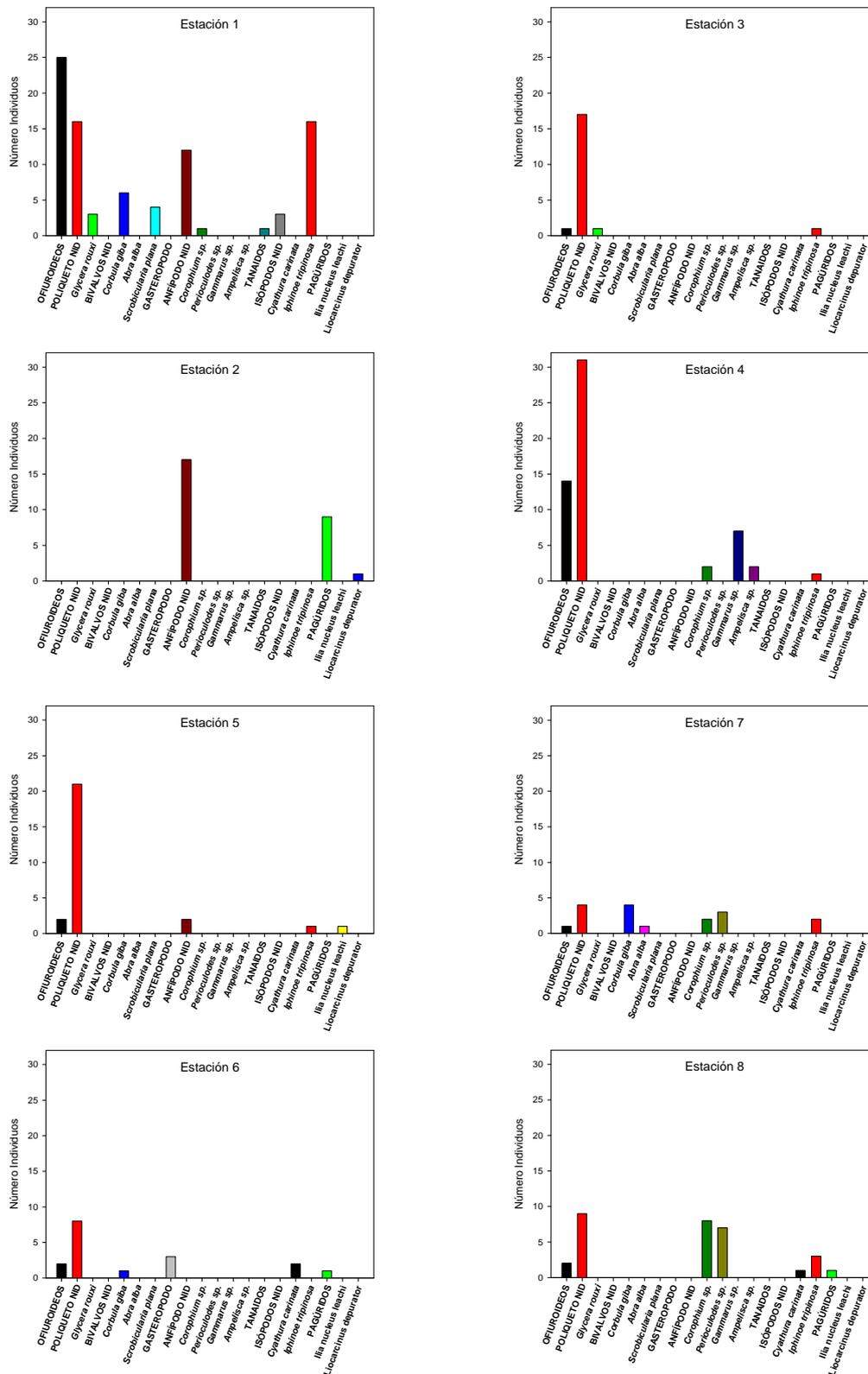


Figura 2.5. Número de individuos recolectados en cada estación de muestreo

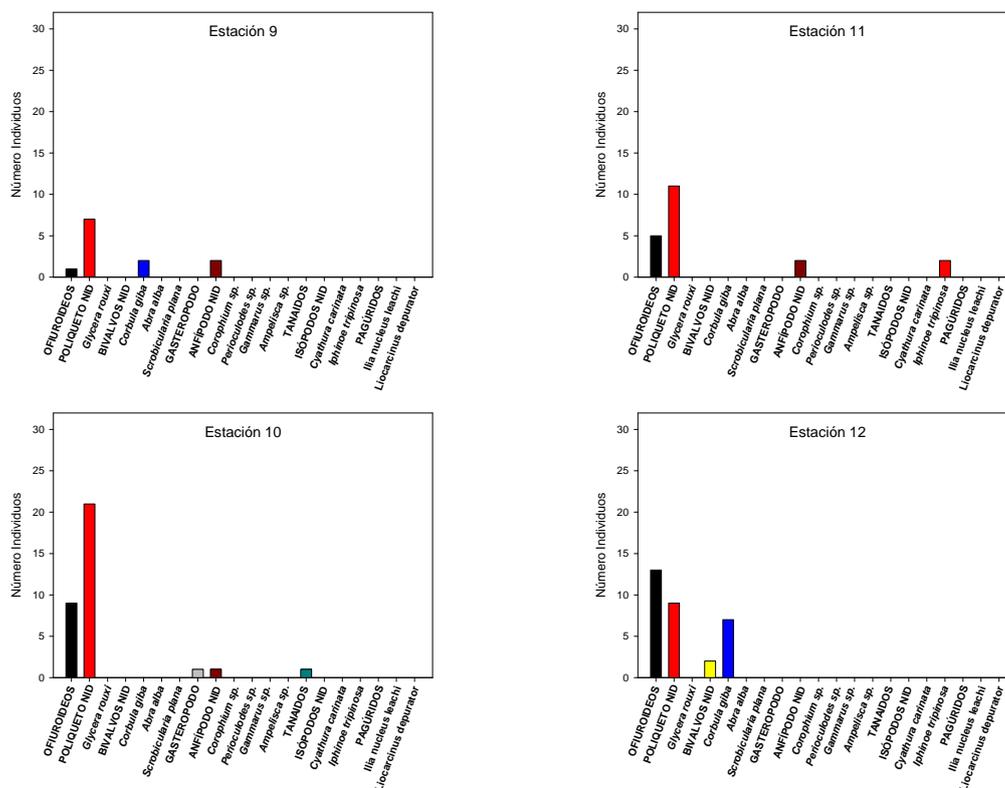


Figura 2.5. (Continuación) Número de individuos recolectados en cada estación de muestreo

2.2. Contaminantes: Metales

Además de para el estudio de los macroinvertebrados, paralelamente se recogieron muestras de sedimento para el análisis de los metales pesados presentes. Para ello, una vez obtenido el sedimento con la draga se vaciaba en una bandeja, previamente lavada con ácido nítrico (10%) durante 24 horas (Fig. 2.2.C), se homogenizaba la muestra con una paleta de plástico y se colocaba en un bote de plástico de 0,5 litros de capacidad, previamente lavado y etiquetado. Posteriormente, se congelaba dicha muestra hasta su análisis.

El análisis de la concentración de metales se realizó en la fracción total del sedimento, por ser la fracción menor de 63 μm muy pequeña en la mayoría de las estaciones (80%) inferior al 5%. Para ello se descongeló la muestra y se liofilizó (VIRTIS ADVENTAGE) para su posterior molienda en un mortero de ágata hasta

reducirla a polvo fino. El método empleado para los análisis fue el descrito por Loring y Rantala (1992), que permite la disolución completa de las muestras. Aproximadamente 0,20 g de sedimento seco fue digerido en bombas de Teflón con 1mL de HNO₃-HCl (ratio 1:3, v/v) y 6 mL de HF. Las soluciones se digirieron mediante el empleo de un microondas aplicando un tiempo de 70s a 750W. Posteriormente se filtraron a través de filtros especiales para análisis cuantitativos (Filter-Lab 1242) y se diluyeron con agua Mili-Q hasta 25 ml en matraces de plástico aforados, enrasando con H₃BO₃ al 5.6%. La adición de ácido bórico contribuye a la estabilización de la señal en la espectroscopía de absorción atómica (Hsu y Locke, 1983) y permite el uso de material de vidrio sin riesgo de contaminación. Previamente al análisis, todo el material utilizado se limpió con ácido nítrico al 10% durante 24 horas. Los reactivos utilizados fueron de calidad Suprapur.

Los análisis de los elementos Cu, Zn, Ni, Fe, Mn, Cd, Co y V se realizaron a través de un espectrofotómetro de emisión óptica con plasma de inducción acoplado ICP-OES (PE 2100DV). El Hg se analizó mediante el empleo de un AMA 254 (LECO Instruments) que permite el análisis de muestras sólidas.

Se utilizó tanto material de referencia como blancos reactivos para verificar la exactitud de los resultados.

Además de los metales analizados, se estimó el contenido de materia orgánica (MO) utilizando el método de pérdida de masa por combustión (LOI) (Mook y Hoskin, 1982) y el carbono orgánico por el método de digestión húmeda propuesto por Gaudette et al (1974) según modificación de El Ragis (1985) como análisis complementario. Este método consiste en el pesado de entre 3 y 5 gramos de sedimento secado previamente en crisoles de sílice o porcelana a 106°C. Posteriormente, se procede a su combustión en el horno mufla a 500°C durante 16 horas, y luego a su pesaje.

La Figura 2.6 muestra el porcentaje de humedad de la muestra así como el porcentaje de la fracción mayor de 63 µm presente en la muestra de sedimento. Como se observa, la mayoría de la muestra se corresponde a la fracción mayor de 63 micras, con un contenido de humedad desde el 20 % hasta el 60%. Las estaciones situadas en las cercanías al muelle Delta, son las que menor proporción de material mayor de 63

micras presenta, posiblemente debida a la menor energía hidrodinámica existente en esta área.

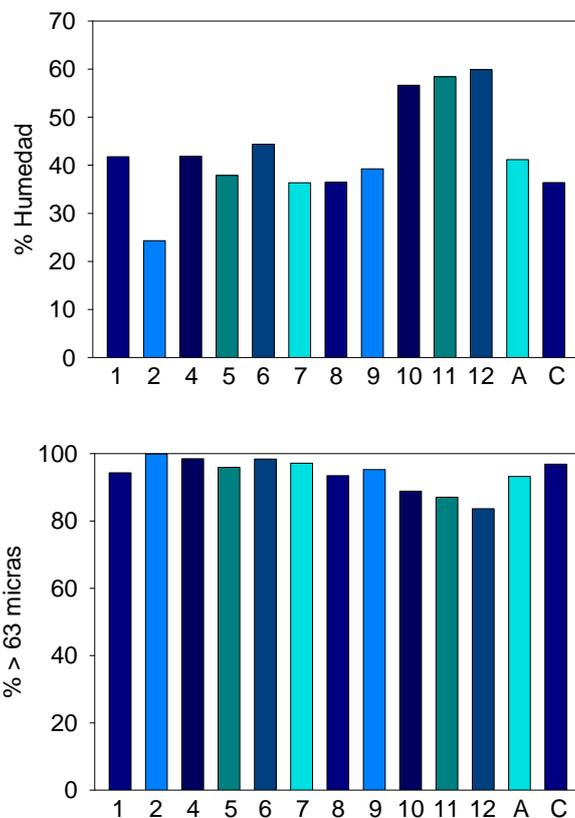


Figura 2.6. Porcentaje de humedad y porcentaje de la fracción mayor de 63 micras contenida en la muestra de sedimento. Las estaciones A y C vienen representadas en la figura 3.1.

Con respecto al porcentaje de materia orgánica (calculada a partir de la pérdida por calcinación LOI) (Figura 2.7), este siempre fue menor del 10 %, siendo en la estación 2 y la 5, 6 y 7, que son aquellas más separadas del muelle Delta, las que menor cantidad de materia orgánica presentaron.

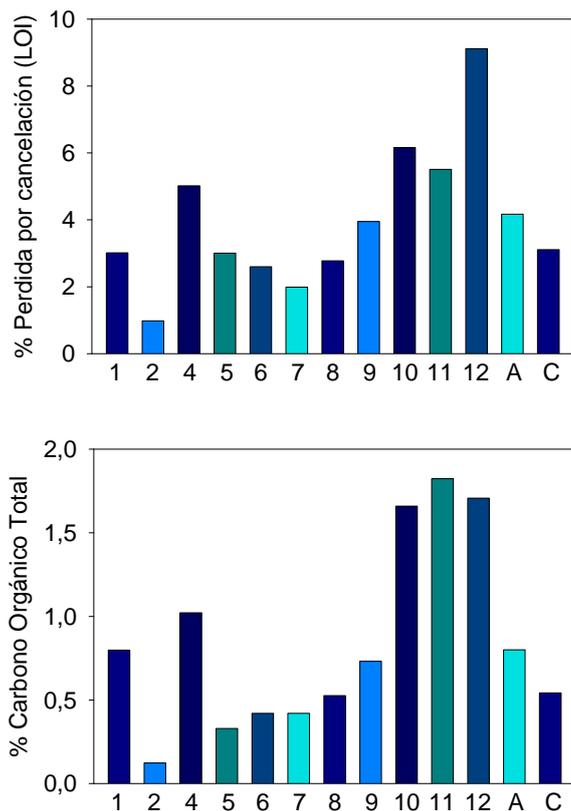
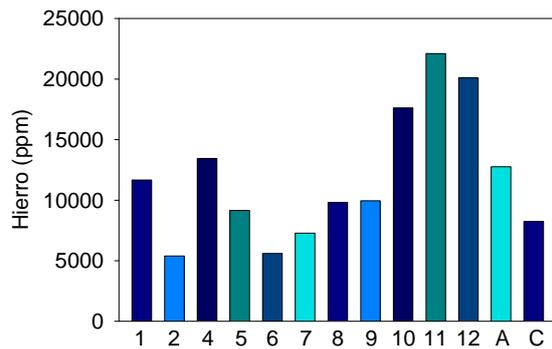
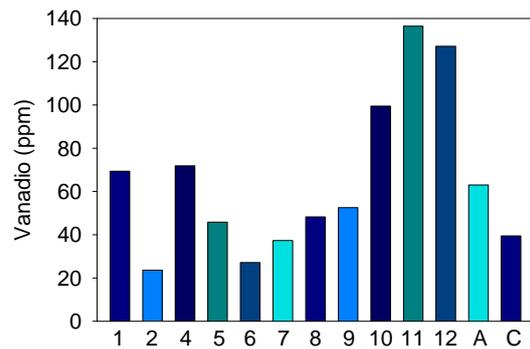
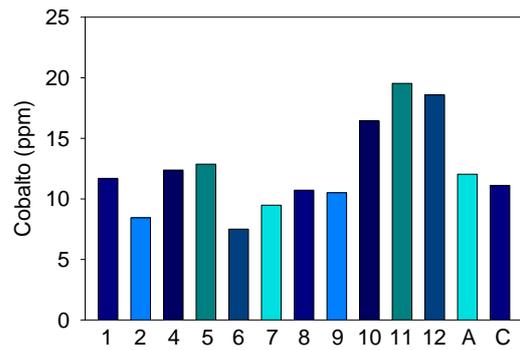
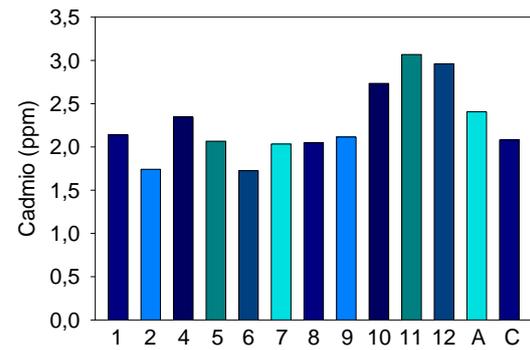
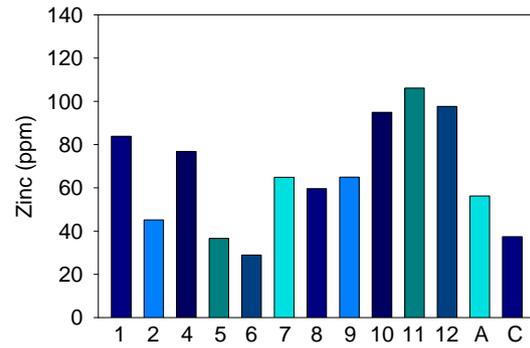
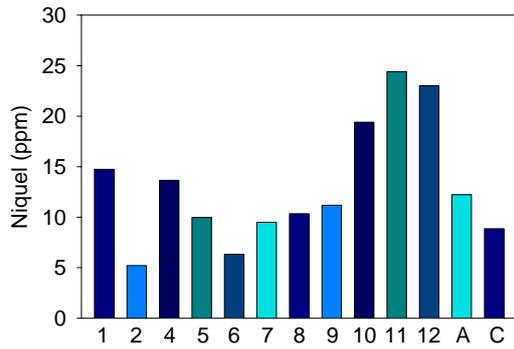
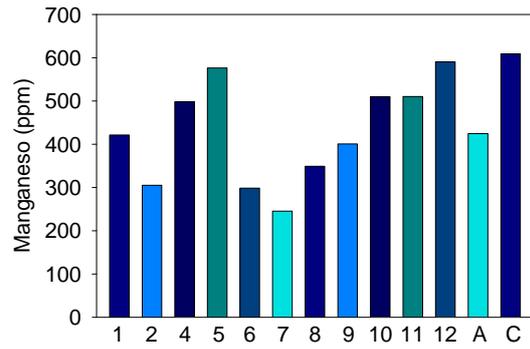
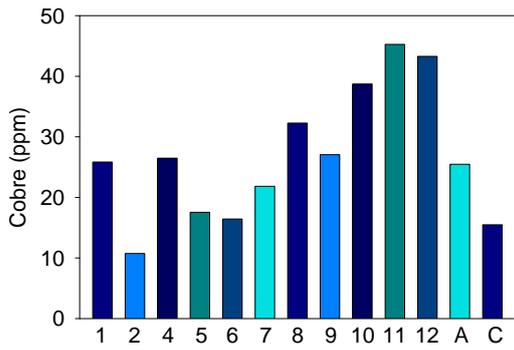


Figura 2.7. Porcentaje de carbono orgánico total en las muestras. Las estaciones A y C vienen representadas en la figura 3.1.

Los datos de CO siguieron la misma tendencia que los valores de LOI, mostrando una buena correlación entre ambas variables ($r^2 \approx 0.8$).

La Figura 2.8 muestra la concentración de metales en las estaciones medidas (Figura 2.1), mientras que la estación A y C vienen representadas en la Figura 3.1. De forma general, las mayores concentraciones de metales se alcanzan en las estaciones 10, 11 y 12, que son las más cercanas a la planta Delta. Asimismo, las estaciones con menor concentración de metales se corresponden con la estación 2, situadas al norte Cádiz, y las estaciones 5 y 6, cercanas al muelle de La Cabezuela.



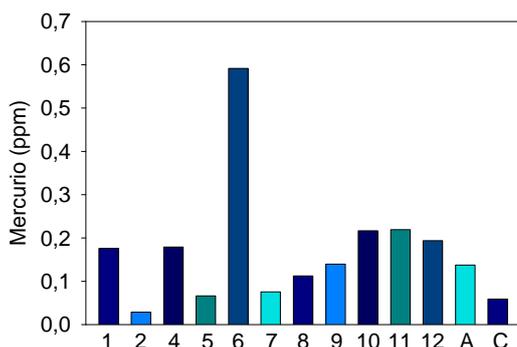


Figura 2.8. Distribución de la concentración de metales en las diferentes estaciones de muestreo

Las concentraciones de los metales medidos en las estaciones de muestreo se pueden categorizar como CATEGORIA I, S/RGMDPE, aunque estas concentraciones son referidas a toda la fracción de sedimento, ya que la fracción menor de 63 μm es muy escasa en la zona de estudio. Los niveles de acción para los diferentes contaminantes son: Cobre (Cu, 100 ppm), cadmio (Cd, 1 ppm), Zinc (Zn, 500 ppm), Níquel (Ni, 100) y Mercurio (Hg, 0.6). Como puede observarse en las figuras, tanto para el cobre, níquel, mercurio y zinc no llega a alcanzarse ni la mitad de concentración del valor límite para pertenecer a la Categoría I, mientras que para el cadmio sí se supera este nivel en la mayoría de las estaciones.

3. Campaña del medio pelágico

El día 22 de Febrero de 2007 se realizó a bordo del buque “AntonioVidal” un muestro de 12 horas (ciclo mareal completo) en la Bahía de Cádiz. A lo largo de estas 12 horas, se realizaron 8 transectos entre los puntos A-B-C y otros 8 transectos en el sentido C-B-A. La localización geográfica de estos puntos se recoge en la Figura 3.1 y en la Tabla 3.1. A lo largo de estas 12 horas, se realizaron los muestreos que se describen a continuación:

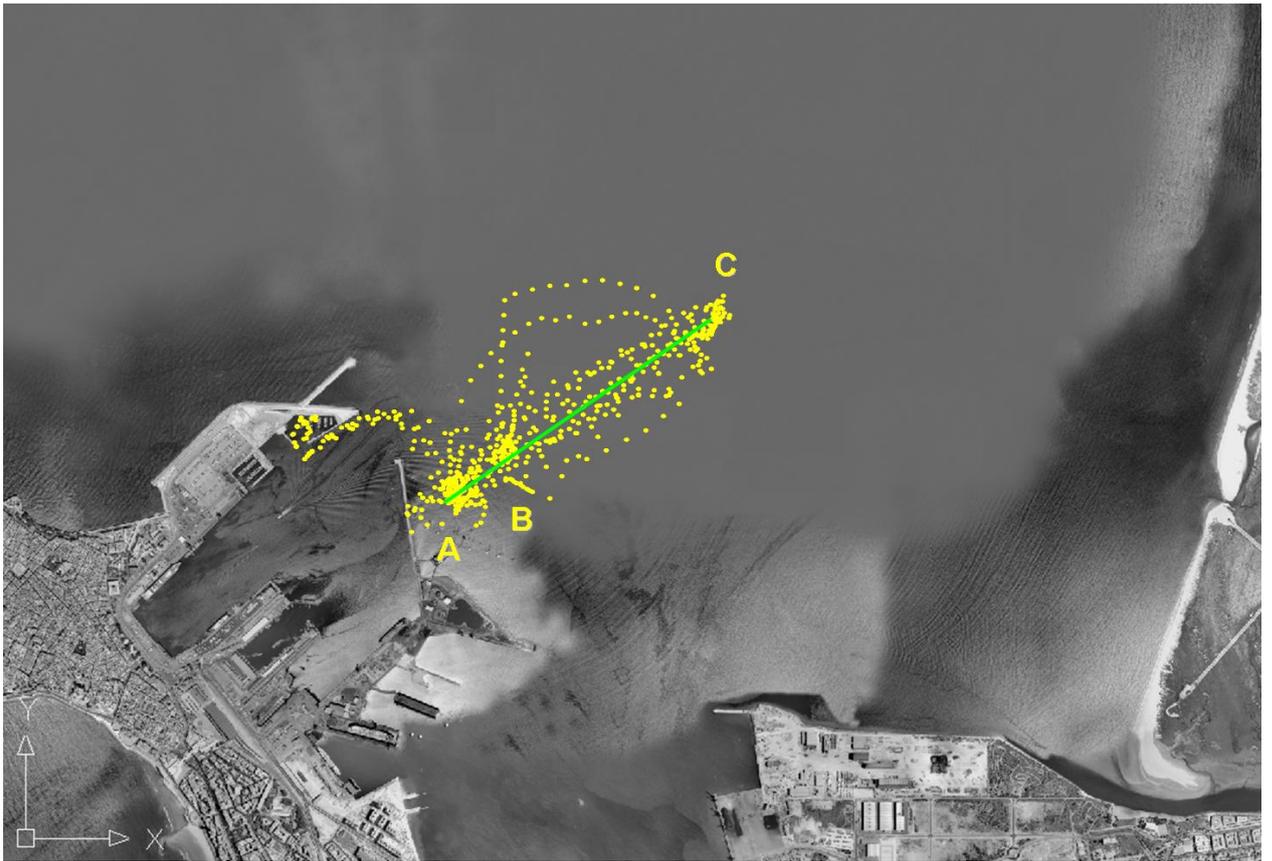
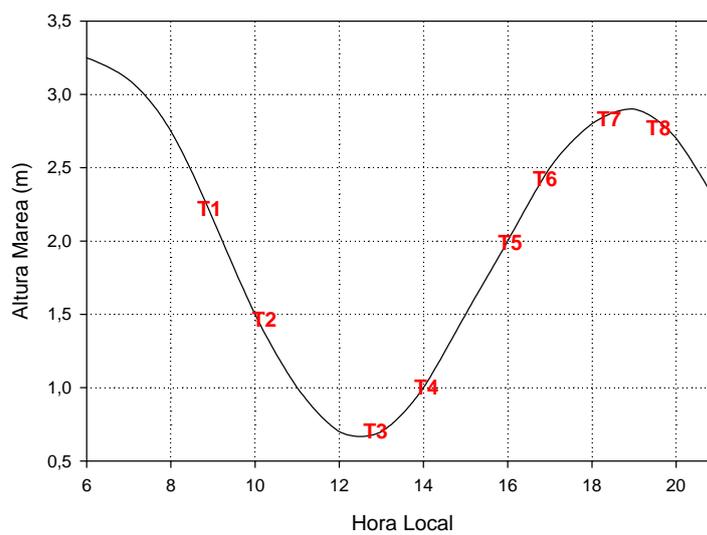


Figura 3.1. Localización geográfica de los diferentes puntos de muestreo de la campaña del medio pelágico.



Estación	Hora	Muestreo	Sonda (m)
A1	9:03	BÁSICO	14
B1	9:12	BÁSICO	17
C1	9:23	BÁSICO	5
A2	9:52	COMPLETO	8
B2	10:16	COMPLETO	17
C2	10:38	COMPLETO	4
A3	12:23	COMPLETO	7
C3	13:16	COMPLETO	4
B3	13:36	COMPLETO	18
A4	13:55	BÁSICO	7
B4	14:06	BÁSICO	17
C4	14:18	BÁSICO	4
A5	16:03	COMPLETO	8
B5	16:16	COMPLETO	19
C5	16:32	COMPLETO	5
A6	17:08	COMPLETO	9
B6	17:22	COMPLETO	11
C6	17:39	COMPLETO	6
A7	18:15	COMPLETO	14
B7	18:23	COMPLETO	15
C7	18:38	COMPLETO	6
A8	19:15	COMPLETO	10
B8	19:24	COMPLETO	17
C8	19:38	COMPLETO	6

Tabla 3.1. Información concerniente al muestreo.

3.1. Muestreo en continuo de parámetros hidrológicos superficiales

Durante las 12 horas de muestreo se dispuso de un sistema autónomo de medida de parámetros ambientales de la superficie del agua (a unos 50 cm de la superficie). Este sistema se componía de una bomba peristáltica para la obtención de agua superficial, que previamente se filtraba a través de unos filtros para evitar la entrada de partículas grandes que pudieran dañar el sistema. Esta bomba, conectada a una batería de 12 voltios, con un consumo de 8 amperios y un caudal nominal de 6 litros/minuto, alimentaba de agua a un CTD SBE16+ con sensores externos dispuesto en una caja de PVC mecanizada. La sonda CTD nos permite obtener diferentes parámetros del agua, como temperatura, salinidad, conductividad, fluorescencia, turbidez y oxígeno disuelto.

Además, el propio CTD contiene una bomba SBE5T para el suministro continuo del agua necesaria para su buen funcionamiento. El sistema estaba permanentemente tomando datos, y hacía una integración cada minuto. A su vez, este sistema se encuentra integrado con un GPS GARMIN para el posicionamiento correcto, y por lo tanto, para la georeferenciación de los parámetros medidos por el CTD.

Sensor	Rango	Precisión	Resolución	T. respuesta
Temperatura	-3 + 33°C	0,003 °C	0,0005 °C	50 ms
Conductividad	0 – 70 mS/cm	0,003 ms/C	0,001 mS/cm	50 ms
Oxígeno	0 – 50 ppm	0,1 ppm	0,01 ppm	3 s

Tabla 3.2. Características técnicas del CTD (SBE16plus).

En la Figura 3.2, se presentan algunas fotografías del sistema utilizado para la obtención del muestreo en continuo.



Figura 3.2. Selección de fotografías representativas del sistema de muestreo

En conjunto, para todo el muestreo y en la zona mas superficial, el diagrama TS (Temperatura – Salinidad) nos indica que la temperatura del agua superficial oscila entre 14,7 y 15,2 °C, y la salinidad entre 35 y 36. A medida que transcurre el tiempo, se observa que el agua aumenta de temperatura, debido al aumento de la radiación solar. Con respecto a la fluorescencia, claramente se observa como los máximos aparecen asociados a aguas de temperaturas cercanas a los 14,9°C y salinidad de 36,5, que a su vez, pueden estar asociados a los valores más altos de turbidez. Sin embargo, con respecto al oxígeno disuelto, son las aguas más cálidas y salinas, las que mayor concentración de oxígeno presentan.

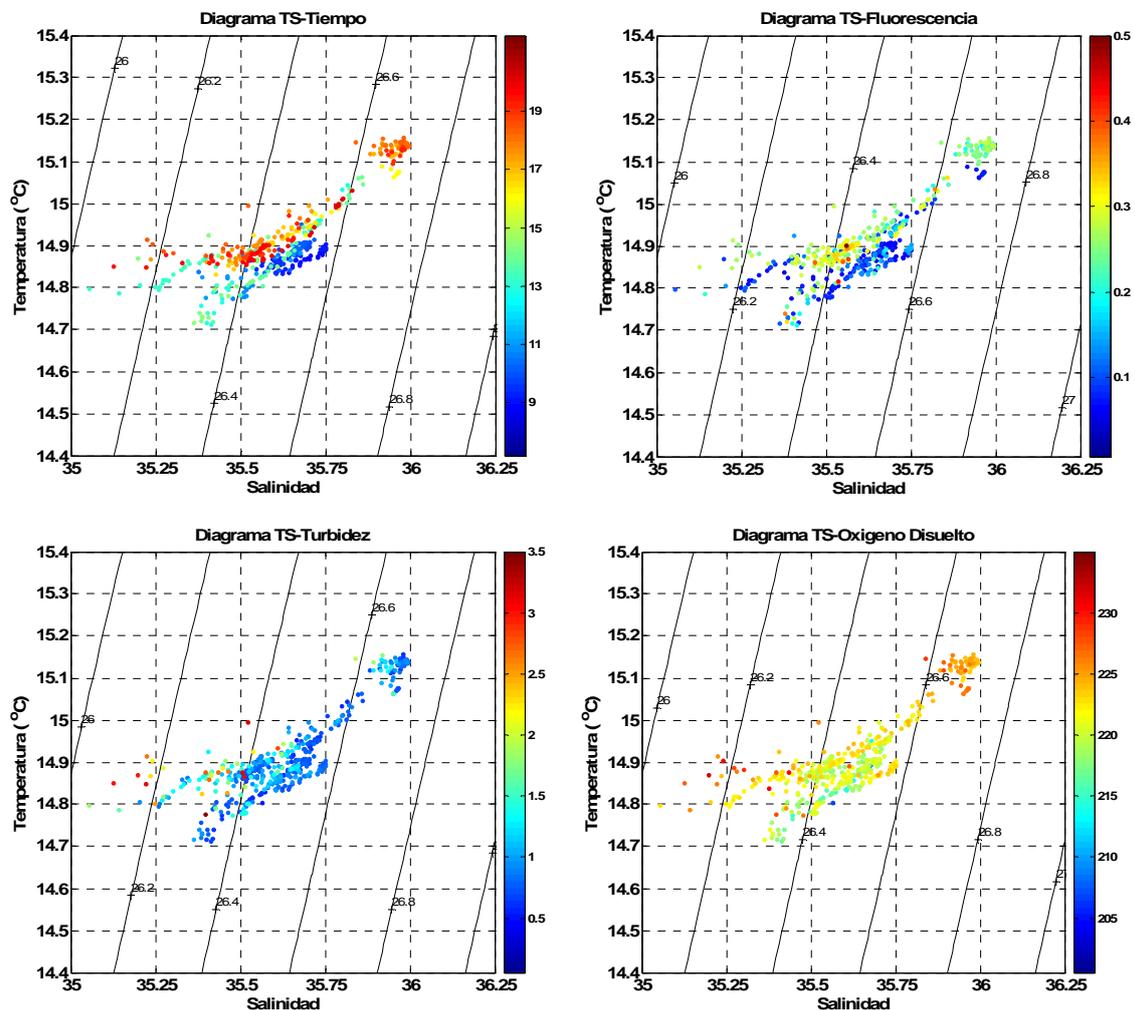


Figura 3.3.. Diagramas Temperatura – Salinidad superficial para el muestreo en continuo. El color indica en cada TS una variable. Sup-Izq: Tiempo (hora); Sup-Der: Fluorescencia (v); Inf-Izq: Turbidez (v) e Inf-Der: Oxígeno disuelto (mg/l)

Con respecto a la distribución superficial de las variables hidrológicas en el transecto perpendicular al canal, en las Figuras 3.4 y 3.5 se muestra dicha distribución

de forma clara y concisa, separando cada transecto y representando dichas variables en función de la longitud del punto muestreado, ya que nos permite situarnos en la zona de muestreo concreta. Además, la figura presenta la distribución superficial de temperatura, salinidad, turbidez, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y fluorescencia a lo largo del transecto realizado entre el punto C y el punto A, ya que este se hacía sin parar y a velocidad más constante que el realizado entre el punto A y C, mientras que en este caso se paraba el barco para recolectar las muestras con la botella oceanográfica y realizar los perfiles. En la Figura y Tabla 3.1 se recoge la localización geográfica de cada punto, así como el periodo de muestreo.

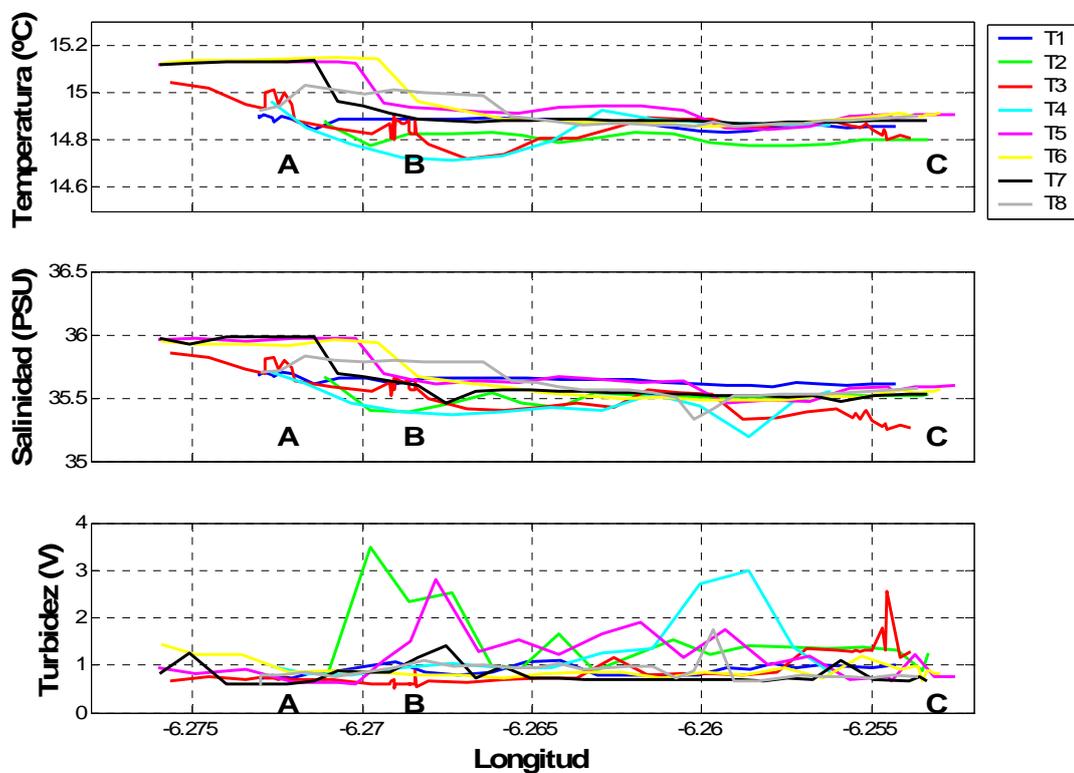


Figura 3.4. Transectos entre los puntos C-B-A a lo largo del ciclo mareal. Las variables representadas son Temperatura (°C), Salinidad y Turbidez (v).

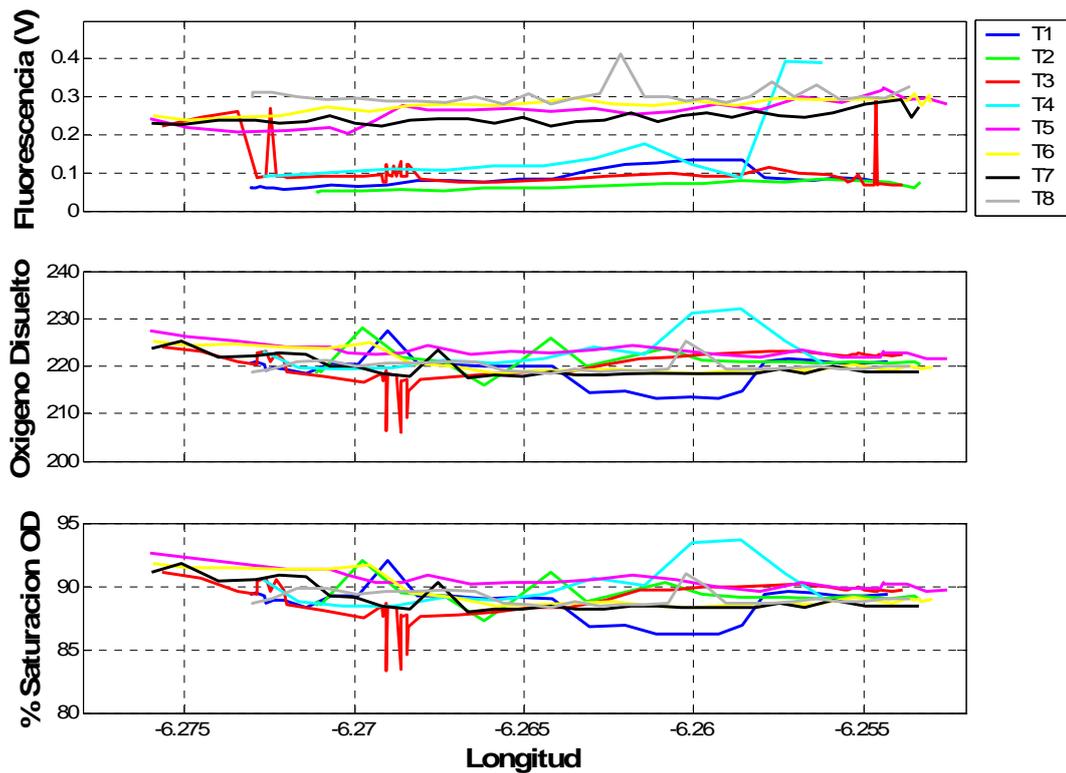


Figura 3.5. Transectos entre los puntos C-B-A a lo largo del ciclo mareal. Las variables representadas son Fluorescencia (v), Oxígeno Disuelto ($\mu\text{mol/Kg}$) y Porcentaje de saturación de OD (%).

Por último, y para que aparezca de forma más integradora, en las Figuras 3.6 y 3.7 se representan los datos en superficie de temperatura, salinidad, turbidez, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y fluorescencia de la clorofila a lo largo de las 12 horas de muestreo con respecto a la longitud.

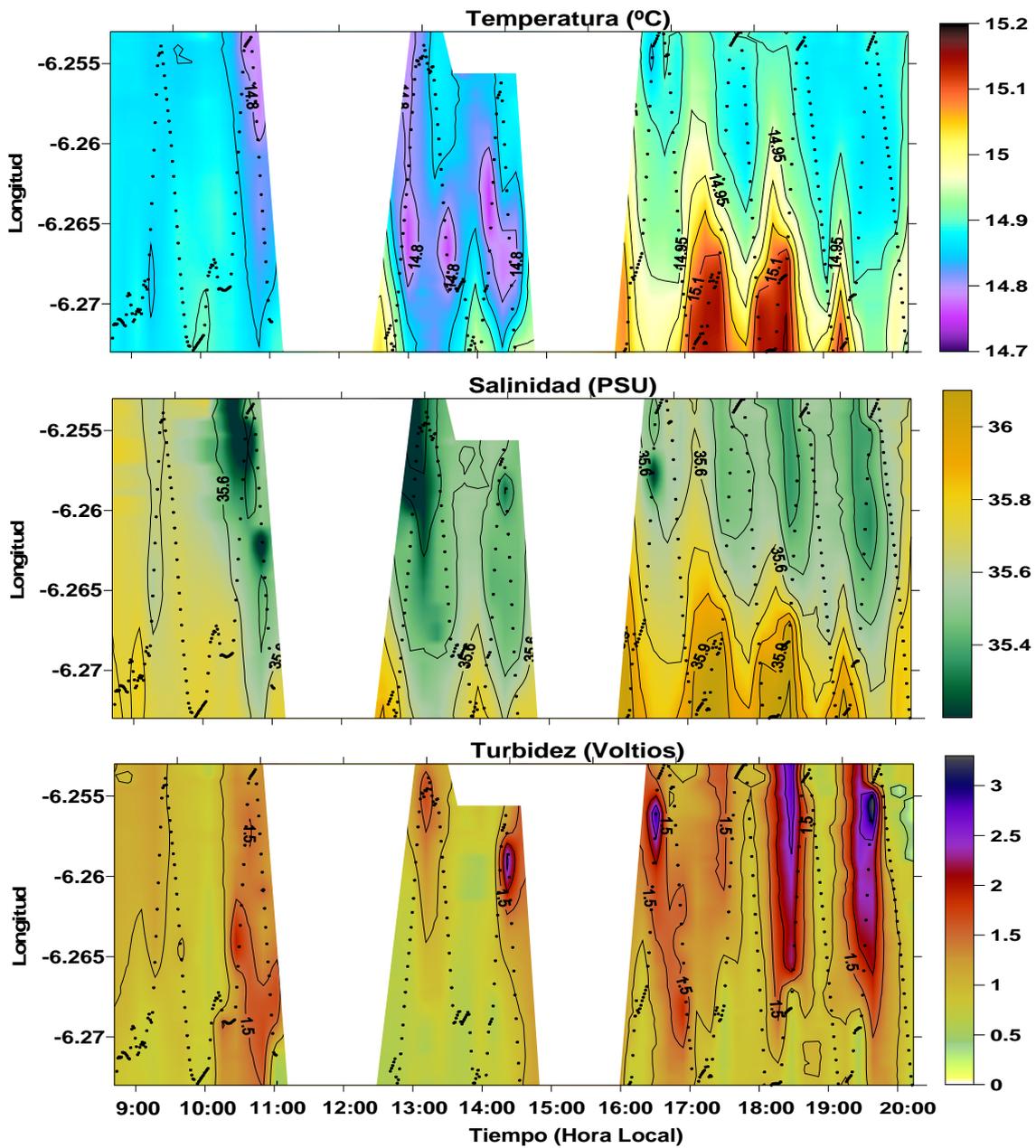


Figura 3.6. Distribución (Tiempo – Longitud) durante el muestreo. Las variables representadas son Temperatura (°C), Salinidad y Turbidez (v).

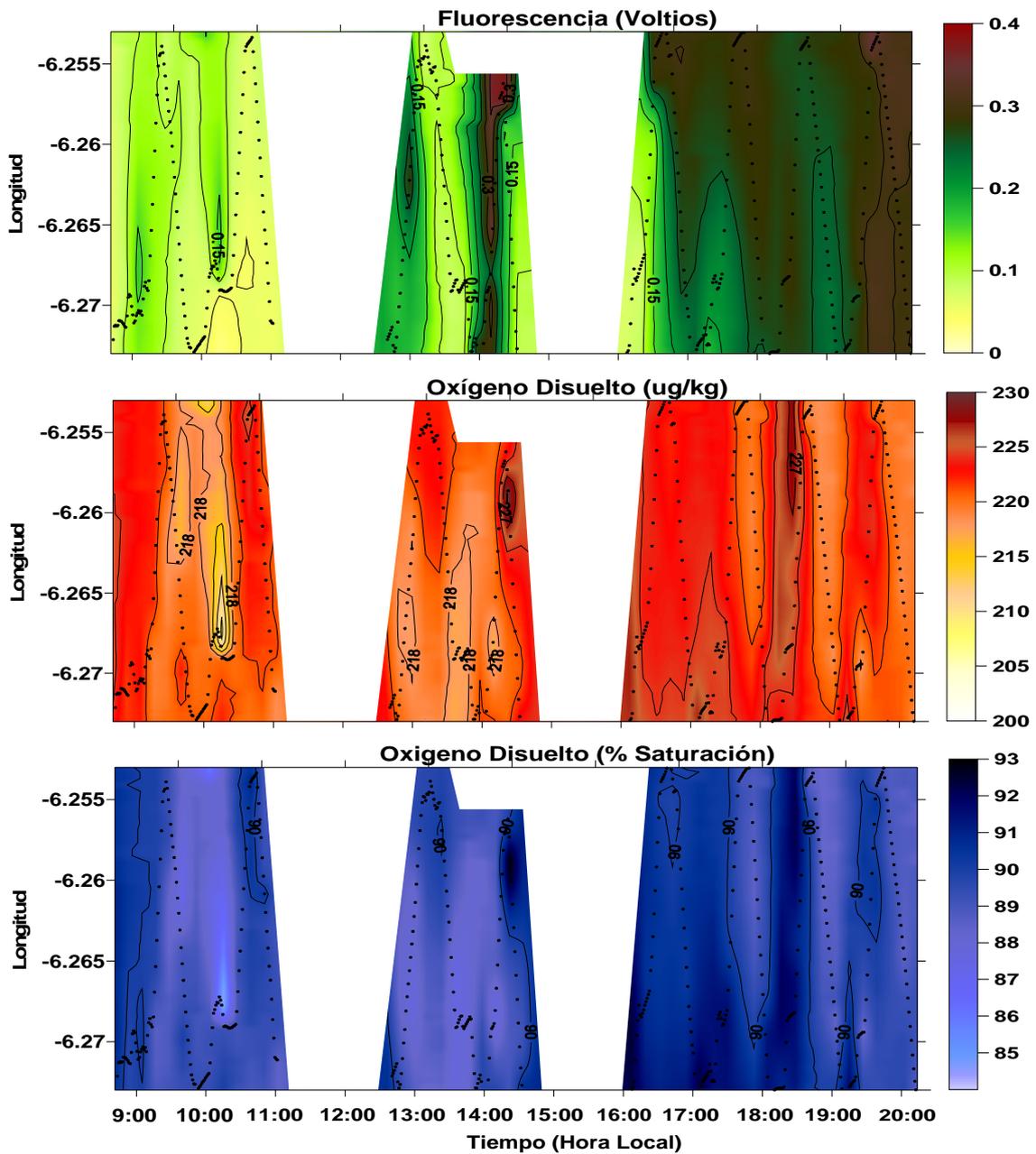


Figura 3.7. Distribución (Tiempo – Longitud) durante el muestreo. Las variables representadas son Fluorescencia (v), Oxígeno Disuelto ($\mu\text{mol/Kg}$) y Porcentaje de Saturación de OD (%).

3.2. Muestreo de los parámetros hidrológicos en la columna de agua

En las estaciones de muestreo A, B y C, y cada vez que se pasaba por ellas (ver Tabla Z), se realizó un perfil de las propiedades termohalinas hasta el fondo con una sonda CTD SBE19, que se largaba por la popa a una velocidad inferior a 1 m/s. Las características técnicas de dicho instrumento son:

Sensor	Rango	Precisión	Resolución	T. respuesta
Presión	0 – 7000 dbar	0.05%	0.03%	15 ms
Temperatura	-3 +33°C	0.003 °C	0.0005 °C	50 ms
Conductividad	0 – 70 mS/cm	0.003 ms/C	0.001 mS/cm	50 ms
Oxígeno	0 – 50 ppm	0.1 ppm	0.01 ppm	3 s

Tabla 3.3. Características técnicas del CTD (SBE19).



Figura 3.8. Fotografía del CTD19 entrando en el agua.

Con respecto a las propiedades termohalinas, se observa que estas cambian a lo largo de la marea.

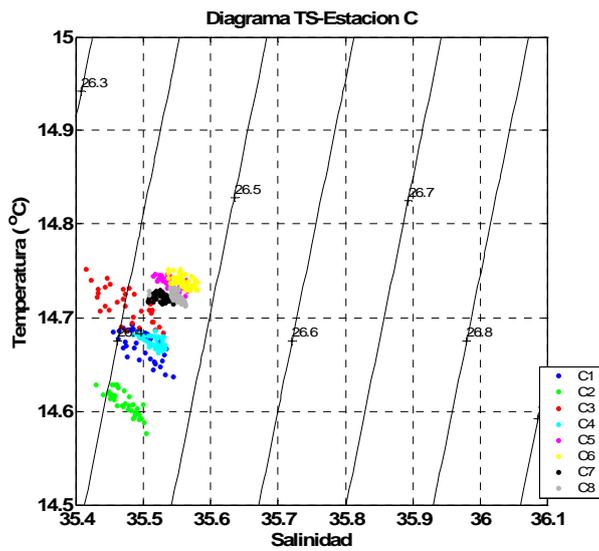
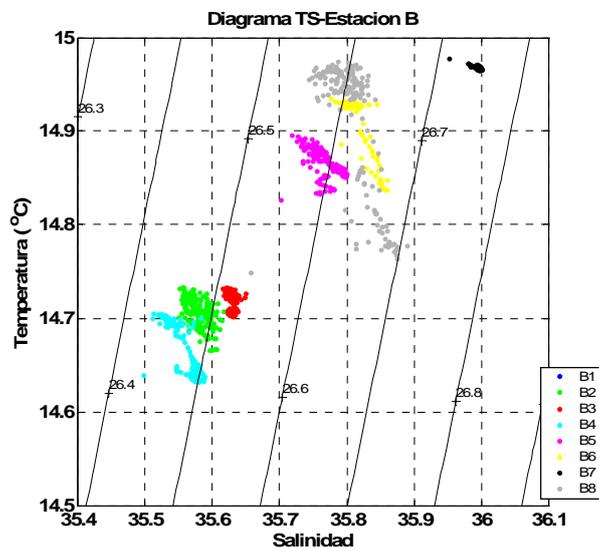
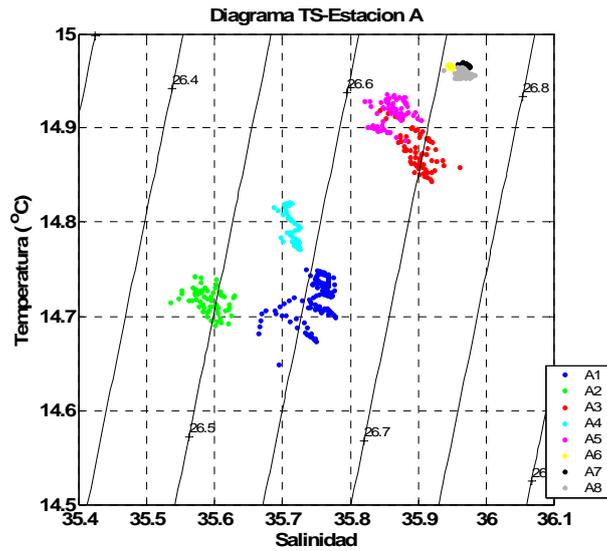


Figura 3.9. Diagramas T-S de los diferentes perfiles a lo largo del muestreo.

Los perfiles hidrológicos muestran como la columna de agua a lo largo de todo el muestreo se mantiene completamente mezclada, con las temperaturas más elevadas a última hora de la tarde, mientras que los mínimos de salinidad en la estación A y B se producen con la bajada de la marea. De forma general, la variabilidad en el rango de temperatura y salinidad en la estación cercana a la desembocadura del río San Pedro es menor que en el centro de la canal de navegación y en la estación cercana al muelle Delta.

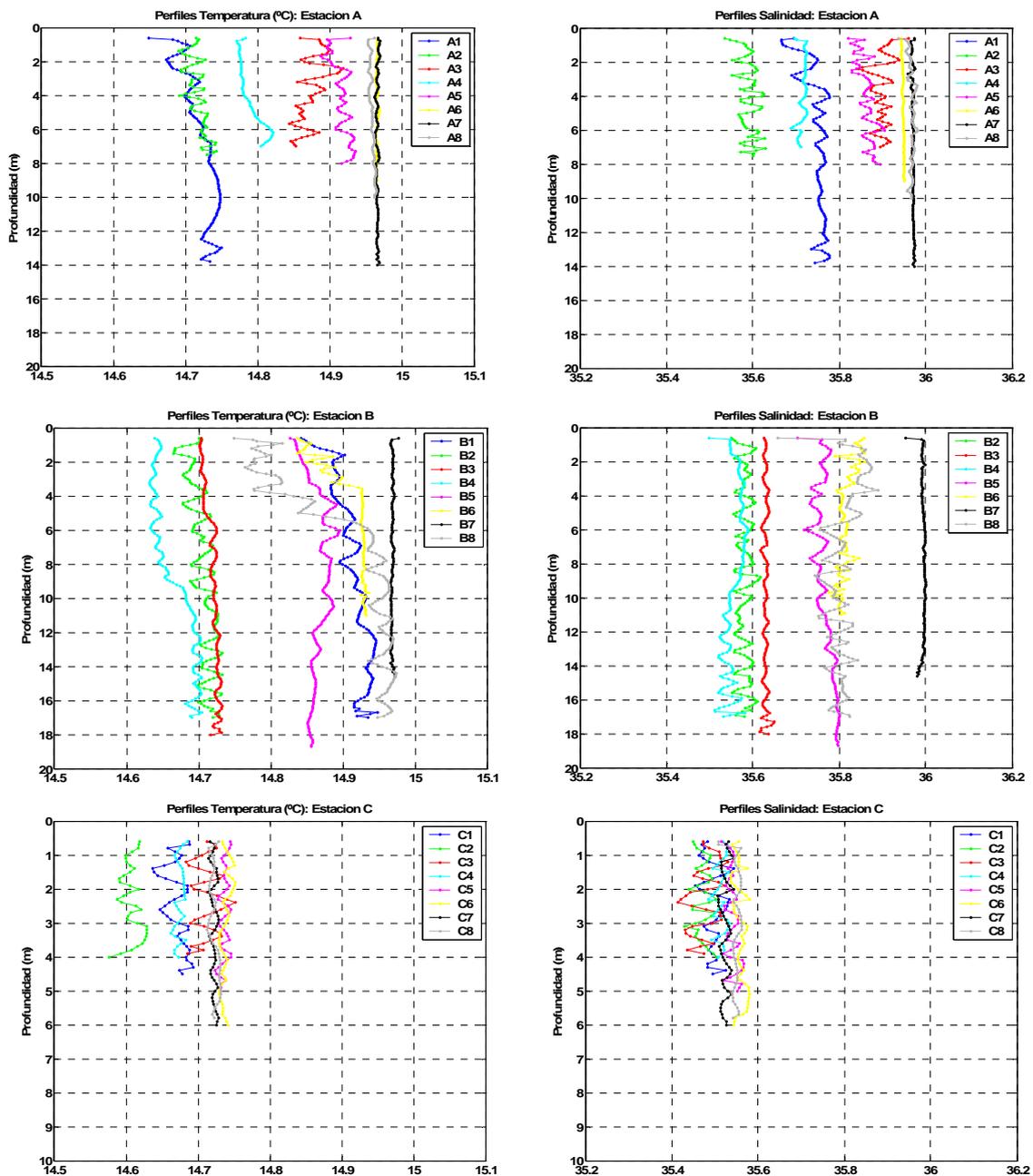


Figura 3.10. Perfiles de Temperatura (°C) y Salinidad en los puntos A, B y C a lo largo del muestreo.

3.3. Muestreo de las variables biogeoquímicas en la columna de agua

En las estaciones donde se realizó un perfil hidrológico, se obtenía agua de superficie con una botella oceanográfica Van Dorn. En dichas estaciones, se guardaba agua para el estudio de diferentes variables y de forma diferente. Las variables a medir fueron:

3.3.1. Nutrientes inorgánicos

Las concentraciones de nitrato, fosfato, nitrito y silicato se determinaron utilizando un autoanalizador *TRAACS 800* y siguiendo el método descrito por Grasshoff *et al.* (1983). La muestra fue previamente filtrada a través de filtros *Whatman GF/F* y se conservó a -20°C hasta su posterior análisis.

En la Figura 3.11 se observa el cambio de la concentración de nutrientes a lo largo del ciclo mareal para cada una de las tres estaciones de muestreo. De forma general se observa como los valores más altos de concentración de nutrientes se alcanzan en marea baja, coincidiendo con la salida del agua del saco de la bahía interna con mayor concentración de nutrientes que en la llenante, que el agua proviene del saco externo de la bahía, y por lo tanto con una carga menor de nutrientes. Estas concentraciones de nutrientes son elevadas, alcanzando concentraciones no limitantes para el crecimiento del fitoplancton.

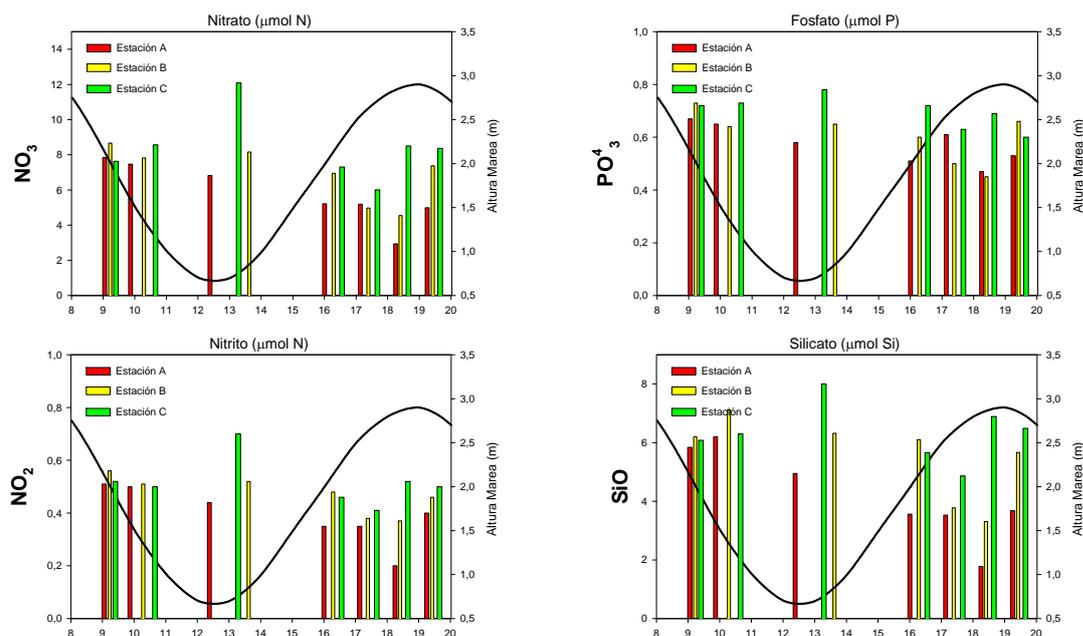


Figura 3.11. Distribución de nutrientes (Nitrato, Nitrito, Fosfato y Silicato) en los diferentes puntos de muestreo y a diferentes horas (eje x).

3.3.2. Sólidos en suspensión: Orgánicos e inorgánicos

Se determinó la concentración de sólidos en suspensión totales, así como los porcentajes de materia orgánica e inorgánica particulada. Para ello se filtraron 700 ml de muestra a través de filtros *Whatman GF/F* y se conservaron a -20°C hasta su posterior análisis por gravimetría. Con respecto a los sólidos, la estación C cercana al río San Pedro presentó mayor concentración de sólidos totales, orgánicos e inorgánicos.

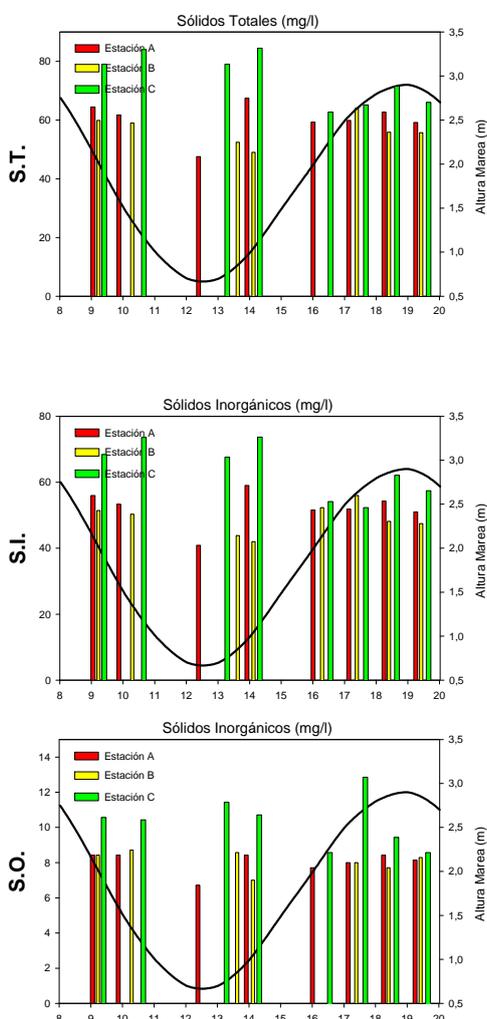


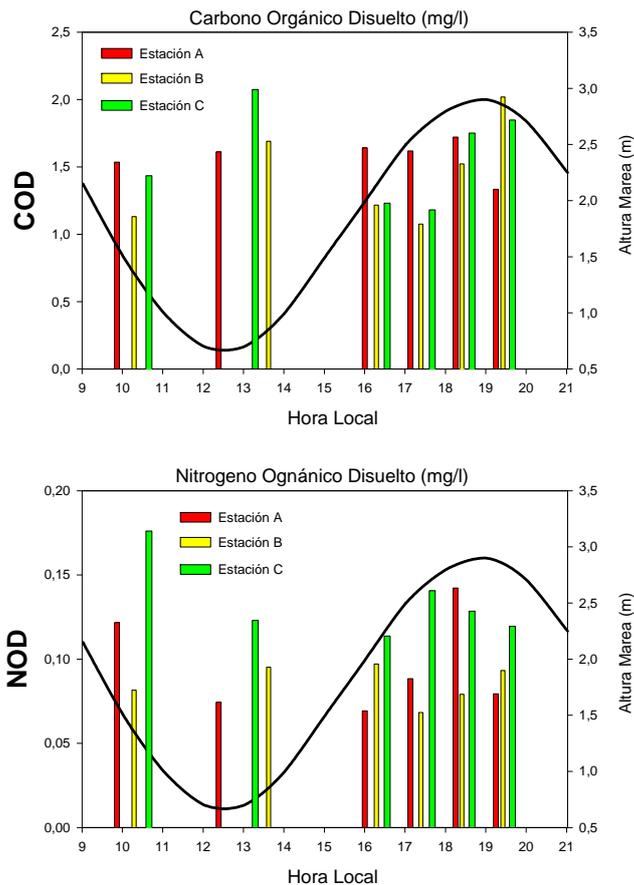
Figura 3.12. Distribución de sólidos totales, sólidos inorgánicos y orgánicos en los diferentes puntos de muestreo y a diferentes horas (eje x).

3.3.3. Carbono y nitrógeno orgánicos disueltos

Las muestras de agua para el posterior análisis del carbono orgánico disuelto (COD) y nitrógeno total (NT) se filtraron a través de filtros Whatman GF/F, se acidificaron con ácido fosfórico al 25 % con el fin de convertir las especies químicas del carbono inorgánico disuelto a CO₂ y se almacenaron en ampollas selladas a 4°C. Previamente a su análisis, se burbujearon con N₂ para eliminar el CO₂ procedente de la acidificación.

La determinación del COD y el NT se realizó con un analizador de materia orgánica modelo TOC-V Series Shimadzu, que aplica el método de oxidación catalítica a elevadas temperaturas (680 °C) para la medida de los compuestos de carbono orgánico y la quimioluminiscencia para los de nitrógeno. El procedimiento consiste básicamente en introducir la muestra en un tubo de combustión donde se quema la materia orgánica disuelta, de tal modo que todas las especies químicas de carbono se transforman a CO₂, que se detecta a través de infrarrojos no dispersivos (NDIR). La detección suministra una señal cuya área es proporcional a la concentración de carbono en la muestra y mediante la ecuación obtenida de una curva de calibración, se expresa matemáticamente la relación entre el área y la concentración de carbono. A través de un sistema de vacío de alto rendimiento, la corriente de gas procedente del detector de infrarrojos es conducida hacia una cámara de reacción donde los compuestos de nitrógeno de la muestra reaccionan con una corriente de ozono (O₃), generándose NO₂ excitado que transita a su estado fundamental. La radiación emitida en esta transición se detecta en un fotomultiplicador y es proporcional a la concentración de nitrógeno total. A estos valores se sustraen los correspondientes al nitrógeno inorgánico obtenidos mediante el autoanalizador Skalar, obteniéndose así la concentración de nitrógeno orgánico disuelto.

Los valores más altos de COD se alcanzan en la estación C coincidente con la bajamar, mientras que en la subida de la marea, los valores más altos de COD se alcanzan en la estación A cercana al muelle Delta. La concentración de COD en esta estación es muy constante a lo largo del ciclo mareal y no muestra mucha correlación con la hidrodinámica de la zona, tal como también se observa en otras variables como son los sólidos y los nutrientes inorgánicos.



3.3.4. Alcalinidad y presión parcial de CO₂

Las muestras de agua de mar para el posterior análisis de alcalinidad se recogieron en botellas de 300ml de borosilicato prelavadas con HCl al 10 % y se preservaron con una solución saturada de HgCl₂. La alcalinidad se midió mediante titulaciones potenciométricas con un valorador Metromh 794 de acuerdo con el método de Pérez *et al.*,(2000), determinándose previamente el pH de las muestras con un pHmetro modelo 780 de Metromh que contiene un sensor de pH con sonda de temperatura SGJ PT-1000, y cuya precisión es de +0.001. La presión parcial de CO₂ (*p*CO₂) en las muestras se calculó a partir de los valores de pH y alcalinidad, usando las ecuaciones termodinámicas del sistema de carbonatos (Dickson, 1981) y las constantes determinadas por Lueker *et al.* (2000) con una exactitud de ± 5 µatm.

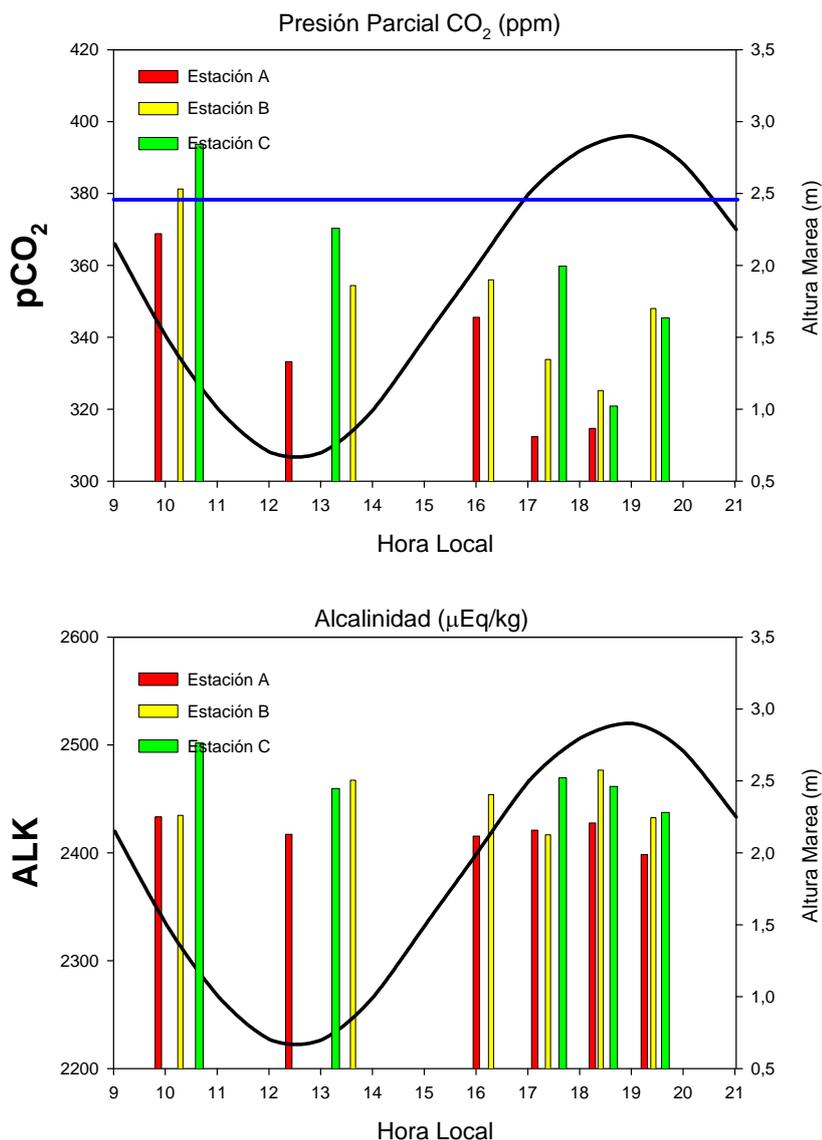
El intercambio de CO₂ entre el océano y la atmósfera se ha obtenido aplicando la siguiente ecuación:

$$F = 0.24k\alpha (p \text{ CO}_2 \text{ mar} - p \text{ CO}_2 \text{ aire})$$

Donde F es el flujo neto de CO_2 aire-mar ($\text{mmol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), k (cm h^{-1}) es el coeficiente de intercambio, α es la solubilidad de CO_2 en el agua de mar ($\text{mol}^{-1} \text{ atm}^{-1}$), $p\text{CO}_{2\text{mar}}$ es la presión parcial en la superficie del mar y $p\text{CO}_{2\text{aire}}$ representa la presión parcial de CO_2 atmosférico, estimada según Pérez *et al.*, (1998). Weiss (1974) establece una relación para α como una función de temperatura y salinidad. El efecto de la velocidad del aire y el coeficiente de extinción se ha calculado usando las ecuaciones dadas por Wolf y Torpe (1991), como indican Gago *et al.*, (2003) y el número de Schmidt ($Sc=2073.1-125.6+3.6^2-0.04t^3$) a través de las ecuaciones dadas por Wanninkoff (1992). La velocidad del viento media diaria procedía del INM (Instituto Nacional de Meteorología). Considerando un error de $\pm 1 \text{ ms}^{-1}$ en la velocidad del viento, $\pm 5 \mu\text{atm}$ en $p\text{CO}_2$ del mar y $\pm 1 \mu\text{atm}$ in $p\text{CO}_2$ del aire, el error estimado en F equivale a un 33%.

Las calibraciones se efectuaron usando Certified Referente Material (CRMs Batch #76), proporcionado por la Dr. A. Dickson Scripps Institution of Oceanography.

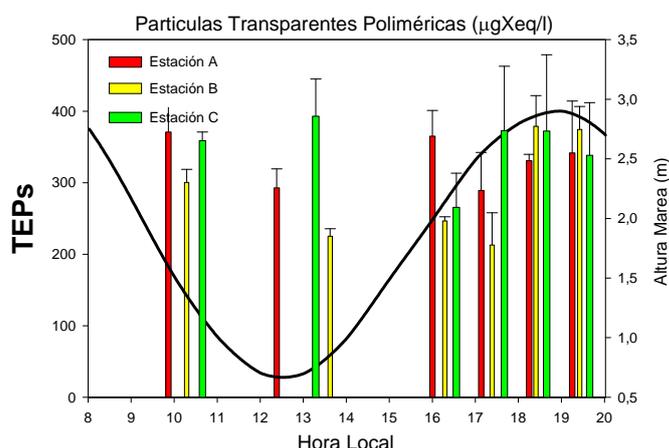
Los datos obtenidos nos indican que durante esta campaña la bahía de Cádiz actuó como un sumidero de CO_2 , comportándose de igual forma que el resto del golfo de Cádiz en esta época del año. Mientras que la $p\text{CO}_2$ tuvo un marcado carácter mareal, la concentración de carbono inorgánico vario en menor media y dicha concentración se mantuvo más constante a lo largo del ciclo mareal.



3.3.5. Partículas Transparentes Exopoliméricas (TEPs)

Las muestras tomadas (0.5 litros) para estimar la concentración de TEPs por el método colorimétrico (Passow y Alldredge, 1995) se fijaron durante la campaña con formol (filtrado por 0.2 μm), a una concentración final de 1% para su análisis posterior. El formol no interfiere con el ulterior procedimiento de tinción (Passow y Alldredge, 1994; Schuster y Herndl, 1995). Posteriormente, ya en el laboratorio, se filtraron 3 réplicas de 160 ml sobre filtros de policarbonato (*Poretics*) de 0.4 μm de tamaño de poro siguiendo el protocolo utilizado por Prieto *et al.*, (2002). Los TEPs se tiñeron sobre

el filtro usando 500 µl de solución Azul de Alciano al 0.02% en ácido acético al 0.06% (pH=2.6) durante menos de 2 segundos. Tras hacer pasar el colorante a través de los filtros, se filtraron 4 ml de agua destilada filtrada por 0.2 µm, se retiraron los filtros y sus caras inferiores se enjuagaron en una placa de petri con agua destilada para lavar el exceso de colorante. Posteriormente, los filtros se sumergieron 3 horas en una disolución de H₂SO₄ al 80%. La intensidad de color adquirida por la disolución en este extracto se medía en un espectrofotómetro a 787 nm. Se empleo Goma de Xantano para calibrar la solución de Azul de Alciano, y por tanto, los resultados están expresados en µg l⁻¹ equivalentes Goma de Xantano (µg l⁻¹). Los valores mas altos a lo largo del ciclo mareal se produjeron en la estación cercana al río San Pedro, siendo durante la bajamar el máximo de concentración.



3.3.6. Clorofila total y Fraccionada

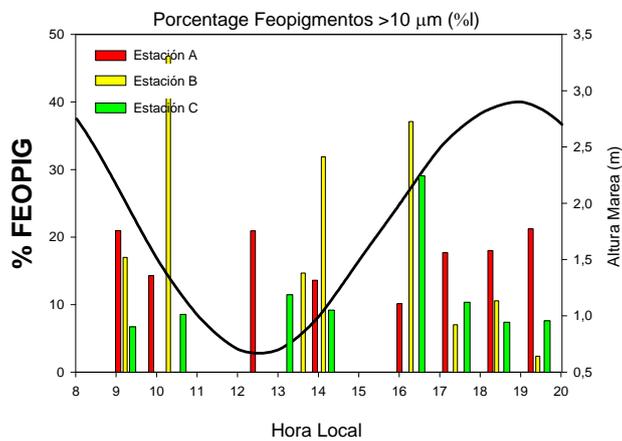
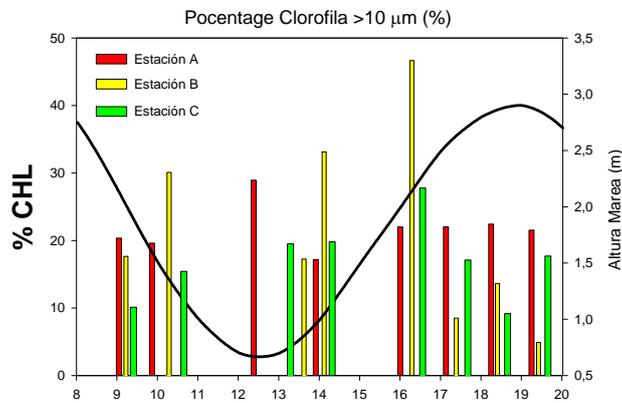
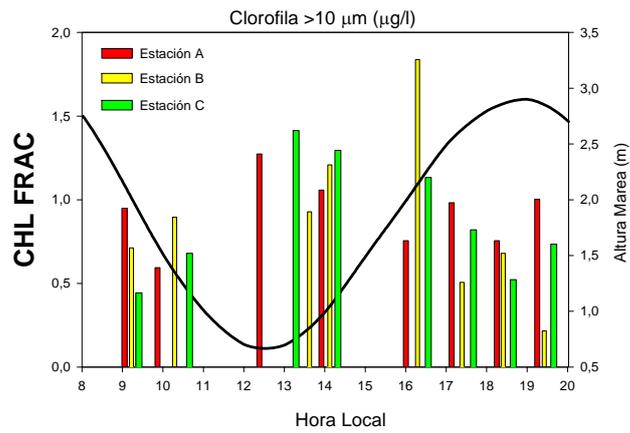
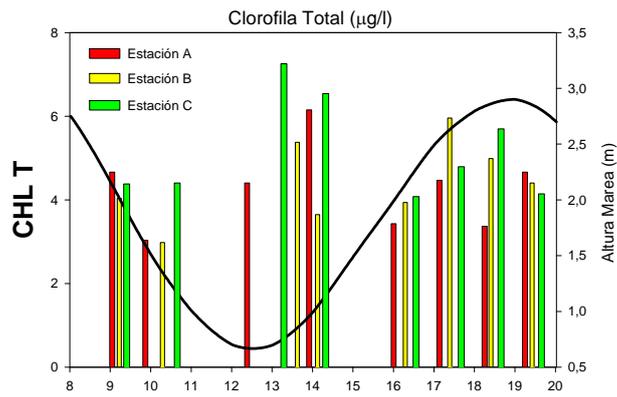
Para la medida de la clorofila total se filtraron 0.5 litros de agua a baja presión (<100 mm Hg) a través de filtros *Whatman* GF/F ($\approx 0.7 \mu\text{m}$) de 47 mm de diámetro. El filtro se envolvía en papel de aluminio y se congelaba hasta su posterior análisis. La extracción de la clorofila consistió en introducir el filtro en viales de vidrio y añadir 8 ml de acetona al 90 %, manteniendo dichos viales en frío y oscuridad. Tras 24 horas, se procedió a la lectura del extracto en un fluorímetro Turner Designs-10 mediante el método fluorométrico propuesto por Yentsch y Menzel (1963) y posteriormente modificado por Holm-Hansen *et al.*, (1965). Se realizó una segunda medida tras añadir

dos gotas de ácido clorhídrico (HCl) para estimar simultáneamente los feopigmentos. El fluorímetro se calibró días antes de la campaña con clorofila *a* pura, de manera que pudiera ser sensible a concentraciones bajas de clorofila.

Para determinar la cantidad de clorofila perteneciente a la fracción de organismos de tamaño >20 μm se filtraron 5 litros de agua a través de una malla de nylon de 20 μm de diámetro nominal de poro. El material retenido se recogía usando agua de mar previamente filtrada por 0.7 μm y posteriormente se filtraba a través de *Whatman* GF/F siguiendo el mismo protocolo que para la clorofila total. Los resultados de dicha variable se muestran en forma de porcentaje, calculado como:

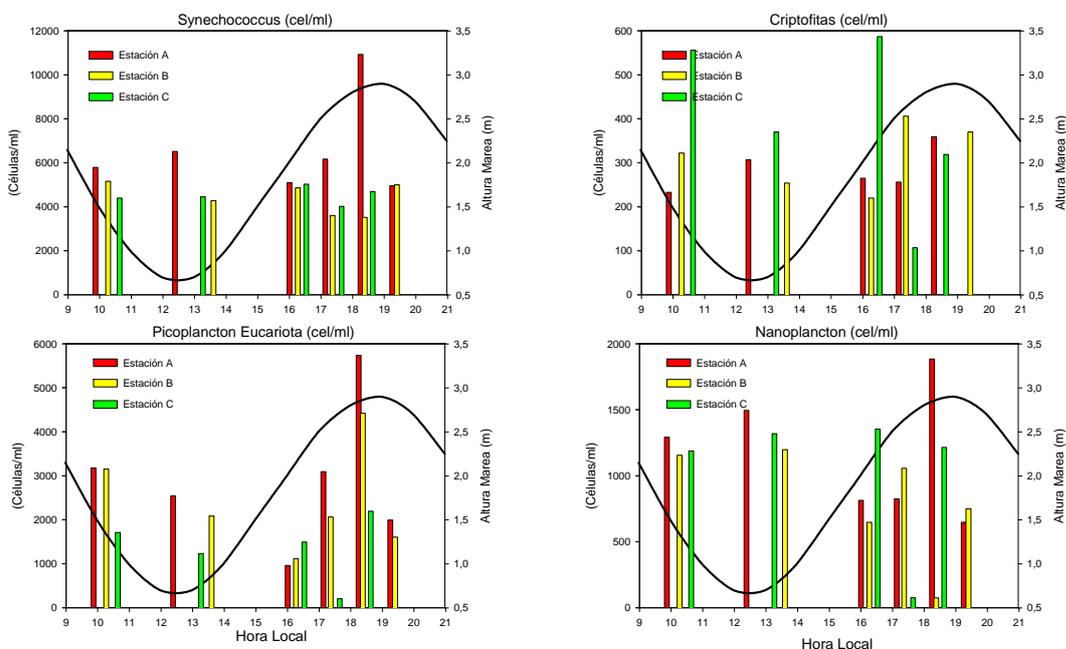
$$\text{Indice fraccionada (\%)} = \frac{\text{clorofila } > 20 \mu\text{m}}{\text{clorofila total}} * 100$$

Los valores de clorofila obtenidos varían entre 3 y 7, y siguiendo las recomendaciones de la ROM 5.1, estos valores quedan englobados en aguas con índice de calidad media alta, según la estación y hora de muestreo. En la mayoría del periodo de estudio, los máximos se alcanzan en la desembocadura del Río San Pedro, y coincidentes con la bajamar, cuando se produce la exportación de materia procedente de las zonas de marismas del río San Pedro, así como aguas procedentes del saco interno que hacen que los máximos de clorofila en el resto de estaciones se alcancen después de la bajamar.



3.3.7. Fitoplancton

Los valores de organismos fitoplanctónicos estimados mediante citometría de flujo muestran diferencias según la población de estudio. Con respecto a *Synechococcus*, Picoplancton y Nanoplancton, es en la estación del muelle Delta donde las concentraciones son mayores, sobre todo después de la bajamar. Sin embargo, la concentración mayor de Criptoficeas se alcanza en la estación cercana al río San Pedro. Todas las poblaciones muestran una variabilidad marcada a lo largo del ciclo mareal, indicativo de su relación con las masas de agua.



4. Bibliografía

Dickson, A.G., 1981. An exact definition of total alkalinity and a procedure for the estimation of alkalinity and inorganic total carbon from titration data. *Deep-Sea Res* 18, 609-23

Grasshoff. 1983. Procedures for the automated determination of seawater constituents. Pages 362-379 in Grasshoff, K., M. Ehrhardt, and K. Kremling, editors. *Methods of seawater analysis: second, revised and extended edition*. Verlag Chemie, Weinheim.

- Holm-Hanssen, O., Lorenzen, C.J., Homes, R.W., Strickland, J.D.H., 1965. fluorometric determination of chlorophyll *Journal du Conseil. Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer.* 187, 9–18.
- Hsu, C.G. y Locke, D.C. 1983. Digestion methods for determination of cadmium and lead in organic and silica-rich sediments. *Anal.Chem. Acta*, 153: 313-318.
- Loring D.H. y Rantala, R.T.T. 1992. Manual for the geochemical analysis of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth Sci.Rev.*, 32: 235-283.
- Mook, D.H. y Hoskin, C.M. 1982. Organic determination by ignition: caution advised. *Estuar.Coast.Shelf Sci.*, 15: 697-699.
- Passow, U., Alldredge, A.L., 1995a. A dye-binding assay for the spectrophotometric measurement of transparent exopolymer particles (TEP) in the ocean. *Limnology and Oceanography* 40, 1326–1335.
- Passow, U., Alldredge, A.L., 1994. Distribution, size and bacterial colonization of transparent exopolymer particles. *Marine Ecology Progress Series* 113, 185–198.
- Perez,F.F.,Ríos, A.F.,Castro,C.G.,Roson,G.,1998.Mixing analysis of nutrients, oxygen and dissolved inorganic carbon in the upper and middle North Atlantic Ocean east of the Azores. *J Mar Sys* 16, 219-233.
- Prieto, L., Ruiz, J., Echevarría, F., García, C.M., Gálvez, J.A., Bartual, A., Corzo, A., Maci´ as, D., 2002. Scales and processes in the aggregation of diatom blooms. High time resolution and wide size range records in a mesocosm study. *Deep-Sea Research I* 49, 1233–1253.
- Schuster, S., Herndl, G.J., 1995. Formation and significance of transparent exopolymer particles in the northern Adriatic Sea. *Marine Ecology Progress Series* 124, 227–236.
- Wanninkoff,R.,1992.Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *J Geophys Res* 97,7373-7382

Weiss, R.F.,1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non ideal gas, Mar Chem 2,203-215.

Wolf,D.K.,Thorpe,S.A.,1991.Bubbles and the air-sea exchange of gases in near saturation conditions. J Mar Res 49, 435-466.