
Proyecto Constructivo de rehabilitación del puente
internacional en Irún
(P.K. 20/929 de la línea Donostia – Hendaia de
E.T.S.)

Anejo – 06

Estudio de dinámica del litoral

Noviembre 2024

Hoja de control de calidad

Documento	Anejo 06: Estudio de dinámica del litoral		
Proyecto	SE9887. Proyecto Constructivo de rehabilitación del puente internacional de Irún (P.K. 20/929 de la línea Donostia – Hendaia de E.T.S.)		
Código	SE9887-PC-AN-06-DinamicaLitoral-D02.docx		
Autores:	Firma:	ANP	ANP
	Fecha:	07/05/2024	30/10/2024
Verificado	Firma:	JMH	JMH
	Fecha:	07/05/2024	08/11/2024

Índice:

1. INTRODUCCIÓN.....	1
APÉNDICE 1: ESTUDIO DE DINÁMICA DEL LITORAL	2

Anejo 06.- Estudio dinámica del litoral

1. INTRODUCCIÓN

Se ha evaluado la influencia de la obra sobre la dinámica del litoral del Bidasoa en el entorno del puente objeto de proyecto. El objetivo del estudio es justificar los requerimientos del Reglamento General de Costas, el cual requiere que las obras que se encuentren en la costa o puedan ejercer una influencia sobre la misma, deben contener una evaluación de los posibles efectos del cambio climático, así como un estudio básico de dinámica del litoral.

El estudio ha sido realizado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria y se presenta a continuación.

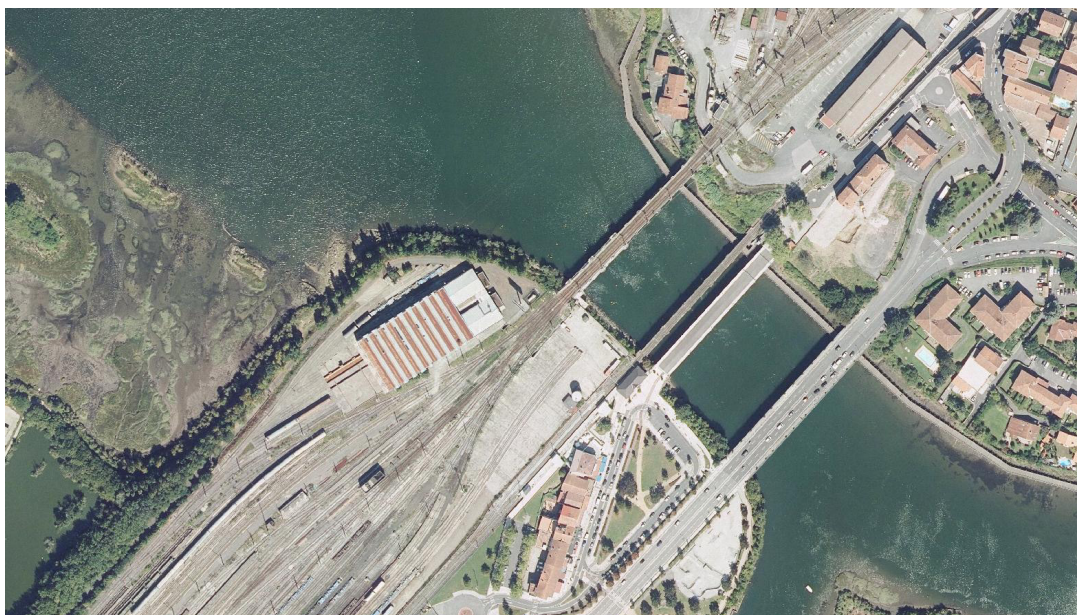
APÉNDICE 1: ESTUDIO DE DINÁMICA DEL LITORAL



IH cantabria

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

TYPSA



**ESTUDIO PARA EVALUAR LA AFECCIÓN A LA DINÁMICA
LITORAL DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO DE
REHABILITACIÓN DEL PUENTE INTERNACIONAL (IRÚN)**



ÍNDICE



ÍNDICE

1. ANTECEDENTES.	1
2. CONTENIDO DEL INFORME.	2
3. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE PARTIDA.	3
3.1. Introducción.	3
3.2. Zona de estudio.	3
3.3. Batimetría.	4
3.4. Datos meteo-oceánicos.	5
3.4.1. Mareógrafos.	5
3.4.2. Base de datos numérica de salinidad.	6
3.5. Aportes fluviales a la zona de estudio.	8
3.6. Granulometría de la zona de estudio.	8
3.7. Geometría actual y futura de la zona de estudio, así como durante la realización de la obra de rehabilitación.	9
3.8. Proyecciones del escenario de cambio climático SSP5-8.5 en el horizonte de 50 años.	9
4. MODELOS DE CÁLCULO.	11
4.1. Introducción.	11
4.2. Modelo numérico Delft3D-FLOW.	11
4.3. Modelo morfodinámico de la suite Delft3D.	11
5. ESTUDIO DE LOS REQUERIMIENTOS DEL REGLAMENTO GENERAL DE COSTAS.	13
5.1. Introducción.	13
5.2. Metodología.	13
5.3. Configuración del modelo numérico Delft3D en la zona de estudio.	15
5.4. Respuesta a los diferentes aspectos recogidos en el artículo 93 del Reglamento General de Costas.	17
5.4.1. A) Estudio de la capacidad de transporte litoral.	17
5.4.2. B) Balance sedimentario y evolución de la línea de costa, tanto anterior como previsible.	18
5.4.3. C) Clima marítimo, incluyendo estadísticas de oleaje y temporales direccionales y escalares.	19
5.4.4. D) Dinámicas resultantes de los efectos del cambio climático.	19
5.4.5. E) Batimetría hasta zonas del fondo que no resulten modificadas, y forma de equilibrio, en planta y perfil, del tramo de costas afectado.	20
5.4.6. F) Naturaleza geológica de los fondos.	20
5.4.7. G) Condiciones de la biosfera submarina y efectos sobre la misma de las actuaciones previstas en la forma que señala el artículo 88 e) de este reglamento.	20
5.4.8. H) Recursos disponibles de áridos y canteras y su idoneidad, previsión de dragados o trasvases de arenas.	21
5.4.9. I) Plan de seguimiento de las actuaciones previstas.	21
5.4.10. J) Propuesta para la minimización, en su caso, de la incidencia de las obras y posibles medidas correctoras y compensatorias.	21
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES.	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio.	3
Figura 2. Batimetría de la zona de estudio utilizada para alimentar los modelos numéricos.	4
Figura 3. Red de Mareógrafos d Puertos del Estado (REDMAR) (Fuente: http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx).	5
Figura 4. Función de distribución de probabilidad acumulada de carrera de marea astronómica del mareógrafo de Bilbao.	6
Figura 5. Dominio de la zona IBI (Fuente: http://www.myocean.eu.org).	7
Figura 6. Localización de los puntos de muestreo de sedimento en los trabajos de Solaun et al. (2009).	8
Figura 7. Geometría de la situación temporal con recinto de tablestacas en pilas 1 y 4 (a) y de la situación futura con encepados reforzados en pilas 1 y 4 y escollera en todas las pilas (b).	9
Figura 8. Proyecciones de aumento de nivel del mar (m) respecto los SSP-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Fuente: https://www.eea.europa.eu	10
Figura 9. Puntos de control donde se ha analizado la variación de nivel, velocidad, salinidad y transporte potencial, situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación proyectada en la ría del Bidasoa.	14
Figura 10. Mallas numéricas utilizadas en las simulaciones y detalle de la zona de ubicación donde está proyectado llevar a cabo la rehabilitación del puente internacional.	16
Figura 11. Evolución del nivel del mar en una onda de marea: a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación, b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación, c) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación y d) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.	17
Figura 12. Variación de la velocidad en una onda de marea (positiva en dirección aguas abajo y negativa en dirección aguas arriba): a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación, b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación, c) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación y d) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.	18
Figura 13. Transporte potencial en una onda de marea en el punto de control aguas abajo de la actuación: a) Marea media, b) Marea viva equinoccial.	18
Figura 14. Variación producida por los efectos del cambio climático (escenario SSP5-8.5) en una onda de marea viva equinoccial de: a) Nivel del mar en el punto de control aguas arriba de la actuación, b) Velocidad de la corriente en el punto de control aguas arriba de la actuación, c) Salinidad en el punto de control aguas arriba de la actuación y d) Transporte potencial en el punto de control aguas abajo de la actuación.	19

Figura 15. Variación de salinidad en una onda de marea: a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación, b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación, c) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación y d) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.
..... 20



MEMORIA



1. ANTECEDENTES.

En abril de 2024 se firma con TYPESA el contrato para la realización del “Estudio para evaluar la afección a la dinámica litoral del proyecto constructivo de rehabilitación del puente internacional (Irún)” cuyo objetivo es el de dar respuesta a los requerimientos del Reglamento General de Costas que, en su artículo 91 establece que las obras que se encuentren en la costa o puedan ejercer una influencia sobre la misma, deben contener una evaluación de los posibles efectos del cambio climático, así como un estudio básico de la dinámica litoral.

Los trabajos en los que se divide este estudio han sido realizados por los siguientes miembros de IHCantabria:

- Tamara Rodríguez Castillo, Doctora por la Universidad de Cantabria. Tecnóloga del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.
- Javier García Alba, Doctor por la Universidad de Cantabria. Tecnólogo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

En Santander, a 24 de abril de 2024

Fdo.: Javier García Alba

Tecnólogo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria

2. CONTENIDO DEL INFORME.

El presente informe "Estudio para evaluar la afección a la dinámica litoral del proyecto constructivo de rehabilitación del puente internacional (Irún)" se encuentra dividido en los capítulos que se listan a continuación:

- a) Capítulo 3: Recopilación y análisis de información de partida.
- b) Capítulo 4: Modelos de cálculo.
- c) Capítulo 5: Estudio de los requerimientos del artículo 91 del Reglamento General de Costas referentes a un análisis básico de la dinámica litoral, así como a los posibles efectos del cambio climático.
- d) Capítulo 6: Resumen y conclusiones.

3. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE PARTIDA.

3.1. Introducción.

En este apartado se recoge la información utilizada para la realización de este estudio, relacionada con los siguientes aspectos:

- Zona de estudio.
- Batimetría.
- Datos meteo-oceánicos.
- Aportes fluviales a la zona de estudio.
- Granulometría de la zona de estudio.
- Geometría de las actuaciones de rehabilitación del puente internacional.
- Proyecciones de cambio climático para el escenario SSP5-8.5, el más desfavorable en cuanto al aumento del nivel del mar, en el horizonte de 50 años.

3.2. Zona de estudio.

La zona de estudio se localiza en la ría del Bidasoa y, más concretamente, bajo los puentes internacionales (Irún) (véase la Figura 1).



Figura 1. Localización de la zona de estudio.

3.3. Batimetría.

La información sobre el fondo marino es clave en cualquier estudio que involucre el análisis de las corrientes marinas. En su viaje hacia la costa, las ondas largas están condicionadas por los forzamientos a los que son sometidas y por las irregularidades del fondo marino y la costa. En profundidades indefinidas son importantes las irregularidades a gran escala, como cañones o grandes cabos. Sin embargo, en profundidades intermedias y reducidas su comportamiento es un reflejo de la batimetría.

En este estudio la batimetría se ha obtenido a partir de la unión de la batimetría de la zona estuarina (ría del Bidasoa) proporcionada por la Dirección de Patrimonio Natural y Cambio Climático del Gobierno Vasco y de la batimetría de detalle proporcionada por TYPESA en las inmediaciones de la actuación de rehabilitación. En la Figura 2, se muestra la información batimétrica utilizada en este estudio.

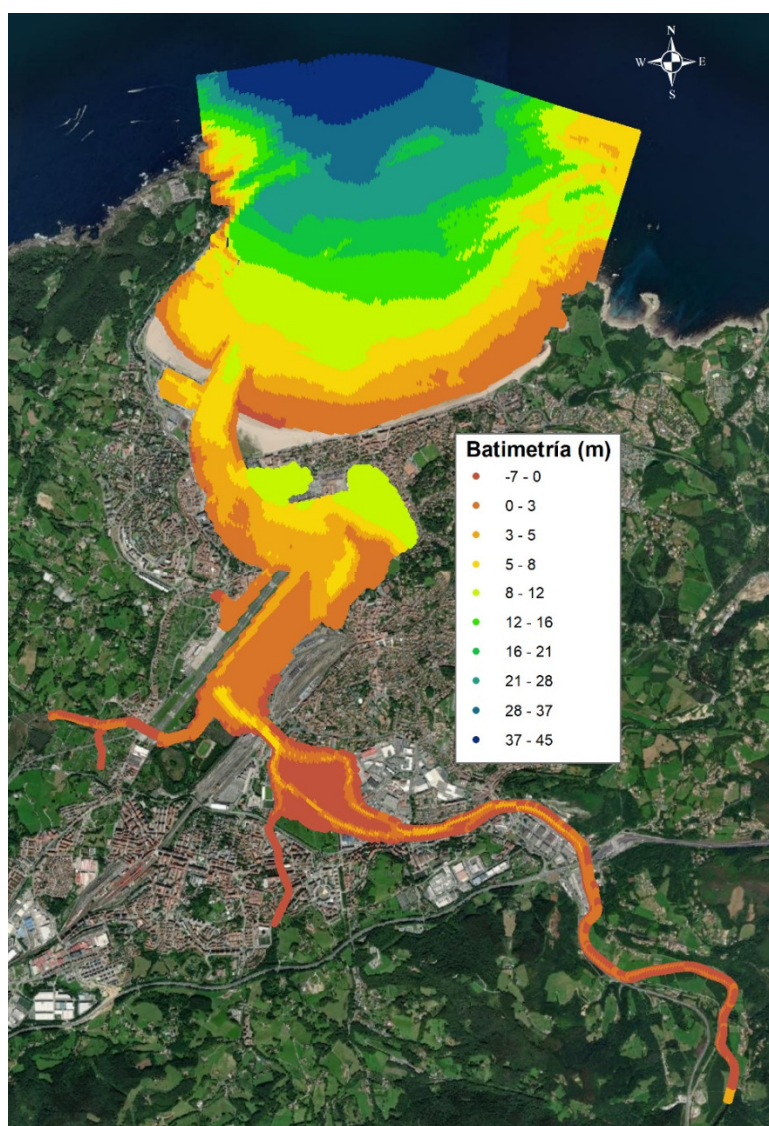


Figura 2. Batimetría de la zona de estudio utilizada para alimentar los modelos numéricos.

3.4. Datos meteo-oceánicos.

3.4.1. Mareógrafos.

En España existen varias instituciones que disponen de redes de mareógrafos, como, por ejemplo, el Instituto Español de Oceanografía (IEO), Puertos del Estado (PdE), el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

De todas ellas, Puertos del Estado ha desarrollado y mantiene tanto sistemas de medida como de previsión del medio marino con el objetivo fundamental de proporcionar al Sistema Portuario Español los datos océano-meteorológicos imprescindibles para su diseño y explotación, lo que permite reducir los costes y aumentar la eficiencia, sostenibilidad y seguridad de las operaciones portuarias.

El sistema consta de redes de medida (boyas, mareógrafos y radares de alta frecuencia), servicios de predicción (oleaje, nivel del mar, corrientes y temperatura del agua) y de conjuntos climáticos, que describen tanto el clima marítimo en la actualidad como sus escenarios de cambio en el siglo XXI.

De la red de mareógrafos de Puertos del Estado, el más próximo a la zona de estudio y, por tanto, el seleccionado para la realización del mismo es el mareógrafo de Bilbao (Figura 3). En la actualidad, la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR) consta de más de 30 estaciones operativas a lo largo de toda la costa peninsular e Islas Canarias (véase la Figura 3). Dichos mareógrafos están en general referidos al cero del puerto, es decir, a un nivel de referencia o cero conveniente establecido por cada puerto para la realización de obras, dragados, etc. Normalmente coincide con la mínima bajamar.



Figura 3. Red de Mareógrafos d Puertos del Estado (REDMAR) (Fuente: <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>).

En la Figura 4 se muestra la función de distribución de probabilidad acumulada de carrera de marea astronómica del mareógrafo de Bilbao, mareógrafo más cercano a la zona de estudio, junto con los datos de carrera de marea para tres percentiles significativos de la carrera de marea (P90, P50 y P25). Cabe señalar que la máxima amplitud de marea astronómica (marea viva equinoccial) presenta un valor de 2,423 m en la serie registrada en el mareógrafo de Bilbao.

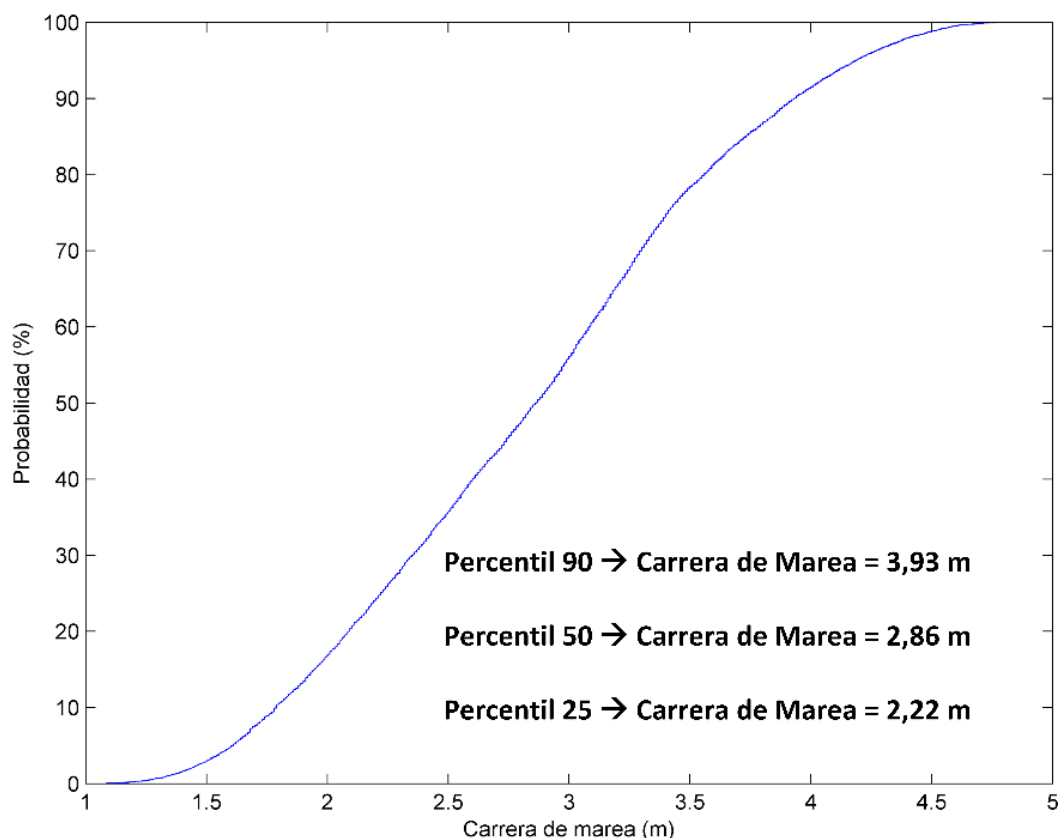


Figura 4. Función de distribución de probabilidad acumulada de carrera de marea astronómica del mareógrafo de Bilbao.

3.4.2. Base de datos numérica de salinidad.

Los datos oceanográficos de salinidad han sido proporcionados por el servicio europeo Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>). De esta forma, el sistema se ha anidado a CMEMS, obteniéndose así las condiciones de contorno. CMEMS es un proyecto de oceanografía operacional desarrollado por 61 instituciones de 29 países europeos con el objetivo de incrementar la capacidad europea de predicción y monitorización marina a través de la creación de un servicio pan-europeo de observación y predicción a escala global y regional. Como parte de su desarrollo se ha establecido un Sistema de Predicción Marina (SPM) que proporciona operacionalmente variables oceanográficas a nivel global y regional. CMEMS cuenta con un modelo global de resolución (1/12º) que se complementa con distintos sistemas regionales tales como el SPM de la zona IBI (Iberian-Biscay-Ireland Regional Seas) (véase la Figura 5).

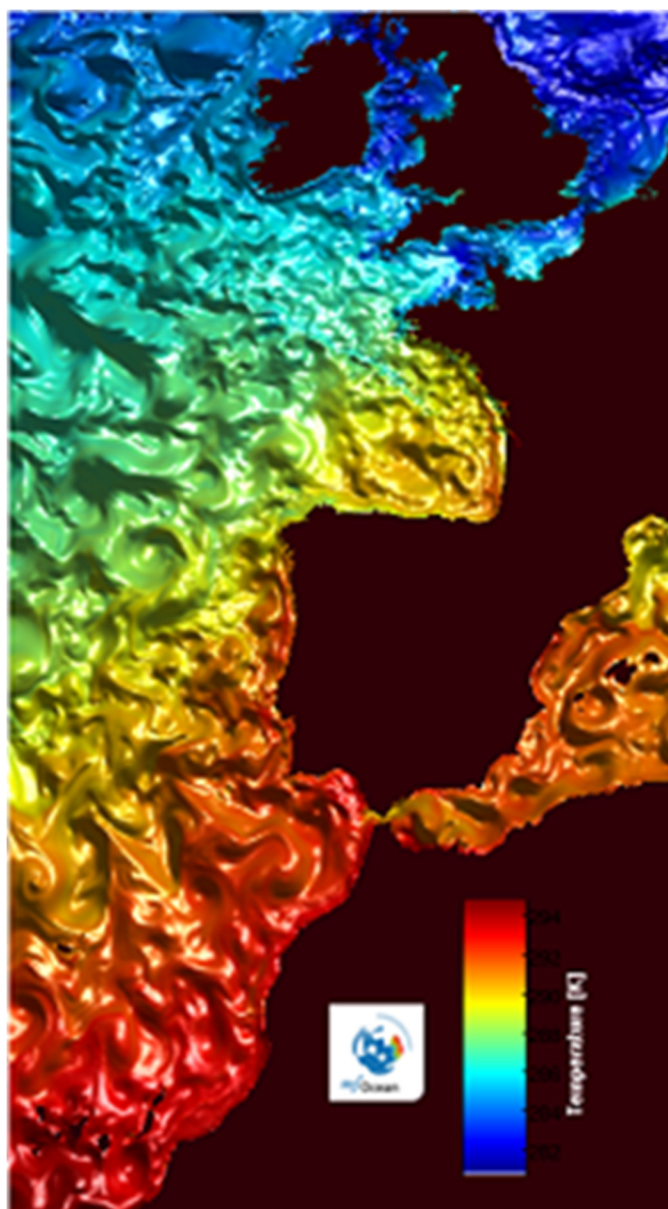


Figura 5. Dominio de la zona IBI (Fuente: <http://www.myocean.eu.org>).

En la zona IBI, Puertos del Estado y el Centro Francés Mercator-Ocean en colaboración con el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) son responsables del desarrollo del SPM. Este sistema de predicción está basado en la aplicación del modelo numérico de predicción oceánica NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean). La resolución espacial horizontal de la malla empleada es de $1/36^\circ$, es decir, aproximadamente 3.08 km y 50 niveles verticales en coordenada z, cubriendo profundidades desde la superficie hasta los 5000 metros de profundidad. La aplicación provee información de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar.

Para el desarrollo de este trabajo, se ha empleado el valor medio de los datos diarios de salinidad en la zona costera exterior a la ría del Bidasoa, que toma una magnitud de 35 psu, procedente del promedio de la información recogida en dicha ubicación en la base de datos histórica que posee CMEMS en la zona IBI (Iberian-Biscay-Ireland).

3.5. Aportes fluviales a la zona de estudio.

La ría del Bidasoa recibe los aportes fluviales del río Bidasoa que, de acuerdo con la información de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico, O.A. (www.chcantabrico.es), posee una cuenca hidrográfica que lo alimenta de 710 km² y presenta un caudal medio anual de 24,69 m³/s.

3.6. Granulometría de la zona de estudio.

La información granulométrica de la zona de estudio se ha obtenido de Solaun et al. (2009). En la Figura 6 se recoge la ubicación de los muestreos de sedimento tomados en dicho estudio en la ría del Bidasoa. Cabe señalar que el D50 promedio en la zona de estudio obtenido de dichos trabajos es de 109 micras.

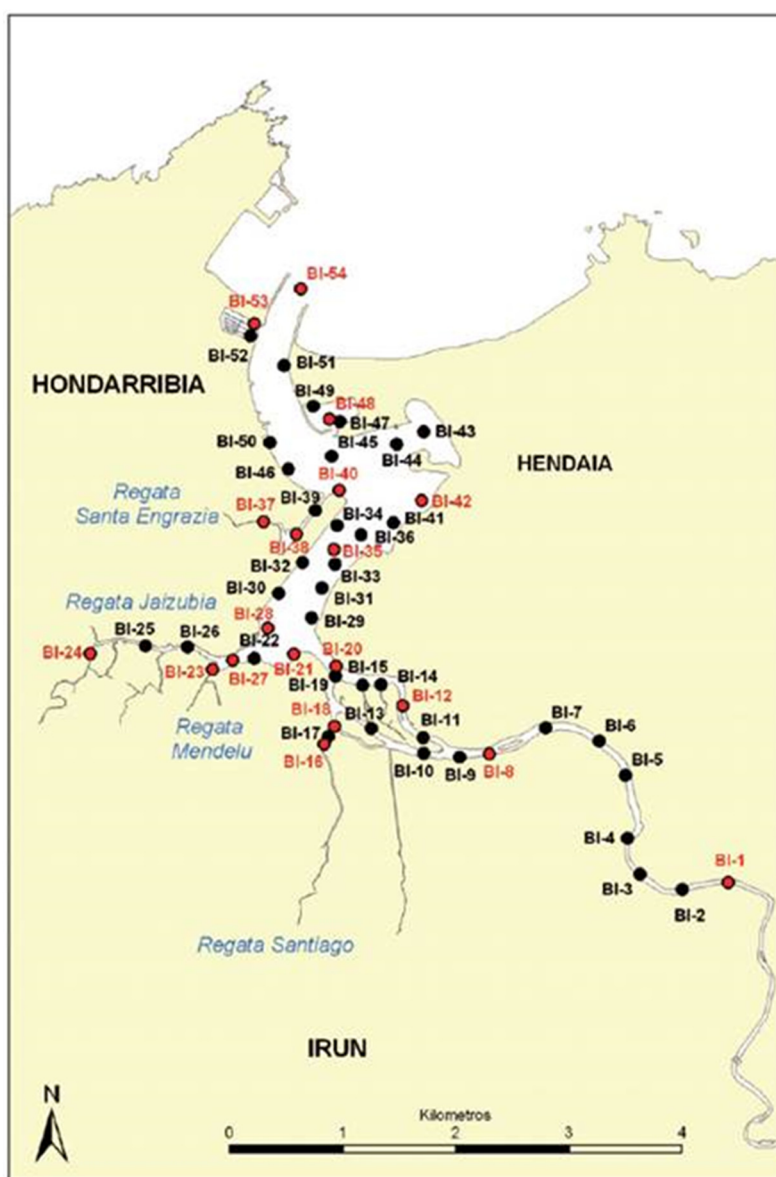


Figura 6. Localización de los puntos de muestreo de sedimento en los trabajos de Solaun et al. (2009).

3.7. Geometría actual y futura de la zona de estudio, así como durante la realización de la obra de rehabilitación.

La geometría actual del puente internacional de Irún en la zona de estudio, así como la geometría de la situación durante la obra (recinto de tablestacas de 19x19 m con esquinas chafladas y centrado en las pilas 1 y 4, Figura 7a) y la situación final tras las labores de rehabilitación (encepados reforzados 1 m en todo el perímetro de las pilas 1 y 4, junto con escollera de protección con talud 1:1 en todas las pilas, Figura 7b) han sido proporcionados por TYPESA (Figura 7).

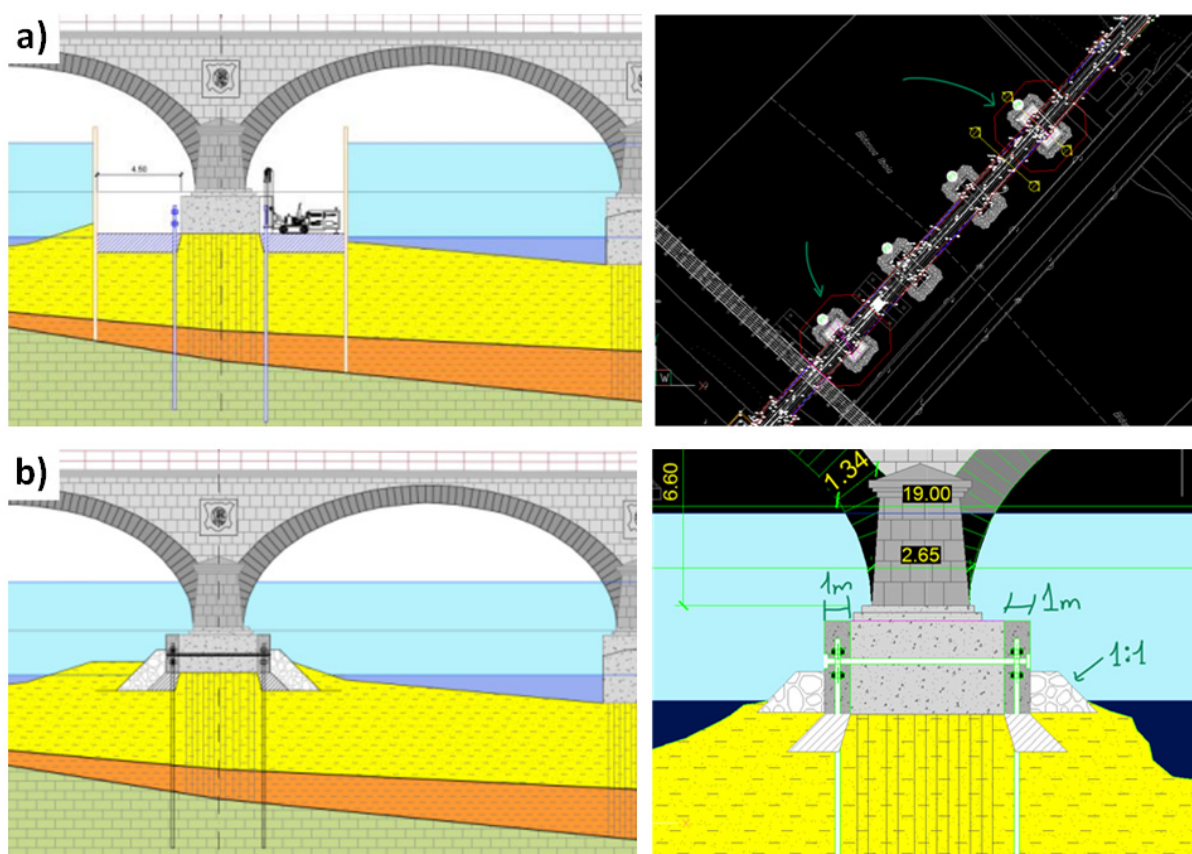


Figura 7. Geometría de la situación temporal con recinto de tablestacas en pilas 1 y 4 (a) y de la situación futura con encepados reforzados en pilas 1 y 4 y escollera en todas las pilas (b).

3.8. Proyecciones del escenario de cambio climático SSP5-8.5 en el horizonte de 50 años.

La información de aumento del nivel de mar en la zona de estudio se ha obtenido del visor web de la European Environment Agency (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/projected-global-mean-sea-level#tab-dashboard-01>). Para el escenario de cambio climático SSP5-8.5, el más desfavorable de todos, el incremento del nivel del mar toma un valor medio de 0,453 m para un horizonte de 50 años (véase la Figura 8).

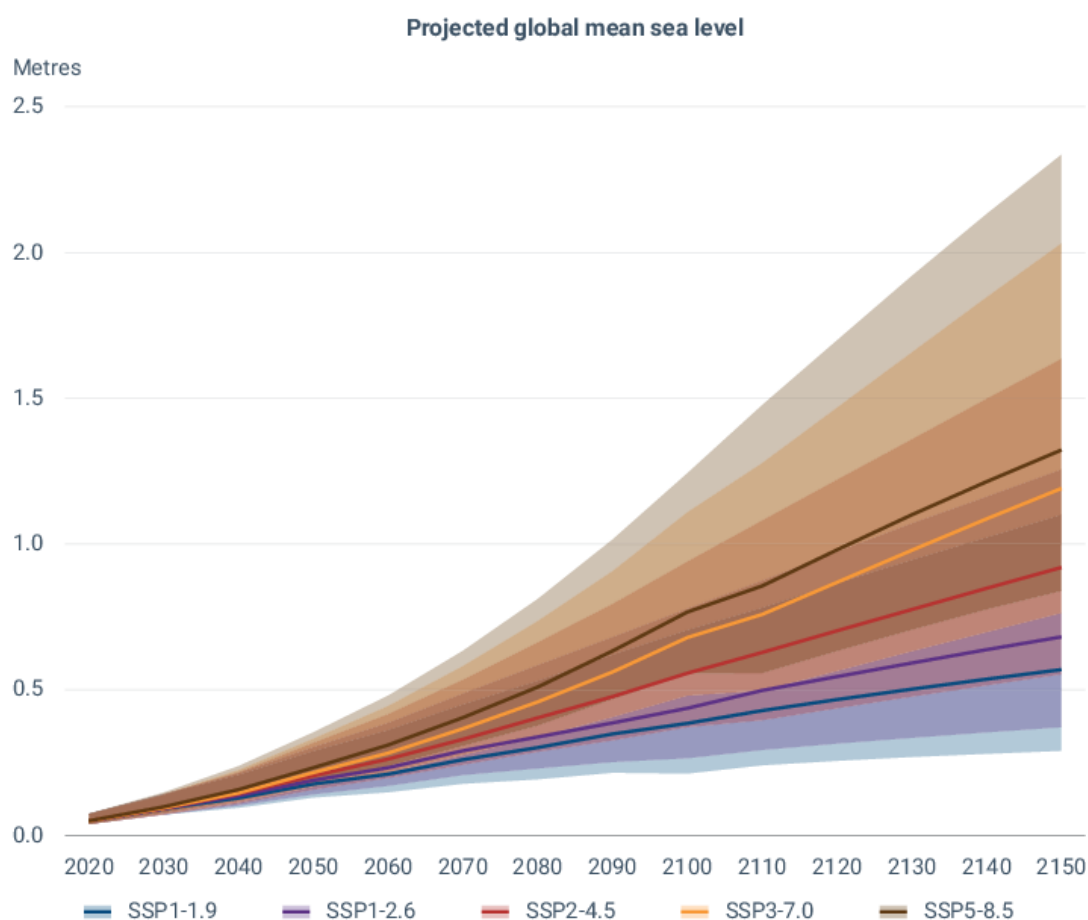


Figura 8. Proyecciones de aumento de nivel del mar (m) respecto los SSP-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.
Fuente: <https://www.eea.europa.eu>.

Por otro lado, la variación en el caudal del río Bidasoa bajo el escenario climático SSP5-8.5 en el horizonte de 50 años se ha obtenido a través de la Plataforma sobre Adaptación al Cambio Climático en España (AdapteCCa) (<https://www.adaptecca.es>). AdapteCCA es una iniciativa conjunta de la Oficina Española de Cambio Climático y la Fundación Biodiversidad, ambas del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. El caudal medio del río Bidasoa en el escenario de cambio climático SSP5-8.5 en el horizonte de 50 años, de acuerdo a los resultados de AdapteCCA, se reducirá en un 14%.

4. MODELOS DE CÁLCULO.

4.1. Introducción.

En este apartado se recoge la descripción de los modelos numéricos utilizados en este estudio y que se listan a continuación:

- Modelo numérico Delft3D-FLOW.
- Modelo morfodinámico de la suite Delft3D.

4.2. Modelo numérico Delft3D-FLOW.

Delft3D-FLOW es un sistema de modelado integrado de flujo y transporte orientado al medioambiente acuático que resuelve las ecuaciones no lineales 2D (promediado en profundidad) y 3D para aguas someras (shallow water equations). Las formulaciones matemáticas incluidas en el modelo permiten tener en cuenta los siguientes fenómenos físicos:

- Efectos de la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis).
- Efectos baroclínicos.
- Masas de turbulencia inducida y flujos de momentos (modelos de cierre turbulento).
- Transporte de salinidad, temperatura y otras sustancias conservativas.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.
- Variaciones espacial y temporal de la tensión tangencial del viento en la superficie de la masa de agua.
- Variaciones espaciales de la tensión tangencial en el fondo.
- Variaciones espacial y temporal de la presión atmosférica en la superficie.
- Variación temporal de fuentes y sumideros (i.e. descargas en ríos).
- Inundación y secado de llanuras mareales.
- Flujos de calor.
- Efecto del oleaje.
- Flujo sobre estructuras hidráulicas.

4.3. Modelo morfodinámico de la suite Delft3D.

El modelo Delft3D, incluye un módulo que calcula el transporte de sedimentos y los cambios morfológicos derivados del mismo. Mediante su aplicación, es posible el cálculo tanto del transporte de sólidos en suspensión, para material cohesivo como no cohesivo, como el transporte de material no cohesivo por fondo. Este módulo permite considerar diversas fracciones de sedimento, según tamaño y densidad, que no interactúan entre sí.

El transporte tridimensional de sólidos en suspensión se calcula mediante la resolución de la ecuación tridimensional de advección – difusión para sólidos en suspensión:

$$\frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(\ell)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(\ell)}}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s^{(\ell)})c^{(\ell)}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.1)$$

donde $c^{(\ell)}$ es la concentración de masa de la fracción de sedimento (ℓ) (kg/m^3), u, v, w son las componentes de la velocidad de flujo (m/s), $\varepsilon_{s,x}^{(\ell)}, \varepsilon_{s,y}^{(\ell)}, \varepsilon_{s,z}^{(\ell)}$ son los coeficientes de difusión de la fracción de sedimento (ℓ) (m^2/s) y $w_s^{(\ell)}$ es la velocidad de sedimentación de la fracción de sedimento (ℓ) (m/s).

El uso del módulo morfodinámico, introduce el efecto de las fracciones de sedimento para calcular la densidad del fluido mezcla de sedimento y agua ρ_{mix} . Este efecto sobre la densidad del agua, obtenida como función de la salinidad y temperatura en ausencia de sedimentos, es calculado con la siguiente relación cuando el medio presenta una cierta concentración de los mismos:

$$\rho_{mix}(S, c^{(\ell)}) = \rho_w(S) + \sum_{\ell=1}^{l_{sed}} c^{(\ell)} \left(1 - \frac{\rho_{mix}(S)}{\rho_s^{(\ell)}} \right) \quad (4.2)$$

donde S es la concentración de salinidad (ppt), $\rho_w(S)$ es la densidad específica del agua con una concentración de salinidad S (kg/m^3), $\rho_s^{(\ell)}$ es la densidad específica de la fracción de sedimento (ℓ) (kg/m^3) y l_{sed} es el número de fracciones de sedimento.

Según las características del material sólido transportado, el modelo Delft3D utiliza diferentes formulaciones para modelizar su transporte, siendo la característica diferencial el hecho de ser sedimento cohesivo o no cohesivo.

5. ESTUDIO DE LOS REQUERIMIENTOS DEL REGLAMENTO GENERAL DE COSTAS.

5.1. Introducción.

El Reglamento General de Costas recoge en su artículo 91 que las obras que se encuentren en la costa (se entiende que se incluye las zonas estuarinas) o puedan ejercer una influencia sobre la misma, deberán contener una evaluación de los posibles efectos del cambio climático, así como un estudio básico de la dinámica litoral.

A su vez, de acuerdo con el artículo 93 del Reglamento General de Costas, un estudio básico de dinámica litoral deberá comprender los siguientes aspectos:

- a) Estudio de la capacidad de transporte litoral.
- b) Balance sedimentario y evolución de la línea de costa, tanto anterior como previsible.
- c) Clima marítimo, incluyendo estadísticas de oleaje y temporales direccionales y escolares.
- d) Dinámicas resultantes de los efectos del cambio climático.
- e) Batimetría hasta zonas del fondo que no resulten modificadas, y forma de equilibrio, en planta y perfil, del tramo de costas afectado.
- f) Naturaleza geológica de los fondos.
- g) Condiciones de la biosfera submarina y efectos sobre la misma de las actuaciones previstas en la forma que señala el artículo 88 e) de este reglamento.
- h) Recursos disponibles de áridos y canteras y su idoneidad, previsión de dragados o trasvases de arenas.
- i) Plan de seguimiento de las actuaciones previstas.
- j) Propuesta para la minimización, en su caso, de la incidencia de las obras y posibles medidas correctoras y compensatorias.

A continuación, se recoge la metodología, así como los resultados de la misma para dar respuesta a cada uno de los aspectos recogidos en el artículo 93 del Reglamento General de Costas.

5.2. Metodología.

Con el fin de poder dar respuesta a los aspectos contemplados en el artículo 93 del Reglamento General de Costas recogidos en el subapartado anterior, es preciso obtener las características de las corrientes, nivel del mar, salinidad y transporte potencial de sedimento a la escala requerida por este estudio (local). Para ello, es necesario aplicar una metodología que utilice las mejores bases de datos disponibles, tanto instrumentales como numéricas, y modelos numéricos que sean capaces de reproducir las corrientes generadas por las dinámicas relevantes en la zona de estudio: marea y aportes fluviales.

Para dar respuesta al punto a) del artículo 93 comentado anteriormente, referente al estudio de la capacidad de transporte litoral, se han llevado a cabo los siguientes trabajos:

- En primer lugar, se ha analizado la variación del patrón circulatorio en una situación fruto de la combinación de un caudal medio del río que afluye a la ría del Bidasoa y de dos mareas diferentes, una marea media y una marea viva equinoccial, en la zona de estudio con modelado numérico bidimensional, analizando la situación inicial del tramo de cauce, durante las obras de rehabilitación del puente internacional, así como una acabadas las obras (situación futura). A través de los resultados de esta modelización se ha evaluado la diferencia de niveles y velocidades aguas arriba y aguas abajo de la zona donde se llevará a cabo la actuación entre las 3 situaciones (antes de la obra, durante la obra y después de la obra) en dos puntos de control situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación (Figura 9).



Figura 9. Puntos de control donde se ha analizado la variación de nivel, velocidad, salinidad y transporte potencial, situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación proyectada en la ría del Bidasoa.

- Los resultados hidrodinámicos se han empleado para alimentar un modelo de transporte potencial de sedimento con el que se ha evaluado si la obra proyectada generará alguna modificación sobre el transporte litoral en términos de transporte potencial de sedimento en el punto de control situado aguas abajo de dicha obra, con el fin de dar respuesta al Reglamento General de Costas.

A su vez, para dar respuesta al punto d) de efectos de cambio climático del artículo 93, se han analizado los escenarios hidromorfodinámicos considerados (antes y después de la obra) bajo el escenario de cambio climático SSP5-8.5 en el horizonte de 50 años, tal y como recoge el reglamento citado anteriormente, evaluándose las diferencias respecto de la situación climática actual. Cabe señalar que se ha tenido en cuenta la variación generada

en el caudal medio del río y el aumento del nivel del mar de acuerdo al SSP5-8.5, información que se recoge en el apartado de datos de partida de este documento. Además, debe ser mencionado que el posible efecto del cambio climático se ha analizado en los casos forzados con la marea viva equinoccial.

Por último, con el fin de evaluar posibles efectos sobre la biosfera marina (punto g) del artículo 93 antes citado, se ha evaluado si existen modificaciones en la concentración de salinidad en la zona de estudio en los puntos de control situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación, que pudieran alterar el ecosistema en las tres fases de la obra, tanto en la situación actual como en el escenario de cambio climático.

Cada uno de los casos hidrodinámicos se ha calculado con el modelo hidrodinámico Delft3D (Roelvink y van Banning, 1994; WL/Delft Hydraulics, 2006), que se ha configurado en la zona de estudio en modo bidimensional. El modelado del transporte potencial se ha realizado con la aplicación de la formulación de Van Rijn (1993), incluido en el modelo Delft3D.

Los casos hidrodinámicos se han simulado durante un periodo de 6 días, quedándonos con las 12 últimas horas para garantizar la estabilidad numérica de los resultados del modelo y poder analizar la variación de las magnitudes estudiadas durante una onda de marea.

5.3. Configuración del modelo numérico Delft3D en la zona de estudio.

El modelo numérico en la zona estudio está formado por el anidamiento entre dos mallas de cálculo (véase la Figura 10). La primera de las mallas, con una resolución espacial más grosera de 10m, contempla la ría del Bidasoa y su zona costera adyacente, presentando una extensión de 256x529 celdas en la dirección X e Y. Esta malla se ha anidado a una malla de 1 metro de resolución espacial que cubre la totalidad de zona de estudio con una extensión de 222x442 celdas.

El estudio de la propagación de la onda de marea, dado que la zona de estudio es un área somera, se ha considerado un problema bidimensional, es decir, sólo se ha definido una capa en la coordenada vertical.

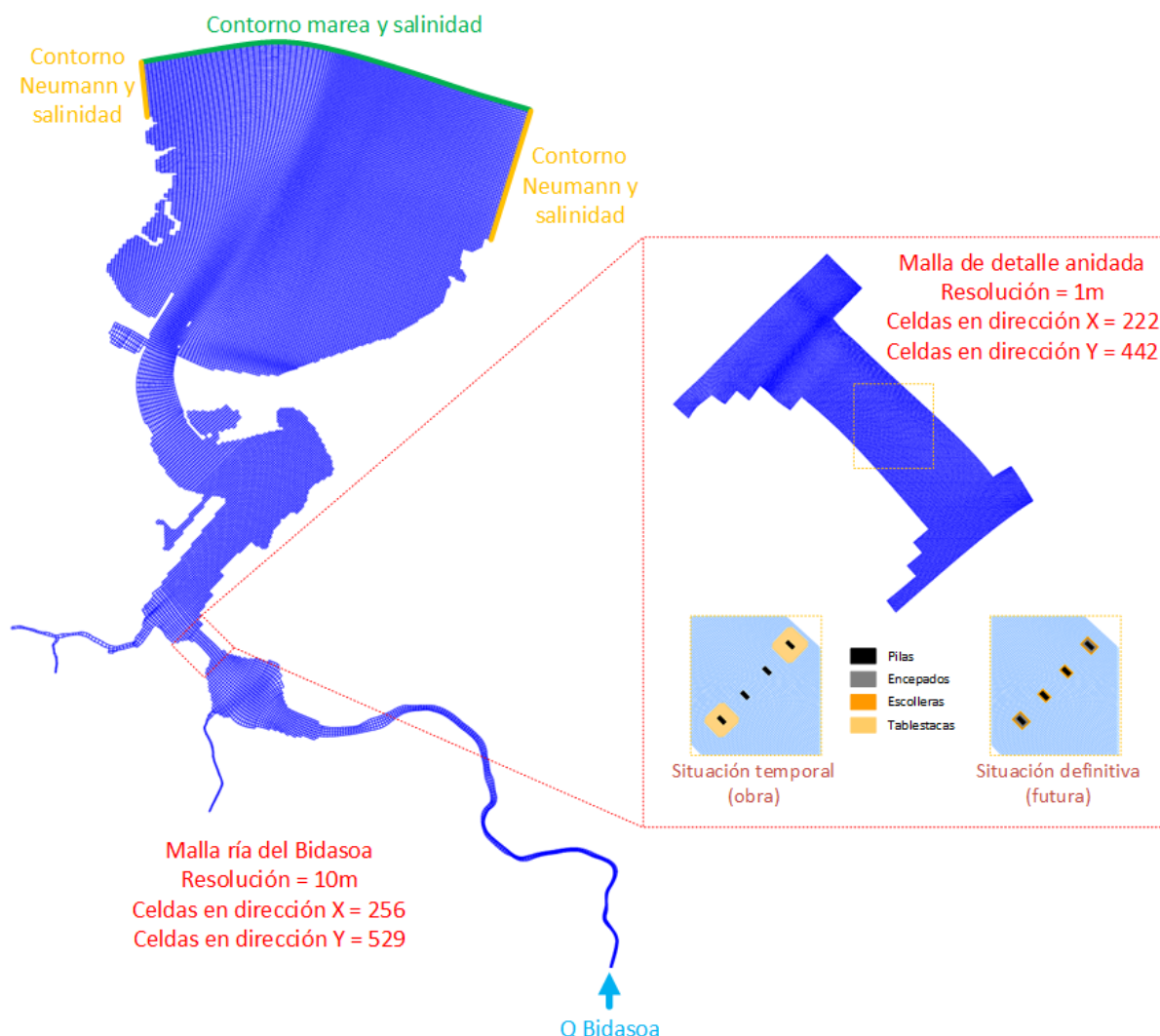


Figura 10. Mallas numéricas utilizadas en las simulaciones y detalle de la zona de ubicación donde está proyectado llevar a cabo la rehabilitación del puente internacional.

El contorno que simula la entrada de la marea se ha forzado con una condición de marea media (carrera de marea de 2,46 m) y marea viva equinoccial (carrera de marea de 4,85 m) obtenida del Mareógrafo de Bilbao comentado anteriormente. La salinidad en dichos contornos, además de en los contornos de Neumann adyacentes (necesarios para el funcionamiento del contorno de marea) ha tomado un valor constante de 35 psu. Por otro lado, el contorno fluvial se ha modelado con un caudal medio constante para la condición de entrada del río Bidasoa de 24,69 m³/s, así como una salinidad constante de 0 psu.

Por último, es importante mencionar que el efecto del fondo se ha modelado mediante el uso de un coeficiente de fricción del fondo de acuerdo a la formulación de Manning (n), estableciéndose un valor de $n=0,02$.

5.4. Respuesta a los diferentes aspectos recogidos en el artículo 93 del Reglamento General de Costas.

5.4.1. A) Estudio de la capacidad de transporte litoral.

La posible afección al transporte litoral debido a la actuación proyectada en la ría del Bidasoa se ha evaluado mediante el análisis de la variación del nivel del mar, velocidad y transporte potencial de sedimento a lo largo de una onda de marea en los puntos de control situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación. Esta variación se recoge de la Figura 11 a la Figura 13.

Como puede apreciarse en estas figuras, tanto la situación actual como la situación con obra y la situación futura apenas presentan diferencias de nivel del mar, velocidad y transporte potencial aguas arriba y aguas abajo de la actuación proyectada en la ría del Bidasoa durante una onda de marea (ya sea una marea media o una marea viva equinoccial). Por ello, la alteración sobre la capacidad de transporte litoral de la actuación proyectada se considera despreciable.

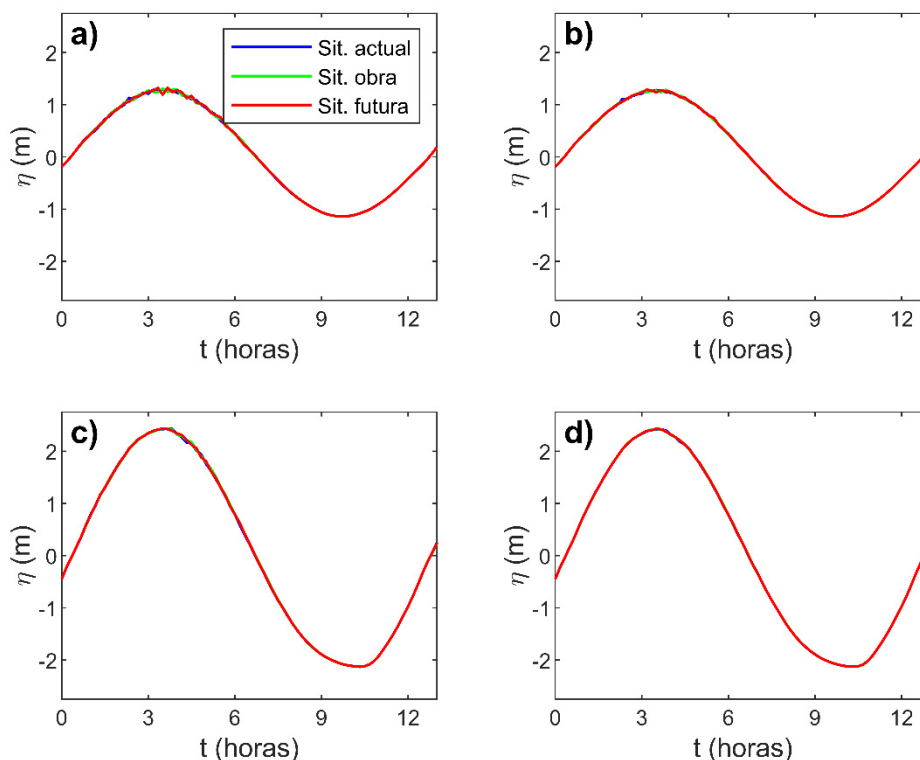


Figura 11. Evolución del nivel del mar en una onda de marea: a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación, b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación, c) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación y d) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.

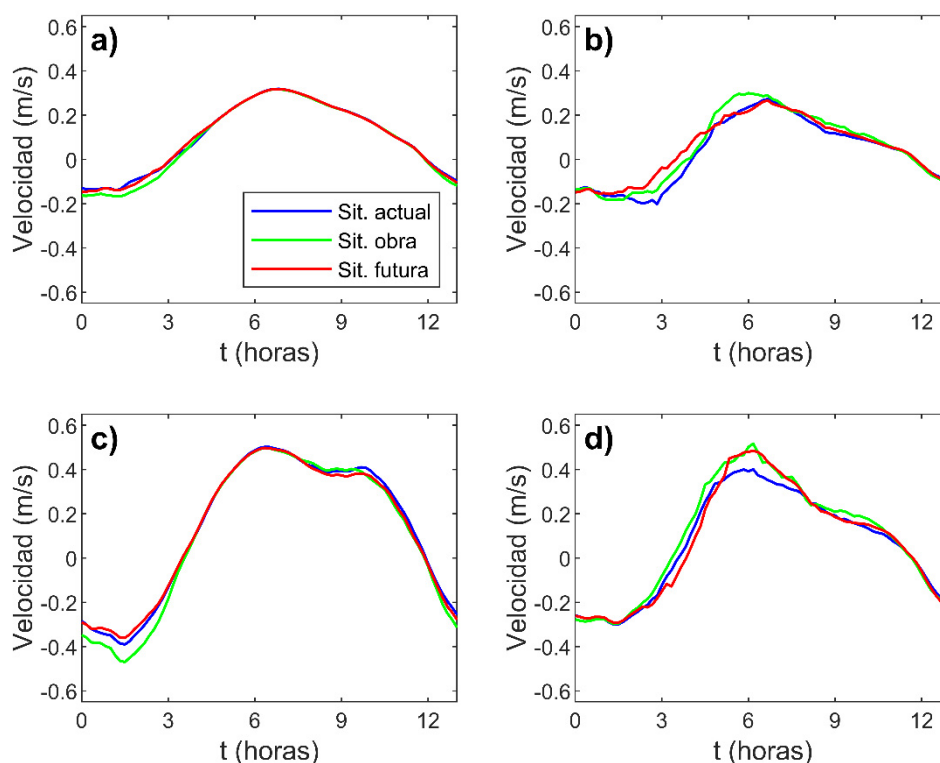


Figura 12. Variación de la velocidad en una onda de marea (positiva en dirección aguas abajo y negativa en dirección aguas arriba): a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación, b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación, c) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación y d) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.

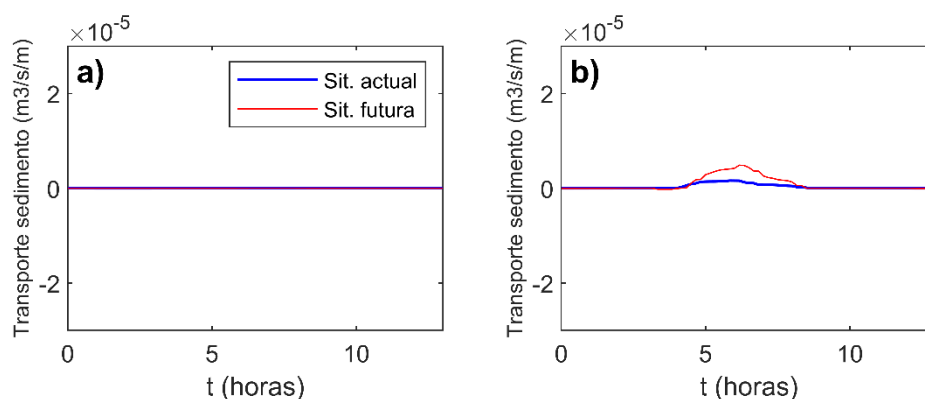


Figura 13. Transporte potencial en una onda de marea en el punto de control aguas abajo de la actuación: a) Marea media, b) Marea viva equinoccial.

5.4.2. B) Balance sedimentario y evolución de la línea de costa, tanto anterior como previsible.

No existe variación en el transporte potencial, luego no es necesario evaluar este aspecto.

5.4.3. C) Clima marítimo, incluyendo estadísticas de oleaje y temporales direccionales y escalares.

Teniendo en cuenta la localización de la zona donde se plantea la actuación, situada en el área interior de la ría del Bidasoa, este aspecto no es de aplicación y por ello no se analiza.

5.4.4. D) Dinámicas resultantes de los efectos del cambio climático.

En la Figura 14 se muestra el efecto del cambio climático, estudiando para este caso el escenario SSP5-8.5, sobre la situación futura (tras las obras). Cabe señalar que en el apartado de capacidad de transporte litoral se ha evidenciado, de acuerdo a los resultados obtenidos del modelado numérico, que la situación futura no presenta una variación significativa sobre la actual, hecho por el que los resultados son coincidentes en ambos casos.

Como puede apreciarse en esta figura, el cambio climático modificará el nivel del mar aguas arriba de la actuación, de acuerdo con el aumento del nivel medio del mar. Por otro lado, el efecto del cambio climático se traduce en variaciones en la velocidad en la zona de estudio, originando que el transporte potencial se reduzca en un 10%. A su vez, debe tenerse en cuenta que el cambio climático, dada la reducción del caudal fluvial y el aumento del nivel medio del mar, origina el aumento de la salinidad aguas arriba de la actuación.

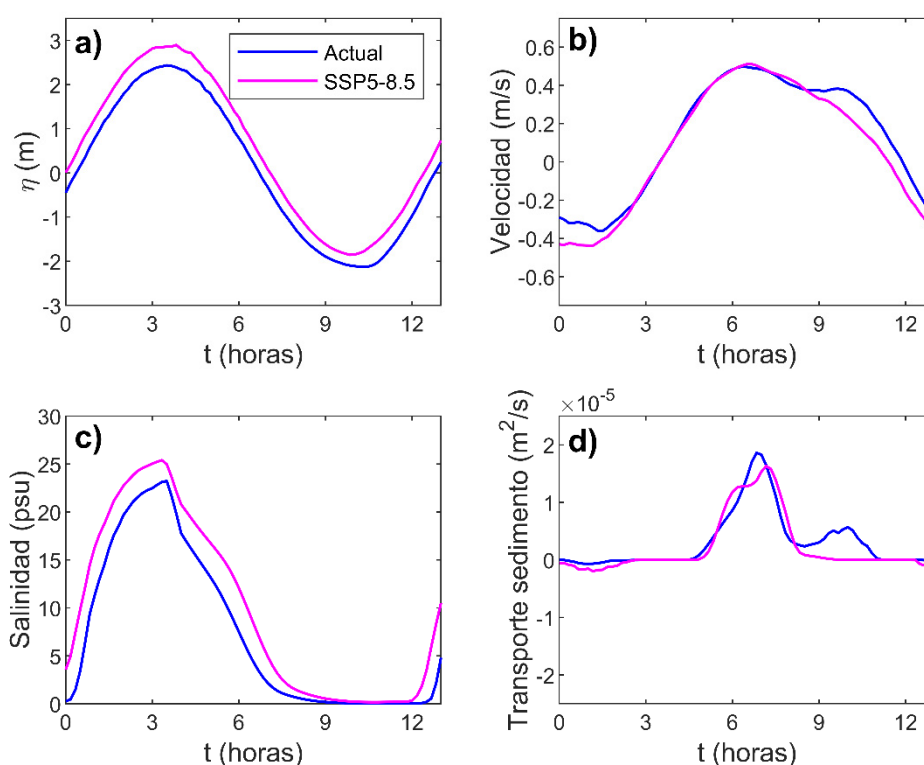


Figura 14. Variación producida por los efectos del cambio climático (escenario SSP5-8.5) en una onda de marea viva equinoccial de: a) Nivel del mar en el punto de control aguas arriba de la actuación, b) Velocidad de la corriente en el punto de control aguas arriba de la actuación, c) Salinidad en el punto de control aguas arriba de la actuación y d) Transporte potencial en el punto de control aguas abajo de la actuación.

5.4.5. E) Batimetría hasta zonas del fondo que no resulten modificadas, y forma de equilibrio, en planta y perfil, del tramo de costas afectado.

Por un lado, como ya se ha indicado, la actuación planteada no produce modificación del transporte de sedimentos y, por otro, se ubica en una zona interna de la ría del Bidasoa, por lo que no originará afección sobre la costa.

5.4.6. F) Naturaleza geológica de los fondos.

Las obras propuestas no implican modificación de la naturaleza de los fondos.

5.4.7. G) Condiciones de la biosfera submarina y efectos sobre la misma de las actuaciones previstas en la forma que señala el artículo 88 e) de este reglamento.

En la Figura 15 se muestra la variación de la salinidad obtenida en los puntos de control situados aguas arriba y aguas abajo de la actuación en los tres escenarios analizados. Como puede apreciarse en estos gráficos, la actuación proyectada apenas modifica la salinidad de la ría del Bidasoa durante la onda de marea, y, por lo tanto, se considera que no afecta a las condiciones inicialmente existentes de la biosfera submarina en dicha área.

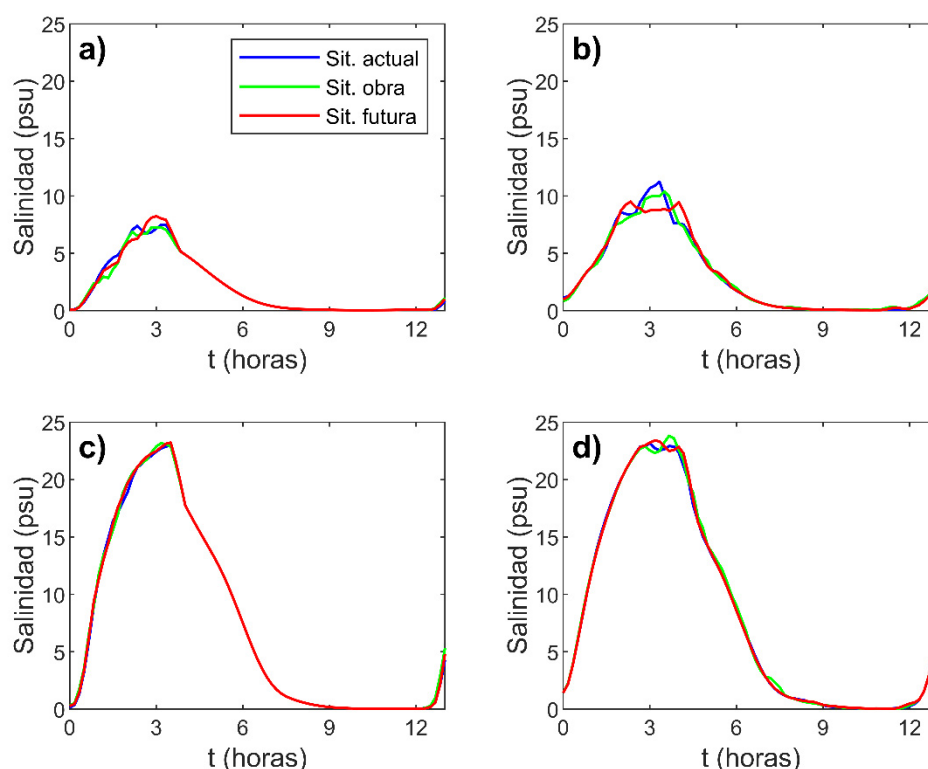


Figura 15. Variación de salinidad en una onda de marea: a) Marea media en el punto de control aguas arriba de la actuación, b) Marea media en el punto de control aguas abajo de la actuación, c) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas arriba de la actuación y d) Marea viva equinoccial en el punto de control aguas abajo de la actuación.

5.4.8. H) Recursos disponibles de áridos y canteras y su idoneidad, previsión de dragados o trasvases de arenas.

Las obras propuestas no prevén dragados o trasvases de arenas, por lo que este aspecto no es de aplicación.

5.4.9. I) Plan de seguimiento de las actuaciones previstas.

Con base en los resultados obtenidos se concluye que no es necesario realizar un plan de seguimiento de las actuaciones en lo que a efectos de la dinámica litoral se refiere, ya que no se produce afección a ésta.

5.4.10. J) Propuesta para la minimización, en su caso, de la incidencia de las obras y posibles medidas correctoras y compensatorias.

No son necesarias medidas correctoras ni compensatorias.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente documento se recogen los resultados obtenidos, empleando técnicas de modelado numérico, del estudio para evaluar la afección a la dinámica litoral del proyecto constructivo de rehabilitación del puente internacional de Irún.

De la metodología desarrollada para la realización de este estudio cabe destacar las siguientes tareas llevadas a cabo secuencialmente:

- En primer lugar, se ha llevado a cabo la recopilación y el análisis de la información disponible sobre batimetría, granulometría de la zona de estudio, datos meteorológicos y aportes fluviales.
- Con base en esta información, se ha realizado un estudio de la hidrodinámica en la ría del Bidasoa para la situación actual, durante la obra y para la situación futura (tras la rehabilitación del puente internacional).
- El modelado hidrodinámico y de transporte potencial de sedimento se ha llevado a cabo con el modelo numérico Delft3D.
- En cada situación (actual, obra, futura) se ha analizado los procesos hidrodinámicos asociados a caudales fluviales promedio en conjunción con una marea media o una marea viva equinoccial.
- Los resultados del modelado en todos estos casos se han comparado a través de la variación de nivel del mar, velocidad, salinidad y transporte potencial de sedimento en puntos de control situados aguas arriba y aguas de la zona donde se encuentra proyectada la actuación en la ría del Bidasoa.
- El efecto del cambio climático se ha analizado mediante la aplicación del escenario SSP5-8.5, teniendo en cuenta la variación que genera en los aportes fluviales y en el nivel medio del mar.

Del análisis de los aspectos recogidos en el **artículo 93** del **Reglamento General de Costas (RD 876/2014)** se concluye:

- **Estudio de la capacidad de transporte litoral [art. 93 a) RD 876/2014]:** La actuación proyectada no presenta ninguna alteración sobre la capacidad de transporte litoral, ya que no genera modificaciones significativas en el nivel mar, velocidades de la corriente y transporte potencial durante el ciclo de marea.
- **Balance sedimentario y evolución de la línea de costa, tanto anterior como previsible [art. 93 b) RD 876/2014]:** Al no existir variación en el transporte potencial, no es necesario evaluar este aspecto.
- **Clima marítimo, incluyendo estadísticas de oleaje y temporales direccionales y escolares [art. 93 c) RD 876/2014]:** Teniendo en cuenta la localización de la zona donde se plantea la actuación, situada en el área interior de la ría del Bidasoa, este aspecto no es de aplicación.
- **Dinámicas resultantes de los efectos del cambio climático [art. 93 d) RD 876/2014]:** El nivel del mar aguas arriba de la actuación aumentará de acuerdo

con el incremento del nivel medio del mar, pero estando siempre contenido dentro de las márgenes de la ría. Por otro lado, las velocidades en la zona de estudio se reducirán, generando en consecuencia que el transporte potencial se reduzca en un 10%. A su vez, la reducción del caudal fluvial y el aumento del nivel medio del mar generará un aumento de la salinidad promedio aguas arriba de la actuación.

- **Batimetría hasta zonas del fondo que no resulten modificadas, y forma de equilibrio, en planta y perfil, del tramo de costas afectado [art. 93 e) RD 876/2014]:** La actuación planteada, al no modificar el transporte de sedimentos y ubicarse en una zona interna de la ría del Bidasoa, no origina afección sobre la costa.
- **Naturaleza geológica de los fondos [art. 93 f) RD 876/2014]:** Las obras propuestas no implican modificación de la naturaleza de los fondos.
- **Condiciones de la biosfera submarina y efectos sobre la misma de las actuaciones previstas en la forma que señala el artículo 88 e) de este reglamento [art. 93 g) RD 876/2014]:** La actuación proyectada no modifica la salinidad en la zona de estudio y, por lo tanto, no afecta a las condiciones inicialmente existentes de la biosfera submarina en dicha área.
- **Recursos disponibles de áridos y canteras y su idoneidad, previsión de dragados o trasvases de arenas [art. 93 h) RD 876/2014]:** No se prevén.
- **Plan de seguimiento de las actuaciones previstas [art. 93 i) RD 876/2014]:** No es necesario realizar un plan de seguimiento de las actuaciones, en lo que a efectos en la dinámica litoral se refiere.
- **Propuesta para la minimización, en su caso, de la incidencia de las obras y posibles medidas correctoras y compensatorias [art. 93 j) RD 876/2014]:** No son necesarias medidas correctoras ni compensatorias.

REFERENCIAS.

- Roelvink, J.A. and Van Banning, G.K.F.M., 1994. Design and Development of DELFT3D and Application to Coastal Morphodynamics. In: Verwey, A., Minns, A.W., Babovic, V. and Maksimovic, C., Eds., Hydroinformatics, Balkema, Rotterdam, 451-456.
- Solaun O., M.J. Belzunce, J. Franco, V. Valencia y Á. Borja, 2009. Estudio de la contaminación en los sedimentos de los estuarios del País Vasco (1998-2001). 'Revista de Investigación Marina'. 10: 47 pp.
- Van Rijn, L. 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. WL/Delft Hydraulics, 2006. Delft3D user manual.