



euskal trenbide sarea

Proyecto Constructivo de reparación y protección
del viaducto de Mundaka

Anejo – 07

Clima Marino y Propagación del Oleaje

Noviembre 2022





Hoja de control de calidad

Documento	Anejo 07: Clima Marino y Propagación del Oleaje	
Proyecto	SE7753. Proyecto Constructivo de reparación y protección del viaducto de Mundaka	
Código	SE7753-PC-AN-07-ClimaMarino-D02.docx	
Autores:	Firma:	ANP
	Fecha:	28/11/2022
Verificado	Firma:	JTS
	Fecha:	28/11/2022

Índice:

1. INTRODUCCIÓN	1
2. CLIMA MARÍTIMO	1
2.1. FUENTE DE DATOS	1
2.2. RÉGIMEN MEDIO	4
2.3. RÉGIMEN EXTREMAL.....	5
2.4. RELACIÓN ENTRE H_s Y T_p	8
3. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE	11
3.1. IMPLANTACIÓN DEL MODELO	11
3.2. RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE	15
4. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	17
4.1. NIVEL MEDIO DEL MAR GLOBAL	17
4.2. NIVEL MEDIO DEL MAR REGIONAL: COSTA CANTÁBRICA ESPAÑOLA	20
4.3. NIVEL MEDIO DEL MAR LOCAL.....	21
4.4. ESCENARIOS CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO	21
5. ESTUDIO DE DINÁMICA LITORAL	22
5.1. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE LITORAL	22
5.2. ANÁLISIS DE LA LADERA SITUADA EN LADO TIERRA DEL VIADUCTO DE MUNDAKA.....	24
5.3. OLEAJE INCIDENTE.....	28
5.4. CONCLUSIONES	29
APÉNDICE: FIGURAS DE PROPAGACIÓN DEL OLEAJE	1

Índice de figuras:

Figura 1. Ubicación boya de Bilbao-Vizcaya y viaducto de Lamiaran.	2
Figura 2. Rosa de oleaje en aguas profundas. Boya exterior Bilbao-Vizcaya.....	2
Figura 3. Régimen medio escalar. Boya exterior Bilbao-Vizcaya.....	4
Figura 4. Régimen extremal direccional. Sector N.....	6
Figura 5. Régimen extremal direccional. Sector NNW.	6
Figura 6. Régimen extremal direccional. Sector NW.	7
Figura 7. Régimen extremal direccional. Sector WNW.....	7
Figura 8. Diagrama de dispersión H_s - T_p . Sector N.	9
Figura 9. Diagrama de dispersión H_s - T_p . Sector NNW.	9
Figura 10. Diagrama de dispersión H_s - T_p . Sector NW.....	10
Figura 11. Diagrama de dispersión H_s - T_p . Sector WNW.	10
Figura 12. Carta Náutica 942.	12
Figura 13. Carta Náutica 943.	12

Figura 14. Carta Náutica 944.	13
Figura 15. Topobatimetría de detalle (TOPOLAN y AZTI, mayo 2021).	13
Figura 16. Batimetría exterior de detalle (GeoEuskadi).	14
Figura 17. Malla exterior. Zona de Euskadi.....	14
Figura 18. Malla de detalle. Cala del viaducto.	15
Figura 19. Alineación para obtención del oleaje de cálculo frente a los bloques de protección del viaducto de Lamiaran.	16
Figura 20. Distribución de Hso y dirección media. Sector WNW. Hso = 16.36 m; Tp = 22.5 s.; Pleamar.....	17
Figura 21. Subida del nivel medio del mar según los diferentes escenarios (fuente: IPCC).	19
Figura 22. Valores de subida del nivel medio según Vermeer and Rahmstorf.	20
Figura 23. Desviaciones regionales en relación al nivel global (fuente: IPCC).	20
Figura 24. Tendencia anual de subida de nivel del mar según datos del Mareógrafo de Bilbao (fuente: Puerto del Estado).....	21
Figura 25. Tipología de la costa en las inmediaciones del viaducto de Mundaka.	22
Figura 26. Bajos rocosos en la zona frontal del viaducto de Mundaka.	23
Figura 27. Bajos rocosos en la zona lado mar del viaducto de Mundaka.	23
Figura 28. Ladera situada en el lado tierra del viaducto de Mundaka.	24
Figura 29. Entrante de costa en el lado tierra del viaducto de Mundaka.	24
Figura 30. Tamaño de los cantos rodados en el entrante de costa en el lado tierra del viaducto de Mundaka.	25
Figura 31. Erosiones localizadas en el pie de la ladera.	28
Figura 32. Alineaciones para obtención de valores de altura de ola en las inmediaciones del viaducto.	28

Índice de tablas:

Tabla 1. Tabla de encuentros altura de ola (Hs) – dirección media (a).	3
Tabla 2. Parámetros de la distribución de Weibull (MC). Régimen medio escalar.	4
Tabla 3. Valores extremos asociados a la estima central (T=238 años).	8
Tabla 4. Valores extremos asociados a la banda superior de confianza del 90% (T=238 años).	8
Tabla 5. Valores del oleaje de diseño asociados a la banda superior de confianza del 90% y T=238 años.....	16
Tabla 6. Valores de subida del nivel medio para diferentes escenarios (fuente: IPCC).	18
Tabla 7. Valores de subida del nivel medio en escenario pesimista.	19
Tabla 8. Valores de subida del nivel medio relativos a 2021 considerado en este Estudio.	22

Anejo 07.- Clima Marino y Propagación del Oleaje

1. INTRODUCCIÓN

Se plantea el estudio de las condiciones de clima marítimo en aguas profundas que permitan definir los valores del régimen extremal de oleaje para trasladarlos posteriormente hasta el pie del viaducto de Lamiaran en la costa de Mundaka y obtener el oleaje de diseño en las inmediaciones del viaducto de cara a diseñar la protección marítima de las pilas del mismo.

Con el objetivo de estudiar el régimen extremal del oleaje se plantea el análisis de los datos registrados y la propagación del oleaje desde la Boya de Bilbao-Vizcaya, situada en un punto exterior a la costa vasca, hasta pie del viaducto de Lamiaran.

Para ello será necesario realizar una caracterización del clima marítimo en la Boya de Bilbao-Vizcaya y la propagación de los estados de mar representativos del régimen extremal hasta los puntos seleccionados.

La propagación de estos estados de mar se llevará a cabo mediante el uso del modelo numérico SWAN (Simulating WAVes till Nearshore), que permite la obtención de las características del oleaje forzado por los datos de la boya en el exterior de los diques del puerto donde se quieren conocer los valores locales de oleaje extremal.

2. CLIMA MARÍTIMO

La caracterización del clima marítimo se llevará a cabo basándose en datos proporcionados por Puertos del Estado para la Boya de Bilbao-Vizcaya, con los que se obtendrán los valores de régimen medio y de régimen extremal característicos de la zona de estudio sobre la que se trabaja.

2.1. FUENTE DE DATOS

De cara al análisis del régimen de oleaje en aguas profundas, se ha utilizado los datos de instrumentales de la boya de Bilbao-Vizcaya, perteneciente a la Red Exterior de Puertos del Estado (REDEXT). Dicha boya se haya fondeada en las coordenadas geográficas 3.04°W y 43.63°N, a unos 35 km al noroeste de la zona del viaducto de Lamiaran, a una profundidad de 600 m.

Dichos datos representan una serie con información direccional, y un registro que abarca desde noviembre de 1990 hasta junio de 2021. El registro presenta una periodicidad de 3h hasta finales de febrero de 2002 y horaria desde entonces. Atendiendo a los periodos en los que la boya no estuvo operativa, el registro efectivo de datos del Estudio es de algo más de 20 años.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de la fuente de datos y la del viaducto de Lamiaran.

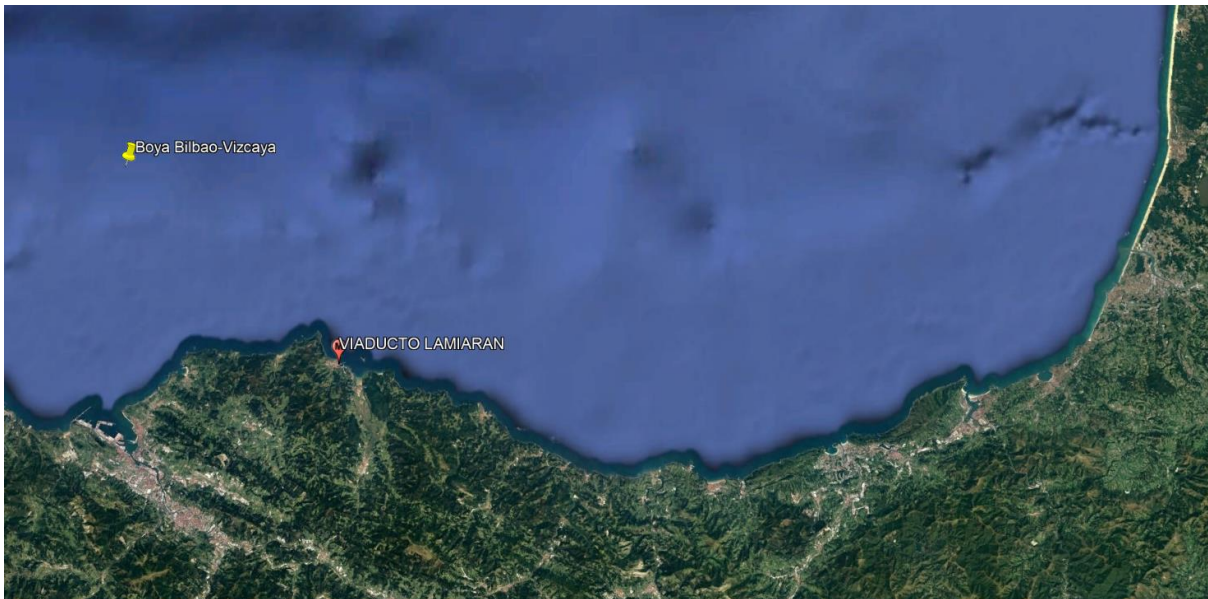


Figura 1. Ubicación boya de Bilbao-Vizcaya y viaducto de Lamiaran.

La distribución sectorial del oleaje queda caracterizada mediante las rosas de oleaje, que discretizan los datos en direcciones y alturas de ola. Cada sector se representa con un brazo de la rosa. La longitud de cada brazo es proporcional a la probabilidad de presentación de cada sector, calculada como la frecuencia relativa muestral. De esta forma, se puede apreciar visualmente cuáles son los sectores que predominan. La discretización en alturas de ola permite determinar cuáles son los sectores más energéticos.

En la siguiente figura se muestra la rosa de oleaje, en la que se aprecia como los oleajes principales se concentran entre las direcciones WNW a N, siendo el sector más frecuente el sector NW, que comparte ser el más energético junto con el sector WNW.

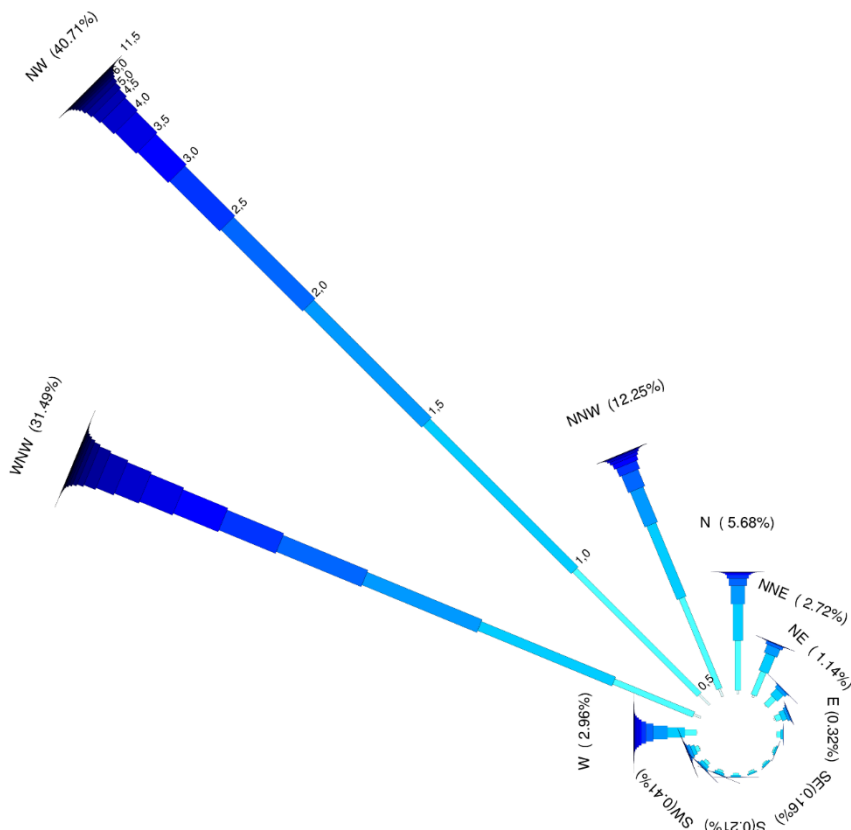


Figura 2. Rosa de oleaje en aguas profundas. Boya exterior Bilbao-Vizcaya.

En la siguiente tabla se muestran los encuentros entre la altura de ola y la dirección del oleaje. Se puede observar que los oleajes más extremos son del cuarto cuadrante, en especial del sector WNW seguidos del sector NW.

Sector/Hs	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0	9.0-9.5	9.5-10.0	10.0-10.5	10.5-11.0	11.0-11.5	11.5-12.0	>12.0	%	TOTAL
Calmas																											0
N	191	2511	1853	927	370	171	82	36	18	3	5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%	6171
NNE	112	1280	936	436	154	24	5	6	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.72%	2957
NE	39	556	431	166	39	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.14%	1234
ENE	73	303	258	131	45	11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.76%	824
E	16	198	109	20	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.32%	346
ESE	5	81	81	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16%	171
SE	5	74	93	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16%	178
SSE	3	107	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16%	179
S	2	109	94	16	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.21%	224
SSW	4	118	116	35	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.26%	277
SW	24	166	169	58	15	6	0	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.41%	443
WSW	33	194	196	154	49	15	11	5	3	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.61%	667
W	45	595	866	718	369	227	140	99	67	49	14	10	3	6	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2.96%	3217
WNW	385	4363	7243	6283	4636	3102	2455	1803	1326	966	621	329	210	149	97	49	24	24	11	13	3	4	3	0	1	31.49%	34200
NW	737	8893	10579	8414	5824	3571	2179	1502	890	517	355	255	142	126	103	59	33	15	10	7	7	3	1	1	0	40.77%	44223
NNW	427	4975	4026	1921	918	440	256	158	106	48	12	7	3	9	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.25%	13311
%	1.93%	22.58%	25.06%	17.76%	11.44%	6.97%	4.72%	3.32%	2.22%	1.46%	0.93%	0.56%	0.33%	0.27%	0.19%	0.10%	0.05%	0.04%	0.02%	0.02%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	
TOTAL	2101	24523	27219	19287	12424	7574	5131	3611	2411	1587	1013	607	360	292	208	111	59	39	21	21	10	7	4	1	1	108622	

Tabla 1. Tabla de encuentros altura de ola (Hs) – dirección media (a).

Esta distribución de oleajes es característica de las zonas del Cantábrico, que recibe la llegada de los fuertes temporales del Atlántico Norte, especialmente durante el invierno.

2.2. RÉGIMEN MEDIO

El objetivo del estudio del régimen medio es caracterizar la probabilidad de no superación de diferentes niveles de altura de ola en un año medio. Esto se lleva a cabo mediante el ajuste de la muestra de alturas de ola disponible a una función de distribución acumulada.

La función utilizada habitualmente para caracterizar el régimen medio del oleaje es la distribución de Weibull de mínimos. Su función de distribución acumulada es:

$$P[H_s \leq h] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{h-A}{B}\right)^c\right]$$

donde A es el parámetro de posición, B es el parámetro de escala y C es el parámetro de forma. Los tres parámetros de esta distribución deben estimarse. En el presente estudio se ha utilizado para ello el método de los momentos.

El análisis del régimen medio de oleaje se realiza a partir de los datos de la boya, realizando un ajuste por mínimos cuadrados a una función de distribución de tipo Weibull triparamétrica. Los resultados se muestran en la Figura 7, con los coeficientes y parámetros que definen el ajuste (Tabla 2).

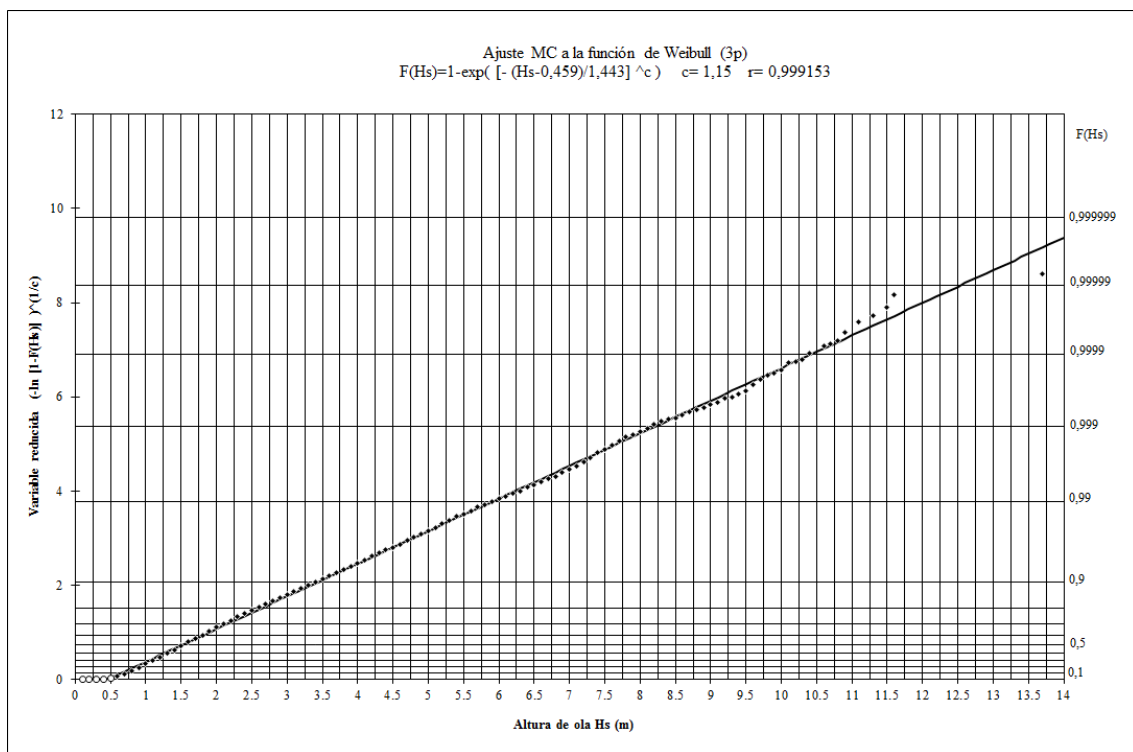


Figura 3. Régimen medio escalar. Boya exterior Bilbao-Vizcaya.

Weibull (MC)	Parámetros
a	0,4590
b	1,4430
c	1,1500
r	0,9992

Tabla 2. Parámetros de la distribución de Weibull (MC). Régimen medio escalar.

2.3. RÉGIMEN EXTREMAL

La caracterización de los valores extremos es muy importante desde el punto de vista de la ingeniería porque está relacionada con la definición de las acciones externas que tienen que resistir las estructuras que se diseñan. El problema para poder caracterizar estas acciones es que los sucesos peligrosos ocurren con relativa poca frecuencia. Por lo tanto, se debe utilizar una teoría que permita estimar el comportamiento de los niveles altos a partir de niveles más bajos. Esto se consigue con la Teoría de Valores Extremos.

En función de los datos que se utilizan para extrapolar el comportamiento de la cola superior de la distribución se distinguen los siguientes métodos: distribución de tamaños, que utiliza todos los datos disponibles y extrapola el resultado a la cola superior, distribución de extremos, que divide el tiempo de registro en intervalos y sólo utiliza el máximo de cada uno, y distribución de excesos, que calcula la distribución de los excesos sobre un umbral.

Según el teorema de Fisher-Tippett, si la distribución que se quiere caracterizar tiene la cola superior regular y el número de datos es suficientemente grande, la distribución del máximo de éstas se aproxima a uno de los siguientes modelos: Fréchet, Gumbel o Weibull.

El análisis extremal de los sectores más energéticos se ha realizado a partir de la obtención de una muestra de extremos representativa, seleccionando los temporales por el método del umbral o POT (*Peak Over Threshold*) y ajustando los valores de la muestra a una función de distribución de Gumbel, por el método de ajuste de Mínimos Cuadrados (MC).

La selección de temporales independientes entre sí que definen el régimen extremal direccional, se ha determinado a partir de un umbral de altura de ola diferente para cada sector, N, NNW, NW y WNW, en este caso con valores de 3 m, 3,5 m, 6 m y 6,25 m, respectivamente. Se han obtenido a su vez una muestra de extremos para cada sector compuestas por 38, 64, 53 y 61 temporales distintos, respectivamente. Los resultados de dichos ajustes se muestran de la Figura 12 a la Figura 15. Los datos se han obtenido del registro actualizado hasta junio de 2021.

Finalmente, para definir el oleaje de cálculo debemos conocer previamente el periodo de retorno asociado a la obra. Una vez conocido, se escogen los valores de H_s a partir de los ajustes realizados. Según la normativa ROM, se considera una vida útil de 25 años y un periodo de retorno asociado de 238 años.

Con esto, los valores direccionales para dicho periodo de retorno obtenidos de los ajustes para los 4 sectores considerados se resumen en la Tabla 3, si se considera la altura de ola asociada a la estima central, y en la Tabla 4 para la banda superior de confianza del 90%. En ambos casos, se muestran los periodos asociados a la altura de ola obtenida, definidos dentro de un rango de posibles valores, de los que identifica en cada caso un valor mínimo y un valor máximo (ver apartado siguiente).

Los temporales de la Tabla 4 serán propagados hasta pie de obra para definir el oleaje de diseño.

**Régimen extremal direccional. Selección método POT Hs > 3.0 m
Ajuste MC a la distribución Gumbel. Sector N**

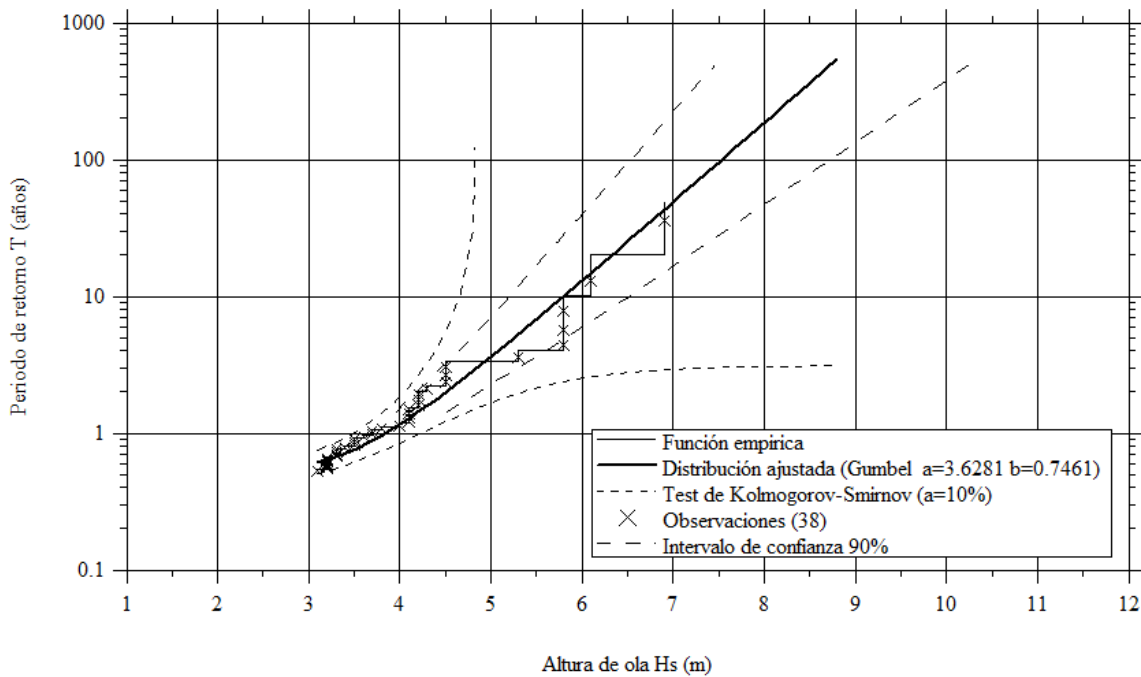


Figura 4. Régimen extremal direccional. Sector N.

**Régimen extremal direccional. Selección método POT Hs > 3.5 m
Ajuste MC a la distribución Gumbel. Sector NNW**

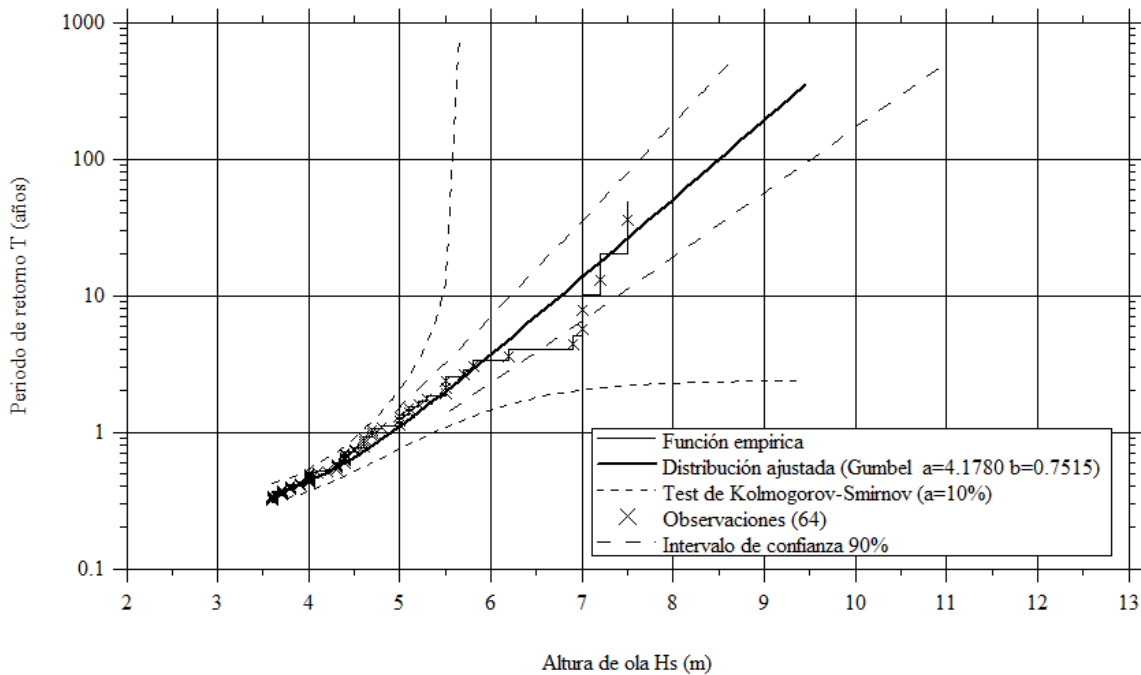


Figura 5. Régimen extremal direccional. Sector NNW.

Régimen extremal direccional. Selección método POT $H_s > 6.0$ m
Ajuste MC a la distribución Gumbel. Sector NW

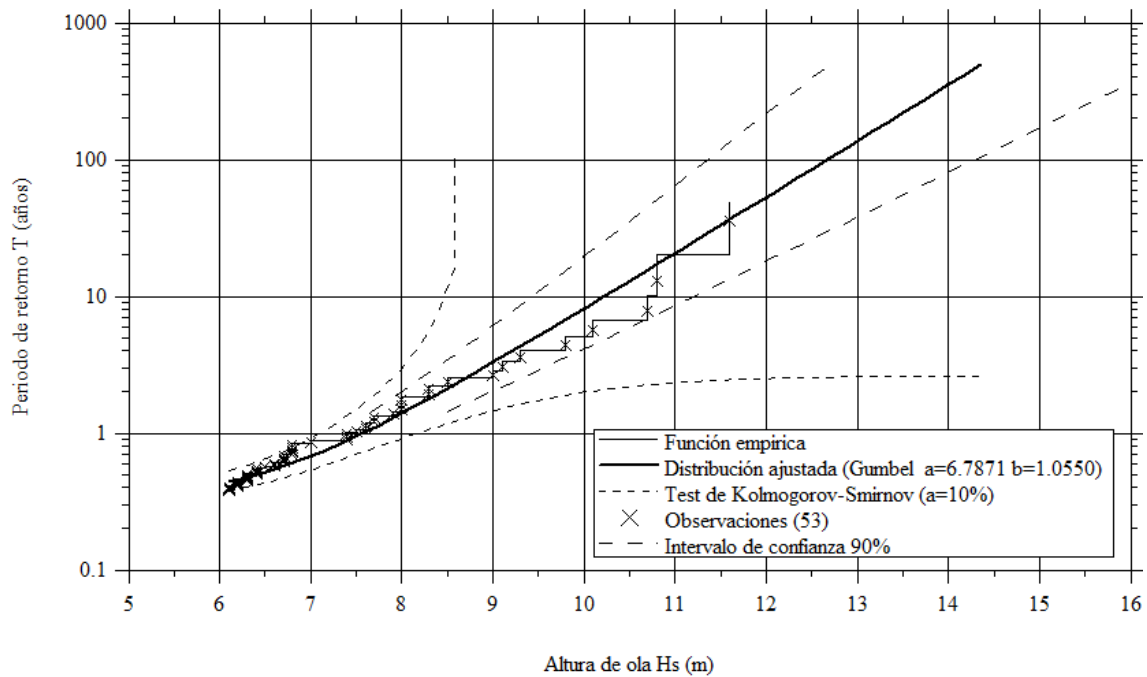


Figura 6. Régimen extremal direccional. Sector NW.

Régimen extremal direccional. Selección método POT $H_s > 6.25$ m
Ajuste MC a la distribución Gumbel. Sector WNW

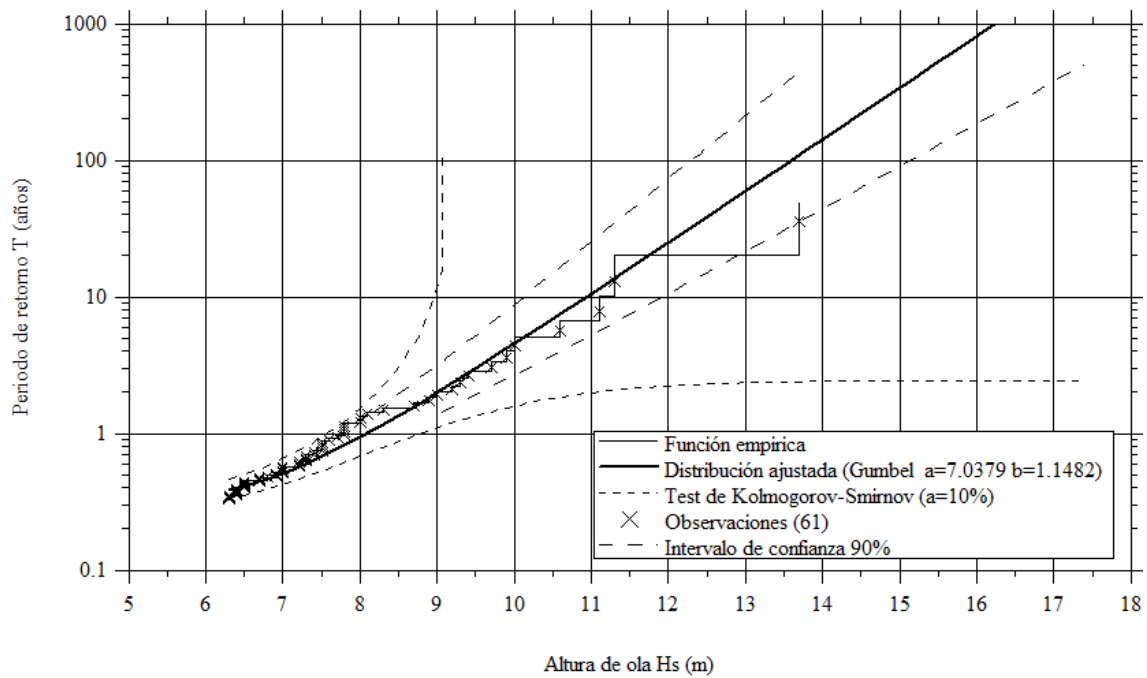


Figura 7. Régimen extremal direccional. Sector WNW.

Sector	Hs (m)	Tpmin (s)	Tpmax (s)
N	8,185	13	17
NNW	9,160	14	18
NW	13,582	15	19
WNW	14,595	16	20

Tabla 3. Valores extremos asociados a la estima central (T=238 años).

Sector	Hs (m)	Tpmin (s)	Tpmax (s)
N	9,556	14	18
NNW	10,305	15	18,5
NW	15,433	16	22
WNW	16,357	17	22,5

Tabla 4. Valores extremos asociados a la banda superior de confianza del 90% (T=238 años).

2.4. RELACIÓN ENTRE H_s Y T_p

Finalmente, se muestra la relación existente entre las variables H_s y T_p , de tal forma que pueda elegirse el conjunto de oleajes tipo a analizar en las propagaciones.

A partir del conjunto de datos direccionales de la boya de Bilbao-Vizcaya, se ha obtenido el diagrama de dispersión con las variables H_s y T_p para cada uno de los 4 sectores considerados (Figuras mostradas a continuación). En dichas figuras se ha superpuesto las curvas de isoperalte de pico en aguas profundas, para identificar de forma clara el tipo de oleajes en función de la altura de ola.

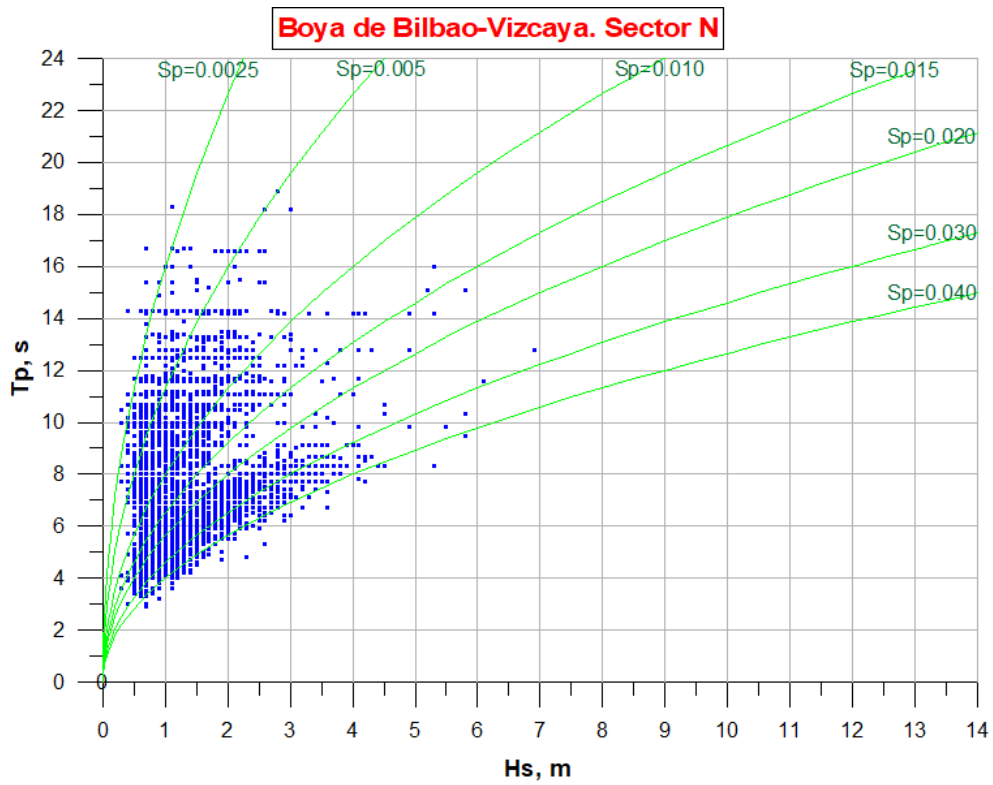


Figura 8. Diagrama de dispersión H_s - T_p . Sector N.

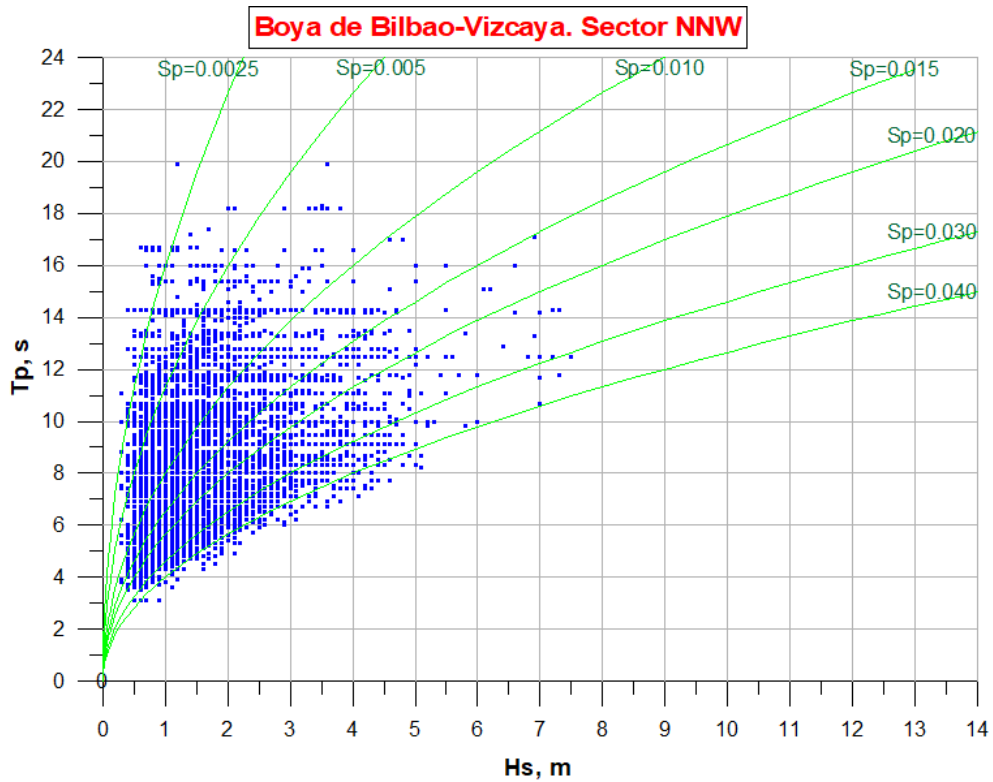


Figura 9. Diagrama de dispersión H_s - T_p . Sector NNW.

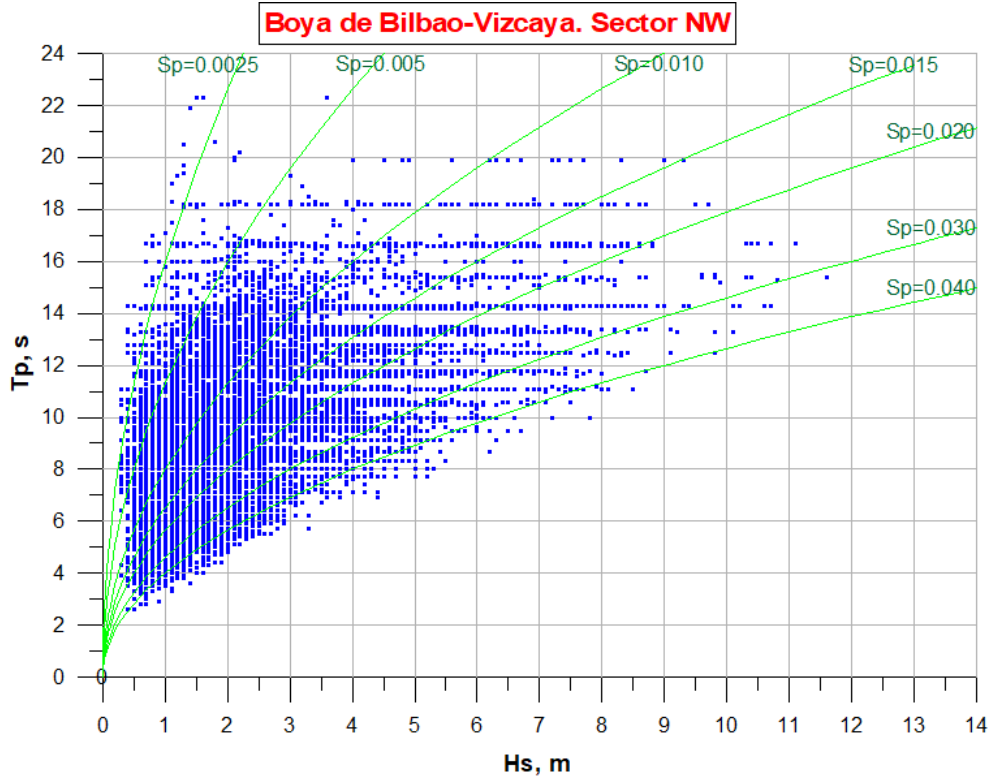


Figura 10. Diagrama de dispersión Hs - Tp. Sector NW.

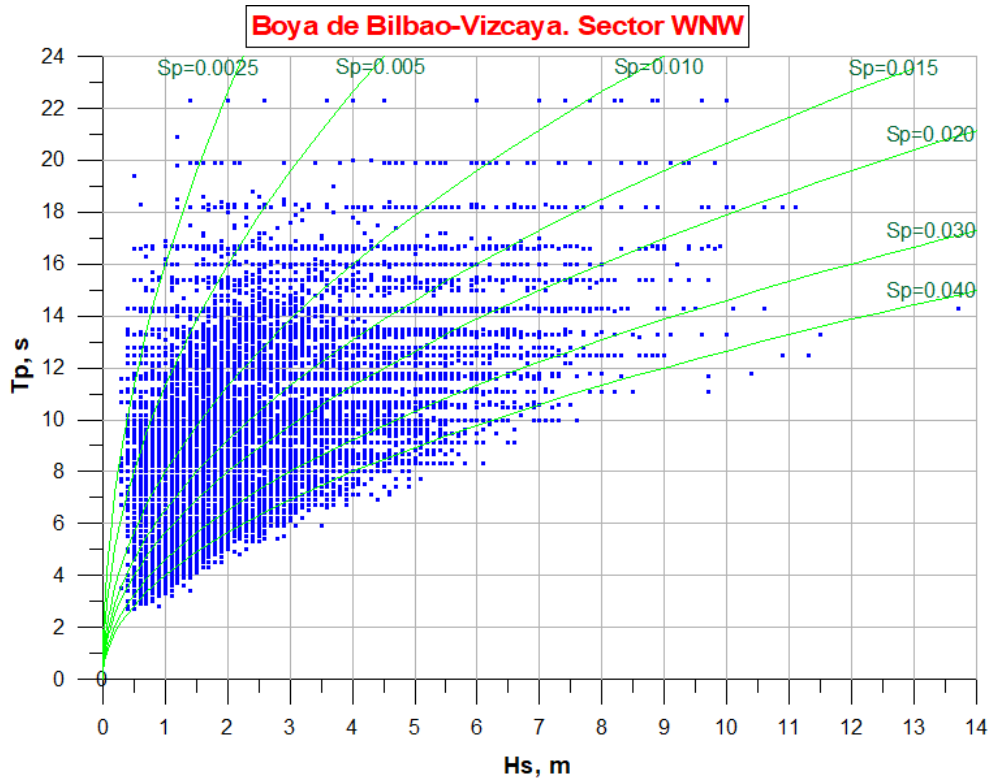


Figura 11. Diagrama de dispersión Hs - Tp. Sector WNW.

3. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Las olas generadas en altamar se propagan hasta la obra según su dirección media de procedencia. Cuando alcanzan zonas de profundidad aproximadamente igual a su semilongitud de onda, su velocidad de avance comienza a sentir el efecto de los fondos de la plataforma. Las olas experimentan entonces los procesos de modificación de su dirección de avance y de su altura, debido a los procesos de refracción y *shoaling* (o asomeramiento).

La generación y la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta el viaducto de Lamiaran se realiza mediante el modelo SWAN (*Simulating WAVes till Nearshore*), desarrollado por la *Faculty of Civil Engineering and Geosciences* de la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft, Países Bajos).

SWAN es un modelo de propagación de oleaje de tercera generación que permite obtener estimaciones realistas de parámetros del oleaje en áreas costeras, lagos y estuarios a partir de condiciones de viento, batimetría y corriente dadas. SWAN puede ser utilizado en cualquier escala pertinente para propagar olas de gravedad generadas por el viento. A continuación, se describen algunas de las características físicas del modelo:

- a. Propagación de oleaje en tiempo y espacio, *shoaling*, refracción debida al fondo, variación en la frecuencia debido a corrientes y profundidad no estacionaria
- b. Generación de oleaje por viento
- c. Interacción ola-ola
- d. Fricción con el fondo y rotura de oleaje por fondo
- e. *Set-up* inducido por el oleaje
- f. Escalas de trabajo: desde laboratorio hasta escalas globales
- g. Transmisión y reflexión debida a obstáculos
- h. Difracción

Los cálculos con el modelo SWAN se pueden realizar en una malla regular, curvilínea o en una malla no estructurada en elementos triangulares, en coordenadas cartesianas o esféricas. Es posible anidar mallas, utilizando como entrada los resultados de otros modelos como el propio SWAN, WAVEWATCH III o WAM. Este modelo es el de referencia en múltiples estudios a nivel internacional.

Una vez obtenida una la digitalización del terreno, el programa es capaz de generar un oleaje a partir de datos de viento y/o propagar un oleaje definido. Por ello, el programa calcula propagaciones de oleaje en cualquier zona de la costa que esté definida con una batimetría. Ello obliga a que, además de la batimetría de detalle de la zona, será necesario recurrir a cartas náuticas que extiendan la zona cartografiada hasta aguas profundas.

3.1. IMPLANTACIÓN DEL MODELO

La definición de la batimetría y de la topografía de la zona de estudio se ha obtenido de las fuentes siguientes:

- Cartas náuticas 942, 943 y 944: Realizadas por el Instituto Hidrográfico de la Marina, incluidas en el paquete BACO, contenido en el SMC.

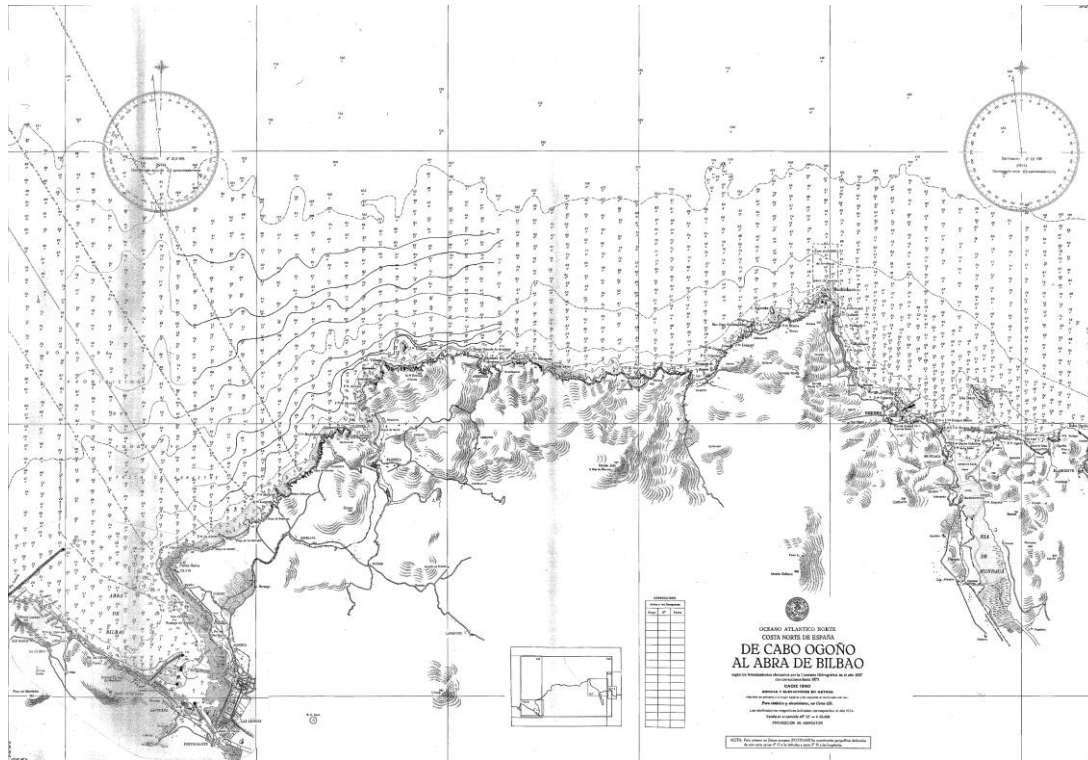


Figura 12. Carta Náutica 942.

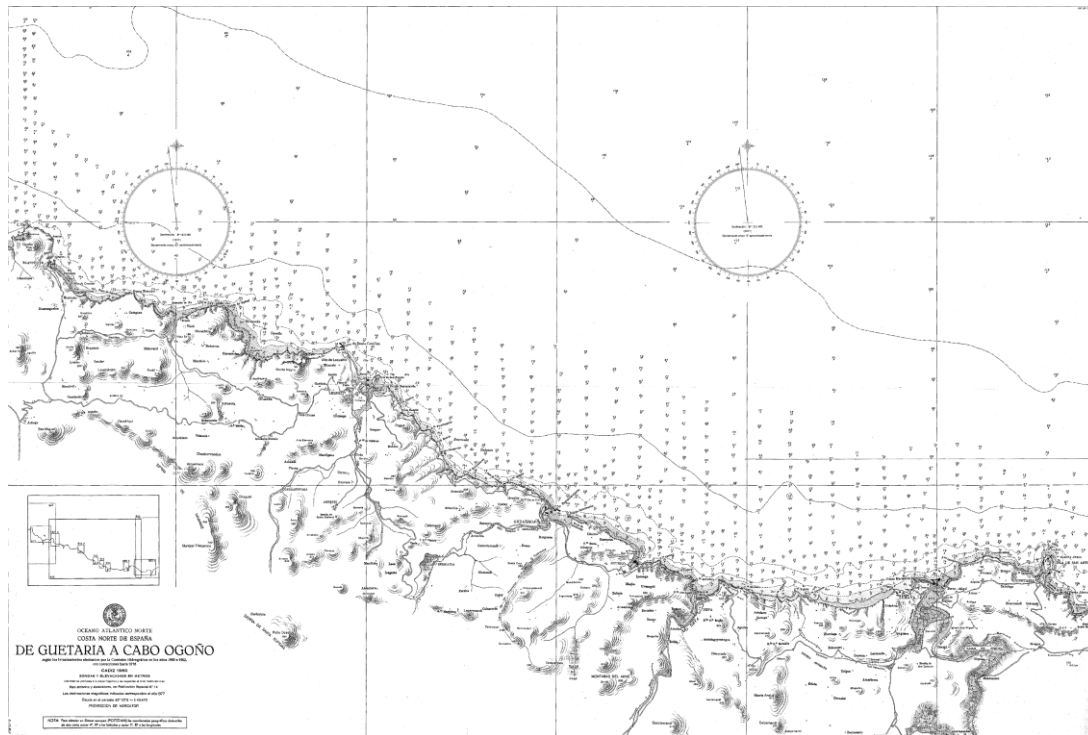


Figura 13. Carta Náutica 943.

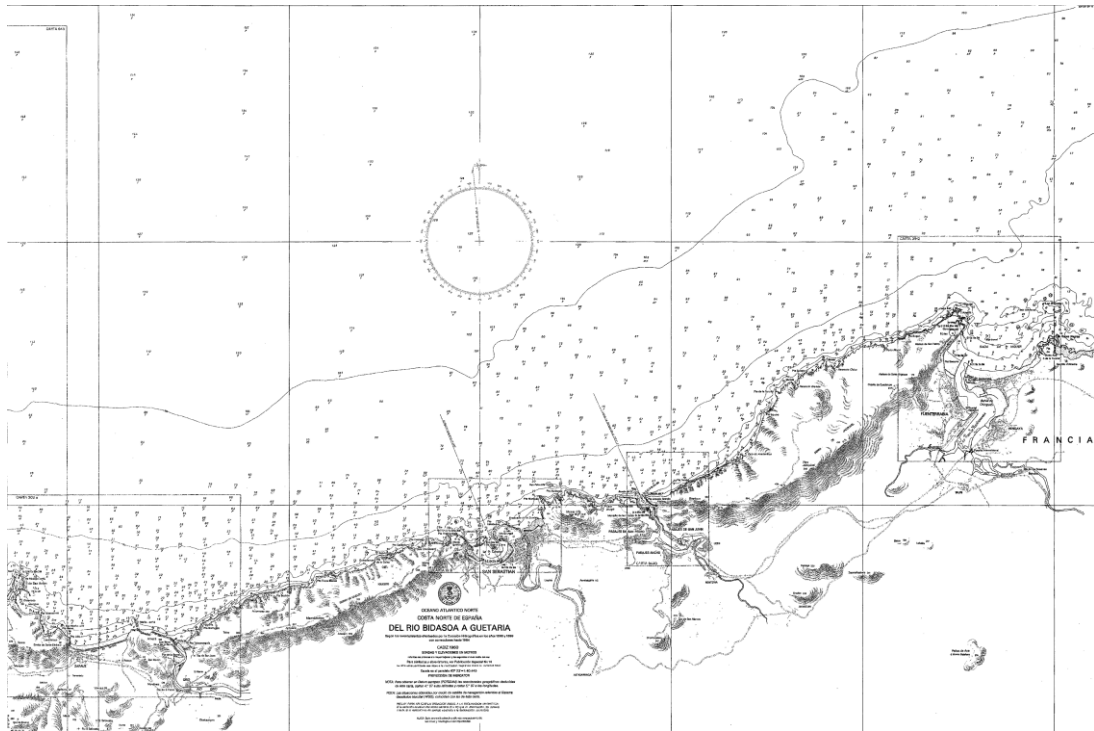


Figura 14. Carta Náutica 944.

- Batimetrías de detalle facilitadas para la redacción del Proyecto. Se han facilitado varias batimetrías en una zona próxima al viaducto de Mundaka. En la Figura 23 se incluye una topobatimetría de detalle de la cala donde se ubica el viaducto, realizada por TOPOLAN y AZTI en mayo de 2021. En la Figura 24, las isóbatas cada metro para la zona de estudio a partir de la información de GeoEuskadi.

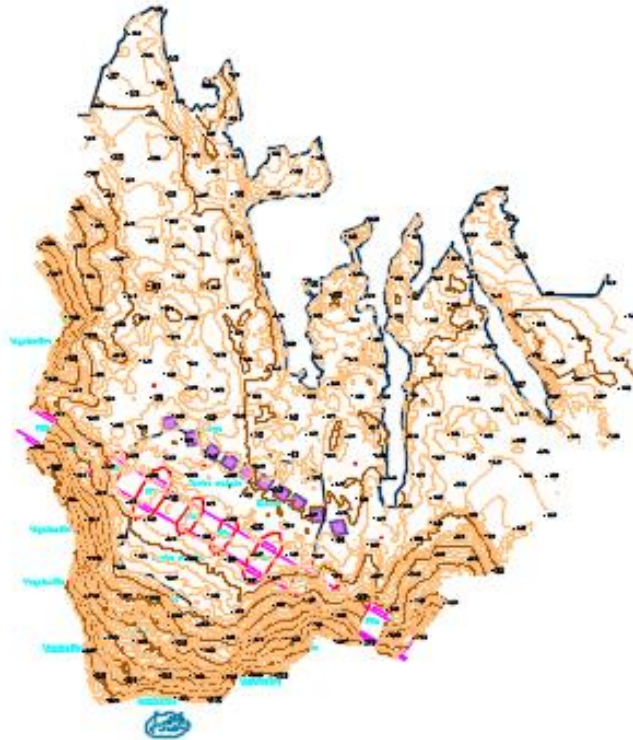


Figura 15. Topobatimetría de detalle (TOPOLAN y AZTI, mayo 2021).

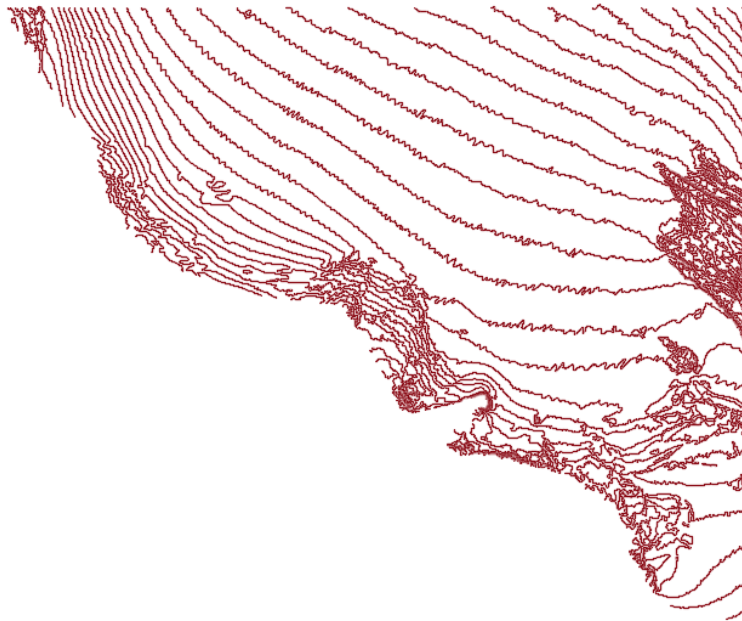


Figura 16. Batimetría exterior de detalle (GeoEuskadi).

A partir de los datos anteriores, es necesario generar un MDT (Modelado Digital del Terreno) de la línea de costa y de la batimetría. A partir de todas las batimetrías correctamente digitalizadas, se obtiene una nube de puntos con información XYZ, empleando la proyección WGS84, Huso 30. Esta nube de puntos es interpolada empleando el programa Surfer. A partir de esta información, se realiza el transporte de los datos al modelo SWAN, para realizar la propagación del oleaje espectral.

Para la propagación se han empleado cuatro mallas en diferencias finitas, una exterior para incluir la boya exterior de Bilbao-Vizcaya, desde donde se propagan los oleajes, que cubre una extensión equiparable a todo el frente cantábrico del País Vasco, cubriendo una superficie de 100x50 km con una resolución de elementos cuadrados de 250x250 m (400 nodos en la dirección X y 200 nodos en la dirección Y); en ella se anida una malla intermedia, que cubre una superficie de 20x20 km con una resolución de elementos cuadrados de 50x50 m (400 nodos en la dirección X y 400 nodos en la dirección Y); a continuación, en esta malla intermedia se anida una segunda malla intermedia que cubre la zona de Bermeo a Mundaka, con una superficie de 4x4 km y una resolución de elementos cuadrados de 10x10 m (400 nodos en la dirección X y 400 nodos en la dirección Y); y, finalmente, una malla de detalle con una superficie de 1x1 km y una resolución de elementos cuadrados de 2.5x2.5 m (400 nodos en la dirección X y 400 nodos en la dirección Y) que cubre la zona de la cala donde se encuentra el viaducto del Euskotren. Estas mallas han sido nombradas como Level1, Level2, Level3 y Level4.

En las siguientes Figuras se muestra la digitalización de la batimetría y el dominio computacional para la malla exterior y la malla de detalle.

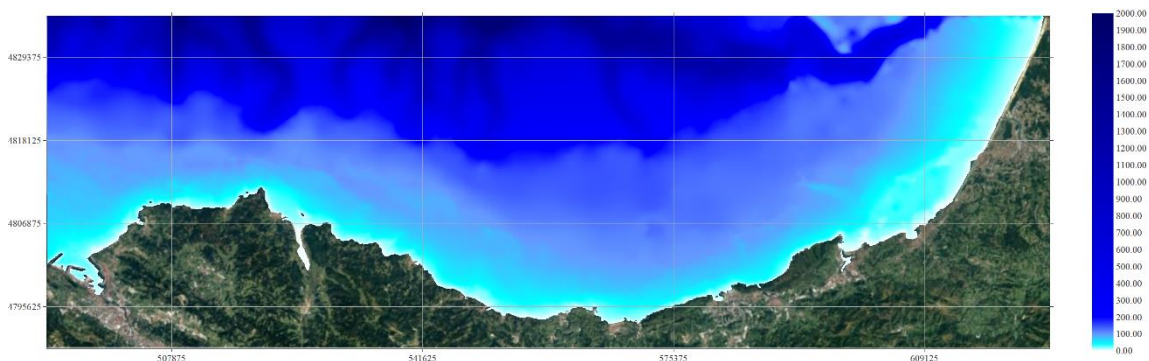


Figura 17. Malla exterior. Zona de Euskadi

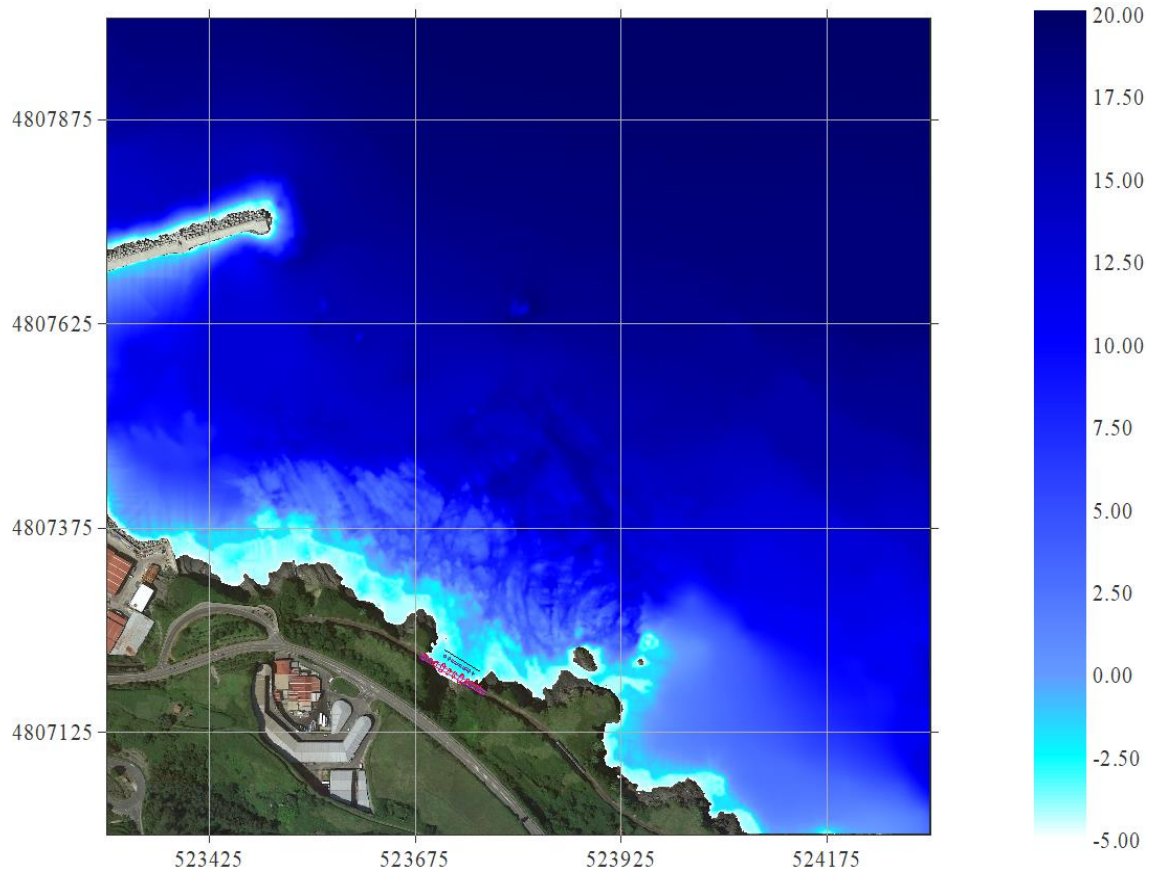


Figura 18. Malla de detalle. Cala del viaducto.

La propagación de los oleajes extremos definidos anteriormente se realiza con el nivel del mar de diseño, con una cota de +5,50 m.

El valor del nivel del mar de diseño ha sido definido teniendo en cuenta la marea astronómica, con un máximo de +4,80 m, la sobreelevación debida a marea meteorológica, con un valor estimado de 0,50 m, y los efectos del cambio climático, que en la costa española, puede considerarse un valor de 0,20 m para un horizonte temporal de 50 años (ver apartado 4.3).

3.2. RESULTADOS DE LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Los resultados de las propagaciones se resumen de manera gráfica en el Apéndice 2: figuras de propagación en la malla de detalle de los oleajes correspondientes a la estima de la banda superior de confianza del 90% para un periodo de retorno de 238 años.

A partir de los resultados de las propagaciones, se ha procedido a definir el oleaje de cálculo a lo largo de la alineación donde se situará la protección marítima de las pilas del viaducto, tomada esta a los bloques actuales de protección (ver Figura 27).

Como resumen de los resultados del análisis del oleaje de diseño para el conjunto de oleajes propagados desde aguas profundas hasta el viaducto de Lamiaran, se reseñan en la Tabla 5, los valores máximos que se producen a pie de viaducto para los distintos sectores, de acuerdo con la banda superior de confianza del 90% y el periodo de retorno de 238 años.

A modo de ejemplo se indica en la Figura 28 la distribución de la altura de ola y la dirección de incidencia para los oleajes del WNW que generan los valores máximos a pie de viaducto, que se corresponden con el nivel de pleamar y el mayor de los dos periodos considerados.

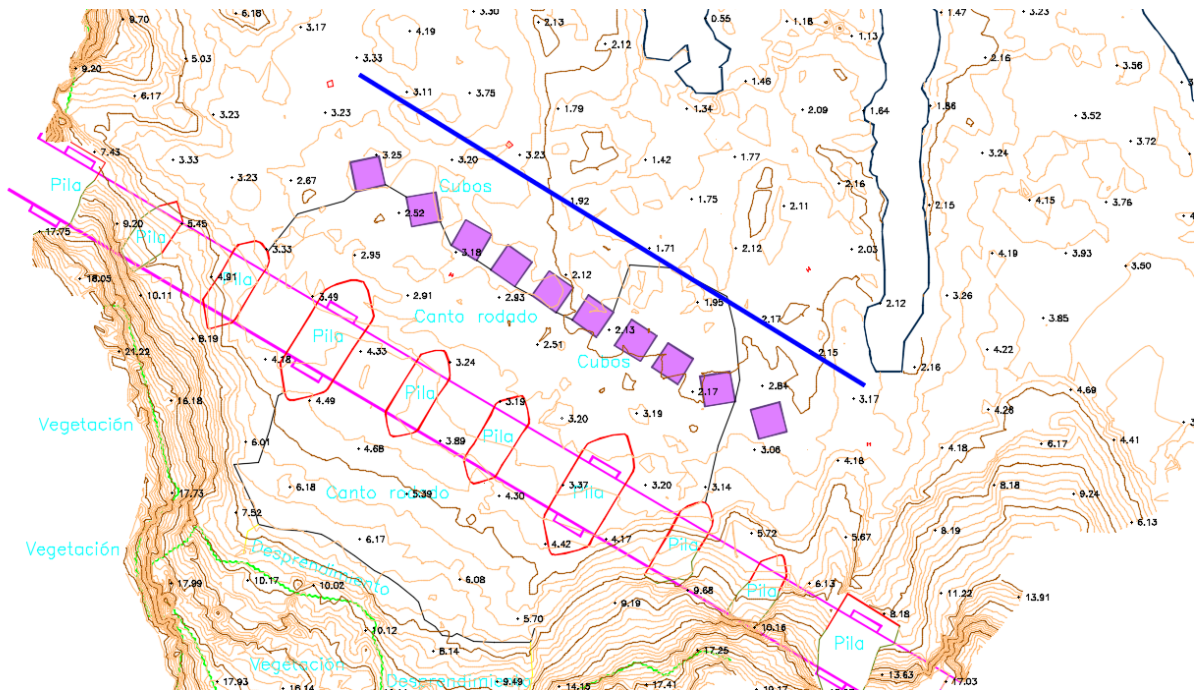


Figura 19. Alineación para obtención del oleaje de cálculo frente a los bloques de protección del viaducto de Lamiaran.

Oleaje Diseño		T _{pmin}	T _{pmax}
N	Hs (m)	3,08	3,79
	T _p (s)	14	18
	Dir (°)	16,2	21,3
NNW	Hs (m)	3,16	3,68
	T _p (s)	15	18,5
	Dir (°)	13,6	18,9
NW	Hs (m)	3,37	4,01
	T _p (s)	16	22
	Dir (°)	15,9	15,8
WNW	Hs (m)	3,49	4,13
	T _p (s)	17	22,5
	Dir (°)	15,2	14,4

Tabla 5. Valores del oleaje de diseño asociados a la banda superior de confianza del 90% y T=238 años.

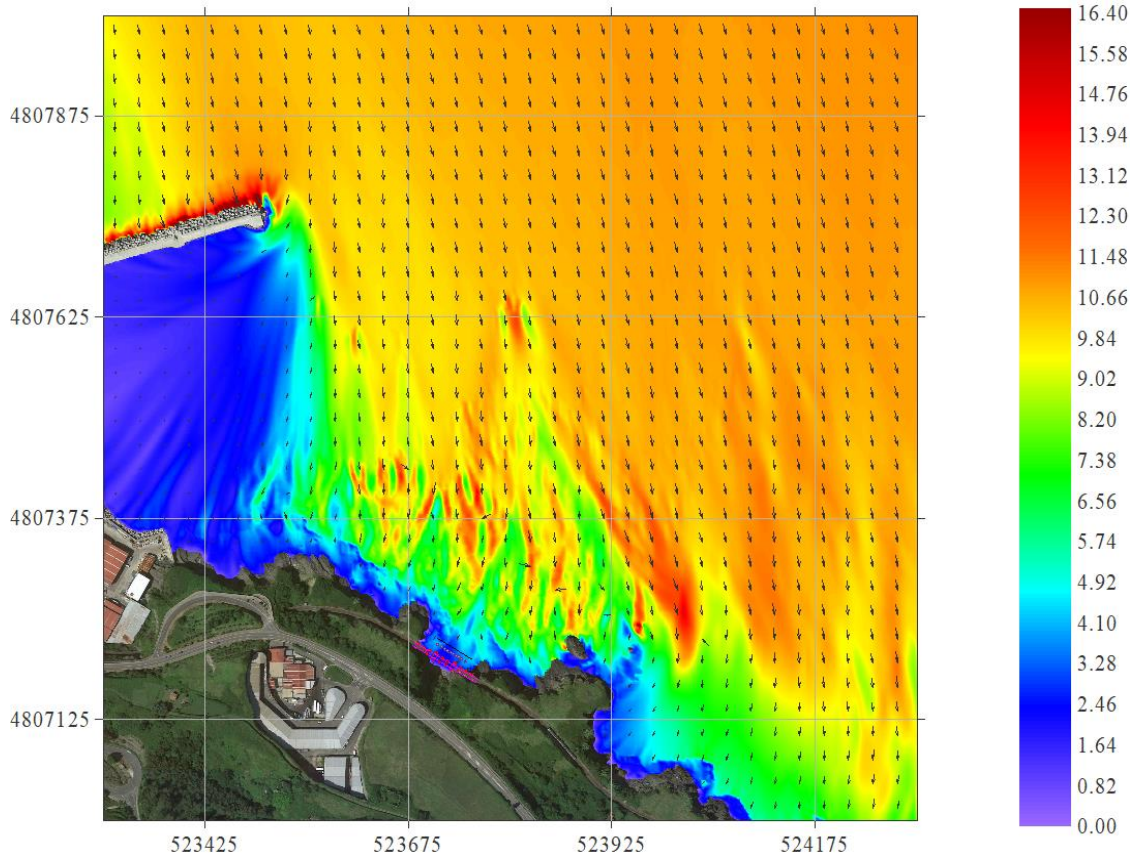


Figura 20. Distribución de Hso y dirección media. Sector WNW. Hso = 16.36 m; T_p = 22.5 s.; Pleamar.

4. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Toda la información relativa a la subida del nivel medio del mar ha sido extraída del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) elaborado entre 2013 y 2014: "*Climate Change 2013. The Physical Science Basis*", y las sus conclusiones más destacables se exponen a continuación.

4.1. NIVEL MEDIO DEL MAR GLOBAL

La subida del nivel del mar global, como media del ascenso del nivel del mar de todo el planeta, se debe fundamentalmente a dos factores:

- La expansión térmica del agua del mar, debido a que el calentamiento del agua produce un aumento en su volumen.
- El deshielo, motivado por el incremento global de la temperatura.

La expansión térmica es la responsable de aproximadamente un tercio de la subida del nivel del mar global, producida en el siglo XX hasta 1990. Desde entonces, el deshielo procedente de glaciares, capas de hielos continentales y polares ha sido mucho más importante.

El ascenso observado entre 1880 y el año 2009 ha sido aproximadamente de 0,21 m, existiendo una considerable variabilidad de la tasa de ascenso a lo largo del siglo XX.

El IPCC proporciona las proyecciones de subida de nivel del mar más fiables para los diferentes escenarios de emisiones. En concreto se valoran 5 escenarios: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5, y SRES A1B. Los Escenarios RCP (del inglés, *Representative Concentration Pathways*) son cuatro escenarios de emisiones sobre la evolución estimada de la emisión y concentración de gases de efecto

invernadero a la atmósfera durante el siglo XXI, establecidos por el IPCC, metro que el último se obtiene de simulaciones semi-empíricas.

Como se puede observar en la Tabla 6 y la Figura 29, hasta el año 2050 el nivel del mar aumenta con una tasa similar en los cinco escenarios, con un aumento en torno a 0,17-0,38 m sobre el nivel de referencia en el periodo 1980-2000. Sin embargo, para finales del siglo XXI, la elección de un escenario u otro supone claras diferencias en el nivel del mar, variable de 0,28 a 0,98 m de ascenso.

Los valores que se muestran en la Tabla 6 muestran el aumento del nivel del mar relativo al período de referencia 1986-2005. Aunque la vida útil de la obra sea de 25 años para considerar el efecto del cambio climático según el Artículo 92 del RD 876/2014, se tomará un horizonte temporal de 50 años. Por tanto, se tomarán la información del IPCC con las proyecciones previstas para el período 2046-2065, que integra la tendencia a una proyección de 60 años.

Los valores medios para el período 2046-2065 son 0,26 m para el escenario RCP4.5, y 0,30 m para el escenario RCP8.5, que supone una tendencia de $4,33 \pm 1,17$ mm/año para el escenario RCP4.5 y de $5,00 \pm 1,33$ mm/año para el escenario RCP8.5. Según estos valores, en 50 años se tendría una subida de nivel del medio de $21,6 \pm 5,8$ cm para el escenario RCP4.5 y de $25,0 \pm 6,6$ cm para el escenario RCP8.5.

	SRES A1B	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Thermal expansion	0.21 [0.16 to 0.26]	0.14 [0.10 to 0.18]	0.19 [0.14 to 0.23]	0.19 [0.15 to 0.24]	0.27 [0.21 to 0.33]
Glaciers ^a	0.14 [0.08 to 0.21]	0.10 [0.04 to 0.16]	0.12 [0.06 to 0.19]	0.12 [0.06 to 0.19]	0.16 [0.09 to 0.23]
Greenland ice-sheet SMB ^b	0.05 [0.02 to 0.12]	0.03 [0.01 to 0.07]	0.04 [0.01 to 0.09]	0.04 [0.01 to 0.09]	0.07 [0.03 to 0.16]
Antarctic ice-sheet SMB ^c	-0.03 [-0.06 to -0.01]	-0.02 [-0.04 to -0.00]	-0.02 [-0.05 to -0.01]	-0.02 [-0.05 to -0.01]	-0.04 [-0.07 to -0.01]
Greenland ice-sheet rapid dynamics	0.04 [0.01 to 0.06]	0.04 [0.01 to 0.06]	0.04 [0.01 to 0.06]	0.04 [0.01 to 0.06]	0.05 [0.02 to 0.07]
Antarctic ice-sheet rapid dynamics	0.07 [-0.01 to 0.16]	0.07 [-0.01 to 0.16]	0.07 [-0.01 to 0.16]	0.07 [-0.01 to 0.16]	0.07 [-0.01 to 0.16]
Land water storage	0.04 [-0.01 to 0.09]	0.04 [-0.01 to 0.09]	0.04 [-0.01 to 0.09]	0.04 [-0.01 to 0.09]	0.04 [-0.01 to 0.09]
Global mean sea level rise in 2081–2100	0.52 [0.37 to 0.69]	0.40 [0.26 to 0.55]	0.47 [0.32 to 0.63]	0.48 [0.33 to 0.63]	0.63 [0.45 to 0.82]
Greenland ice sheet	0.09 [0.05 to 0.15]	0.06 [0.04 to 0.10]	0.08 [0.04 to 0.13]	0.08 [0.04 to 0.13]	0.12 [0.07 to 0.21]
Antarctic ice sheet	0.04 [-0.05 to 0.13]	0.05 [-0.03 to 0.14]	0.05 [-0.04 to 0.13]	0.05 [-0.04 to 0.13]	0.04 [-0.06 to 0.12]
Ice-sheet rapid dynamics	0.10 [0.03 to 0.19]	0.10 [0.03 to 0.19]	0.10 [0.03 to 0.19]	0.10 [0.03 to 0.19]	0.12 [0.03 to 0.20]
Rate of global mean sea level rise	8.1 [5.1 to 11.4]	4.4 [2.0 to 6.8]	6.1 [3.5 to 8.8]	7.4 [4.7 to 10.3]	11.2 [7.5 to 15.7]
Global mean sea level rise in 2046–2065	0.27 [0.19 to 0.34]	0.24 [0.17 to 0.32]	0.26 [0.19 to 0.33]	0.25 [0.18 to 0.32]	0.30 [0.22 to 0.38]
Global mean sea level rise in 2100	0.60 [0.42 to 0.80]	0.44 [0.28 to 0.61]	0.53 [0.36 to 0.71]	0.55 [0.38 to 0.73]	0.74 [0.52 to 0.98]
Only the collapse of the marine-based sectors of the Antarctic ice sheet, if initiated, could cause GMSL to rise substantially above the <i>likely</i> range during the 21st century. This potential additional contribution cannot be precisely quantified but there is <i>medium confidence</i> that it would not exceed several tenths of a meter of sea level rise.					

Notes:

- ^a Excluding glaciers on Antarctica but including glaciers peripheral to the Greenland ice sheet.
- ^b Including the height-SMB feedback.
- ^c Including the interaction between SMB change and outflow.

Tabla 6. Valores de subida del nivel medio para diferentes escenarios (fuente: IPCC).

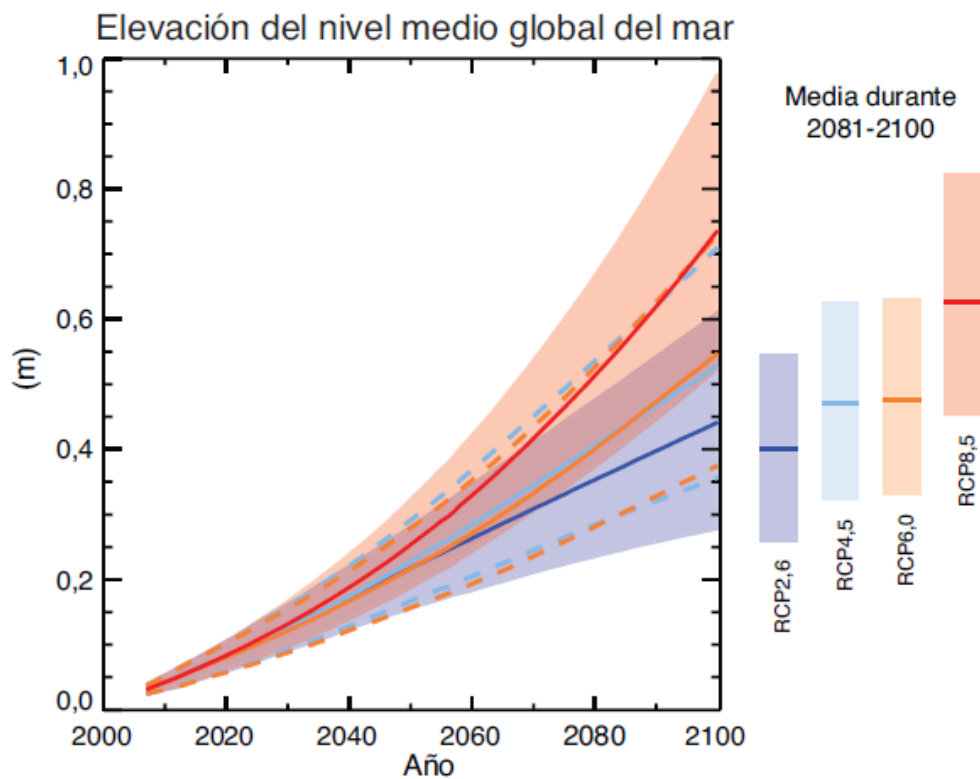


Figura 21. Subida del nivel medio del mar según los diferentes escenarios (fuente: IPCC).

Por otro lado, hay autores que han determinado que las proyecciones del IPCC se quedan cortas, y han establecido subidas del nivel medio mucho más acusadas para finales de siglo. Aunque en estos escenarios se les da menos probabilidad de acierto, debido a que son muy relevantes los valores que ofrecen.

Vermeer and Rahmstorf (2009) establecieron posibles subidas del nivel medio del mar a escala global para finales de siglo, entre ellas que los escenarios más pesimistas se acercan a los 2 m (ver Tabla 7 y Figura 30).

Table 1. Temperature ranges and associated sea-level ranges by the year 2100 for different IPCC emission scenarios

Scenario	Temperature range, °C above 1980–2000	Model average, °C above 1980–2000	Sea-level range, cm above 1990	Model average, cm above 1990
B1	1.4–2.9	2.0	81–131	104
A1T	1.9–3.8	2.6	97–158	124
B2	2.0–3.8	2.7	89–145	114
A1B	2.3–4.3	3.1	97–156	124
A2	2.9–5.3	3.9	98–155	124
A1FI	3.4–6.1	4.6	113–179	143

The temperatures used are taken from the simple model emulation of 19 climate models as shown in figure 10.26 of the IPCC AR4 (2); they represent the mean \pm 1 SD across all models, including carbon cycle uncertainty. The sea-level estimates were produced by using Eq. 2 and 342 temperature scenarios and are given here excluding the uncertainty of the statistical fit, which is approximately \pm 7% (1 SD).

Tabla 7. Valores de subida del nivel medio en escenario pesimista.

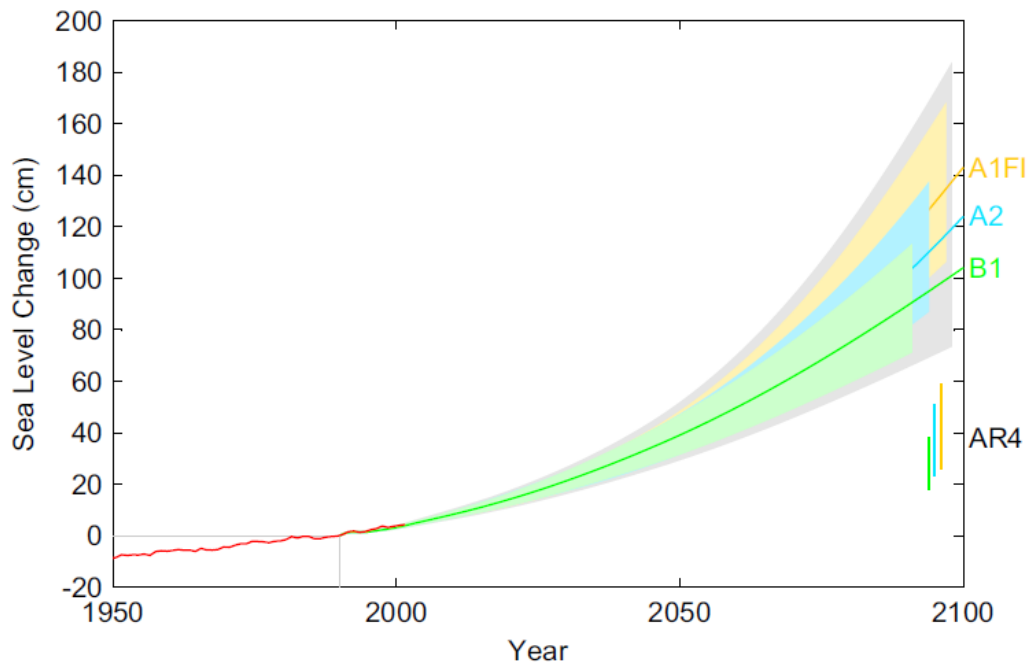


Figura 22. Valores de subida del nivel medio según Vermeer and Rahmstorf.

Para conocer los valores de referencia en el presente Estudio, se deben tomar los valores a escala global como referencia, sobre los que se aplican las variaciones regionales o locales según la zona.

4.2. NIVEL MEDIO DEL MAR REGIONAL: COSTA CANTÁBRICA ESPAÑOLA

En cuanto a proyecciones a nivel regional la información disponible es muy limitada. Todo apunta a que a lo largo del siglo XXI el nivel en las costas españolas seguirá subiendo. En cuanto a los nuevos escenarios de cambio climático, tampoco son muchos los estudios realizados a nivel regional, si bien el más fiable corresponde a Slangen *et al.* (2014), donde se hicieron proyecciones regionalizadas para las cuencas de todo el mundo para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

En el presente informe se tomarán como referencia las proyecciones del IPCC, donde se expone que el efecto regional en el Cantábrico genera una reducción de un 10% sobre los valores medios globales (ver Figura 31).

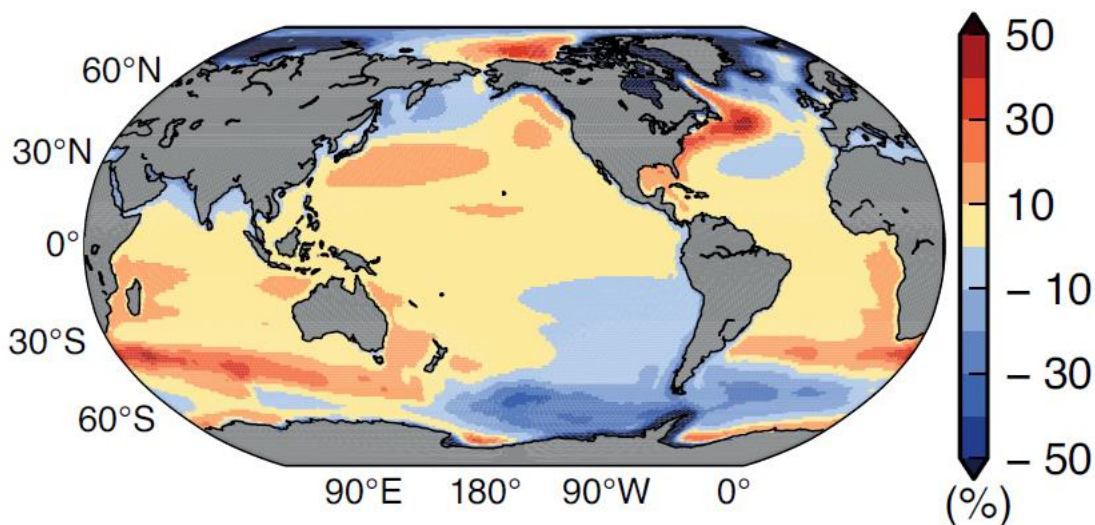


Figura 23. Desviaciones regionales en relación al nivel global (fuente: IPCC).

Aplicando esa reducción del 10% en las tendencias obtenidas a nivel global, resulta que la tendencia para la región cantábrica sería de $3,90 \pm 1,05$ mm/año para el escenario RCP4.5 y de $4,50 \pm 1,20$ mm/año para el escenario RCP8.5. Según estos valores, en 50 años se tendría una subida de nivel del medio de $19,6 \pm 5,2$ cm para el escenario RCP4.5 y de $22,6 \pm 6,0$ cm para el escenario RCP8.5.

En España se han desarrollado diversos estudios sobre el aumento del nivel del mar en su costa, obteniéndose tasas de crecimiento de entre 2 y 3 mm/año durante el último siglo, con importantes variaciones en la cuenca mediterránea debido a efectos regionales.

En el País Vasco, se han determinado los valores de subida del nivel medio del mar, analizando los datos del mareógrafo de Bilbao (REDMAR, *Puertos del Estado*). Tal y como se muestran en la Figura 32, se observa un incremento sobre los valores medios anuales de $2,55 \pm 0,52$ mm/año. Dichos valores resultan ligeramente inferiores a los mostrados según las tendencias del IPCC. Según estos valores en 50 años se tendría una subida de $12,8 \pm 2,6$ cm.

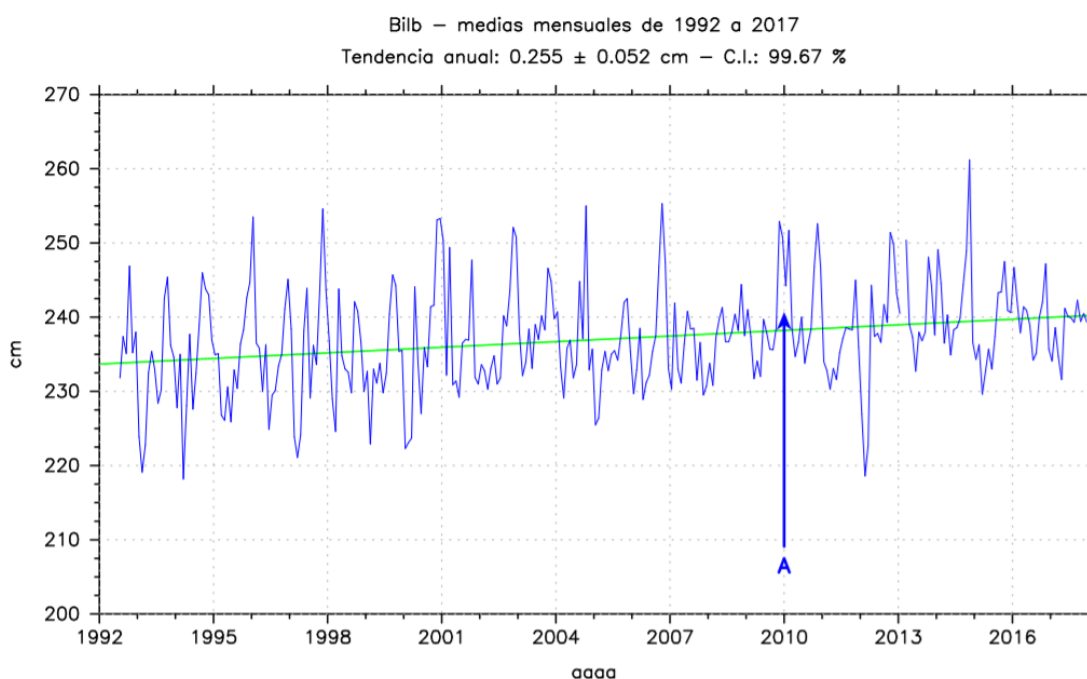


Figura 24. Tendencia anual de subida de nivel del mar según datos del Mareógrafo de Bilbao (fuente: Puerto del Estado).

4.3. NIVEL MEDIO DEL MAR LOCAL

Para obtener la subida del nivel del mar local en las costas españolas hay que sumar, al valor regionalizado, los movimientos verticales de la corteza terrestre asociados a la subsidencia.

Este fenómeno es especialmente importante en desembocaduras de ríos donde se producen aportes de sedimentos. En España resultan especialmente destacables el Delta del Ebro y la zona de la desembocadura del Guadalquivir.

En el caso la Costa Cantábrica, debido a la lejanía con zonas deltaicas, no se producen modificaciones de la zona batimétrica cercana.

Con ello, para futuras proyecciones se mantienen los valores medios del mar regionalizados para la costa Cantábrica anteriores, o en todo caso, se atiende a las tendencias ofrecidas por el mareógrafo de Bilbao que muestran valores inferiores a las tendencias del IPCC, y por ello se eligen los valores de la banda inferior en estos últimos.

4.4. ESCENARIOS CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO

Finalmente, y de acuerdo con los valores anteriores, se han considerado 3 posibles escenarios para valorar la subida del nivel medio del mar para el año 2071: RCP4.5, RCP8.5 y tendencias del

mareógrafo de Bilbao. Los valores de subida de nivel del mar establecidos según estos escenarios se muestran en la Tabla 8.

$\delta\eta$ (m)	2071 Regional/Local
RCP 4.5	0,14
RCP 8.5	0,16
Bilbao	0,16

Tabla 8. Valores de subida del nivel medio relativos a 2021 considerado en este Estudio.

De acuerdo con estos valores, la subida de nivel del mar esperable en los próximos 50 años alcanzará valores entre los 15 y los 20 cm.

5. ESTUDIO DE DINÁMICA LITORAL

En este apartado se realiza un estudio básico de dinámica litoral para evaluar los posibles efectos de las actuaciones previstas sobre la dinámica litoral de la zona, según el Artículo 93 del RD 876/2014.

5.1. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE LITORAL

Como se puede apreciar en la siguiente ortofoto, la zona objeto del proyecto está formada por lajas y bajos rocosos. A partir de la naturaleza de este tramo costero se puede concluir que es una zona en la que no se produce un transporte litoral, ya que este tipo de material (Figuras 34 y 35) no es susceptible de entrar en movimiento por la acción del oleaje.



Figura 25. Tipología de la costa en las inmediaciones del viaducto de Mundaka.



Figura 26. Bajos rocosos en la zona frontal del viaducto de Mundaka.



Figura 27. Bajos rocosos en la zona lado mar del viaducto de Mundaka.

5.2. ANÁLISIS DE LA LADERA SITUADA EN LADO TIERRA DEL VIADUCTO DE MUNDAKA

A continuación, se realiza un análisis del tramo de costa que queda protegido parcialmente frente la acción del oleaje por las pilas del propio viaducto.



Figura 28. Ladera situada en el lado tierra del viaducto de Mundaka.

Se trata de un entrante que queda encajado y protegido parcialmente del oleaje por las pilas del propio viaducto. El material de este entrante de costa está formado por cantos rodados de diferente tamaño, variando desde valores centimétricos (entre 2 y 10 cm) a decimétricos (entre 10 y 40 cm).

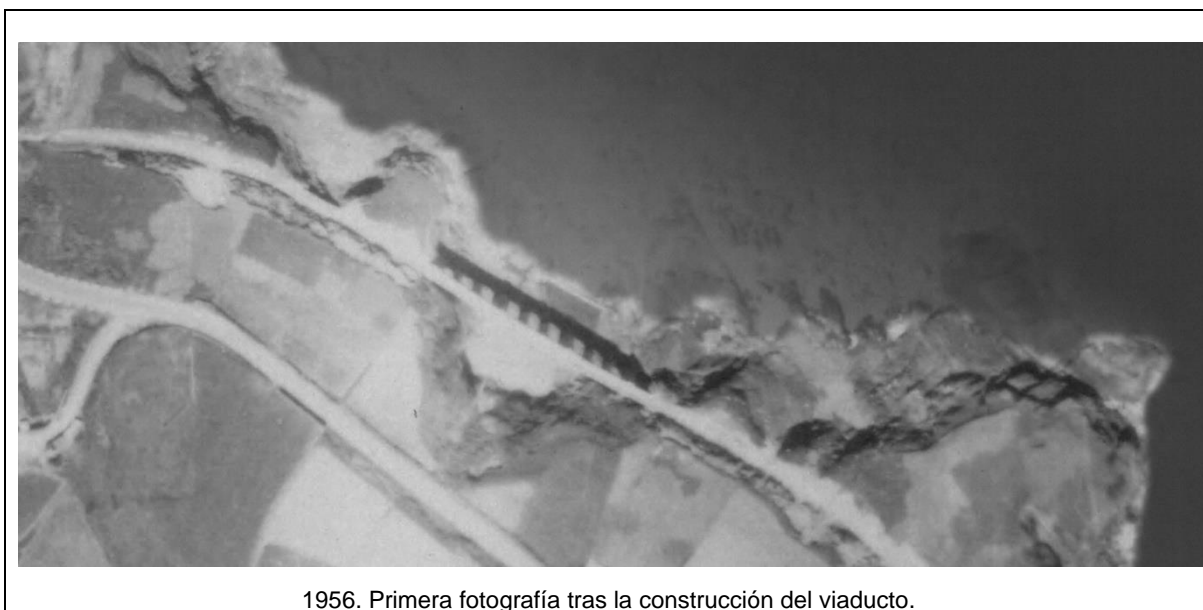


Figura 29. Entrante de costa en el lado tierra del viaducto de Mundaka.



Figura 30. Tamaño de los cantos rodados en el entrante de costa en el lado tierra del viaducto de Mundaka.

A partir del análisis de diferentes fotografías aéreas de diferentes años se puede concluir que si bien se producen ciertos derrumbes del material tipo suelo de la ladera, el entrante de costa y el material de cantos rodados se ha mantenido en un equilibrio estable.

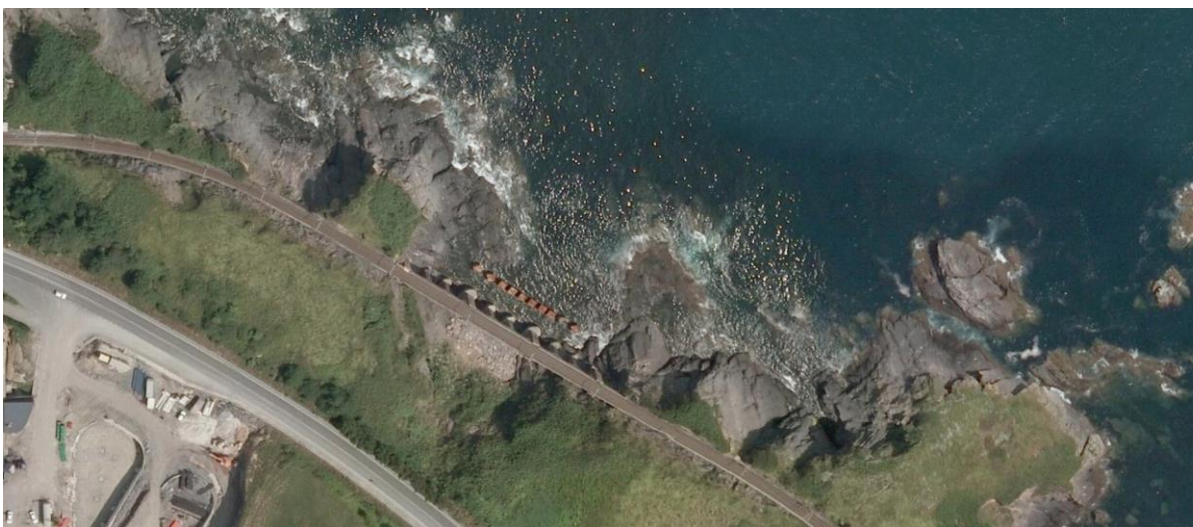




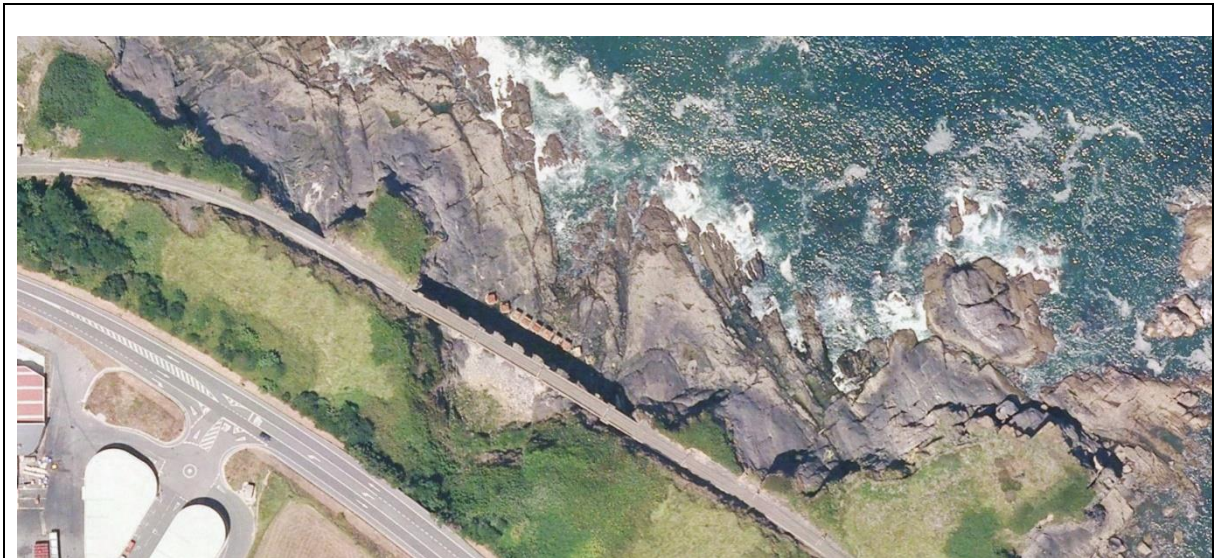
1990. Posible derrumbe de material por la construcción de la carretera



1995. Bloques de protección desplazados por la acción del oleaje.



2006. Bloques de protección anclados al sustrato rocoso. Mayor vegetación en la parte inferior de la ladera.



2012. Bloques de protección anclados al sustrato rocoso. Se mantiene la vegetación en la parte inferior de la ladera.



2016. Bloques de protección anclados al sustrato rocoso, pero con signos evidentes de deterioro. Se observa menor vegetación en la parte inferior de la ladera posiblemente causada por la incidencia de los temporales del año 2014.

Cabe destacar la actuación de protección del viaducto mediante bloques de peso 40 toneladas, que en la fotografía de 1995 se puede observar que han sufrido movimiento desde su posición original. Posteriormente, en el año 2004 se realizó el anclaje de estos elementos de protección al sustrato rocoso, observándose a partir de ese año como la ladera presenta una mayor estabilidad, que se traduce en una mayor presencia de vegetación en la zona del pie de la ladera.

No obstante, en situaciones de temporal y pleamares se pueden producir erosiones en el pie de la ladera, principalmente en el material tipo suelo.



Figura 31. Erosiones localizadas en el pie de la ladera.

5.3. OLEAJE INCIDENTE

A partir de las propagaciones realizadas, descritas en el apartado 4.2, y obteniendo valores de la altura de ola en dos alineaciones situadas en el lado mar y en el lado tierra de las pilas (líneas rojas).

Mientras que en la alineación lado mar se alcanzan unos valores de altura de ola significantes comprendidos entre 3,0 y 3,5 m, en la alineación situada inmediatamente tras las pilas del viaducto la altura de ola significativa se reduce de forma muy significativa hasta valores entre 1,0 y 1,3 m. Hay que tener en cuenta que son valores en régimen extremal y para un periodo de retorno de 238 años, y que tampoco consideran el efecto de los bloques de protección y las pilas del propio viaducto.

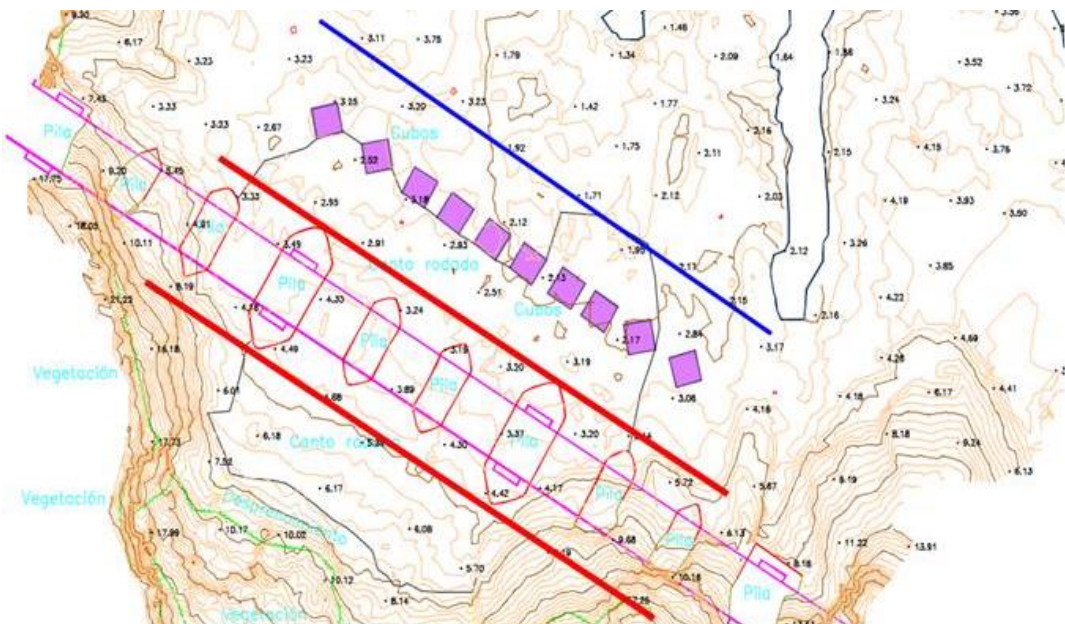


Figura 32. Alineaciones para obtención de valores de altura de ola en las inmediaciones del viaducto.

5.4. CONCLUSIONES

A partir del análisis realizado, se puede concluir que en la zona objeto de estudio no hay un impacto en la dinámica litoral de la zona, ya que no hay capacidad de transporte porque este tipo de material no es susceptible de entrar en movimiento por la acción del oleaje.

Por otro lado, las protecciones marítimas planteadas producirán una reducción del oleaje incidente en la entrada de costa situada en el lado tierra del viaducto lo que favorecerá la estabilidad de esta zona frente a la acción del oleaje, reduciéndose las inestabilidades en el pie de la ladera.

APÉNDICE: FIGURAS DE PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

APÉNDICE: FIGURAS DE PROPAGACIÓN MALLA DETALLE

Listado de figuras

<i>Figura 1. Malla detalle. Distribución de Hs_0 y dirección media. Sector N. $Hs_0 = 9.56$ m; $T_p = 14$ s.; Pleamar.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Malla detalle. Distribución de Hs_0 y dirección media. Sector N. $Hs_0 = 9.56$ m; $T_p = 18$ s.; Pleamar.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 3. Malla detalle. Distribución de Hs_0 y dirección media. Sector NNW. $Hs_0 = 10.31$ m; $T_p = 15$ s.; Pleamar.</i>	<i>3</i>
<i>Figura 4. Malla detalle. Distribución de Hs_0 y dirección media. Sector NNW. $Hs_0 = 10.31$ m; $T_p = 18.5$ s.; Pleamar.</i>	<i>3</i>
<i>Figura 5. Malla detalle. Distribución de Hs_0 y dirección media. Sector NW. $Hs_0 = 15.43$ m; $T_p = 16$ s.; Pleamar.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 6. Malla detalle. Distribución de Hs_0 y dirección media. Sector NW. $Hs_0 = 15.43$ m; $T_p = 22$ s.; Pleamar.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 7. Malla detalle. Distribución de Hs_0 y dirección media. Sector WNW. $Hs_0 = 16.36$ m; $T_p = 17$ s.; Pleamar.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 8. Malla detalle. Distribución de Hs_0 y dirección media. Sector WNW. $Hs_0 = 16.36$ m; $T_p = 22.5$ s.; Pleamar.</i>	<i>5</i>

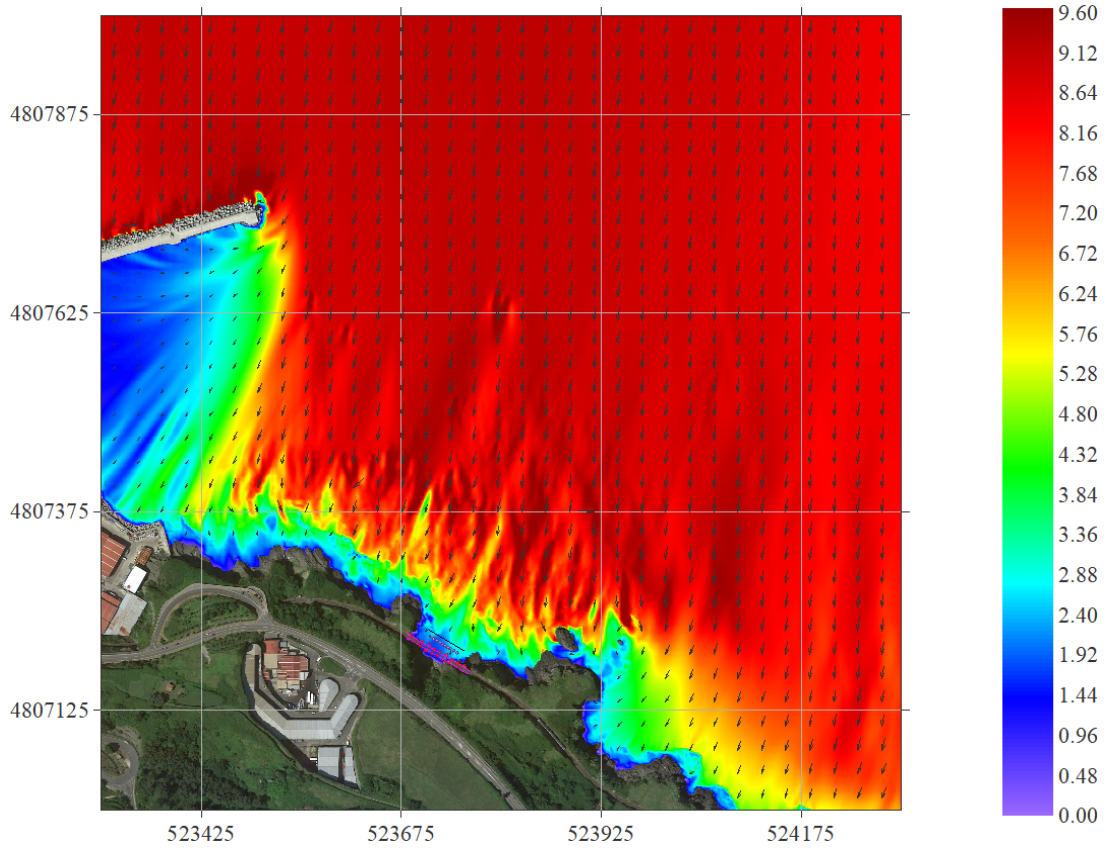


Figura 1. Malla detalle. Distribución de H_{s0} y dirección media. Sector N. $H_{s0} = 9.56$ m; $T_p = 14$ s.; Pleamar.

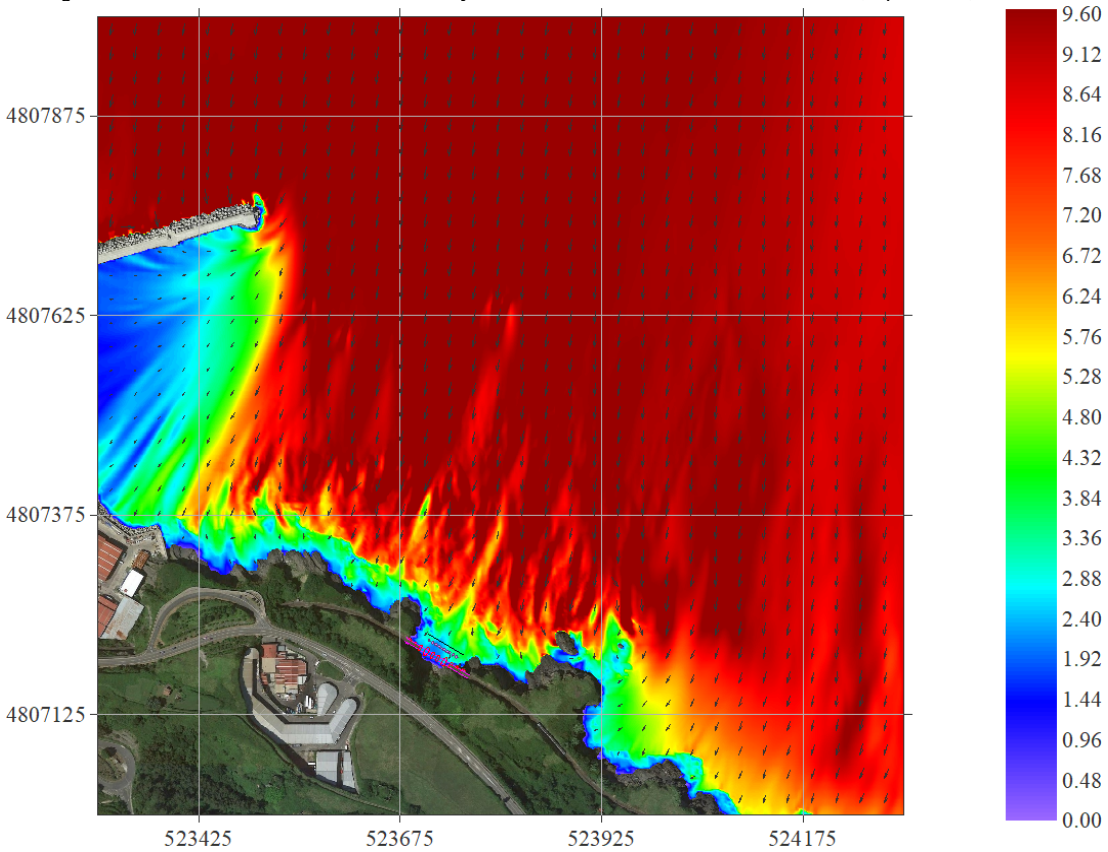


Figura 2. Malla detalle. Distribución de H_{s0} y dirección media. Sector N. $H_{s0} = 9.56$ m; $T_p = 18$ s.; Pleamar.

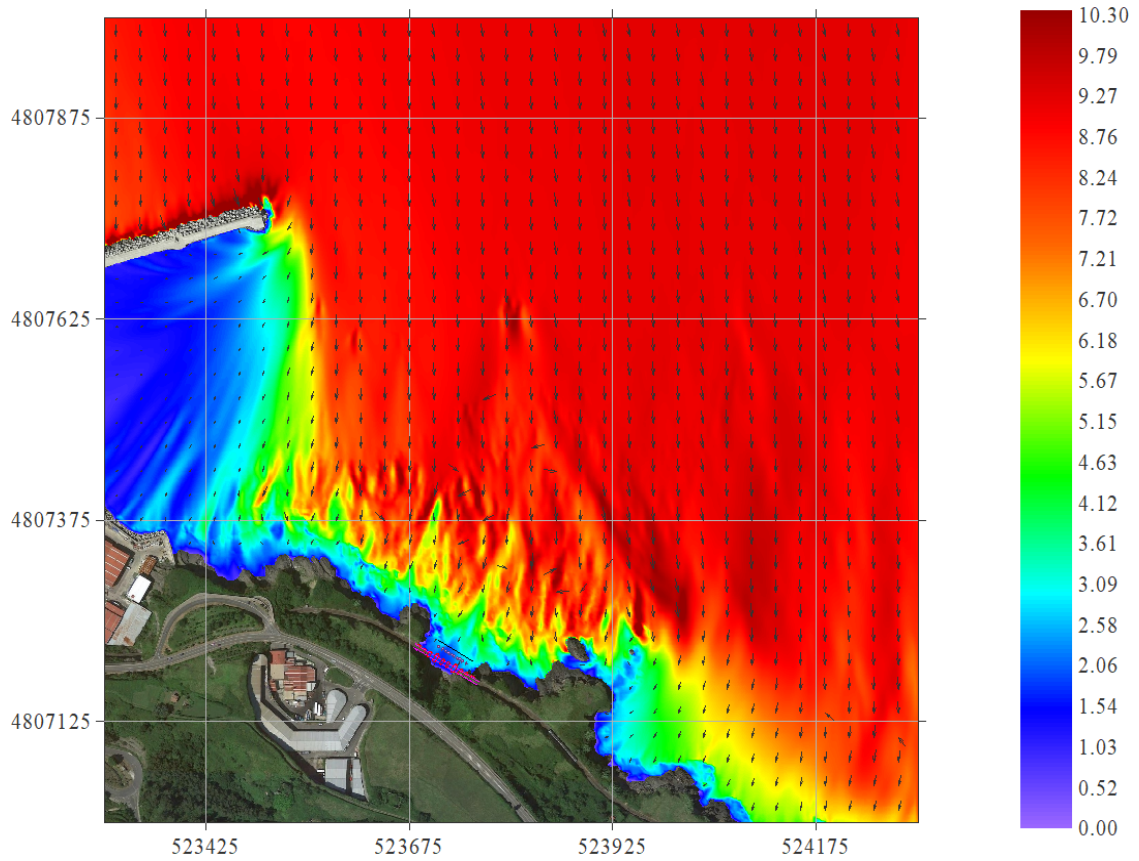


Figura 3. Malla detalle. Distribución de Hs0 y dirección media. Sector NNW. Hs0 = 10.31 m; Tp = 15 s.; Pleamar.

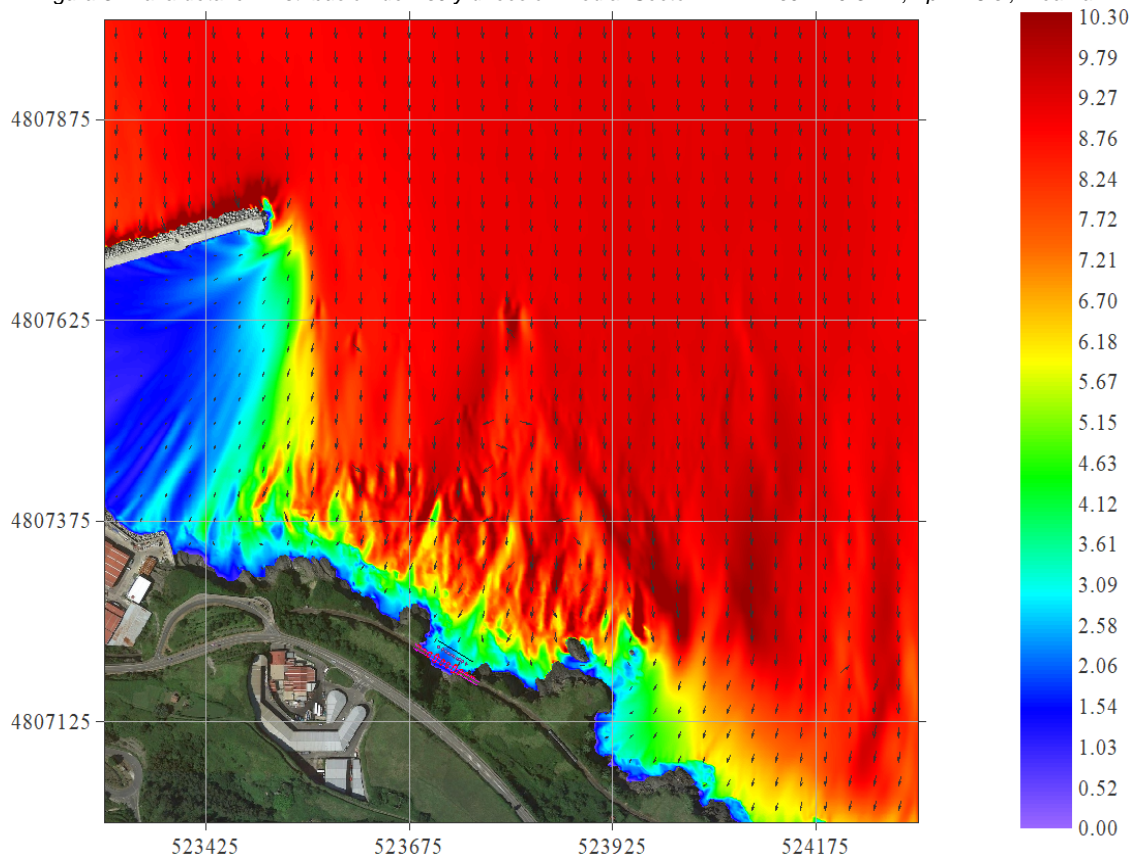


Figura 4. Malla detalle. Distribución de Hs0 y dirección media. Sector NNW. Hs0 = 10.31 m; Tp = 18.5 s.; Pleamar.

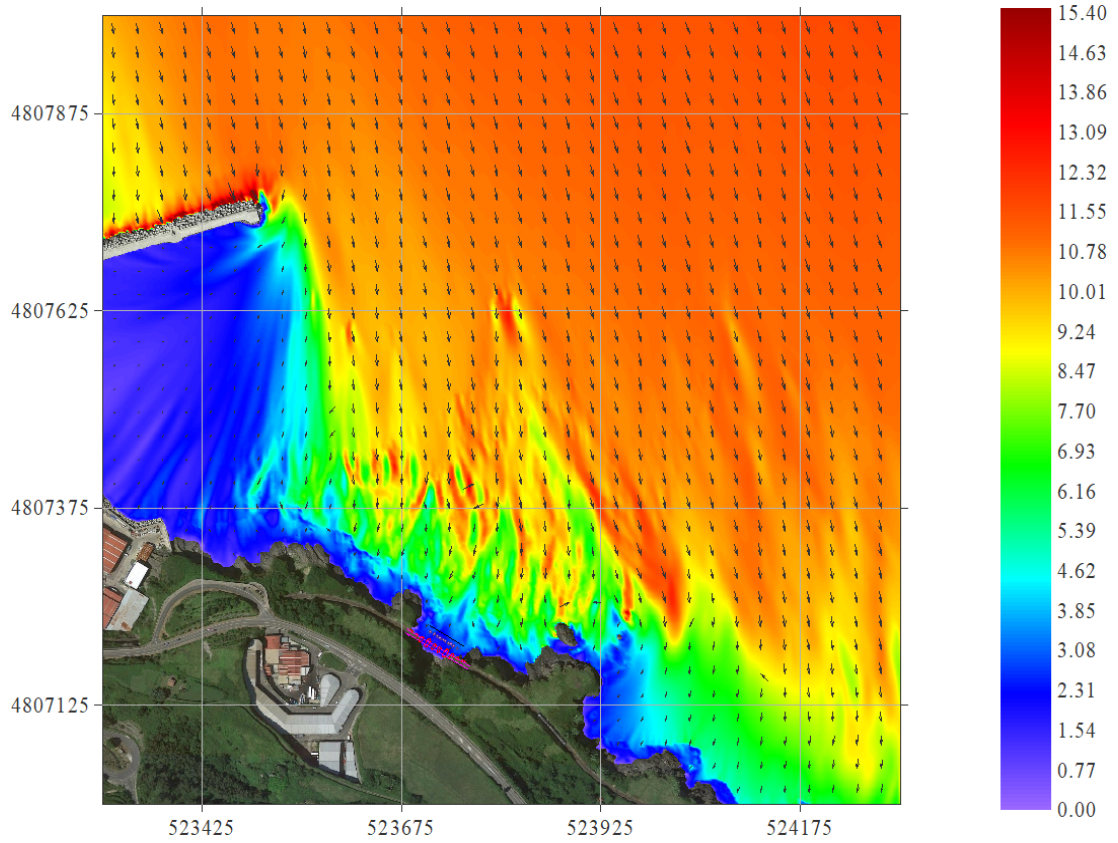


Figura 5. Malla detalle. Distribución de H_{s0} y dirección media. Sector NW. $H_{s0} = 15.43 \text{ m}$; $T_p = 16 \text{ s}$.; Pleamar.

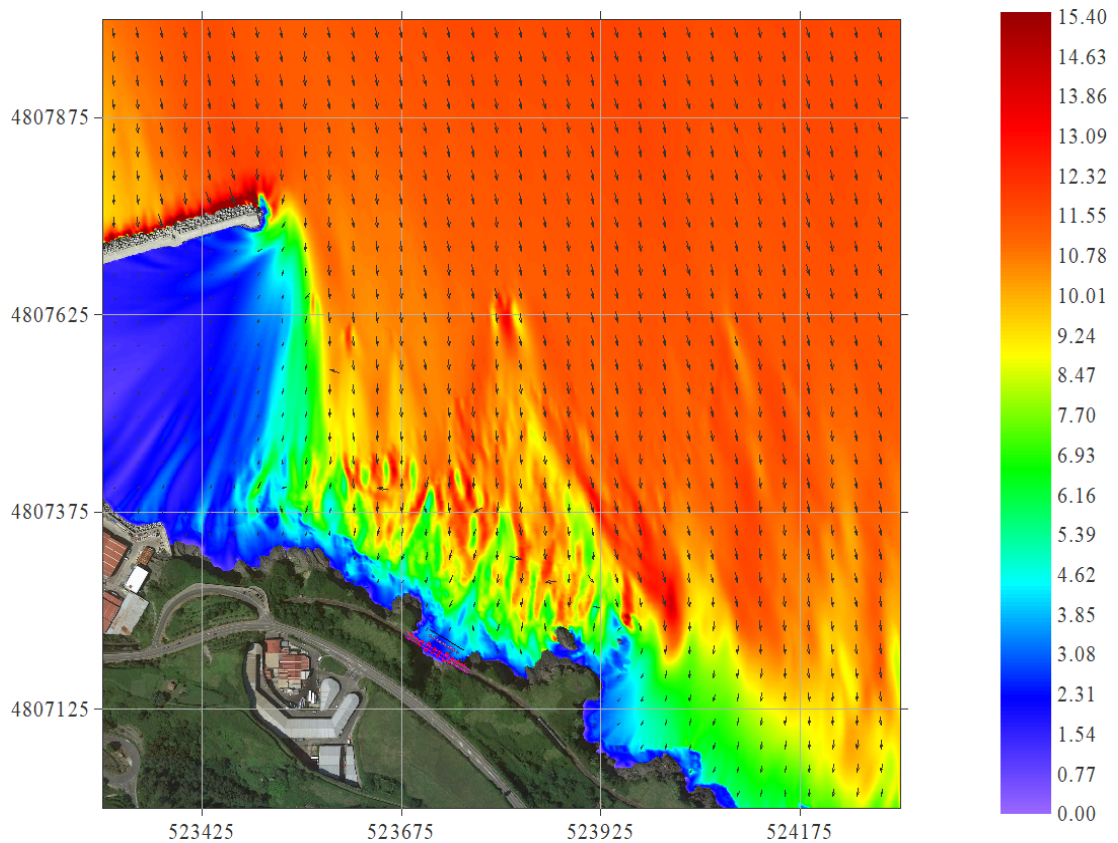


Figura 6. Malla detalle. Distribución de H_{s0} y dirección media. Sector NW. $H_{s0} = 15.43 \text{ m}$; $T_p = 22 \text{ s}$.; Pleamar.

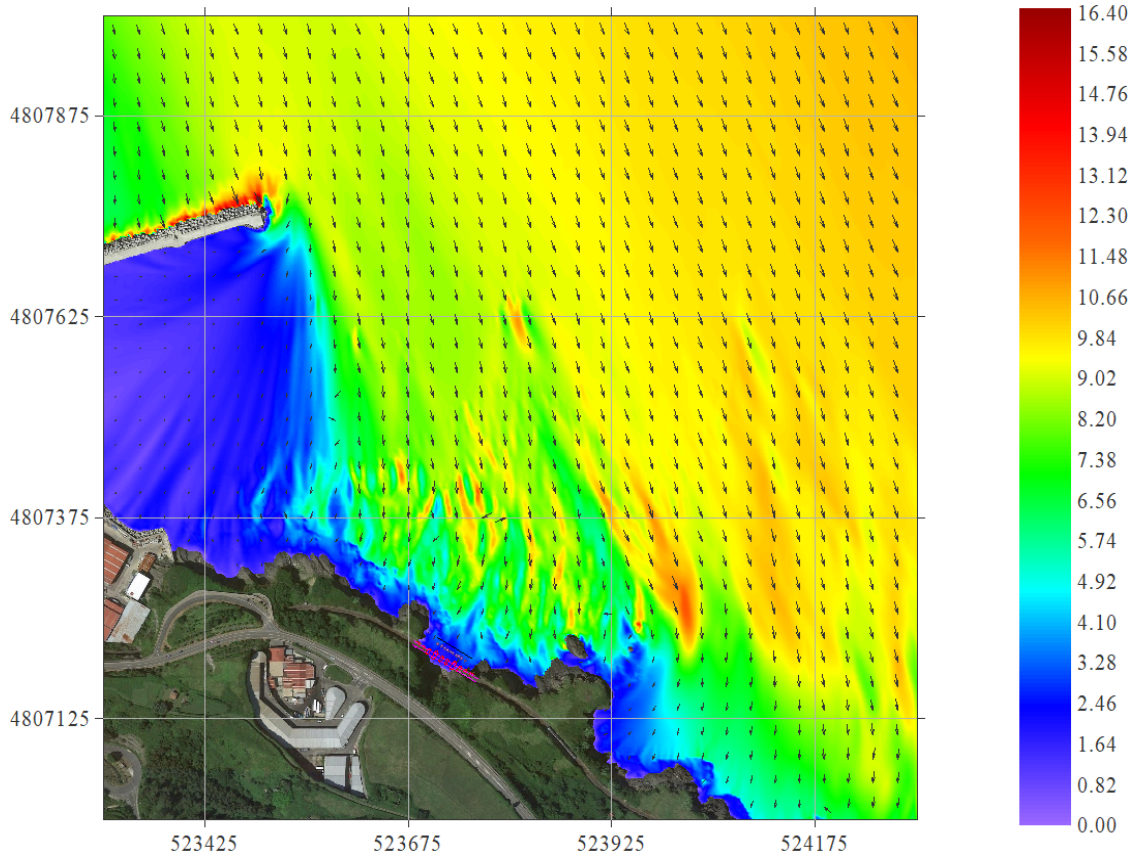


Figura 7. Malla detalle. Distribución de Hs0 y dirección media. Sector WNW. Hs0 = 16.36 m; Tp = 17 s.; Pleamar.

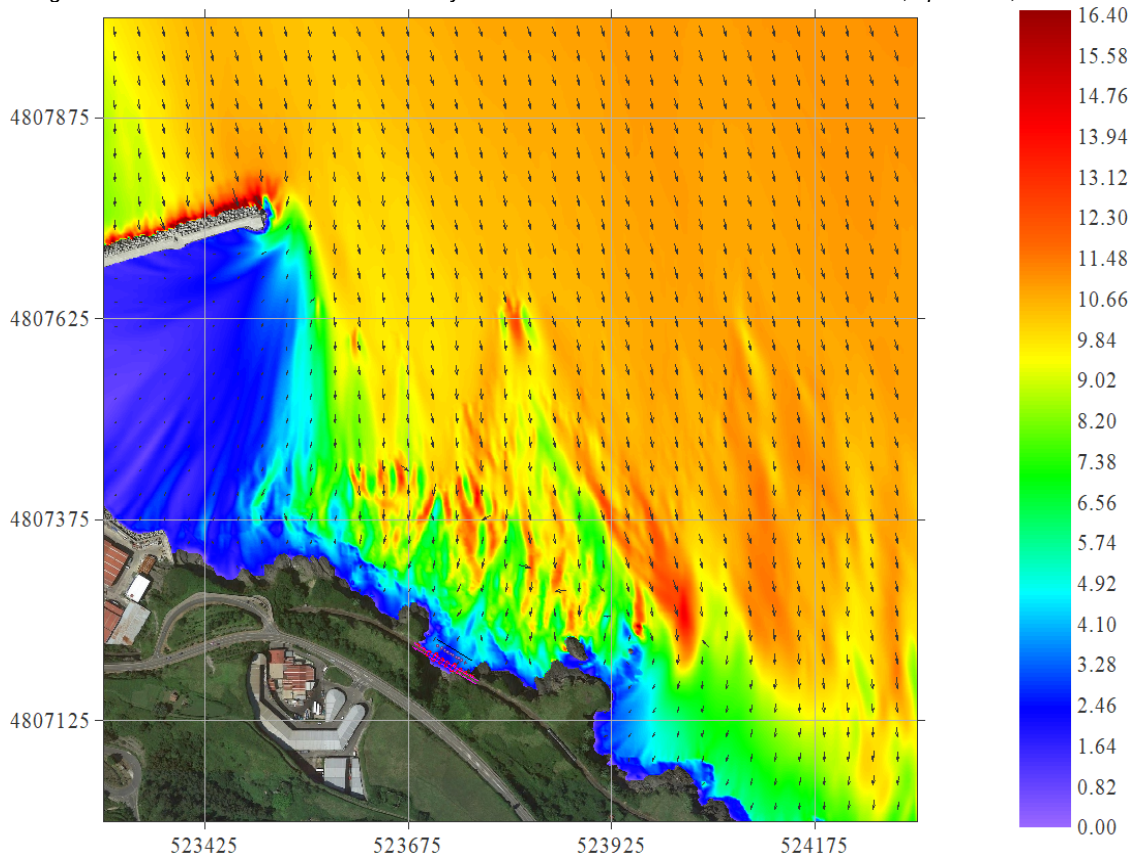


Figura 8. Malla detalle. Distribución de Hs0 y dirección media. Sector WNW. Hs0 = 16.36 m; Tp = 22.5 s.; Pleamar.