Sprilur

Proyecto de Refuerzo del Dique-Muro de la Central Nuclear de Lemoiz

ANEJO Nº3. ANÁLISIS CLIMA MARÍTIMO Y PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Junio 2023

TYPSA

TYPSA dispone de un Sistema de Gestión de la Integridad y desde 2019 cuenta con la Certificación ISO 37001 «Sistema de Gestión Antisoborno». A través del enlace *www.typsa.com/etica-e-integridad/* puede acceder a nuestra Política de Integridad Corporativa y a nuestro Código Ético, así como al canal de comunicación habilitado para denuncias, dudas, quejas o sugerencias.

Hoja de control de calidad

Documento	Anejo Nº3. Análisis clima marítimo y propagación del oleaje desde aguas profundas	
Proyecto	CP9486. Proyecto de refuerzo del dique-muro de la Central Nuclear de Lemoiz	
Código	CP9486-PC-AN-03-ClimaMaritimo-PropagacionOleaje-D01	
Autores:	Firma:	NRG
	Fecha:	09.06.2023
Verificado	Firma:	NUM
	Fecha:	09.06.2023
Destinatario	SPRILUR	
Notas		
Confidencialidad	Información confidencial	

Índice

Anejo Nº3. Análisis clima marítimo y propagación del oleaje desde aguas profundas

1. OBJETO 1
2. CARÁCTER GENERAL DE LA OBRA 2
   2.1. Índice de Repercusión Económica, IRE 2
   2.2. Índice de Repercusión Social y Ambiental, ISA 3
3. CLIMA MARÍTIMO 6
   3.1. Fuentes de datos 6
   3.2. Régimen medio 8
   3.3. Régimen extremal 9
   3.4. Relación entre Hs y Tp 12
4. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE 15
   4.1. Oleaje en aguas profundas 15
   4.2. Definición batimétrica 15
   4.3. Selección de mallas 17
   4.4. Modelo de propagación 18
   4.5. Puntos de control 19
   4.6. Nivel del mar de diseño 19
      4.6.1. Efecto del cambio climático en la subida del nivel del mar 20
   4.7. Resultados de la propagación de oleaje 25

APÉNDICE Nº1. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE DESDE AGUAS PROFUNDAS

Anejo Nº3. Análisis clima marítimo y propagación del oleaje desde aguas profundas

1. OBJETO

En el presente Anejo se analizan las condiciones de clima marítimo en aguas profundas, que permitan definir los valores del oleaje que posteriormente se trasladarán hasta el pie del dique-muro de la central de Lemoiz. El objetivo fundamental de este análisis es conocer el oleaje incidente sobre el dique para poder calcular el refuerzo del dique.

2. CARÁCTER GENERAL 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. Se determina de acuerdo con el procedimiento indicado en la ROM 0.0. "Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias" a partir de los índices de repercusión económica (IRE) y de repercusión social y ambiental (ISA). A través de estos índices se estima la vida útil de la obra y el periodo de retorno considerado para el cálculo del oleaje de diseño.

2.1. Índice de Repercusión Económica, IRE

Este índice valora cuantitativamente las repercusiones económicas, por reconstrucción de la obra (C_{RD}), y por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con ella (C_{RI}), previsibles, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma. El IRE se define por la siguiente expresión:

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0}$$

donde:

C_0, es un parámetro económico de adimensionalización, que en España puede tomarse aproximadamente igual a 3M€.

C_{RI} se obtiene a través del cociente $\frac{C_{RI}}{C_O}$, este puede estimarse cualitativamente mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{C_{RI}}{C_0} = (C) * [(A) + (B)]$$

donde:

(A) es el ámbito del sistema productivo al que sirve la obra, y puede ser:

- Local (1)
- Regional (2)
- Nacional/Internacional (5)

(B) es la importancia estratégica del sistema económico y productivo al que sirve la obra, y puede ser:

- Irrelevante (0)
- Relevante (2)
- Esencial (5)

(C) es la importancia de la obra para el sistema económico y productivo al que sirve la obra, y puede ser:

- Irrelevante (0)
- Relevante (1)
- Esencial (2)

$$\frac{C_{RI}}{C_O} = 2 \cdot (2+5) = 14$$

$$C_{RI} = 14 \cdot 3M€ = 42M€$$

El coste $\mathbf{C_{RD}}$ es el coste de inversión de las obras de reconstrucción de la obra marítima a su estado previo, en el año que se valoren los costes por cese o afección de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra. Este dato puede simplificarse considerando el coste de la inversión inicial. Por tanto, el coste C_{RD} es aproximadamente de 2M€.

Según los valores de los parámetros económicos anteriores, el Índice de Repercusión Económica, IRE, estimado es:

$$IRE = \frac{2M€ + 42M€}{3M€} = 14.67$$

En función del IRE, las obras marítimas se clasificarán en tres tipos correspondientes a tres subintervalos R_i, i=1,2,3:

- R_1, obras con repercusión económica baja, IRE ≤ 5
- R_2, obras con repercusión económica media, 5 < IRE ≤ 20
- R_3, obras con repercusión económica alta, IRE > 20

La duración de la fase de servicio de proyecto, Vm, o vida útil será, como mínimo, el valor consignado en la siguiente tabla, en fución del IRE, índice de repercusión económica de la obra marítima.

IRE	≤ 5	6 - 20	> 20
Vida útil en años	15	25	50

Vida útil mínima en la fase de proyecto de servicio (Fuente: ROM 0.0).

El Índice de Repercusión Económica, IRE, estimado para la obra queda clasificado como R_2, correspondiente a obras con **repercusión económica media** y una **vida útil mínima de 25 años.**

2.2. Índice de Repercusión Social y Ambiental, ISA

Este índice estima cualitativamente el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas, daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y la alarma social generada, considerando que el fallo se produce una vez consolidadas las actividades económicas relacionadas con la obra.

El ISA se define por el sumatorio de tres subíndices, tal como muestra la siguiente ecuación:

$$ISA = \sum_{i=1}^{3} ISA_i$$

donde:

ISA_1 es el subíndice de posibilidad y alcance de pérdida de vidas humanas, con los siguientes valores:

- Remoto (0)
- Bajo (3)
- Alto (10)
- Catastrófico (20)

ISA_2 es el subíndice de daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico.

- Remoto (0)
- Bajo (2)
- Medio (4)
- Alto (8)
- Muy alto (15)

ISA_3 es el subíndice de alarma social. Se asignarán los siguientes valores en función de la intensidad de la alarma social generada:

- Bajo (0)
- Medio (5)
- Alto (10)
- Máxima (15)

Según estos subíndices, la Repercusión Social y Ambiental (ISA) de la obra estimado es:

$$ISA = \sum_{i=1}^{3} ISA_i = 3 + 2 + 0 = 5$$

En función del ISA, las obras marítimas se clasificarán en cuatro tipos correspondientes a cuatro subintervalos S_i, i=1,2,3,4:

- S_1, obras sin repercusión social y ambiental significativa, ISA < 5
- S_2, obras con repercusión social y ambiental baja, 5 ≤ ISA < 20
- S_3, obras con repercusión social y ambiental alta, 20 ≤ ISA < 30
- S_4, obras con repercusión social y ambiental muy alta, ISA ≥ 30

La probabilidad conjunta de fallo $P_{f,ELU}$, del tramo de obra frente a los modos de fallo principales adscritos a los estados límite útilmos, no podrá exceder los valores consignados en la siguiente tabla, en su vida útil.

ISA	< 5	5 -19	20 -29	≥ 30
P_{fELU}	0.20	0.10	0.01	0.0001
β_{ELU}	0.84	1.28	2.32	3.71

Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio para los ELU (Fuente: ROM 0.0).

La probabilidad conjunta de fallo $P_{f,ELS}$, del tramo de obra frente a los modos de fallo principales adscritos a los estados límite de servicio, no podrá exceder los valores consignados en la siguiente tabla durante la fase de proyecto de servicio.

ISA	< 5	5 -19	20 -29	≥ 30
P_{fELS}	0.20	0.10	0.07	0.07
β_{ELS}	0.84	1.28	1.50	1.50

Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio para los ELS (Fuente: ROM 0.0).

El Índice de Repercusión Social y Ambiental, ISA, estimado para la obra queda clasificado como S_2, correspondiente a obras con **repercusión económica social y ambiental baja** y una **máxima probabilidad conjunta de fallo de 0,10.**

Finalmente, el **periodo de retorno** se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{1-(1-P_{fELU})^{1/V}} = \frac{1}{1-(1-0{,}10)^{1/25}} = 238\ años$$

Según la normativa ROM, para fase de servicio, es decir, cuando la obra entra en servicio, el periodo de retorno a tomar para la obra de rediseño de las protecciones de los diques del puerto para evitar el rebase será de 238 años.

3. CLIMA MARÍTIMO

La caracterización del clima marítimo se ha llevado 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 extremal característicos de la zona de estudio sobre la que se trabaja.

3.1. Fuentes 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 3.05ºW y 43.64ºN, a algo más de 25 km al noroeste de la zona de Lemoiz, a una profundidad de 600 m.

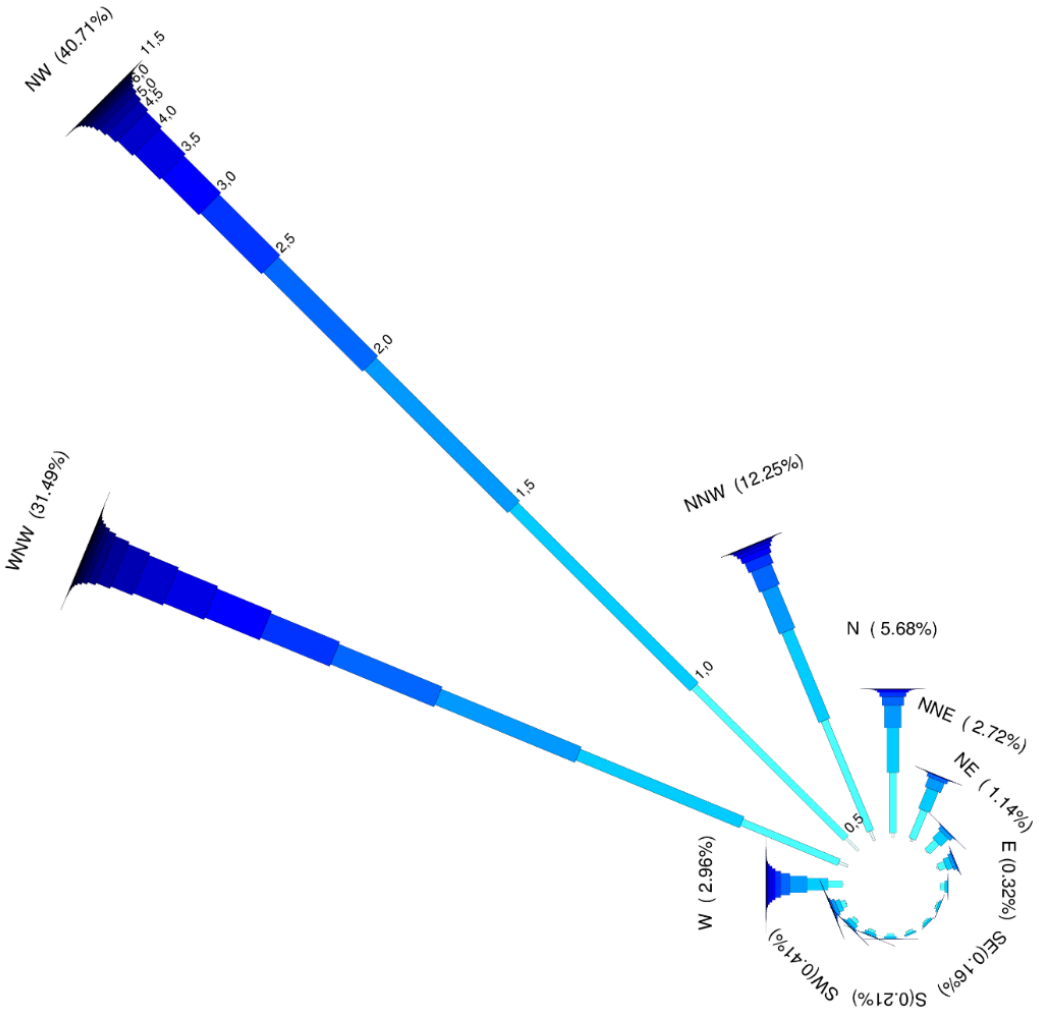
Dichos datos representan una serie con información direccional, y un registro que abarca desde noviembre de 1990 hasta junio de 2021. El registro presenta una periodicidad de 3h hasta finales de febrero de 2002 y horaria desde entonces. Atendiendo a los periodos en los que la boya no estuvo operativa,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



Localización de la boya de Bilbao y la zona de actuación.

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.



Rosa de oleaje en aguas profundas. Boya exterior Bilbao-Bizkaia.

A continuación, se muestra la tabla de 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																										*0.00%*	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	*5.68%*	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	1	0	0	0	0	0	*2.96%*	3217
WNW	385	4363	7343	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	*40.71%*	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 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.

3.2. Régimen medio

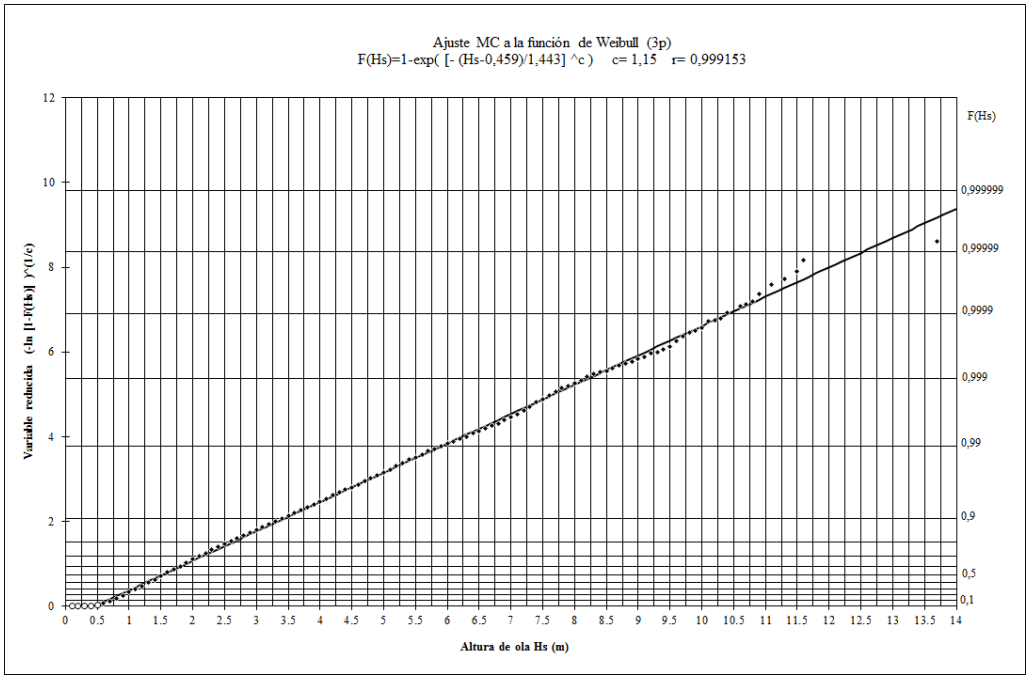
El objetivo del estudio del régimen medio es caracterizar la probabilidad de no superación de diferentes niveles de altura de ola en un año medio. Esto se lleva a cabo mediante el ajuste de la muestra de alturas de ola disponible a una función de distribución acumulada.

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

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

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.



Régimen medio escalar. Boya exterior Bilbao-Vizcaya.

Weibull (MC)	Parámetros
a	0.459
b	1.443
c	1.15
r	0.9992

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

3.3. 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.

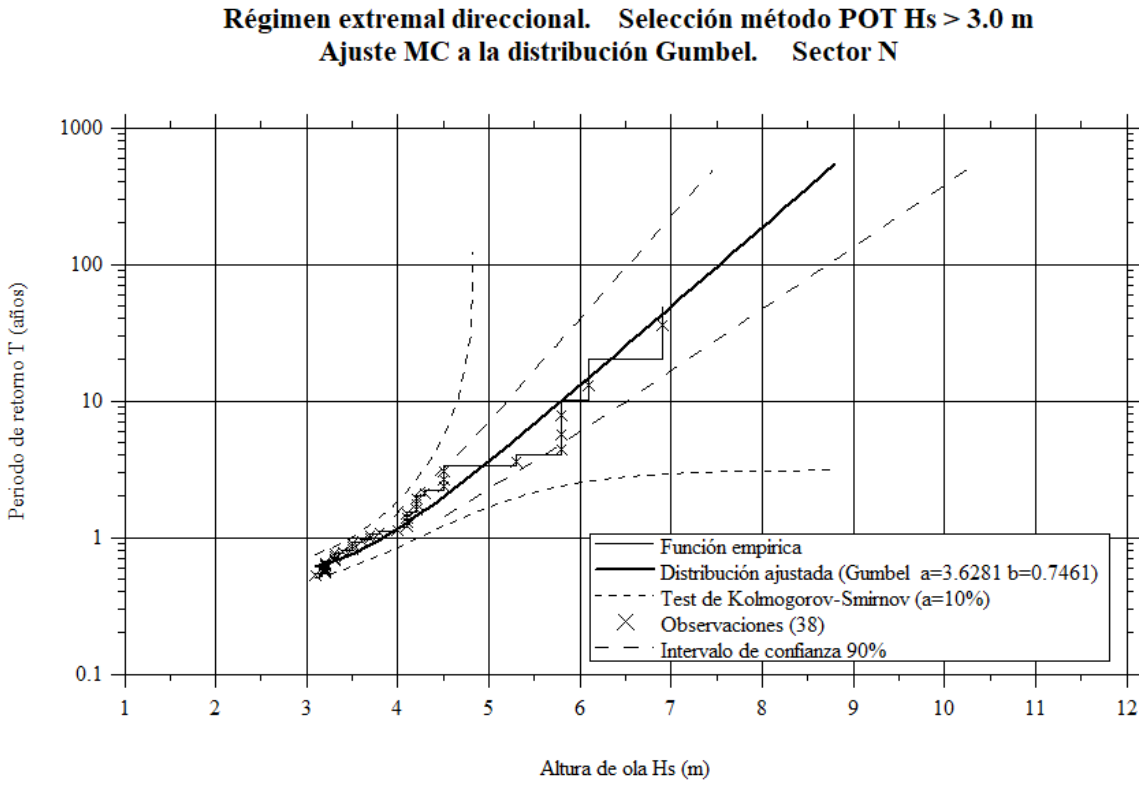
Según el teorema de Fisher-Tippett, si la distribución que se quiere caracterizar tiene la cola superior regular y el número de datos es suficientemente grande, la distribución del máximo de éstas se aproxima a uno de los siguientes modelos: Fréchet, Gumbel o Weibull.

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).

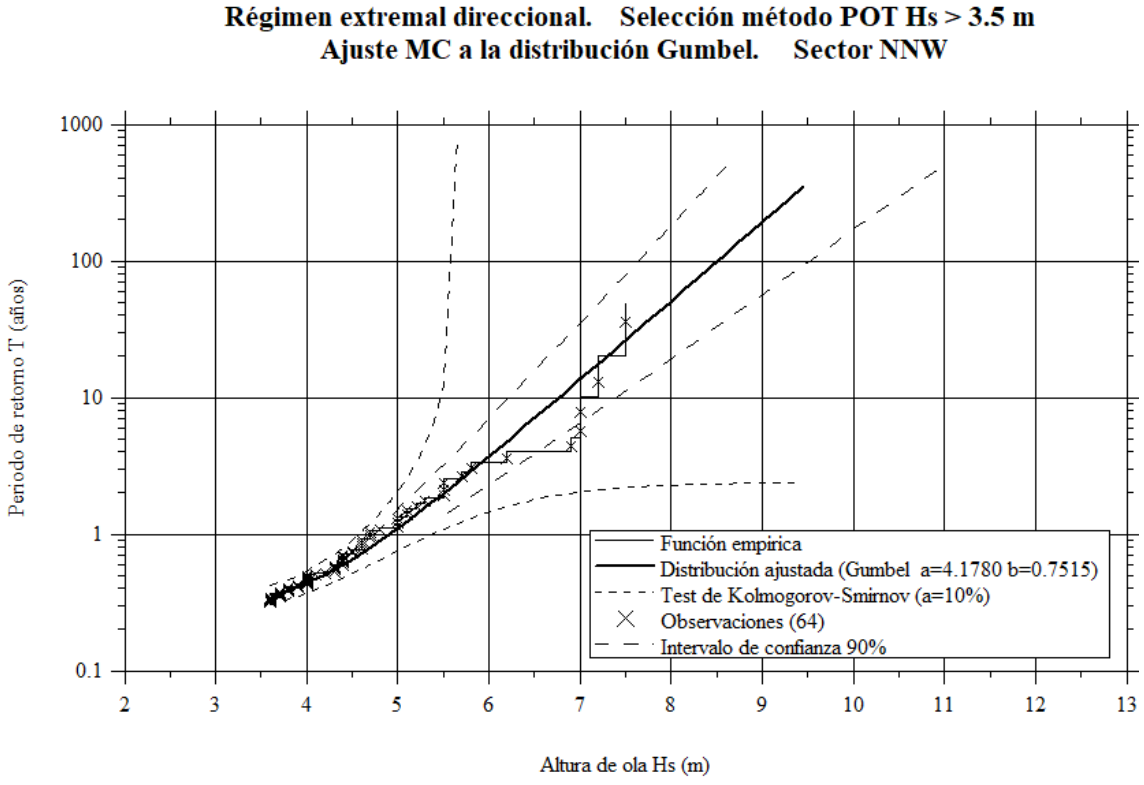
La selección de temporales independientes entre sí que definen el régimen extremal direccional, se ha determinado a partir de un umbral de altura de ola diferente para cada sector, N, NNW, NW y WNW, en este caso con valores de 3 m, 3,5 m, 6 m y 6,25 m, respectivamente. Se han obtenido a su vez una muestra de extremos para cada sector compuestas por 38, 64, 53 y 61 temporales distintos, respectivamente. Los 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 Hs a partir de los ajustes realizados.

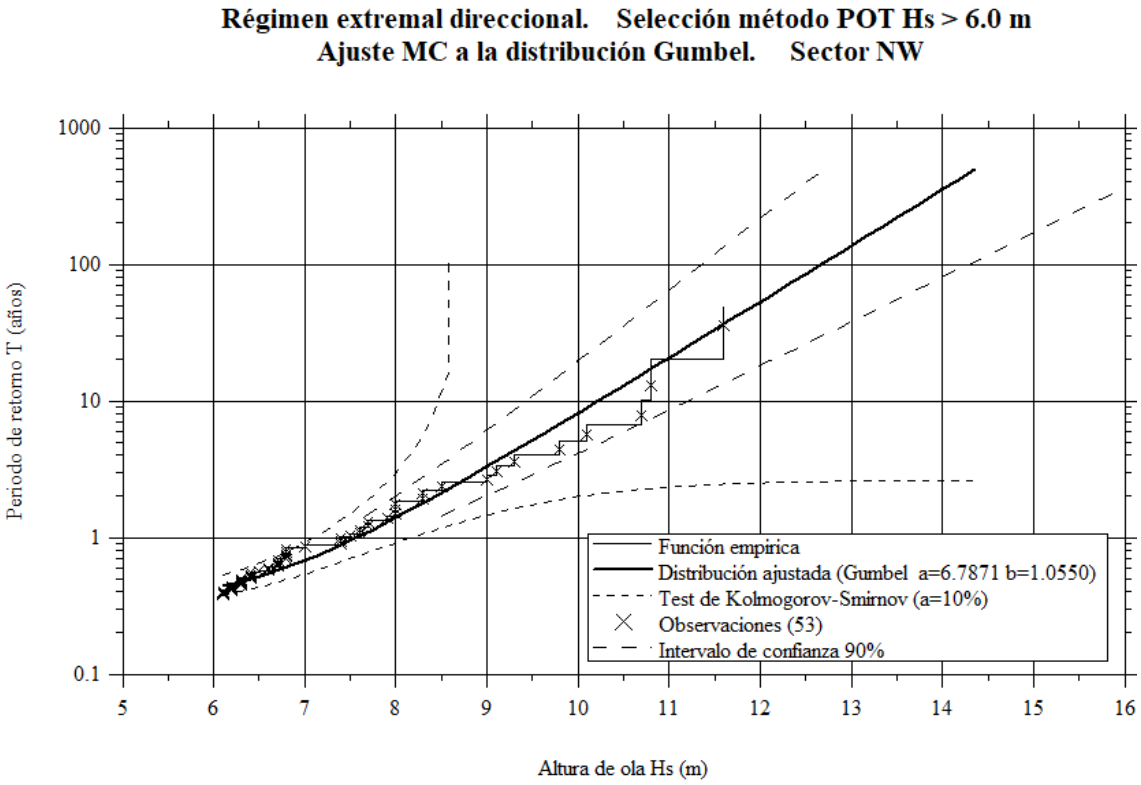
Según la normativa ROM, para fase de servicio, es decir, cuando la obra entra en servicio, el periodo de retorno a tomar para la obra de rediseño de las protecciones de los diques de abrigo será de 238 años.



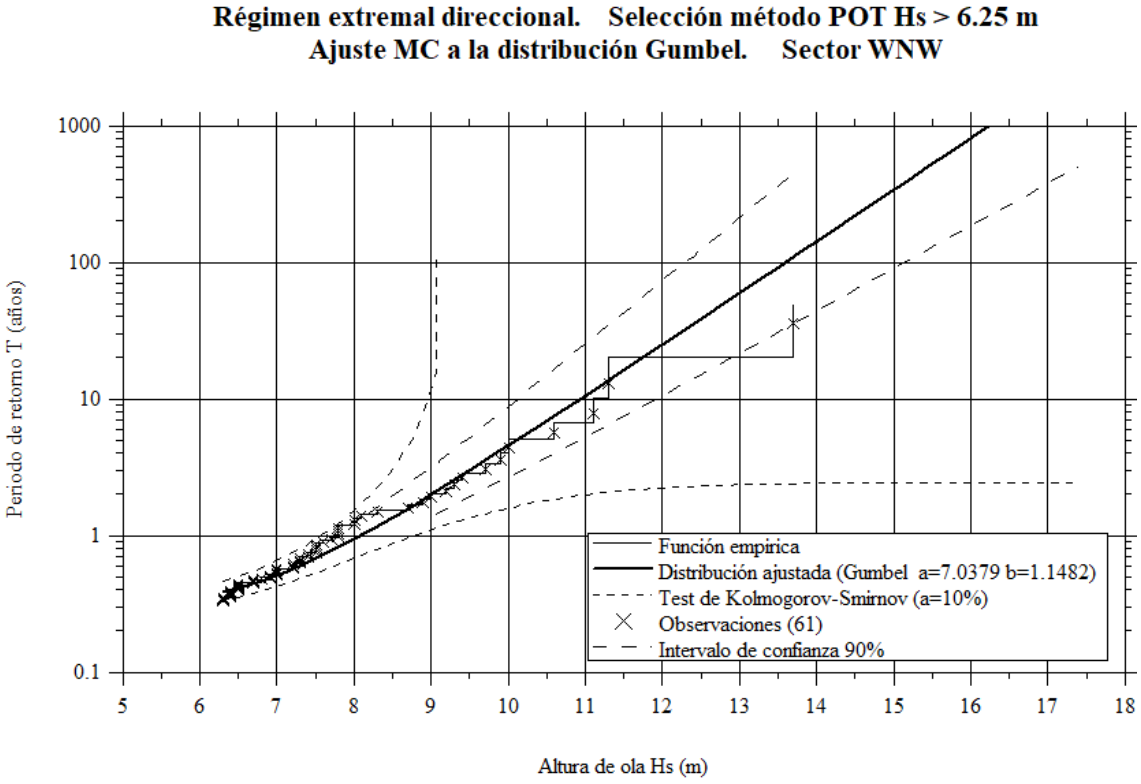
Régimen extremal direccional. Sector N.



Régimen extremal direccional. Sector NNW.



Régimen extremal direccional. Sector NW.



Régimen extremal direccional. Sector WNW.

3.4. Relación entre Hs y Tp

Finalmente, se muestra la relación existente entre las variables Hs y Tp, 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 Hs y Tp para cada uno de los 4 sectores considerados.

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.

Debido a la gran dispersión que presentan las relaciones entre altura de ola significante y período de pico, las curvas de isoperalte resultan muy útiles para definir los límites superior e inferior de los valores de Tp asociados a los valores de Hs definidos en el apartado anterior.

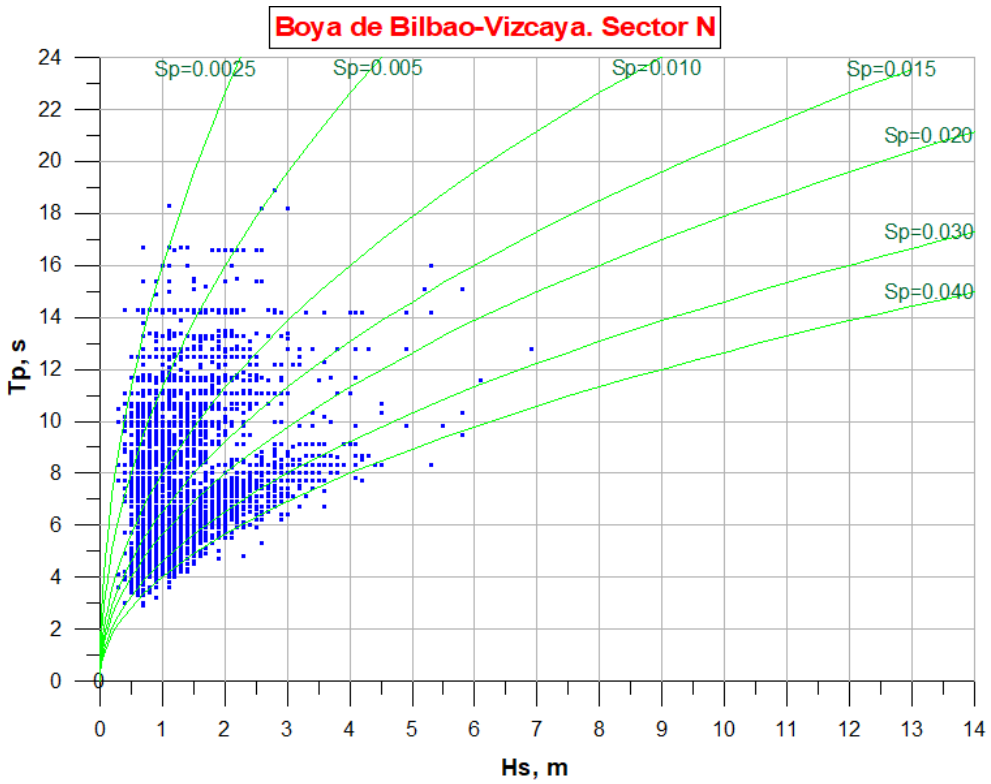


Diagrama de dispersión Hs - Tp. Sector N.

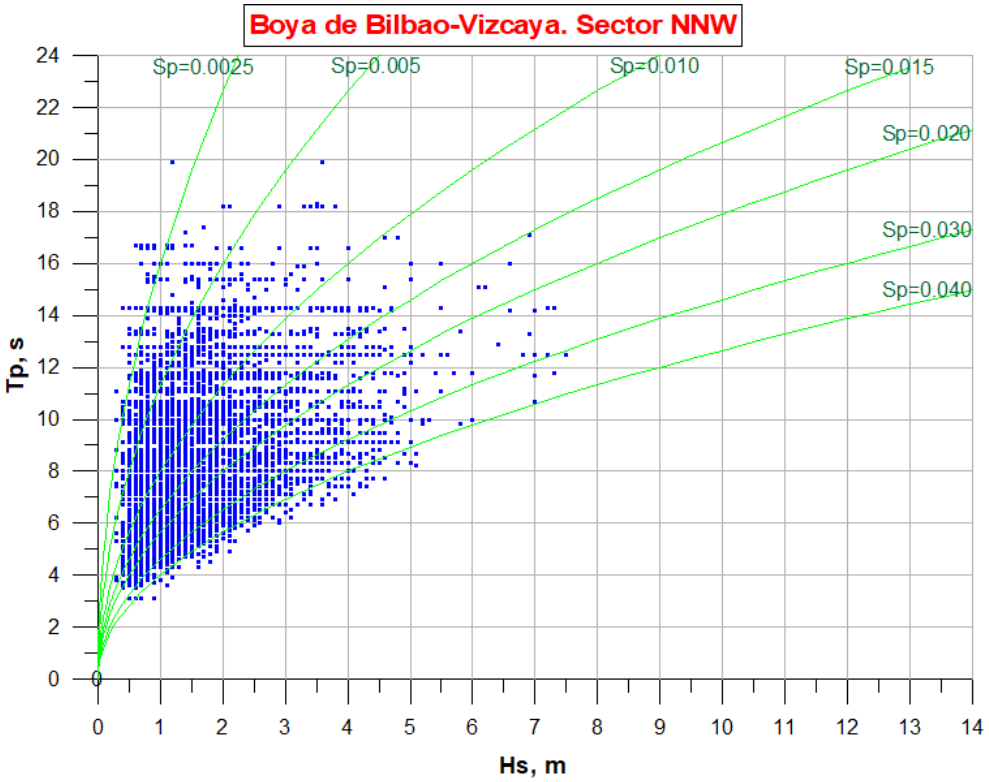


Diagrama de dispersión Hs - Tp. Sector NNW.

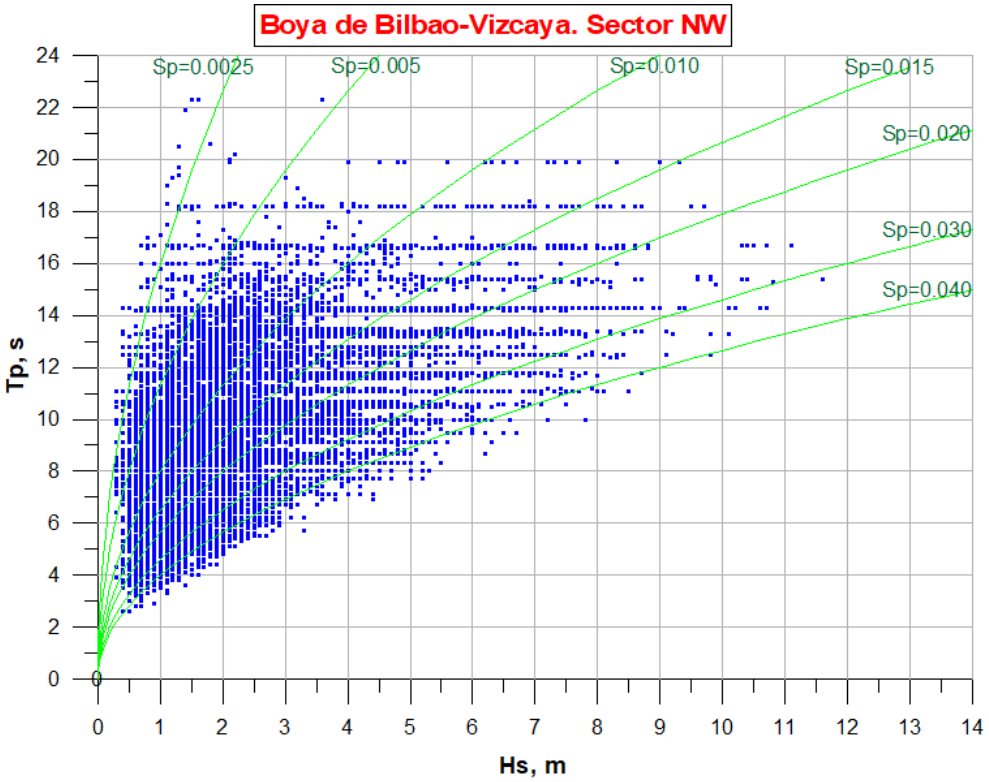


Diagrama de dispersión Hs - Tp. Sector NW.

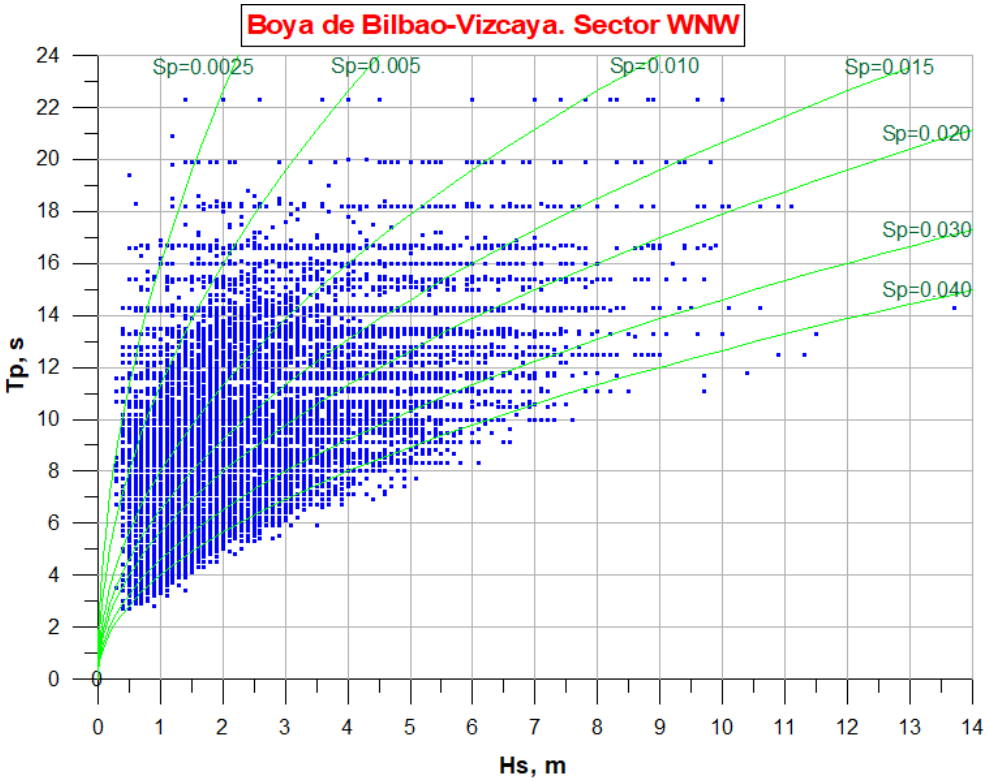


Diagrama de dispersión Hs - Tp. Sector WNW.

4. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Las olas generadas en alta mar 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* (asomeramiento).

4.1. Oleaje en aguas profundas

Los valores direccionales para dicho periodo de retorno obtenidos de los ajustes para los 4 sectores considerados se resumen en las siguientes tablas, tomando los valores de la estima central, y de 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, donde se identifica en cada caso un valor mínimo y un valor máximo.

Atendiendo a dichos resultados se estima oportuno considerar los valores asociados a la banda de confianza del 90% como representativos del clima marítimo en aguas profundas, por lo que únicamente se han propagado estos temporales propagados hasta pie de obra para definir el oleaje de diseño.

Sector	Hs (m)	Tp_{min} (s)	Tp_{max} (s)
N	8.185	13	17
NNW	9.160	14	18
NW	13.582	15	19
WNW	14.595	16	20

Valores extremos asociados a la estima central.

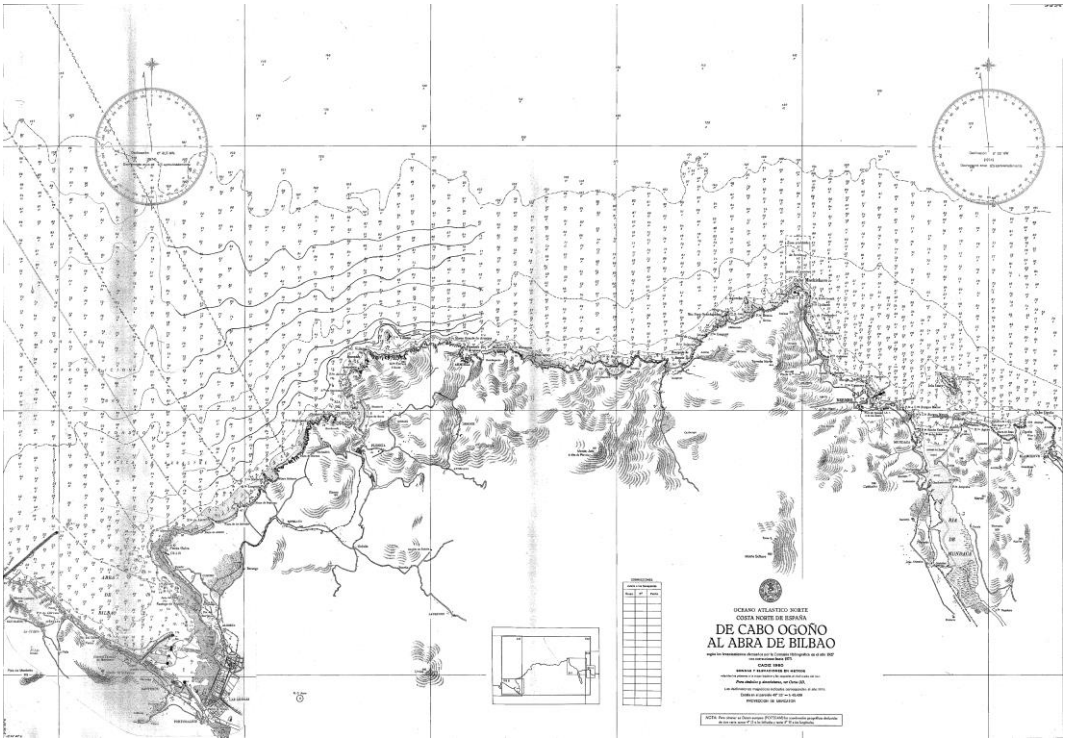
Sector	Hs (m)	Tp_{min} (s)	Tp_{max} (s)
N	9.556	14	18
NNW	10.305	15	19
NW	15.433	16	20
WNW	16.357	17	21

Valores extremos asociados a la banda superior de confianza del 90%.

4.2. Definición batimétrica

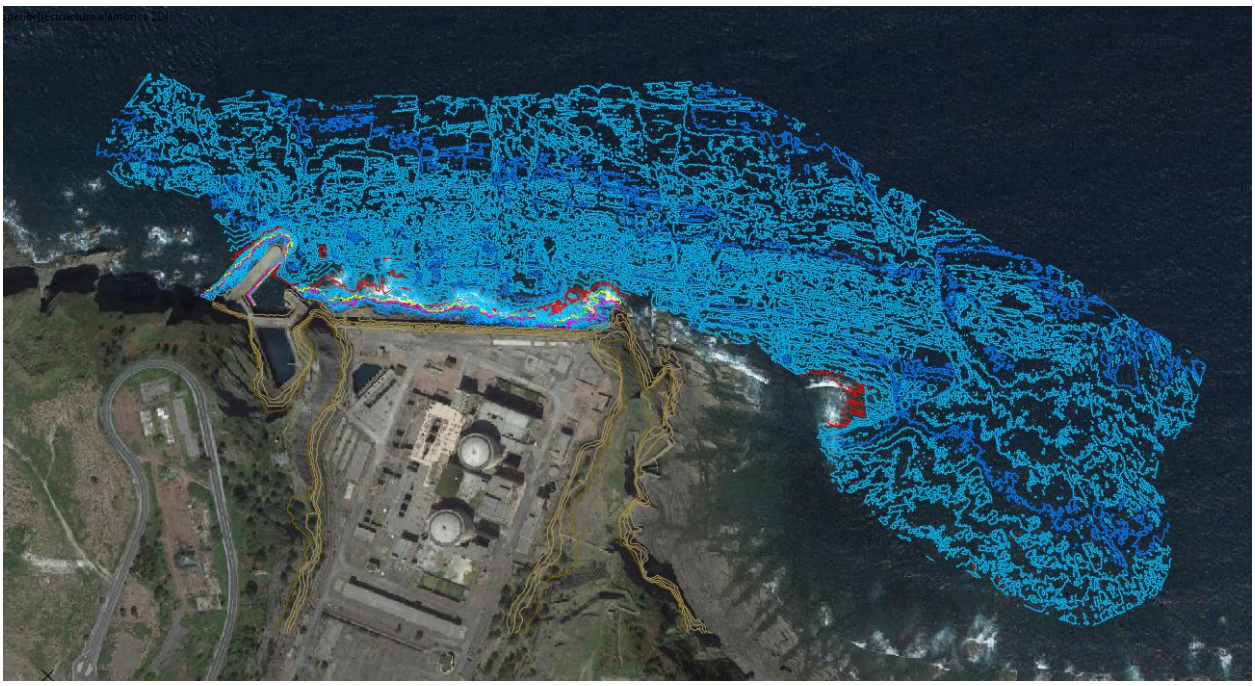
La definición de la batimetría y de la topografía de la zona de estudio se ha obtenido de las fuentes siguientes:

- Carta náutica 942. Realizada por el Instituto Hidrográfico de la Marina, incluidas en el paquete BACO, contenido en el SMC.



Carta Náutica 942.

- Batimetría de detalle facilitada para la redacción del Estudio. Se ha facilitado una topo-batimetría en la zona próxima a la Central Nuclear de Lemoiz. La topografía de la zona emergida se realizó mediante laser escáner el 15 de noviembre de 2022, mientras que la batimetría con sonda multihaz no se pudo realizar por condiciones adversas de mar hasta el 14 de febrero de 2023. En la siguiente figura se muestran las isóbatas cada metro para la zona de estudio.



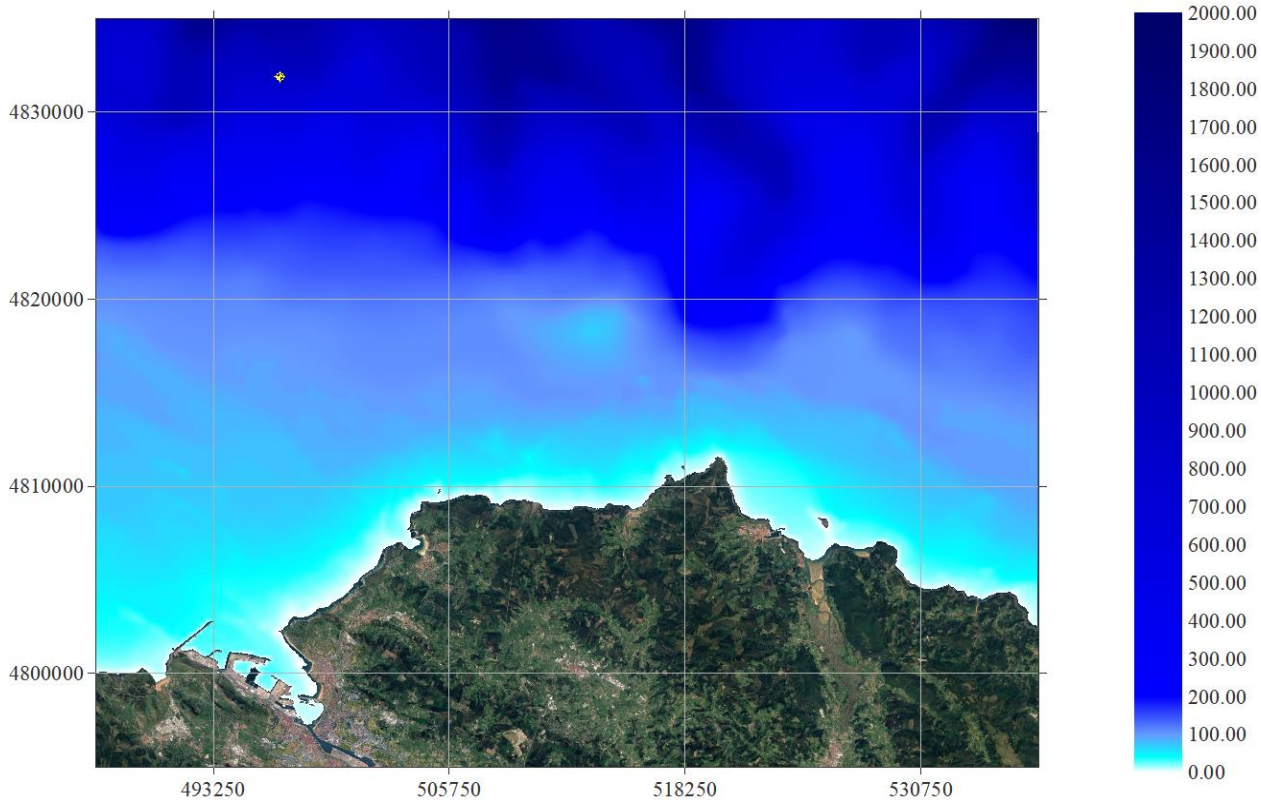
Batimetría de detalle.

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 ETRS89, 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.

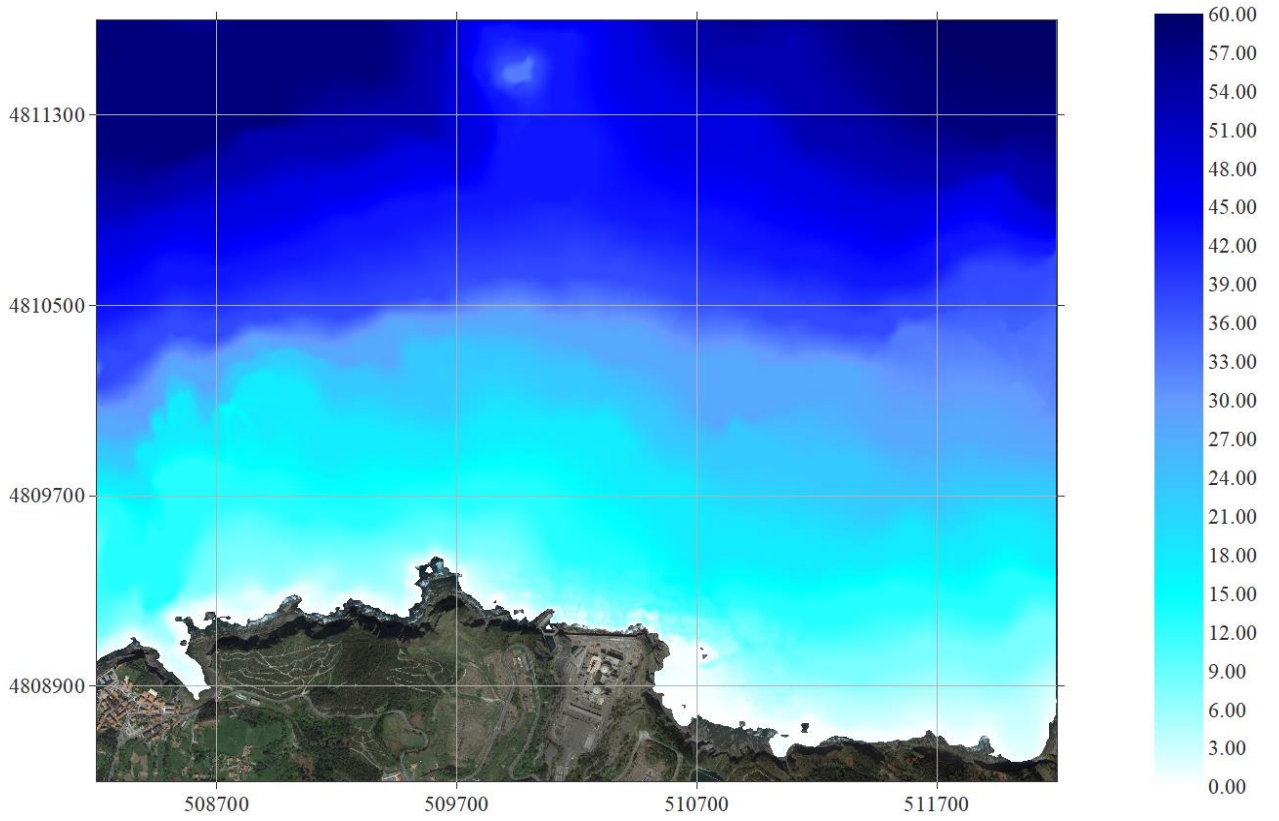
4.3. Selección de mallas

Para la propagación se han empleado tres mallas en diferencias finitas, una exterior para incluir la boya exterior de Bilbao-Vizcaya, desde donde se propagan los oleajes, cubriendo una superficie de 50x40 km con una resolución de elementos cuadrados de 250x250 m (200 celdas en la dirección X y 160 celdas en la dirección Y); en ella se anida una malla intermedia, que cubre una superficie de 20x16 km con una resolución de elementos cuadrados de 50x50 m (400 celdas en la dirección X y 320 celdas en la dirección Y); y, finalmente, una malla de detalle con una superficie de 4x3,2 km y una resolución de elementos cuadrados de 10x10 m (400 celdas en la dirección X y 320 celdas en la dirección Y) que cubre la zona próxima a la central nuclear. Estas mallas han sido nombradas como Level1, Level2, y Level3.

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



Malla exterior. Zona de Vizcaya (Level 1).



Malla de detalle (Level 3).

4.4. Modelo de propagación

La generación y la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la Central Nuclear de Lemoiz 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:

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

4.5. Puntos de control

A partir de las distintas simulaciones, se ha procedido a obtener el oleaje de cálculo a lo largo de una línea paralela al espaldón, situada a una distancia aproximada de 5 veces el valor de altura de ola, lo que supone unos 40 m respecto a los bloques de protección, o unos 60 m respecto al espaldón.



Alineación en la que se han obtenido los resultados.

4.6. Nivel del mar de diseño

La propagación de los oleajes extremos definidos anteriormente se realiza con el nivel del mar de diseño, con una cota de +5,40 m (redondeando el valor de 5,37 m).

Se han considerado los valores registrados en el Puerto de Bilbao. El valor de la pleamar ha sido definido teniendo en cuenta la marea astronómica, con un máximo de +4,77 m; la sobreelevación debida a marea meteorológica, con un valor estimado de 0,40 m; más los efectos del cambio climático, que se definen en el siguiente apartado, tomando un valor de 0,20 m.

Niveles Mar Puerto Bilbao (m)	
Máxima Pleamar Astronómica	+4,77
Residuo Meteorológico	+0,40
Cambio climático	+0,20
Nivel máximo	**+5,37**

4.6.1. Efecto del cambio climático en la subida del nivel del mar

En este apartado se estudia el efecto que tendrá el cambio climático sobre el ascenso del nivel medio del mar en el próximo siglo. El nivel del mar relativo o la subida del nivel medio en una determinada zona contempla la suma de los componentes global, regional y local del mar. La global está relacionada con la expansión térmica del agua y el deshielo, mientras que las componentes regional y local tienen que ver con los modos naturales de variabilidad del clima y los movimientos verticales de la corteza terrestre, respectivamente.

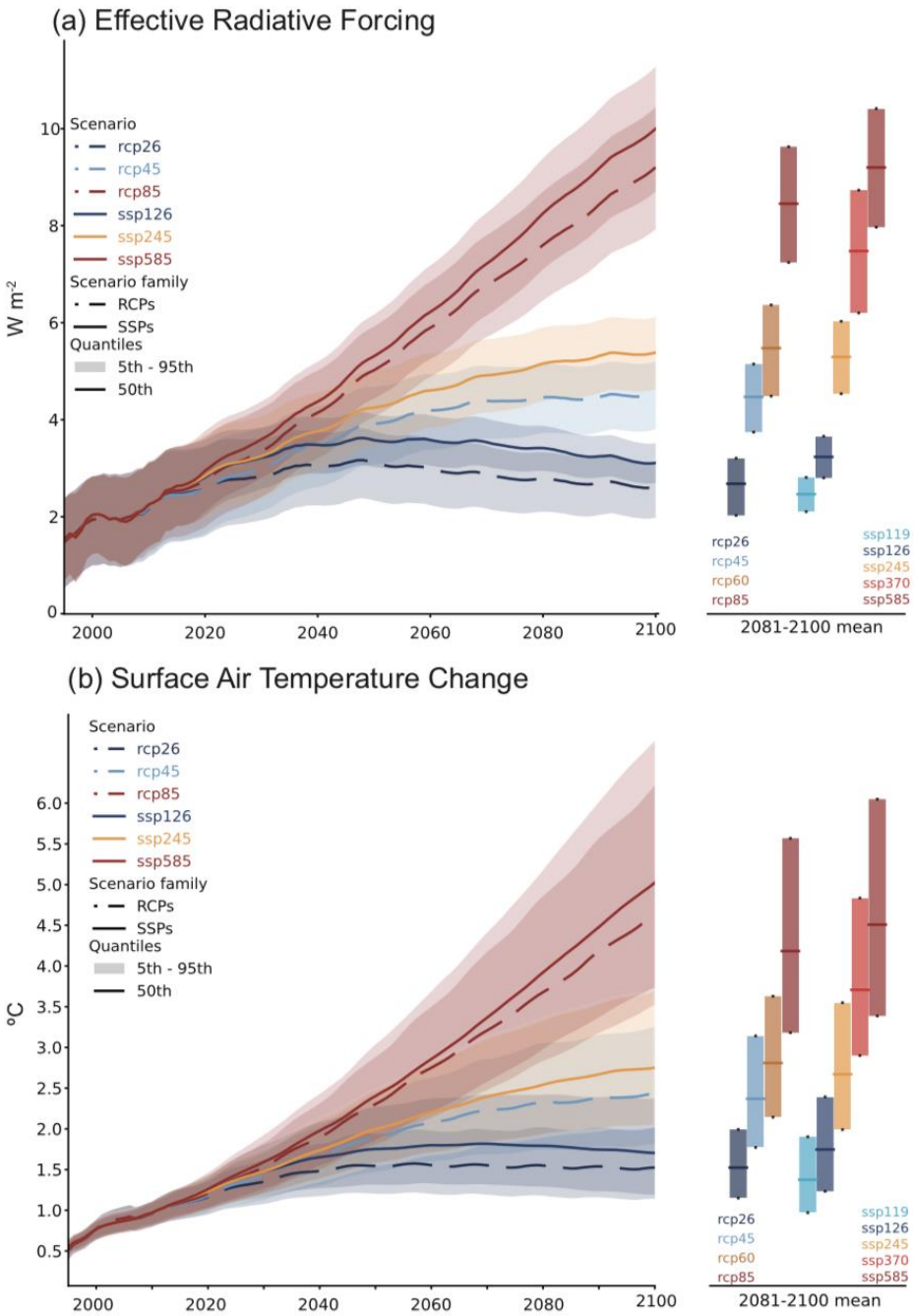
Toda la información relativa a la subida del nivel medio del mar ha sido extraída del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (*Intergubernmental Panel on Climate Change*) elaborado en 2021: "*Climate Change 2021. The Physical Science Basis*", las conclusiones más destacables son las que se exponen a continuación.

El Sexto informe del IPCC 2021 evalúa las simulaciones del futuro cambio climático, abarcando horizontes temporales desde el corto plazo (2021-2040), medio plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100) hasta el año 2300. Las proyecciones evaluadas se basan principalmente en una nueva gama de escenarios, las vías socioeconómicas compartidas (SSP), utilizadas en la fase 6 del proyecto de intercomparación de modelos ensamblados (CMIP6). Entre los SSP, la atención se centra en los cinco escenarios principales: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.

Los escenarios que se utilizan en el Sexto informe del Cambio Climático (IPCC, 2021) no son los mismos que se establecían en el Quinto informe del Cambio Climático (IPCC, 2013). Esto implica que no se puede establecer una comparabilidad retroactiva completa entre los dos tipos de escenarios, ya que los SSP incluyen forzamientos regionales, especialmente del uso de la tierra y los aerosoles, que son distintos a los RCP presentes en el quinto informe. Sin embargo, se puede determinar que aproximadamente la mitad del aumento del calentamiento en el Sexto informe del Cambio Climático en comparación con el Quinto Informe se debe a una mayor sensibilidad climática en los modelos usados en el reciente informe, además de un aumento de las posibles emisiones.

Cabe destacar que en el Quinto informe utilizan un período de referencia de 1986 a 2005, mientras que en el Sexto Informe se actualiza a un período de referencia de 1995 a 2014. Entre estos dos períodos, el *Global Mean Sea Level* (GMSL) aumentó 3 cm, y esta corrección se aplica a las proyecciones de informes anteriores para permitir su comparación.

A continuación, se muestra una comparativa de los escenarios utilizados en el Quinto y Sexto Informe del Cambio Climático, relativas al forzamiento radiactivo efectivo y al cambio de la temperatura del aire en superficie. En general, se observa un alto acuerdo entre las proyecciones hasta el 2050. A partir de aquí, el acuerdo disminuye entre las proyecciones, hasta el año 2100.



Comparación de las RCP y SSP simuladas para estimar las diferencias entre escenarios.

Nivel medio del mar global

El nivel medio global del mar (GMSL) aumentó más rápido en el siglo XX que en cualquier siglo anterior durante los últimos tres milenios, con un incremento de 0,20 (0,15 a 0,25) m durante el período 1901-2018.

Desde finales de 1960, el aumento de GMSL se ha acelerado con una tasa media de 2,3 (1,6-3,1) mm/año durante el período 1971-2018 aumentando a 3,7 (3,2-4,2) mm/año durante el período 2006-2018.

La expansión térmica de los océanos (38%) y la pérdida de masa de los glaciares (41%) dominan el cambio total del nivel del mar entre 1901 y 2018, mientras que la contribución de Groenlandia y la Antártida fue cuatro veces más mayor durante el período 2010-2019 que durante el período 1992-1999.

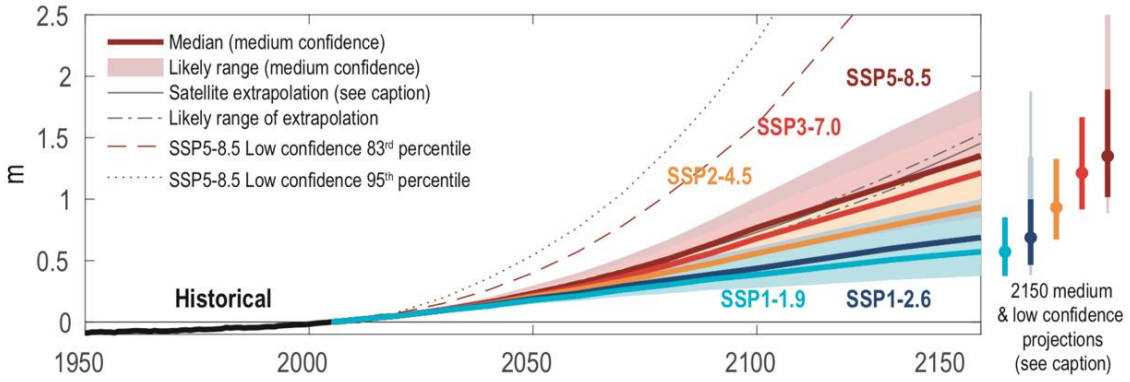
El cambio del nivel del mar surge de procesos que actúan en una variedad de escalas espaciales y temporales en el océano, la criosfera, la Tierra sólida, la atmósfera y la tierra. Por tanto, este cambio del nivel del mar es la suma de los cambios a la densidad del océano y los cambios en la masa del océano como resultado de cambios en la criosfera o el almacenamiento de agua terrestre.

El IPCC en el Sexto Informe proporciona las proyecciones de subida de nivel del mar más fiables para los distintos escenarios de emisiones. En concreto, se valoran 5 escenarios: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Dado que resulta complejo analizar la subida de nivel del mar bajo tantos escenarios distintos, suele ser habitual centrarse en dos de ellos, en concreto el SSP2-4.5 y el SSP5-8.5, por lo que los resultados se mostrarán únicamente para estos dos escenarios.

En la tabla y figura siguientes se observa cómo hasta 2050, las proyecciones de GMSL exhiben poca dependencia del escenario con un aumento probable del nivel del mar entre el período de referencia (1995-2014) y 2050 de 0,19 (0,16-0,25) m bajo SSP1-2.6, y 0,23 (0,20-0,30) m bajo SSP5-8.5. Más allá de 2050, los escenarios divergen cada vez más. Entre el período de referencia (1995-2014) y 2100, los procesos en cuya proyección existe una confianza media impulsan un aumento probable de GMSL de 0,44 (0,32-0,62) m, y 0,77 (0,63-1,01) m bajo SSP1-2.6 y SSP5-8.5, respectivamente.

	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP5-8.5 *Low Confidence*
Thermal expansion	0.12 (0.09–0.15)	0.14 (0.11–0.18)	0.20 (0.16–0.24)	0.25 (0.21–0.30)	0.30 (0.24–0.36)	0.30 (0.24–0.36)
Greenland	0.05 (0.00–0.09)	0.06 (0.01–0.10)	0.08 (0.04–0.13)	0.11 (0.07–0.16)	0.13 (0.09–0.18)	0.18 (0.09–0.59)
Antarctica	0.10 (0.03–0.25)	0.11 (0.03–0.27)	0.11 (0.03–0.29)	0.11 (0.03–0.31)	0.12 (0.03–0.34)	0.19 (0.02–0.56)
Glaciers	0.08 (0.06–0.10)	0.09 (0.07–0.11)	0.12 (0.10–0.15)	0.16 (0.13–0.18)	0.18 (0.15–0.21)	0.17 (0.11–0.21)
Land-water Storage	0.03 (0.01–0.04)	0.03 (0.01–0.04)	0.03 (0.01–0.04)	0.03 (0.02–0.04)	0.03 (0.01–0.04)	0.03 (0.01–0.04)
Total (2030)	0.09 (0.08–0.12)	0.09 (0.08–0.12)	0.09 (0.08–0.12)	0.10 (0.08–0.12)	0.10 (0.09–0.12)	0.10 (0.09–0.15)
Total (2050)	0.18 (0.15–0.23)	0.19 (0.16–0.25)	0.20 (0.17–0.26)	0.22 (0.18–0.27)	0.23 (0.20–0.29)	0.24 (0.20–0.40)
Total (2090)	0.35 (0.26–0.49)	0.39 (0.30–0.54)	0.48 (0.38–0.65)	0.56 (0.46–0.74)	0.63 (0.52–0.83)	0.71 (0.52–1.30)
Total (2100)	**0.38 (0.28–0.55)**	**0.44 (0.32–0.62)**	**0.56 (0.44–0.76)**	**0.68 (0.55–0.90)**	**0.77 (0.63–1.01)**	**0.88 (0.63–1.60)**
Total (2150)	0.57 (0.37–0.86)	0.68 (0.46–0.99)	0.92 (0.66–1.33)	1.19 (0.89–1.65)	1.32 (0.98–1.88)	1.98 (0.98–4.82)
Rate (2040–2060)	4.1 (2.8–6.0)	4.8 (3.5–6.8)	5.8 (4.4–8.0)	6.4 (5.0–8.7)	7.2 (5.6–9.7)	7.9 (5.6–16.1)
Rate (2080–2100)	4.2 (2.4–6.6)	5.2 (3.2–8.0)	7.7 (5.2–11.6)	10.4 (7.4–14.8)	12.1 (8.6–17.6)	15.8 (8.6–30.1)

Proyecciones globales del aumento del nivel del mar.



Proyecciones globales del aumento del nivel del mar para los diferentes escenarios SSP.

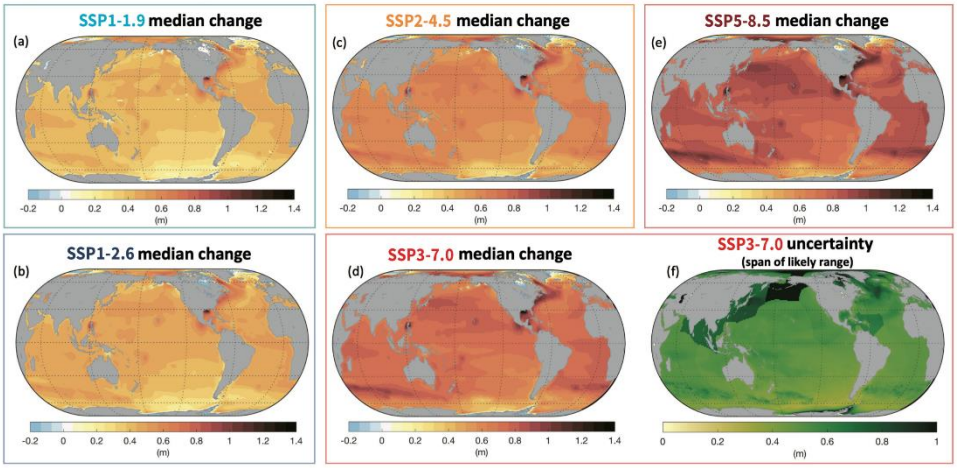
Nivel medio del mar regional: costa cantábrica

A escala de cuenca, las diferencias regionales al nivel del mar surgen de la dinámica oceánica, cambios en la gravedad, rotación y deformación de la Tierra debido al hielo terrestre y cambios en el agua terrestre, y movimiento vertical de la tierra.

Por lo general, el cálculo de los cambios regionales del nivel del mar se resuelve mediante observaciones de mareógrafos y altimetría satelital. Para el Océano Atlántico, el Sexto Informe del Cambio Climático describió la variabilidad regional del nivel del mar impulsada principalmente por las variaciones del flujo de viento y el calor asociadas con la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y los cambios en el transporte de calor asociados con la variabilidad de la Circulación Meridional de Vuelco del Atlántico (AMOC).

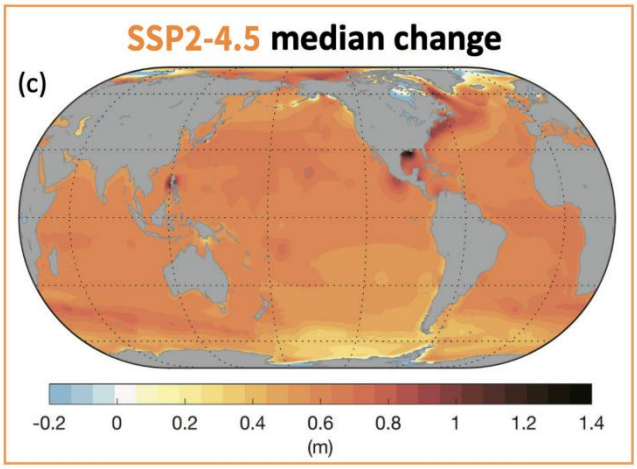
Sin embargo, la resolución sigue siendo un factor relevante, ya que la mayoría de los modelos utilizados en el Sexto Informe del Cambio Climático están lejos de las resoluciones que representan directamente a los procesos costeros y regionales de aguas poco profundas. A escala regional en España se han desarrollado varios estudios sobre el aumento del nivel del mar en la costa, obteniéndose tasas de crecimiento de entre 2 y 3 mm/año durante el último siglo.

En cuanto a proyecciones, la información regional disponible sigue siendo limitada. A continuación, se muestran los resultados regionales de las variaciones al nivel del mar, respecto al período de 1995 a 2014, para los 5 escenarios establecidos por el IPCC.

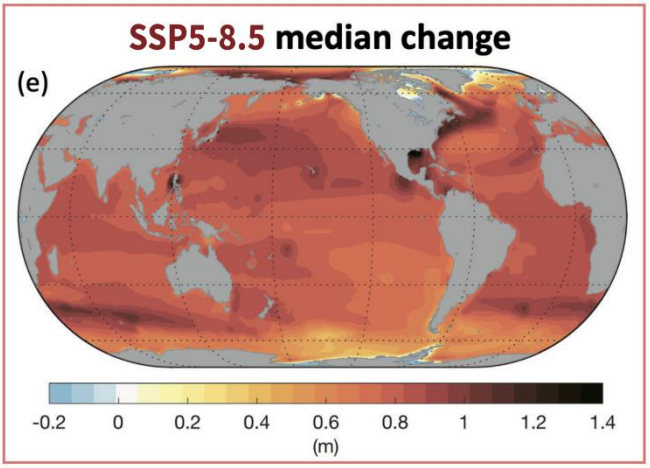


Cambios regionales del nivel del mar en 2100 para los diferentes escenarios.

Analizando en detalle los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 se observa cómo en la costa cantábrica para el año horizonte 2100 se esperan aumentos del nivel del mar alrededor de 0,60 m y 0,80 m, respectivamente, lo que supone que está en la media global (0,56 m y 0,77 m, respectivamente).

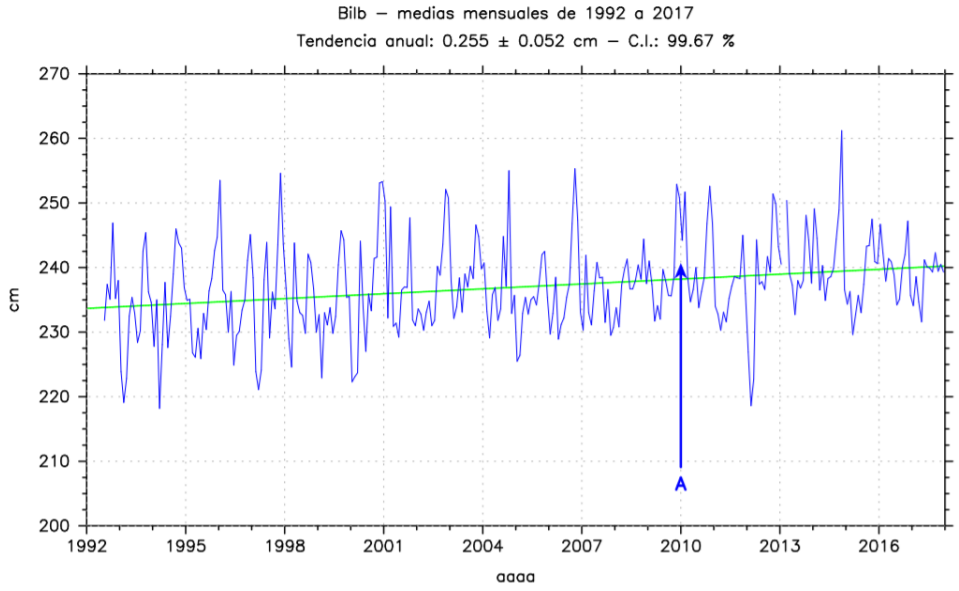


Cambios regionales nivel mar en 2100 escenario SSP2-4.5.



Cambios regionales nivel mar en 2100 escenario SSP5-8.5.

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, se observa un incremento sobre los valores medios anuales de 2,55 ± 0,52 mm/año. Dichos valores resultan ligeramente inferiores a los mostrados según las tendencias del IPCC. Según estos valores en 25 años se tendría una subida de 6,4 ± 1,3 cm.



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

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.

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 2048: SSP2-4.5, SSP5-8.5 y tendencias del mareógrafo de Bilbao. Los valores de subida de nivel del mar establecidos según estos escenarios se muestran a continuación.

dh (m)	2048 Regional/Local
SSP2-4.5	0,130-0,163
SSP5-8.5	0,153-0,196
Bilbao	0,064-0,077

Valores de subida del nivel medio relativos a 2023 considerados en este Estudio.

De acuerdo con estos valores, la subida de nivel del mar esperable en los próximos 25 años podría alcanzar como máximo los 20 cm. Asumiendo este dato, se completa el valor de nivel del mar considerado en las propagaciones a partir del valor máximo de marea astronómica (4,77 m), más 0,40 m de residuo meteorológico y 0,20 m de subida por efecto del cambio climático, resultando un valor total del nivel de marea de 5,37 m.

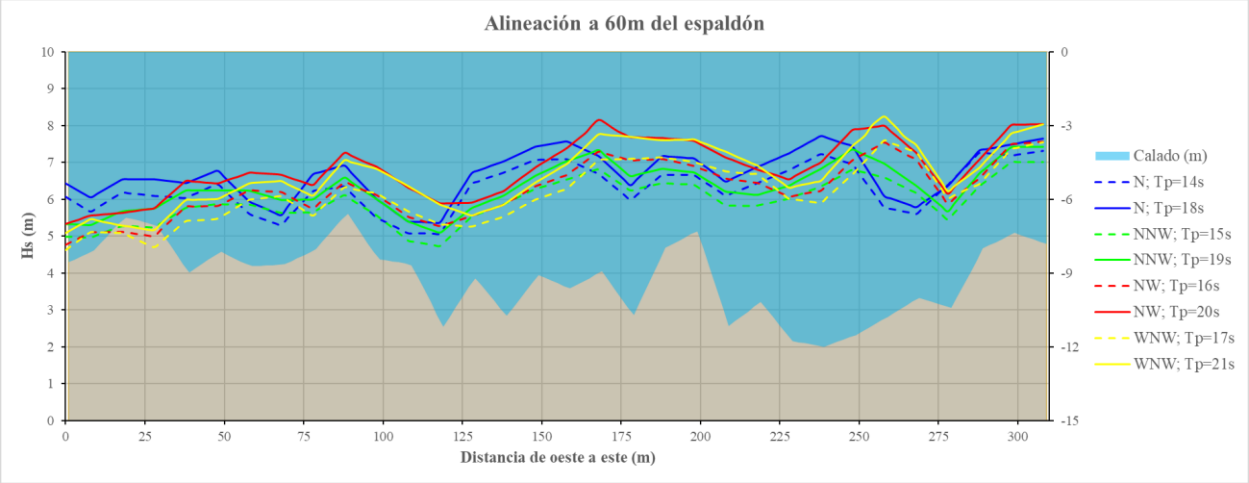
4.7. Resultados de la propagación de oleaje

Los resultados del análisis del oleaje de cálculo para el conjunto de oleajes propagados desde aguas profundas hasta pie de obra (alineación a 60 metros respecto al espaldón) se muestran en la siguiente tabla, donde aparecen los valores máximos que se producen a lo largo de la alineación para los distintos sectores, de acuerdo con la banda de confianza superior del 90%, que define el oleaje de diseño.

Por otro lado, los valores de altura de ola máximos se producen para los dos sectores predominantes en aguas profundas, NW y WNW, y en especial en el tramo situado más hacia el este.

Oleaje en alineación 60 m del espaldón			
N	Tp=14s	Hs(m)	7.31
		Dir (º)	6.5
	Tp=18s	Hs(m)	7.72
		Dir (º)	9.3
NNW	Tp=15s	Hs(m)	7.01
		Dir (º)	348.3
	Tp=19s	Hs(m)	7.43
		Dir (º)	350.2
NW	Tp=16s	Hs(m)	7.56
		Dir (º)	343.5
	Tp=20s	Hs(m)	8.15
		Dir (º)	355.7
WNW	Tp=17s	Hs(m)	7.60
		Dir (º)	345.0
	Tp=21s	Hs(m)	8.25
		Dir (º)	348.7

Valores máximos de oleaje asociados a la banda de confianza del 90%.



Oleaje de diseño a lo largo de la alineación (60 m desde el espaldón).

Las figuras de las propagaciones se presentan en el Apéndice 1. A continuación, se muestran las propagaciones de los oleajes más energéticos y que determinan el oleaje de cálculo: NW y WNW para los periodos de pico más altos.

APÉNDICE Nº1. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE DESDE AGUAS PROFUNDAS

PROPAGACIÓN DEL OLEAJE DESDE AGUAS PROFUNDAS

Listado de figuras

Figura 1. Malla exterior. Zona de Vizcaya (Level 1) 2
Figura 2. Malla intermedia (Level 2)..... 2
Figura 3. Malla de detalle (Level 3). 3
Figura 4. Hs y dirección media. Level 1. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 14 s 3
Figura 5. Hs y dirección media. Level 2. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 14 s 4
Figura 6. Hs y dirección media. Level 3. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 14 s 4
Figura 7. Hs y dirección media. Level 1. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 18 s 5
Figura 8. Hs y dirección media. Level 2. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 18 s 5
Figura 9. Hs y dirección media. Level 3. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 18 s 6
Figura 10. Hs y dirección media. Level 1. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 15 s..... 6
Figura 11. Hs y dirección media. Level 2. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 15 s..... 7
Figura 12. Hs y dirección media. Level 3. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 15 s..... 7
Figura 13. Hs y dirección media. Level 1. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 19 s..... 8
Figura 14. Hs y dirección media. Level 2. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 19 s..... 8
Figura 15. Hs y dirección media. Level 3. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 19 s..... 9
Figura 16. Hs y dirección media. Level 1. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 16 s..... 9
Figura 17. Hs y dirección media. Level 2. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 16 s..... 10
Figura 18. Hs y dirección media. Level 3. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 16 s..... 10
Figura 19. Hs y dirección media. Level 1. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 20 s..... 11
Figura 20. Hs y dirección media. Level 2. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 20 s..... 11
Figura 21. Hs y dirección media. Level 3. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 20 s..... 12
Figura 22. Hs y dirección media. Level 1. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 17 s.... 12
Figura 23. Hs y dirección media. Level 2. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 17 s.... 13
Figura 24. Hs y dirección media. Level 3. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 17 s.... 13
Figura 25. Hs y dirección media. Level 1. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 21 s.... 14
Figura 26. Hs y dirección media. Level 2. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 21 s.... 14
Figura 27. Hs y dirección media. Level 3. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 21 s.... 15

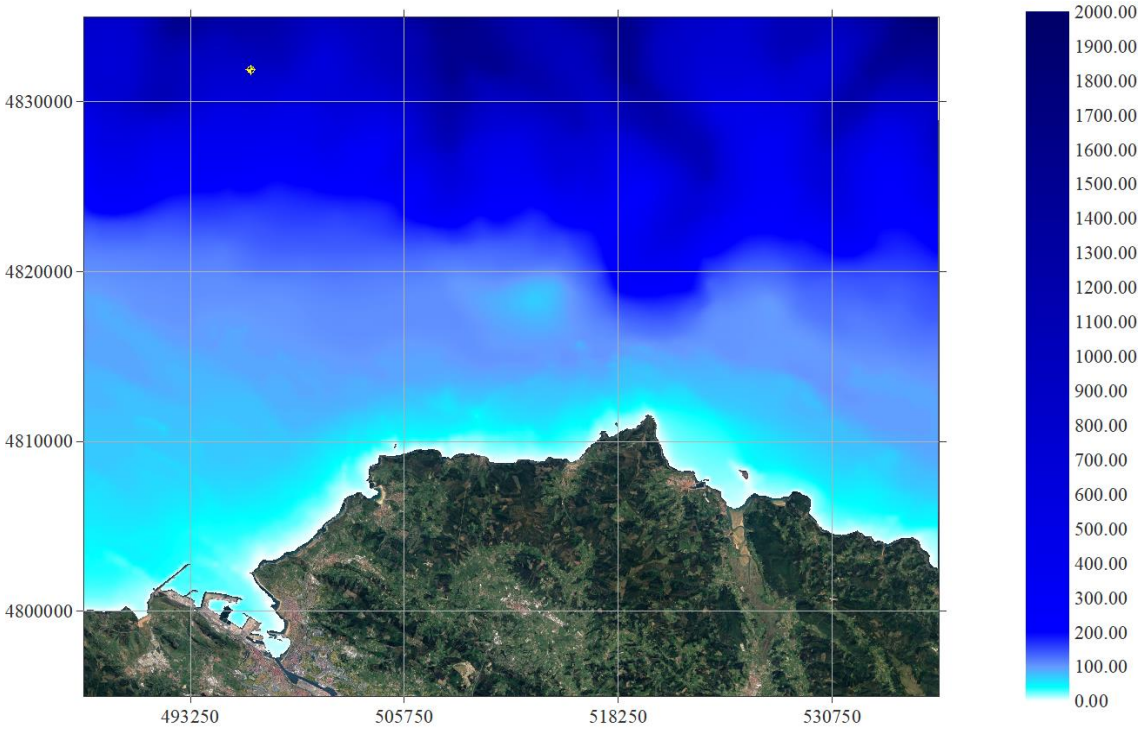


Figura 1. Malla exterior. Zona de Vizcaya (Level 1)

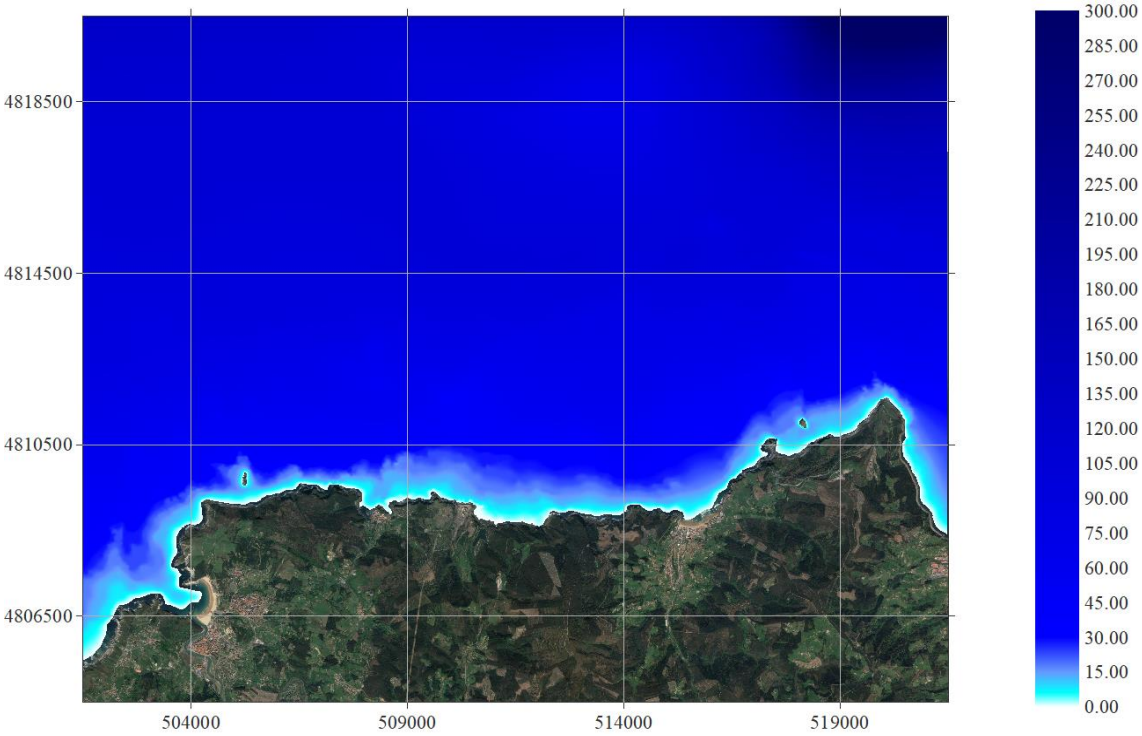


Figura 2. Malla intermedia (Level 2)

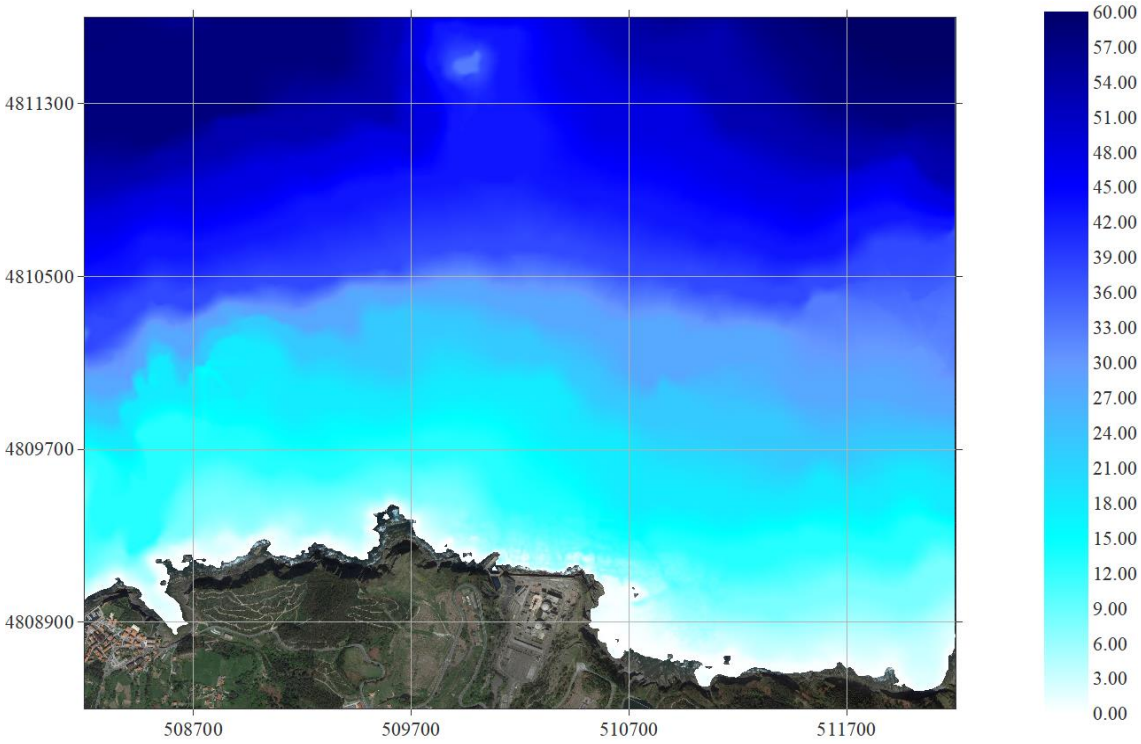


Figura 3. Malla de detalle (Level 3).

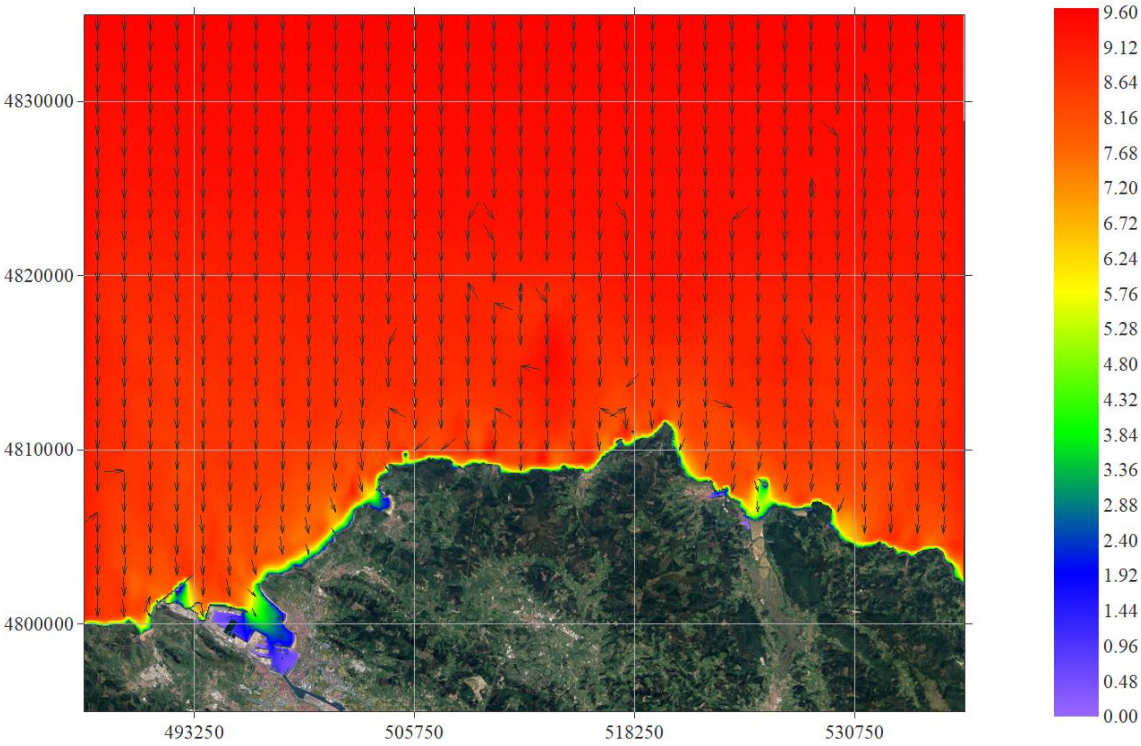


Figura 4. Hs y dirección media. Level 1. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 14 s

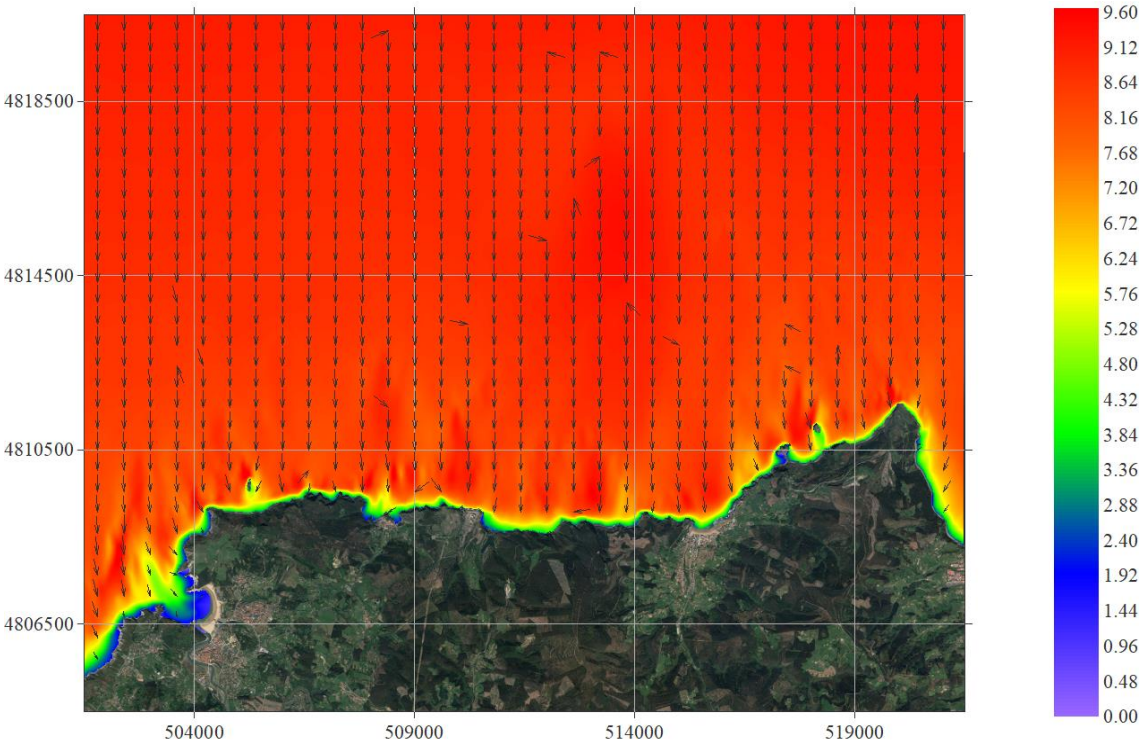


Figura 5. Hs y dirección media. Level 2. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 14 s

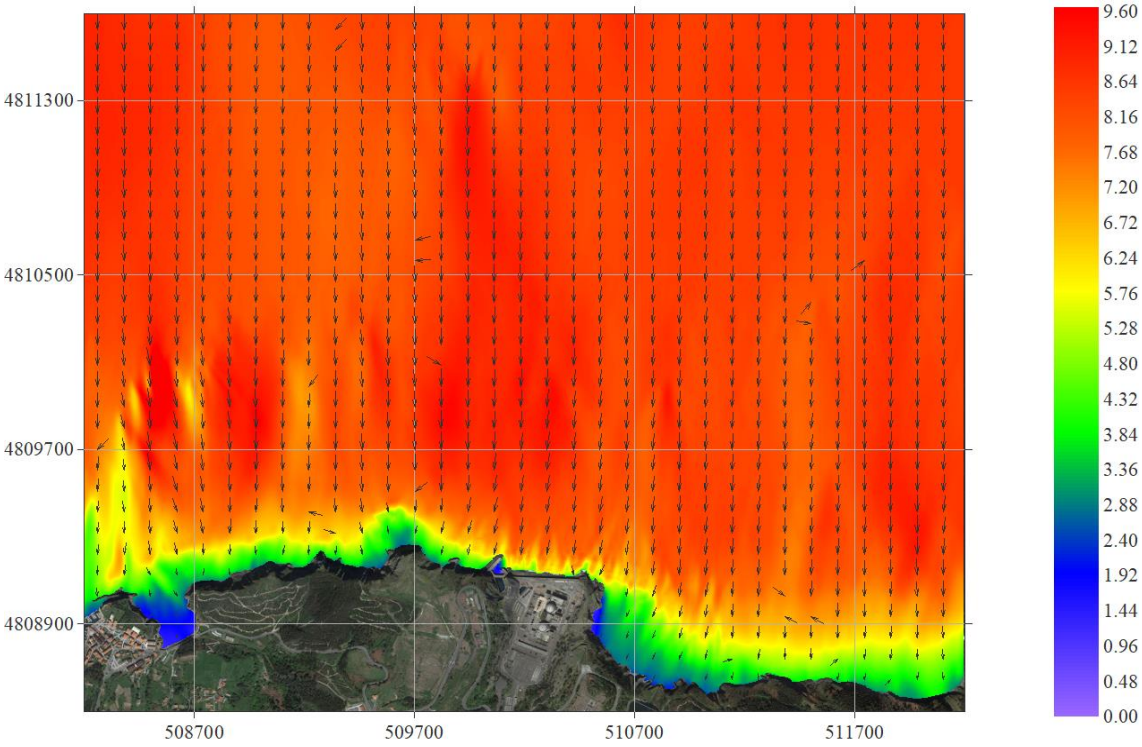


Figura 6. Hs y dirección media. Level 3. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 14 s

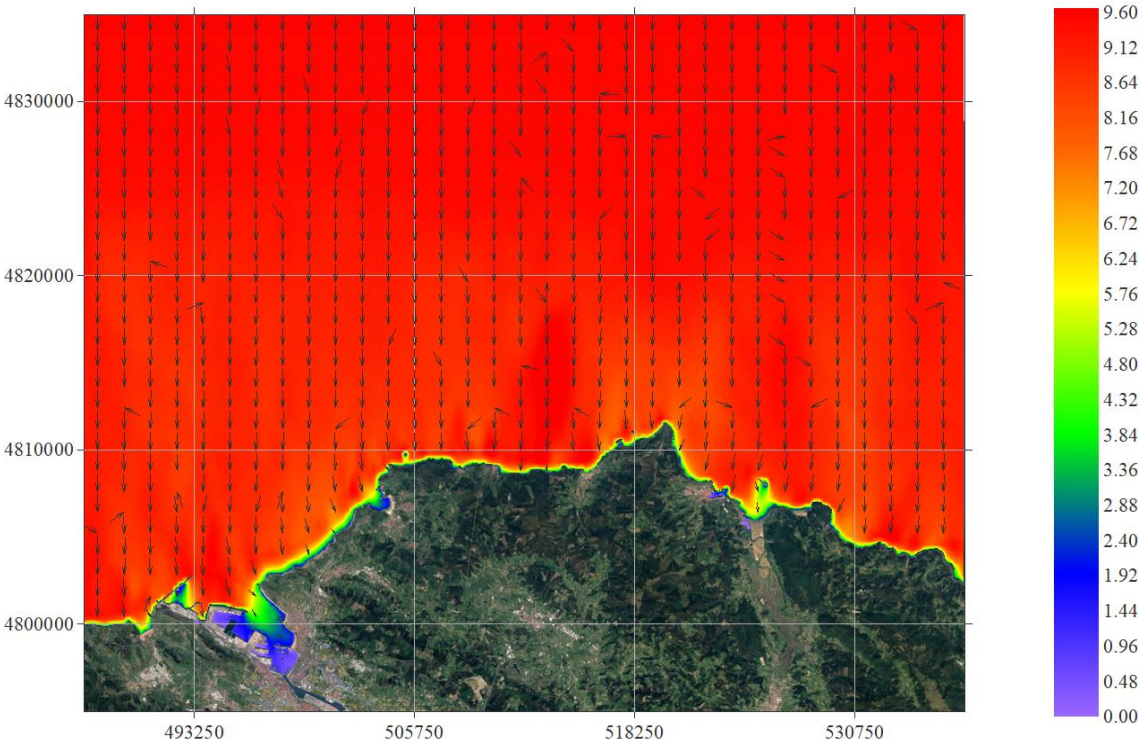


Figura 7. Hs y dirección media. Level 1. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 18 s

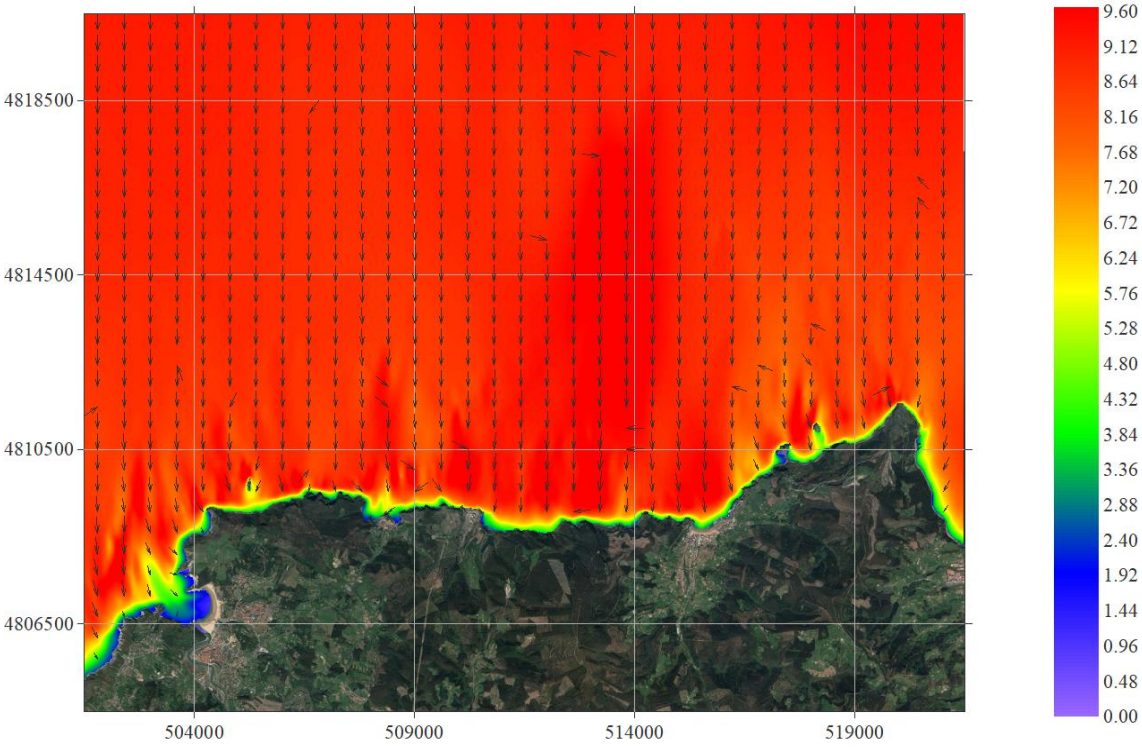


Figura 8. Hs y dirección media. Level 2. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 18 s

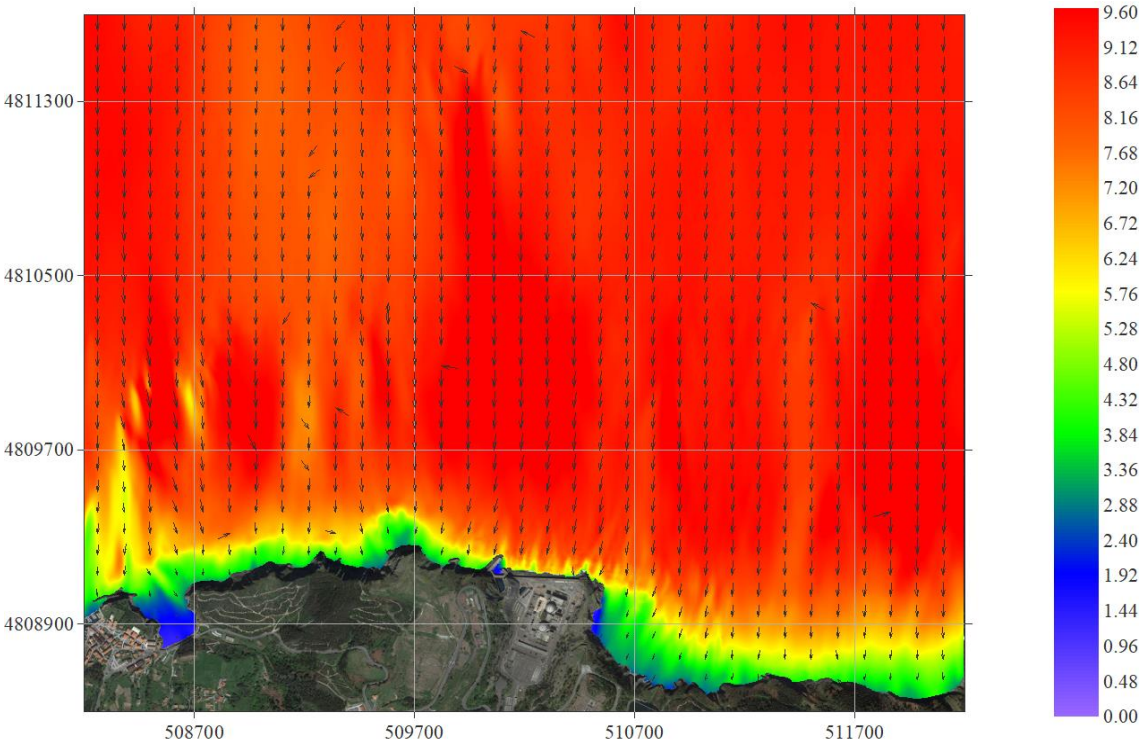


Figura 9. Hs y dirección media. Level 3. Sector N; Hs0 = 9.56 m; Tp = 18 s

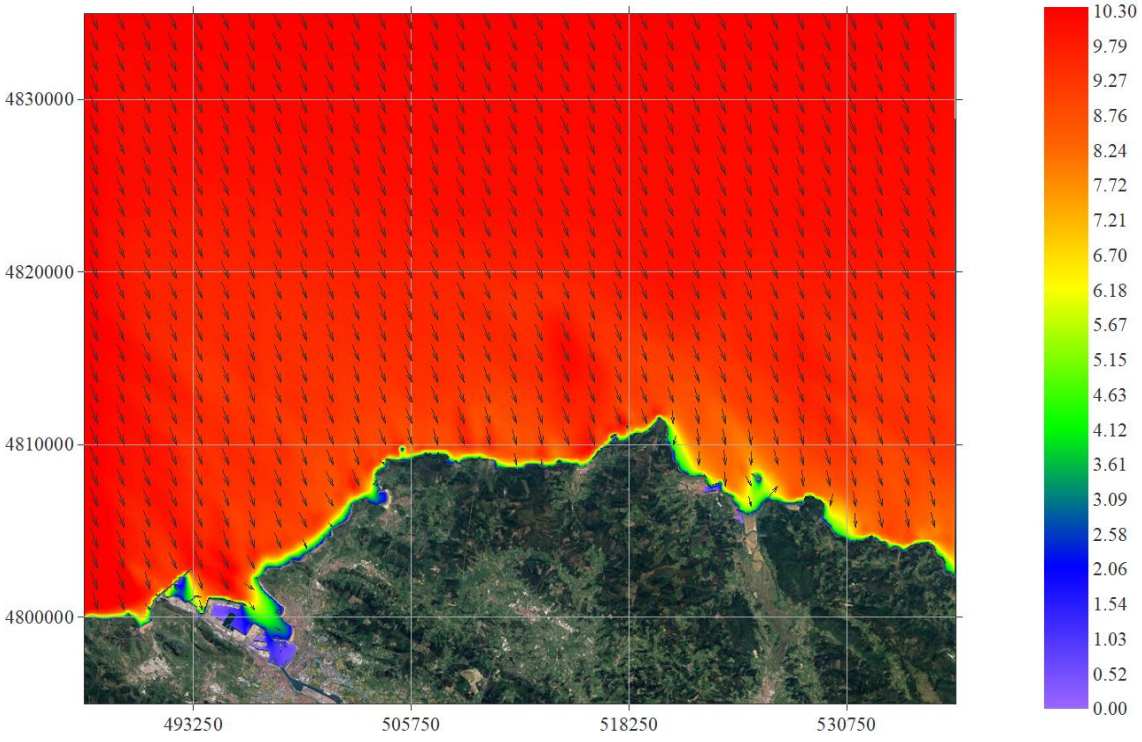


Figura 10. Hs y dirección media. Level 1. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 15 s

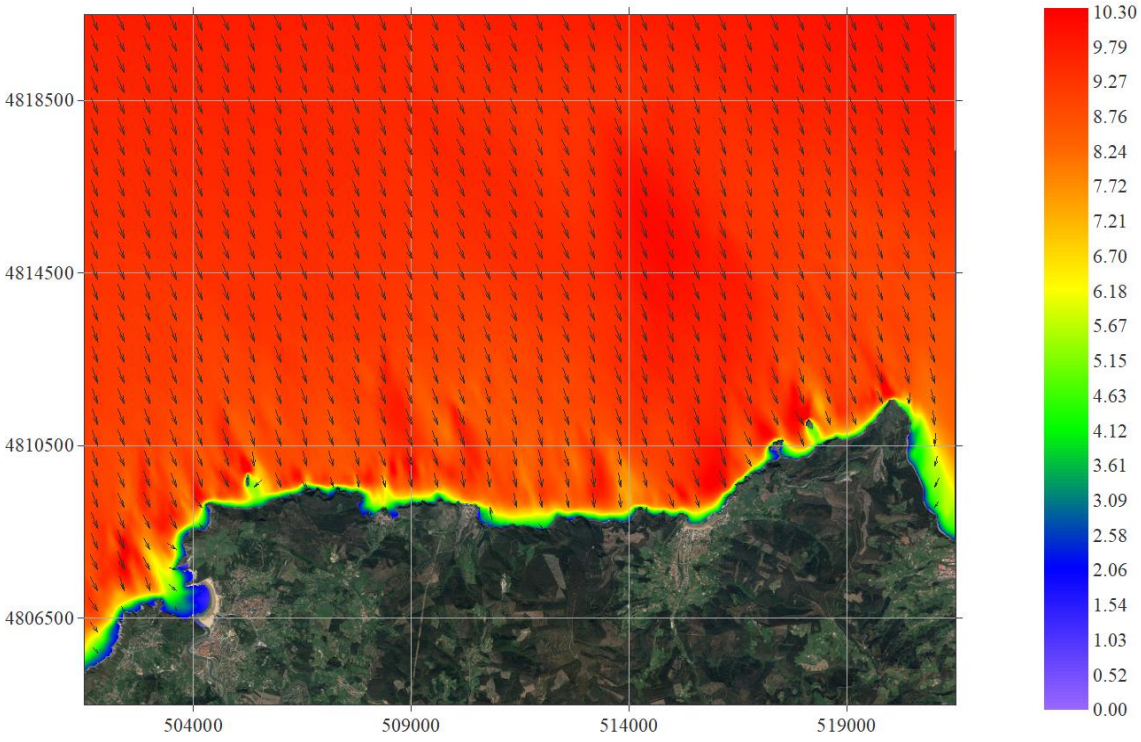


Figura 11. Hs y dirección media. Level 2. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 15 s

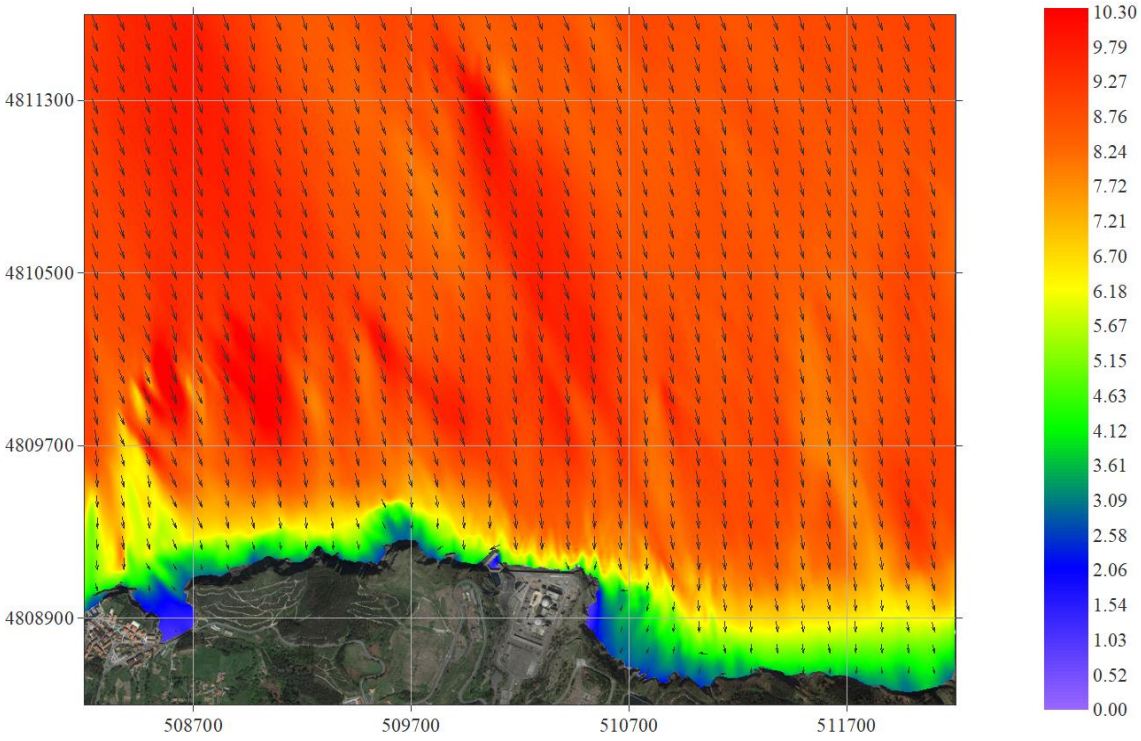


Figura 12. Hs y dirección media. Level 3. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 15 s

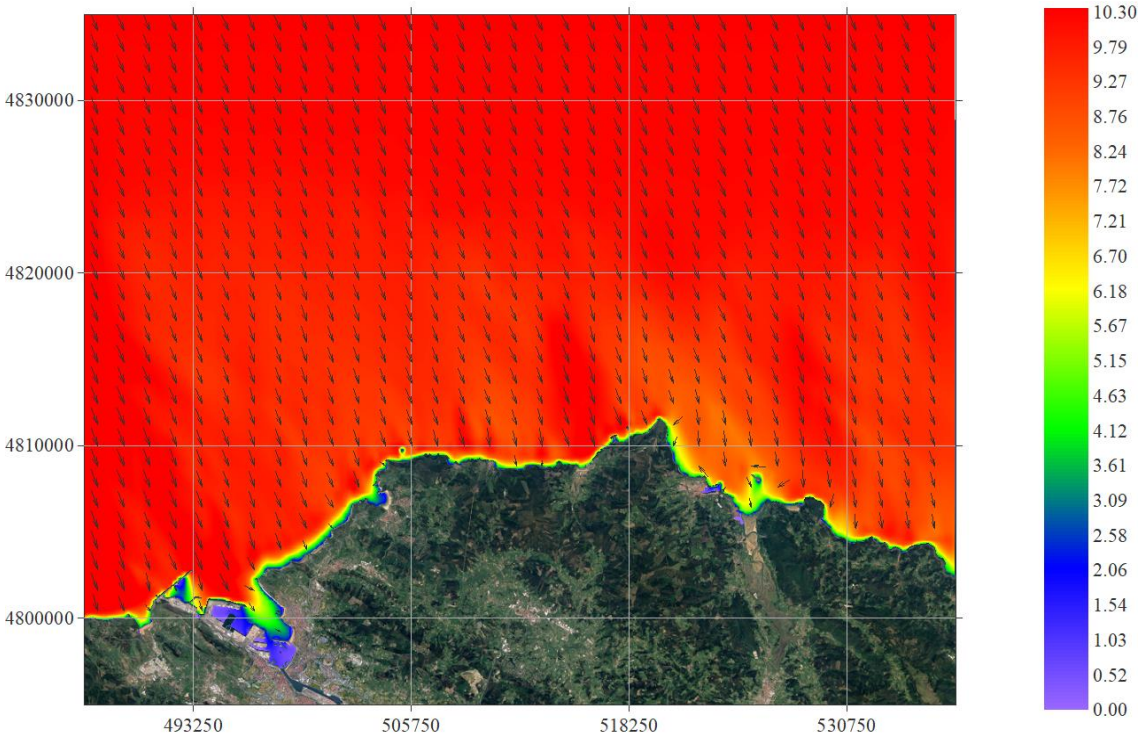


Figura 13. Hs y dirección media. Level 1. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 19 s

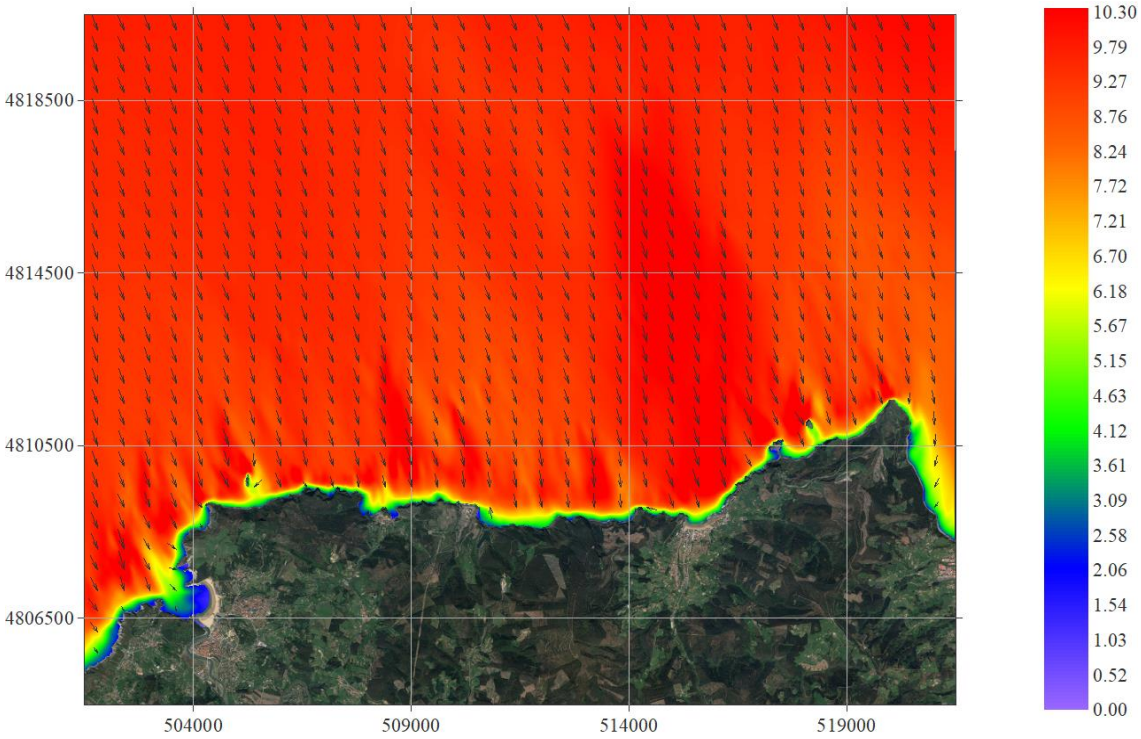


Figura 14. Hs y dirección media. Level 2. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 19 s

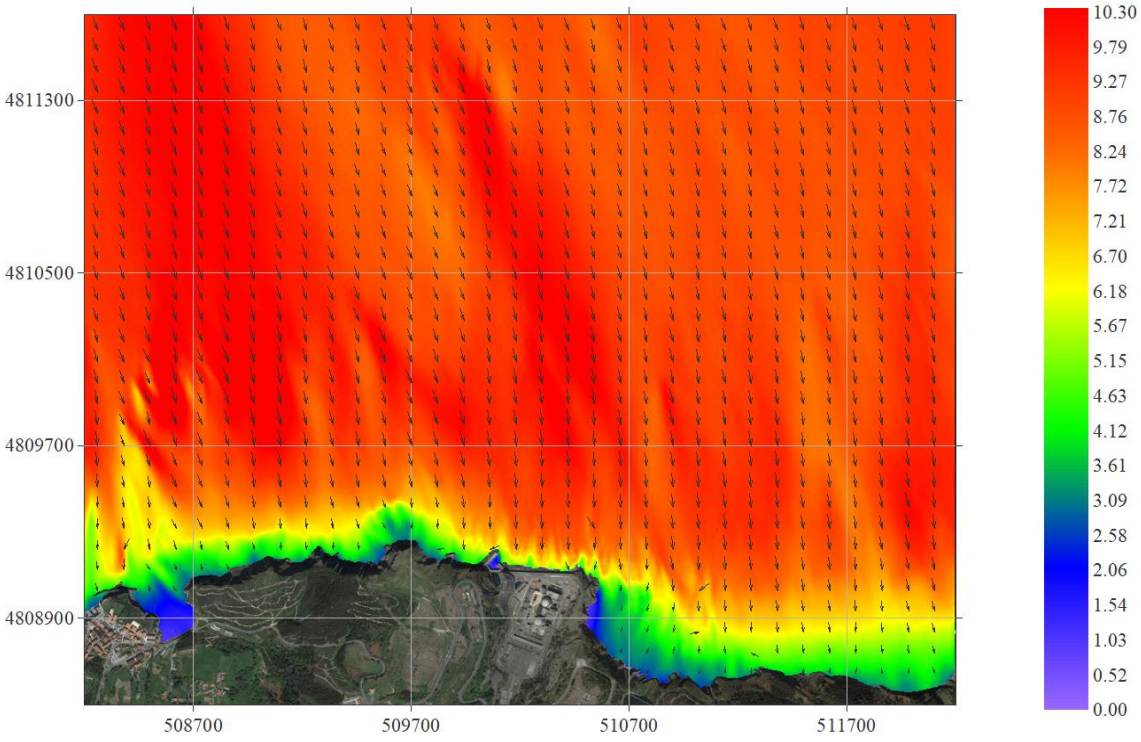


Figura 15. Hs y dirección media. Level 3. Sector NNW; Hs0 = 10.31 m; Tp = 19 s

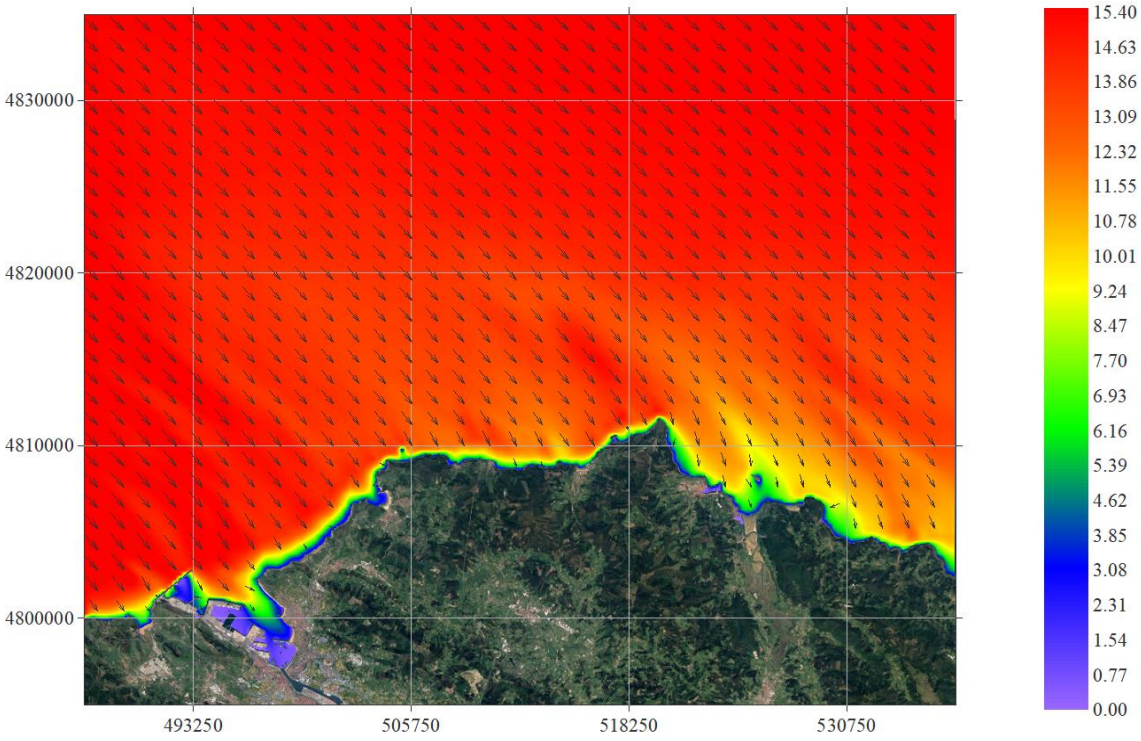


Figura 16. Hs y dirección media. Level 1. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 16 s

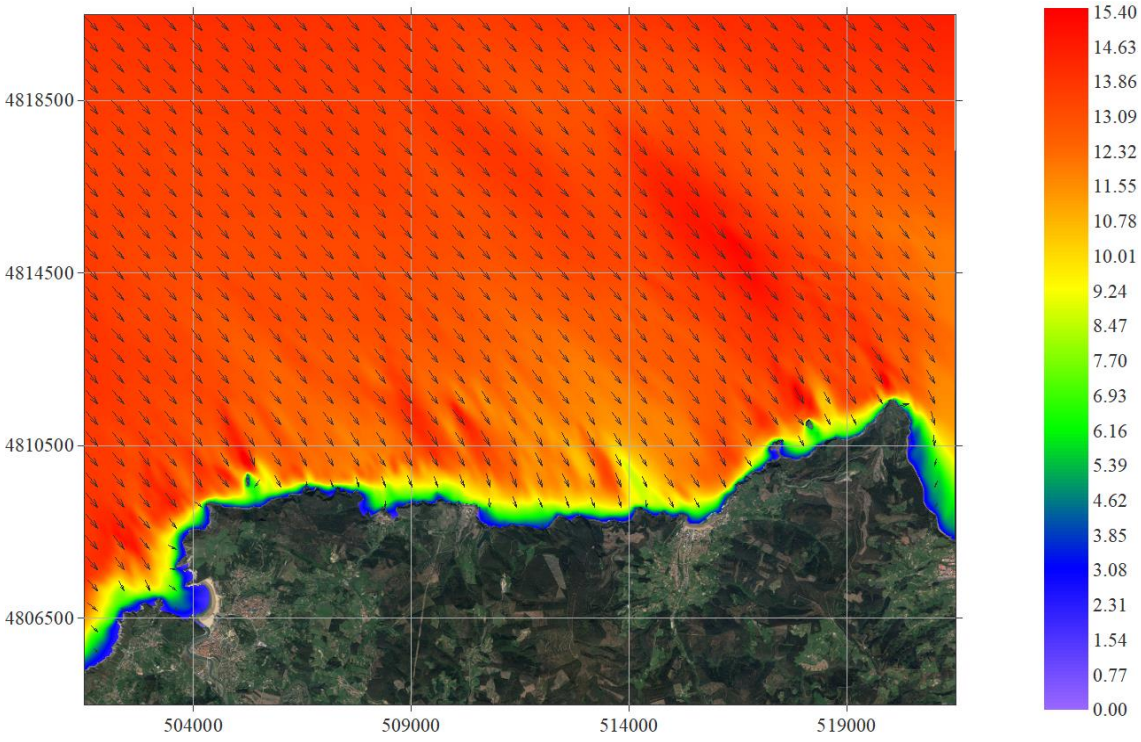


Figura 17. Hs y dirección media. Level 2. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 16 s

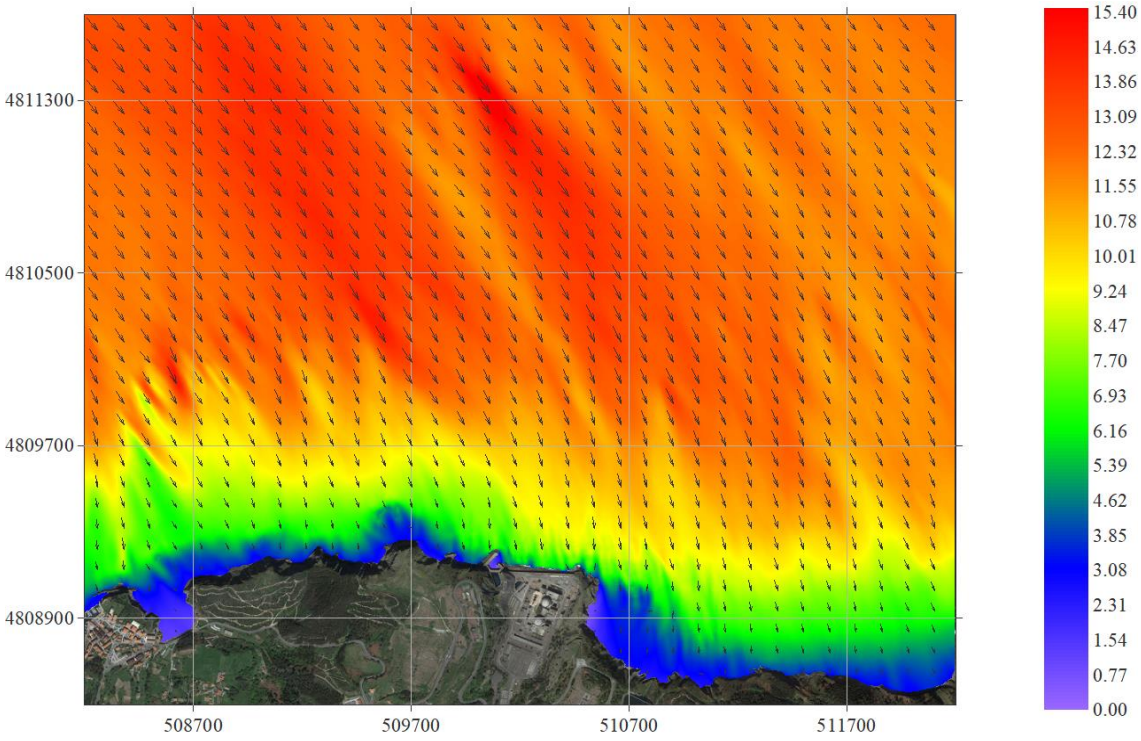


Figura 18. Hs y dirección media. Level 3. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 16 s

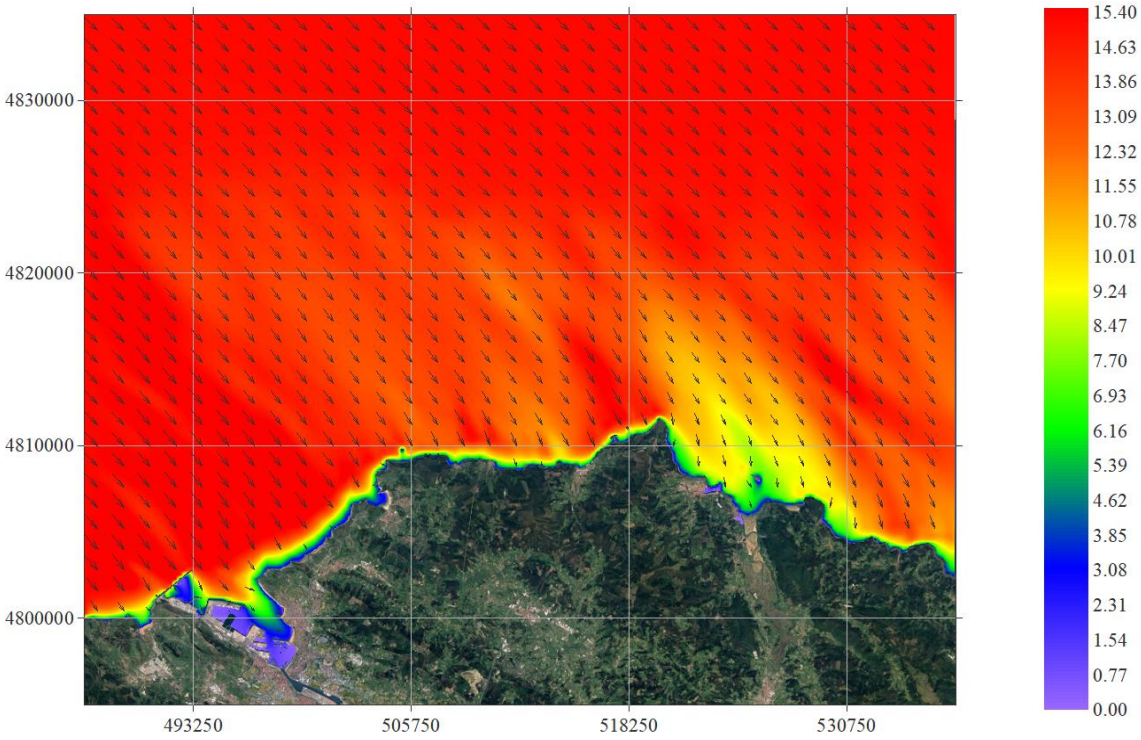


Figura 19. Hs y dirección media. Level 1. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 20 s

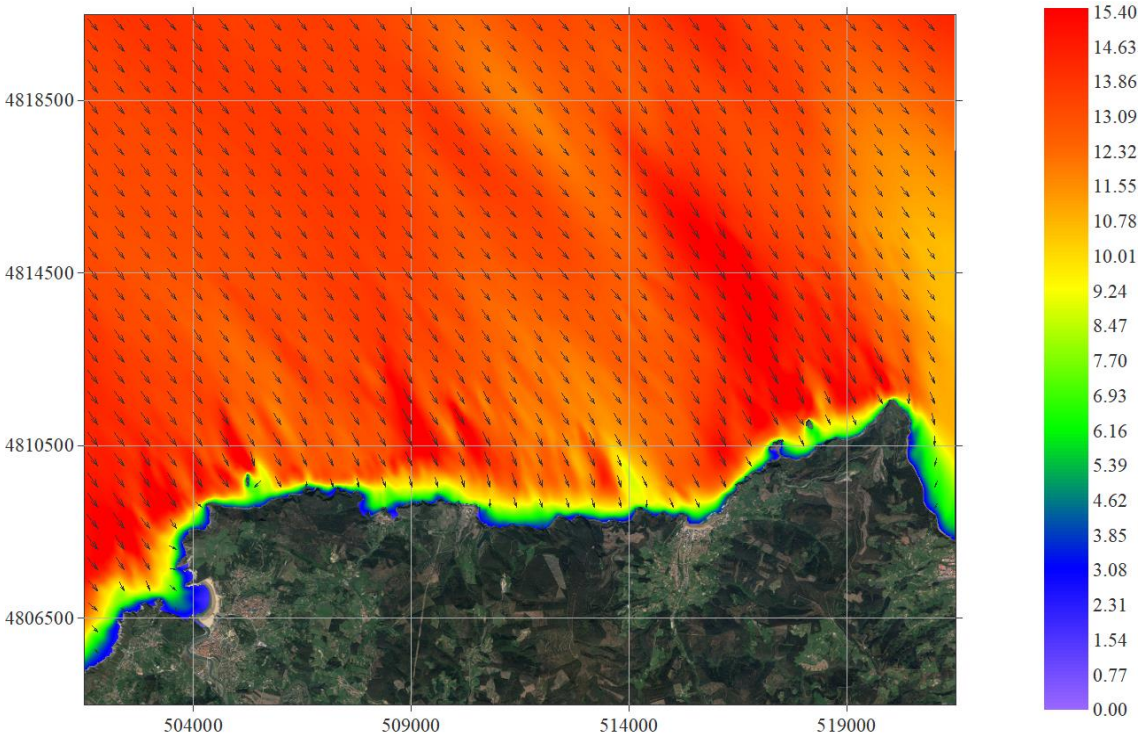


Figura 20. Hs y dirección media. Level 2. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 20 s

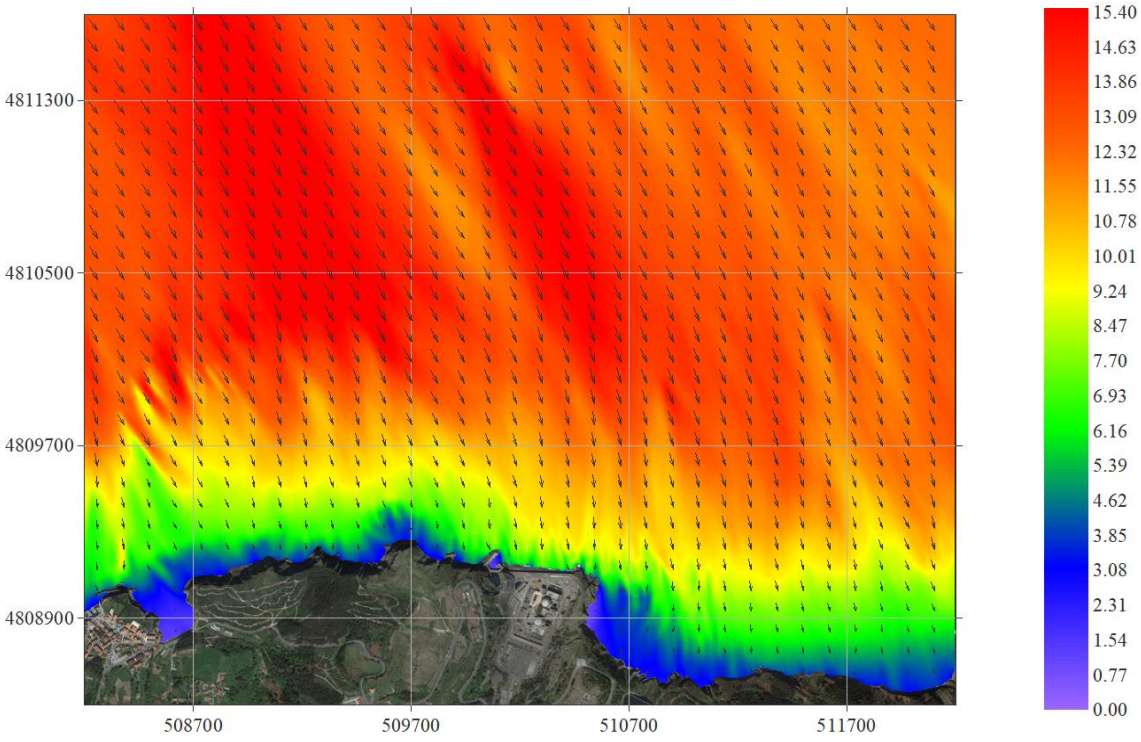


Figura 21. Hs y dirección media. Level 3. Sector NW; Hs0 = 15.43 m; Tp = 20 s

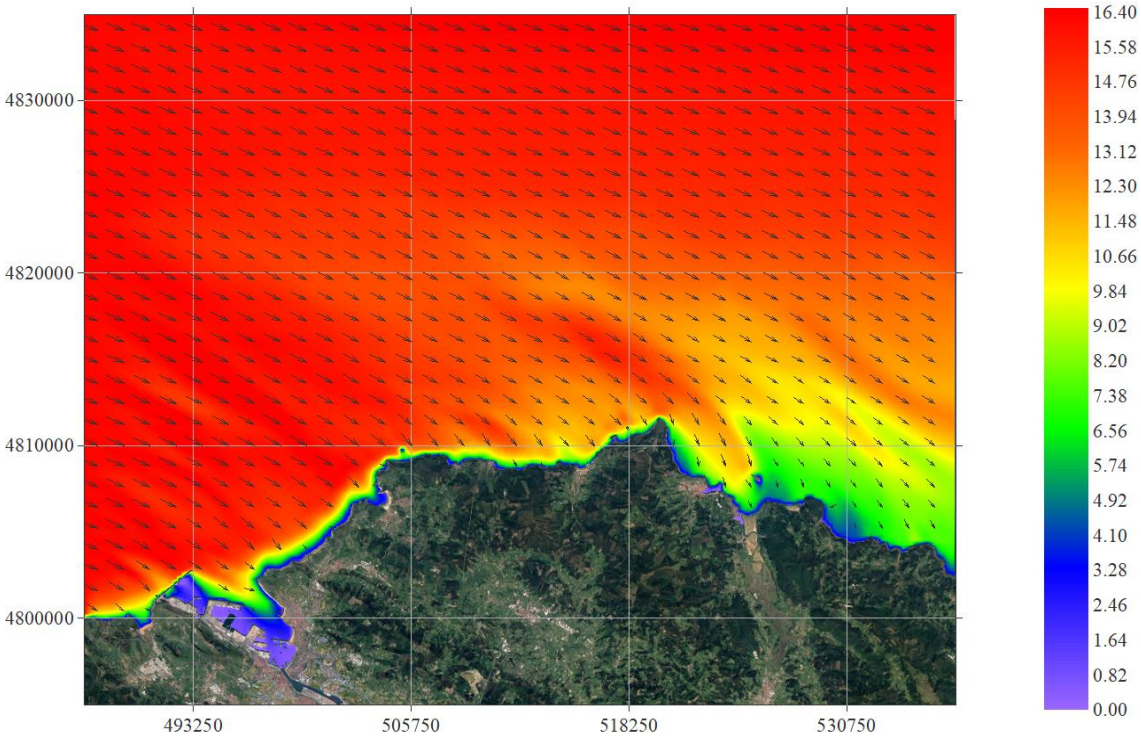


Figura 22. Hs y dirección media. Level 1. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 17 s

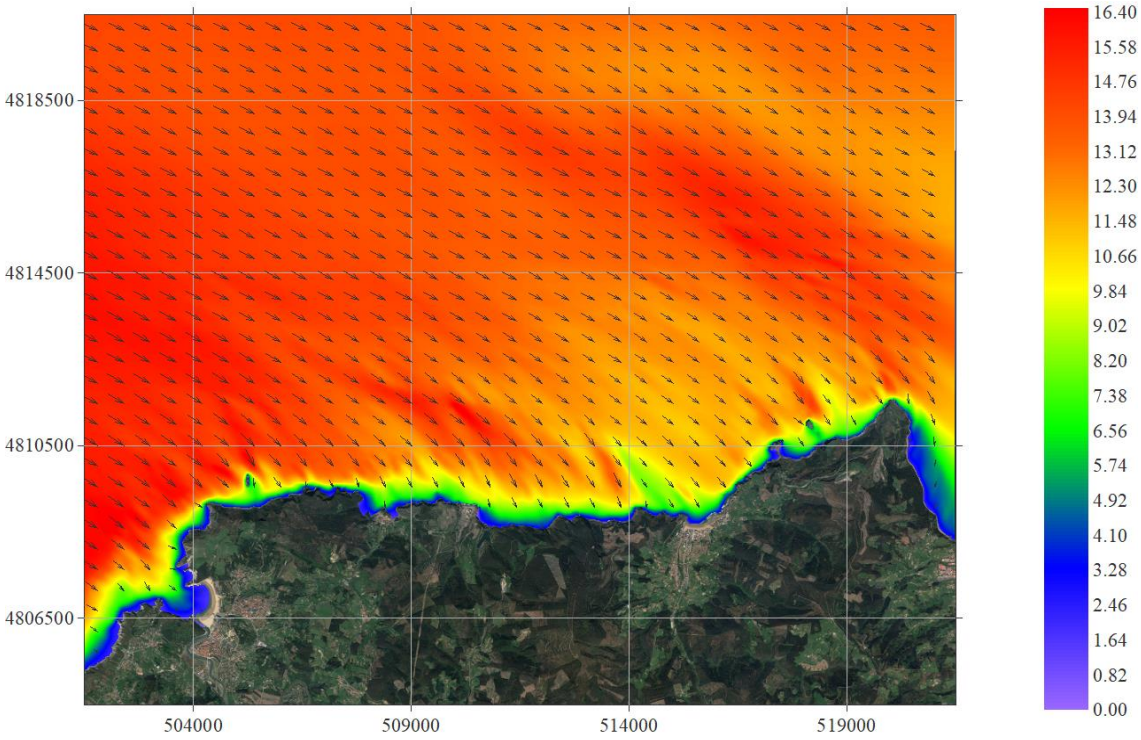


Figura 23. Hs y dirección media. Level 2. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 17 s

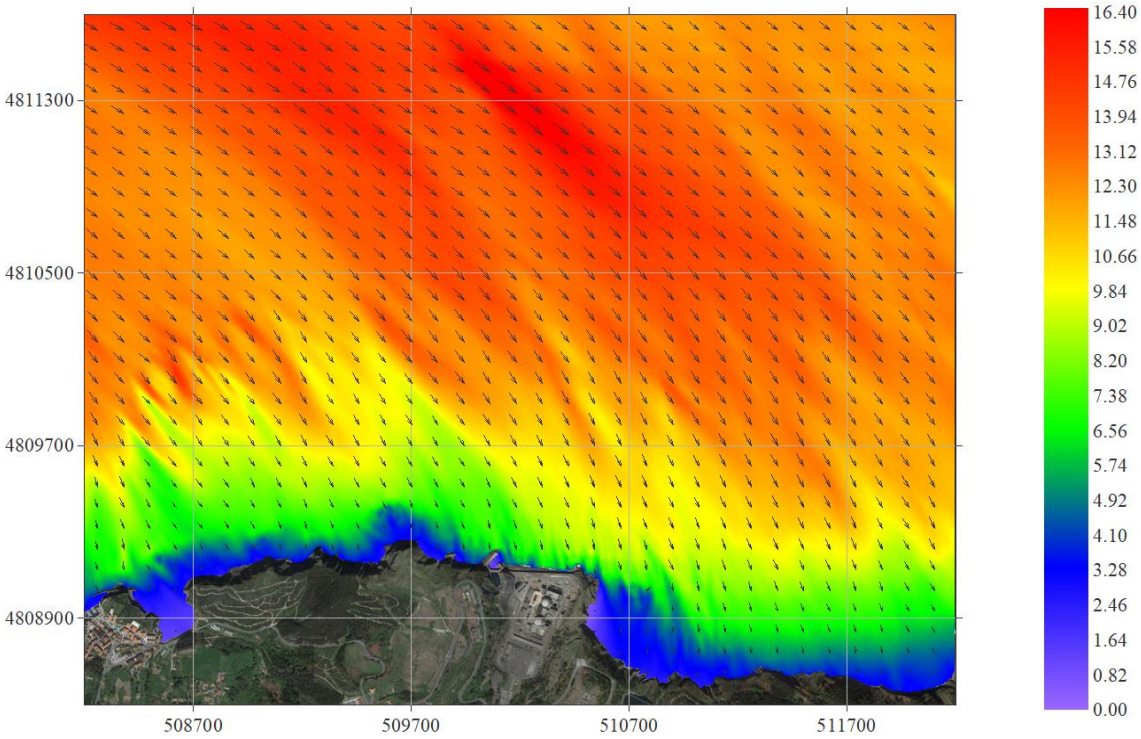


Figura 24. Hs y dirección media. Level 3. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 17 s

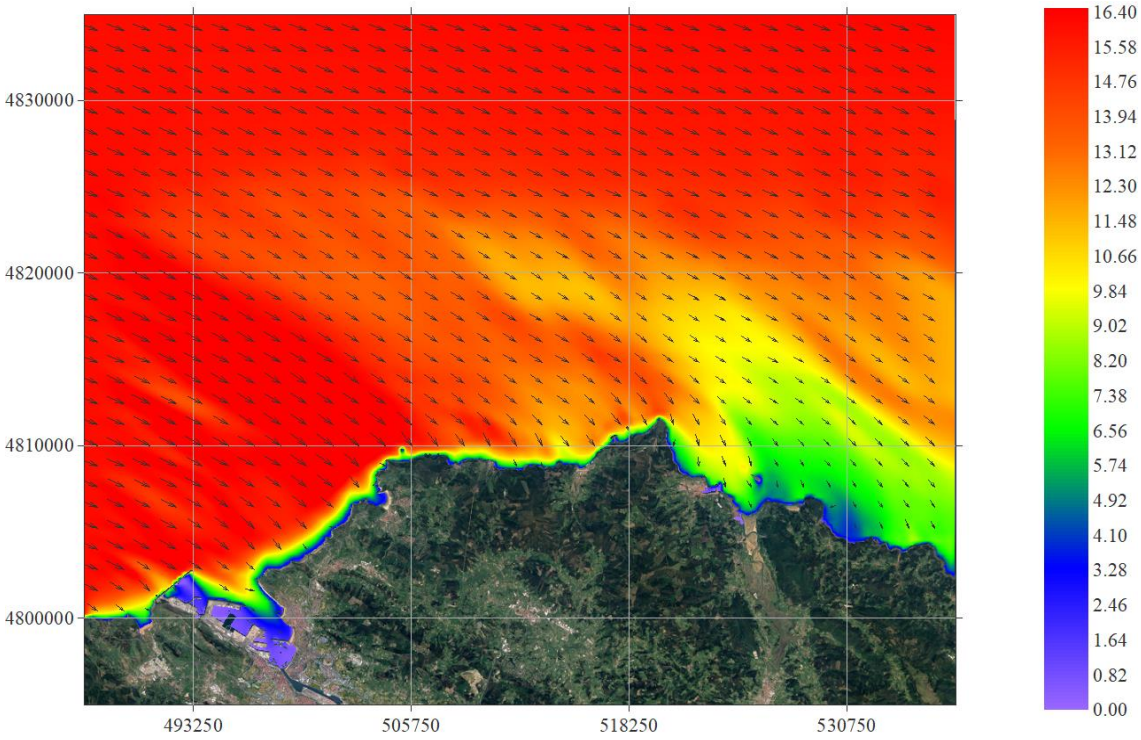


Figura 25. Hs y dirección media. Level 1. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 21 s

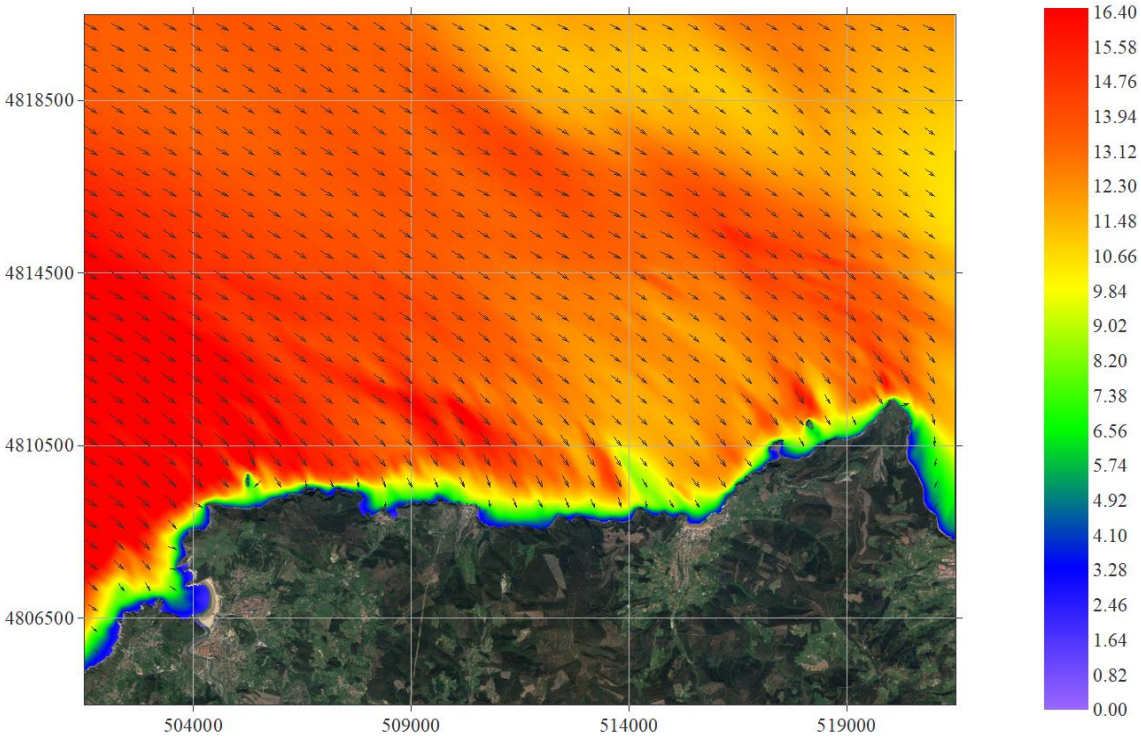


Figura 26. Hs y dirección media. Level 2. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 21 s

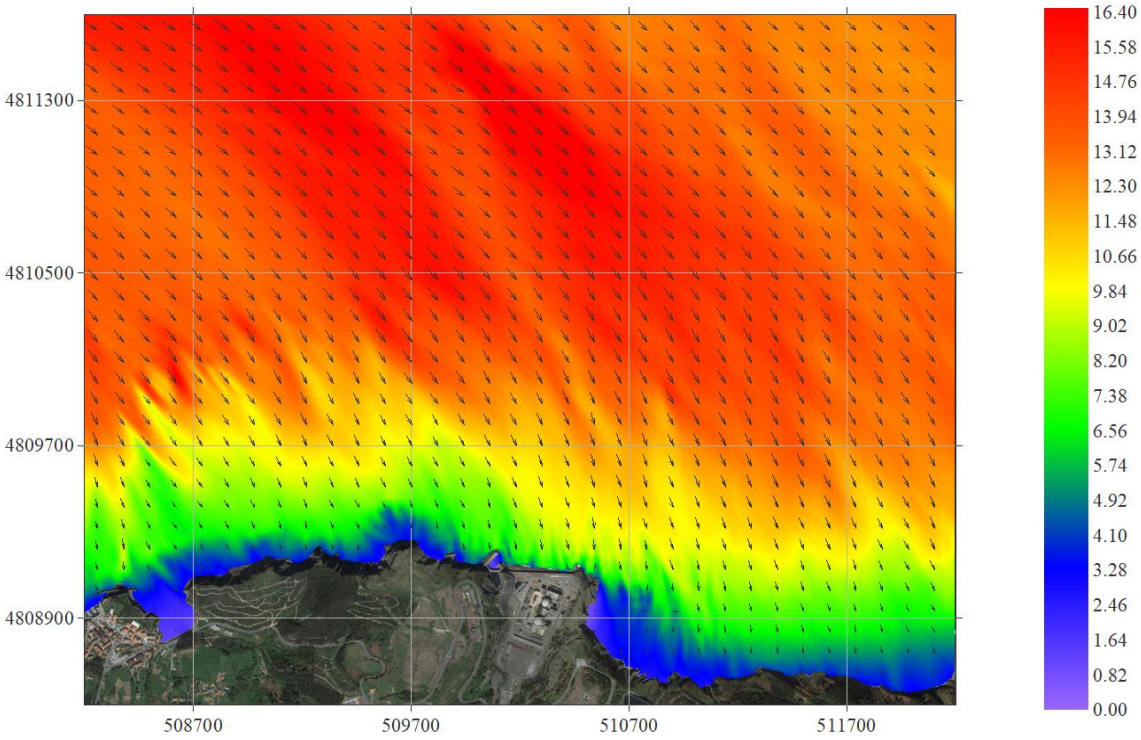


Figura 27. Hs y dirección media. Level 3. Sector WNW; Hs0 = 16.36 m; Tp = 21 s