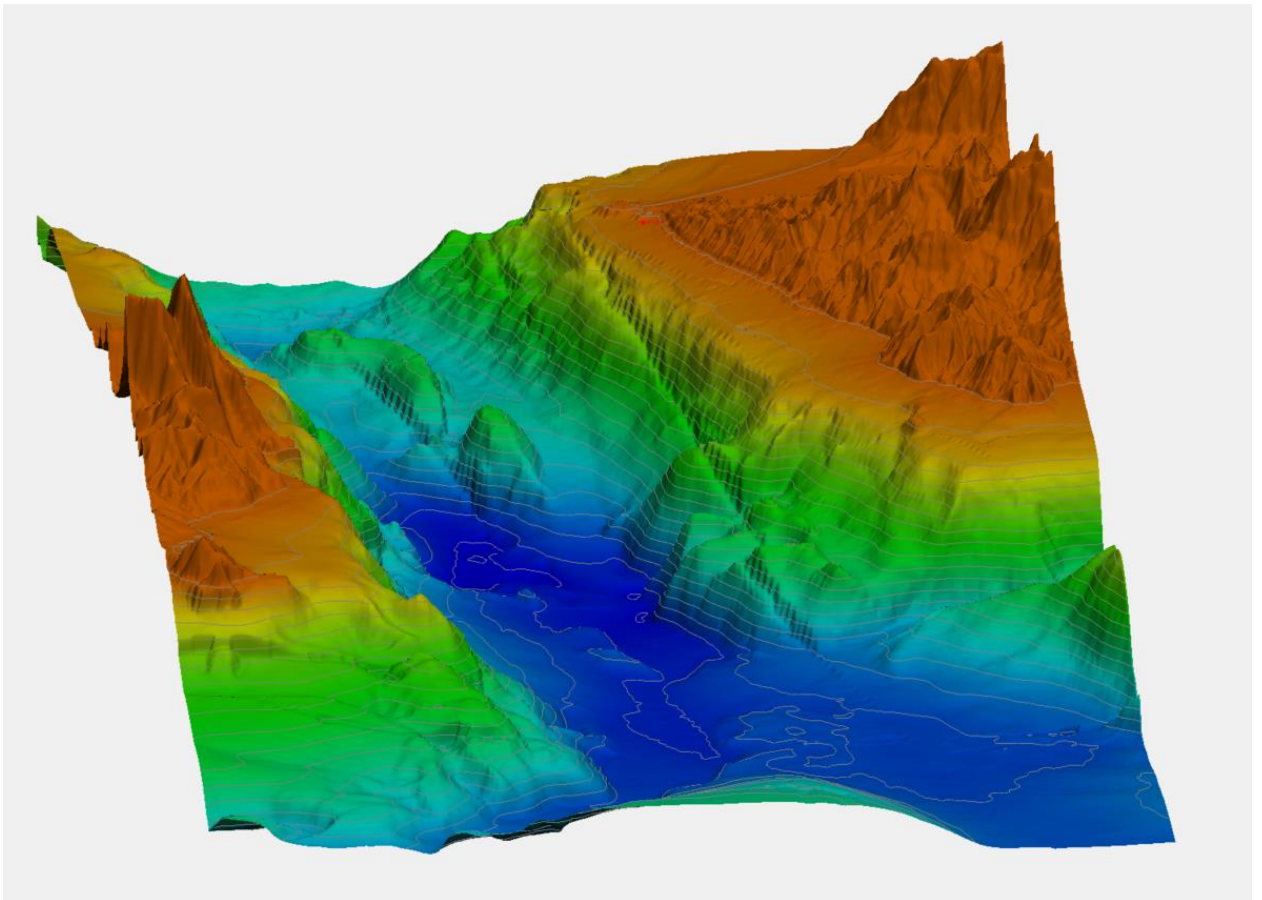


**CÁLCULO DEL RUN-UP EN EL TRAMO ACANTILADO COMPRENDIDO
ENTRE LOS VÉRTICES M-15 Y M-17 DEL DESLINDE DEL DPMT
PRACTICADO ENTRE EL PUERTO DE TARIFA Y CASA TREVIÑO (Ref:
DES01/07/11/0003), T.M. DE TARIFA (CÁDIZ)**



INFORME METODOLÓGICO

MARZO 2021

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Objeto del presente documento	3
1.2	Localización de la zona de interés	3
2	GEORREFERENCIACIÓN	5
3	DATOS DE PARTIDA	5
3.1	Batimetría	5
3.2	Oleaje.....	6
4	BASES DE CÁLCULO	7
4.1	Régimen extremal	7
4.1.1	Selección de extremos	7
4.2	Función de distribución de probabilidad	7
4.3	Propagación del oleaje	8
4.3.1	Modelos empleados	8
5	CLIMA MARÍTIMO.....	8
5.1	Preproceso de datos de oleaje	8
5.1.1	Nodo SIMAR 2022072	8
5.2	Límites de oleaje.....	15
5.3	Oleaje de cálculo	21
5.4	Nivel del mar	24
6	PROPAGACIÓN DEL OLAJE.....	28
6.1	Dominios de cálculo	28
6.2	Propagación del oleaje hasta las proximidades de la zona de estudio.....	29
6.3	Propagación hasta la costa.....	31
7	CONCLUSIONES	32
8	REFERENCIAS	33
	ANEJO 1 : MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS.....	34
	A1.1 INTRODUCCIÓN	35
	A1.2 MODELO CMSWAVE.....	35
	A1.2.1 Ecuaciones de gobierno	35

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto del presente documento

El presente documento tiene por objeto caracterizar algunos aspectos del clima marítimo para la determinación de la ribera del mar en una zona a levante del puerto de Tarifa (T.M. de Tarifa, Cádiz), en el tramo acantilado comprendido entre los vértices M-15 y M-17 del deslinde del DPMT practicado entre el puerto de Tarifa y Casa Treviño (ref: des01/07/11/0003)

1.2 Localización de la zona de interés

El punto de cálculo se encuentra en la ubicación mostrada en la figura 1. Su posición motiva que tanto la propia península de Tarifa como, en menor medida, el dique del Sagrado Corazón (figura 2) lo protejan de los oleajes de poniente. Limitando considerablemente el alcance de este estudio a la zona descrita.

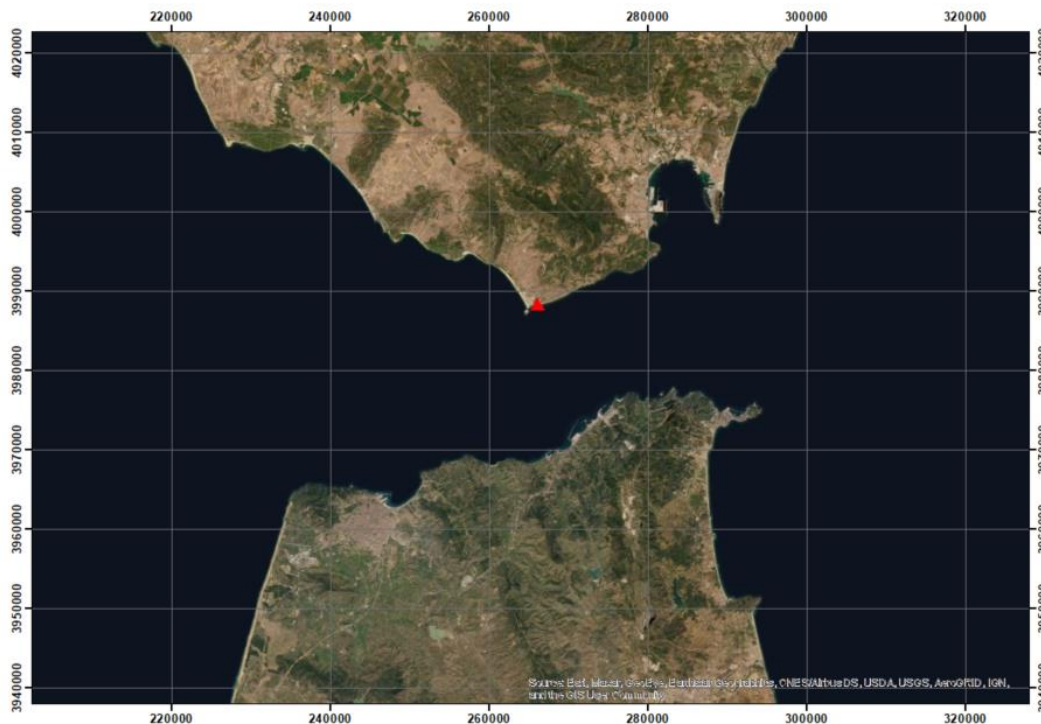


figura 1.- Localización del punto de interés



figura 2.- Localización del punto de interés a levante de la península de Tarifa.



figura 3.- Detalle de la zona de interés

2 GEORREFERENCIACIÓN

Se ha empleado el siguiente sistema de proyección:

ETRS_1989_UTM_Zone_30N
WKID: 25830 Authority: EPSG
Projection: Transverse_Mercator
False_Easting: 500000.0
False_Northing: 0.0
Central_Meridian: -3.0
Scale_Factor: 0.9996
Latitude_Of_Origin: 0.0
Linear Unit: Meter (1.0)

tabla 1 .- Dátum y proyección cartográfica empleados

El dátum vertical empleado es el nivel medio del mar en Alicante (NMMA) (ver sección 5.4).

Las ortofotos empleadas tienen las siguientes fuentes: World Imagery - Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

3 DATOS DE PARTIDA

3.1 Batimetría

Se han combinado datos de tres fuentes diferentes, buscando la extensión necesaria y la precisión más alta posible en la zona de trabajo. Estas fuentes son las siguientes:

FUENTE	FIGURA	ORGANISMO
EMODNet	figura 4	EMODNet
IGN	Error! Reference source not found.	Instituto Geográfico Nacional
Ecocartografía de Cádiz	Error! Reference source not found.	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

tabla 2 .- Datos batimétricos empleados

La batimetría EMODNet, con dátum vertical NMMA ha sido corregida según las diferencias indicadas en el apartado de nivel del mar.

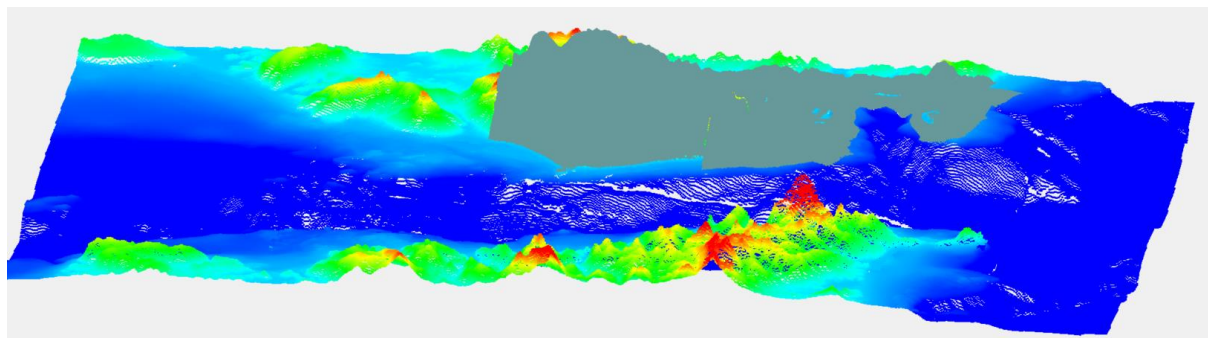


figura 4.- Datos EMODnet

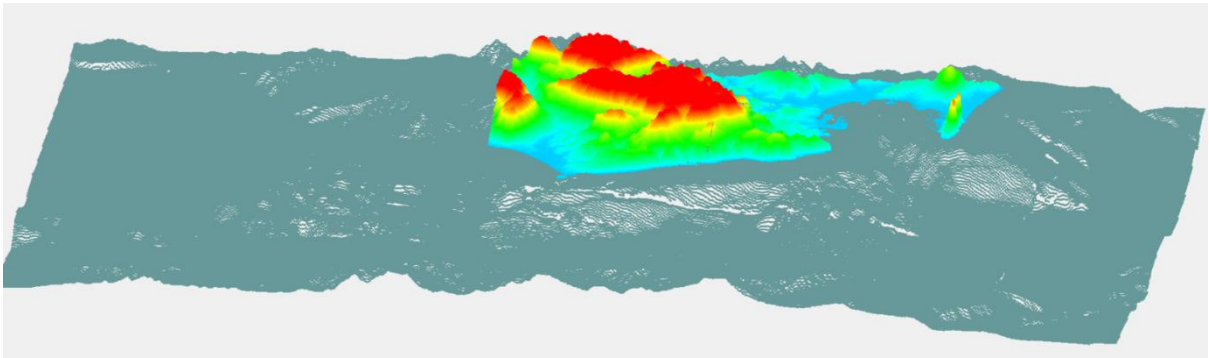


figura 5.- Datos IGN

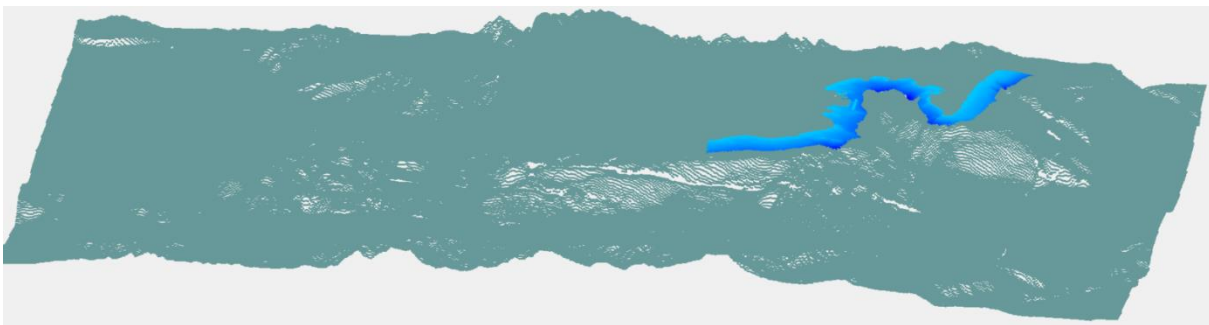


figura 6.- Datos ecocartografía de la provincia de Cádiz

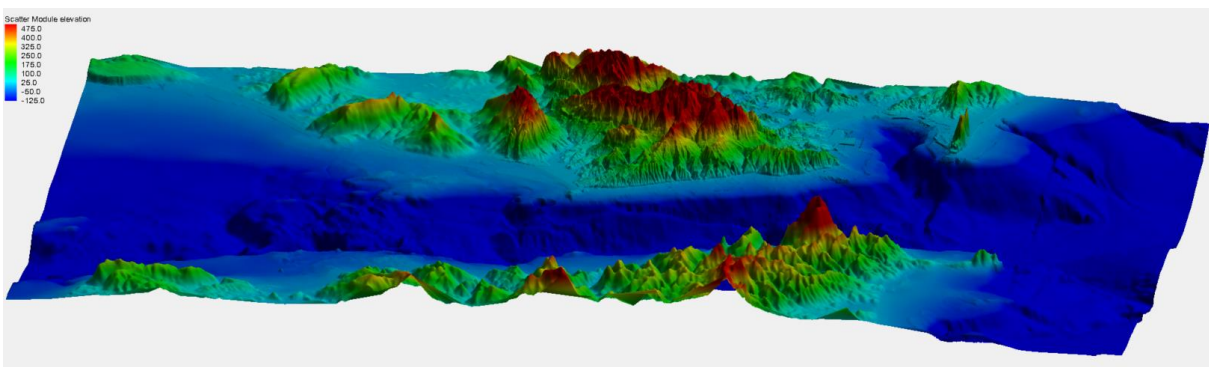


figura 7.- Combinación de las tres fuentes de datos

Se han empleado datos topográficos, con objeto de conocer las direcciones de viento que se encuentran protegidas por la superficie del terreno.

Los datos mostrados en esta sección son brutos, por lo que muestran algunas irregularidades en las intersecciones de las diferentes fuentes. Aunque esas irregularidades no implican modificaciones dignas de consideración en la propagación del oleaje, se suavizan al crear las mallas de cálculo, dando más peso a los datos más fiables (se consideran como tales el levantamiento *ad-hoc* y la ecocartografía de la provincia de Cádiz, por este orden).

3.2 Oleaje

Los datos de oleaje se han obtenido a partir de la base de datos oceanográficos de puertos del Estado. En concreto, se ha empleado la estación siguiente:

ESTACIÓN	RED	Longitud [°]	Latitud [°]	Profundidad [m]	Objetivo
Nodo SIMAR 2022072	SIMAR	5.167° O	36.000° N		Oleaje

tabla 3 .- Fuentes de datos oceanográficos

Su ubicación se muestra en la figura 8, en la que se muestra también el punto de interés.

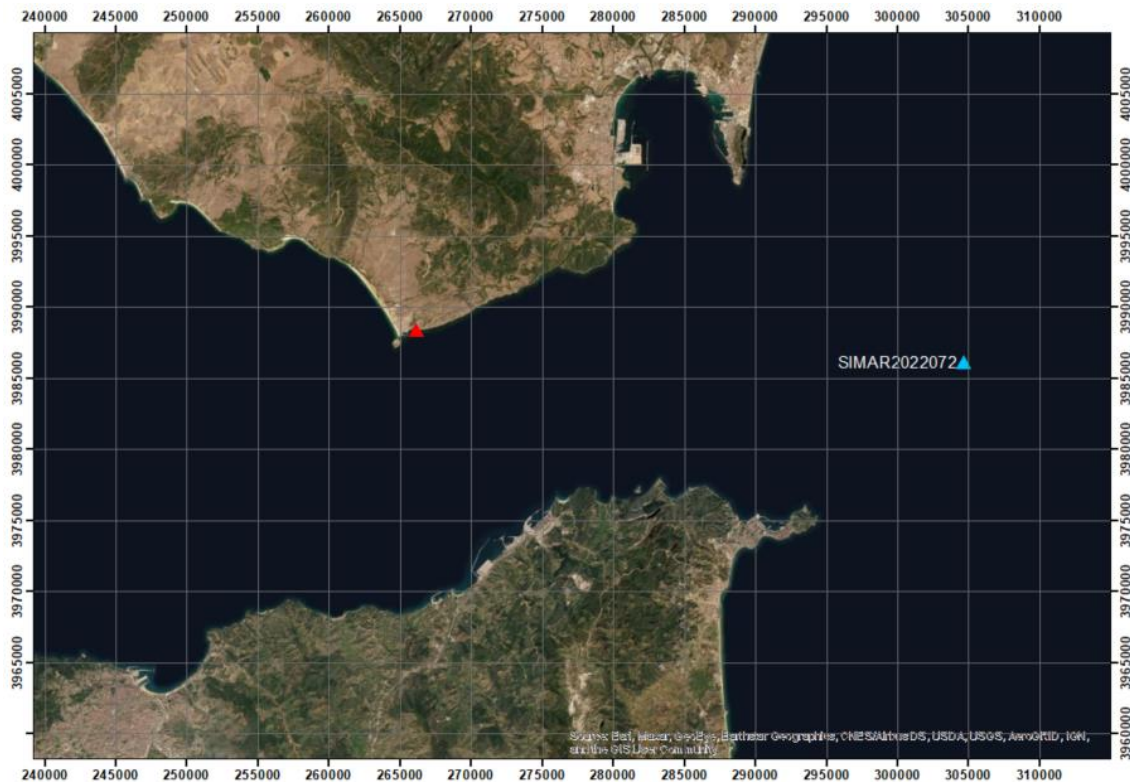


figura 8.- Ubicación de los puntos de toma de datos

Dado que Puertos del Estado no incluye el régimen extremal en el proceso de los datos de retroanálisis, estos se han sometido a un análisis adicional para obtenerlo.

La longitud del registro se muestra en la tabla siguiente:

ESTACIÓN	RED	de	a	Longitud [años]
Nodo SIMAR 2022072	SIMAR	01/1958	01/2021	63.04

tabla 4 .- Longitud del registro

4 BASES DE CÁLCULO

4.1 Régimen extremal

4.1.1 Selección de extremos

Se emplea el método POT con objeto de obtener datos suficientes para ajustar el régimen extremal con los criterios de homogeneidad e independencia. Se utiliza un umbral para el oleaje $T_H = 2.00$ m y una distancia mínima entre picos de 5 días.

Para el viento se ha empleado un umbral $T_W = 10$ m/s. En este caso, el umbral se ha escogido de forma que se obtenga un valor mínimo $\lambda \sim 20$ extremos/año.

4.2 Función de distribución de probabilidad

La función de distribución de probabilidad que se utiliza es la tripamétrica de Weibull. La función de distribución de probabilidad de Weibull es ampliamente utilizada en análisis de fiabilidad debido a su versatilidad. Dependiendo de los valores de los parámetros, la distribución de Weibull se puede usar para modelar una variedad de comportamientos de la variable.

En los tres casos se trabaja con la función de distribución de probabilidad de Weibull triparamétrica:

$$F(x) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right]} \quad [1]$$

Donde:

- F(x) Probabilidad de no excedencia del valor **x** de la variable ajustada
- B Parámetro de centrado o de localización
- A Parámetro de escala
- k Parámetro de forma

El nivel puede ser calculado en función de la probabilidad de no excedencia, F(x), como:

$$H = B + A \cdot \{-\ln[1 - F(x)]\}^{\frac{1}{k}} \quad [2]$$

4.3 Propagación del oleaje

4.3.1 Modelos empleados

Se emplea el modelo CMSWave (ver ANEJO 1) para la propagación del oleaje desde el punto de datos hasta las inmediaciones del punto de interés, y el modelo BOUSS1D, basado en las ecuaciones extendidas de Boussinesq, para la obtención del run-up en el punto de cálculo.

5 CLIMA MARÍTIMO

5.1 Preproceso de datos de oleaje

5.1.1 Nodo SIMAR 2022072

5.1.1.1. Depuración

Se observan datos inválidos en el registro. En la figura 9 se observan valores de $T_p = -99.99$. Se decide filtrar estos valores y reprocesar los datos. Filtrados los datos inválidos, la nube de puntos queda como se muestra en la figura 10. El ajuste de altura de ola significativa a periodo de pico se muestra en la figura 11.

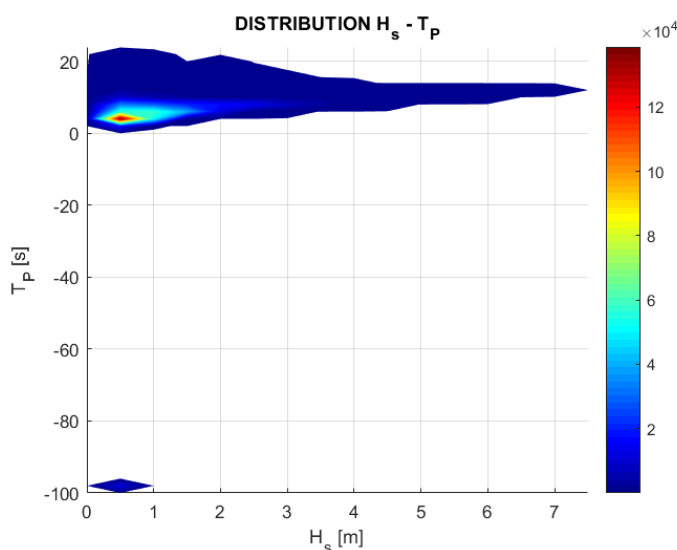


figura 9.- Nube de puntos $H_s - T_p$ no válida

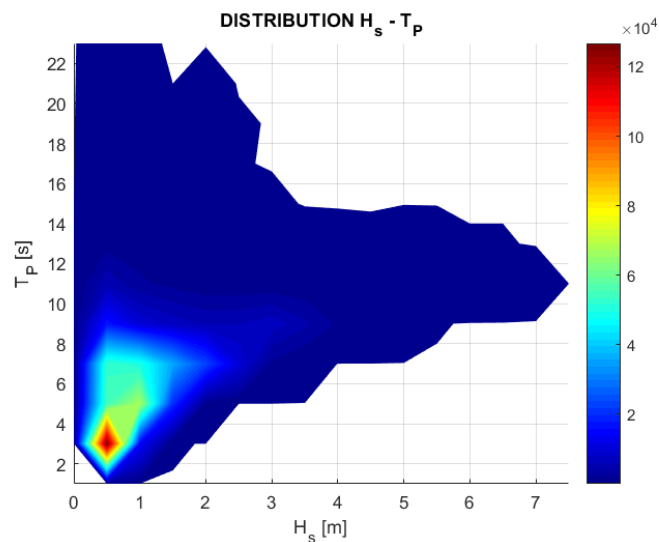


figura 10.- Nube de puntos depurada $H_s - T_p$

5.1.1.2. Rosa, gráficas e histogramas

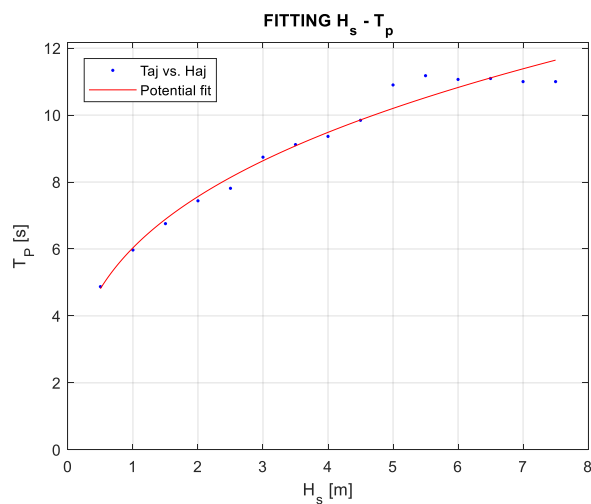


figura 11.- Ajuste del periodo de pico a la altura de ola significativa en el nodo SIMAR2022072

La función potencial que correlaciona el periodo de pico con la altura de ola significativa es:

$$T_p = 6.0136H_s^{0.3282} \quad [3]$$

La rosa de oleaje en el punto de datos es la siguiente:

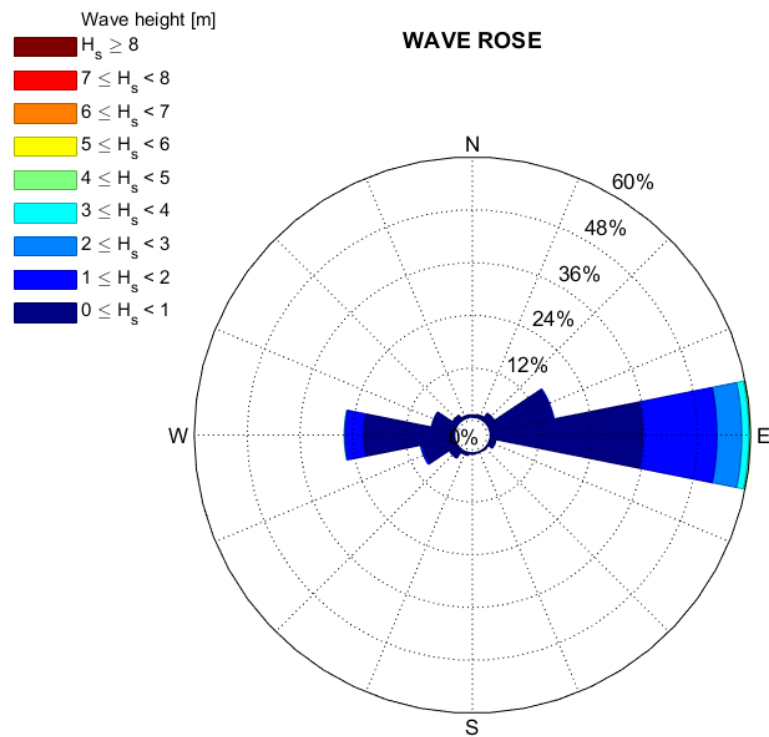


figura 12.- Rosa de oleaje anual

Las series temporales e histogramas se muestran a continuación.

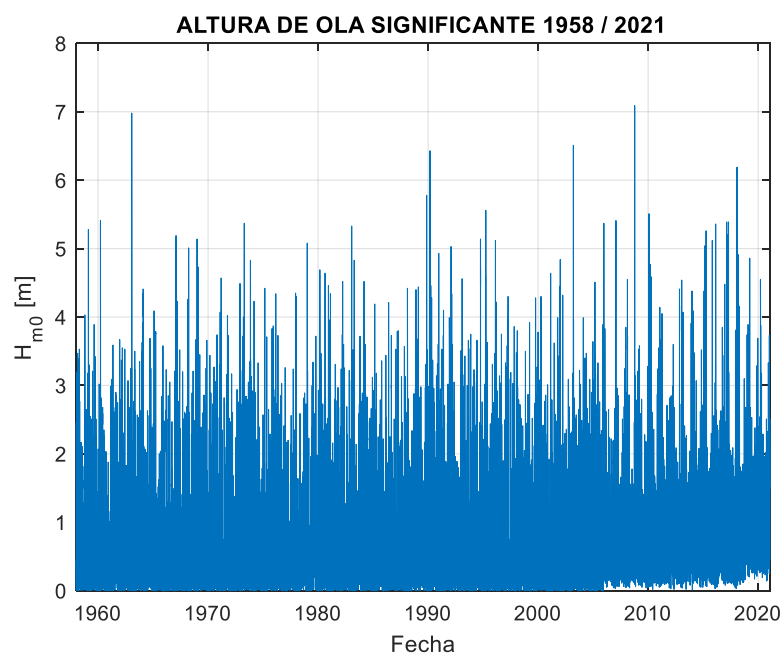


figura 13.- Serie temporal de altura de ola significativa

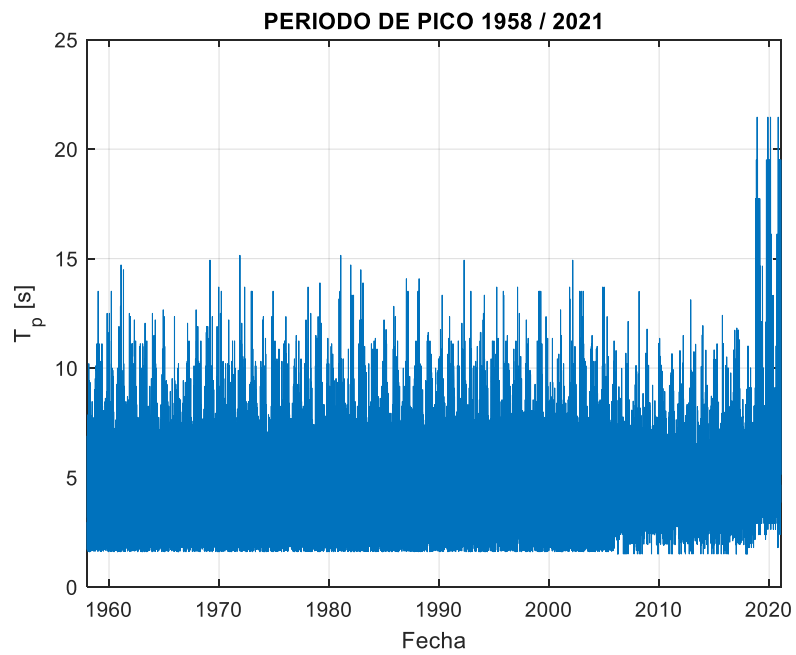


figura 14.- Serie temporal de periodos de pico

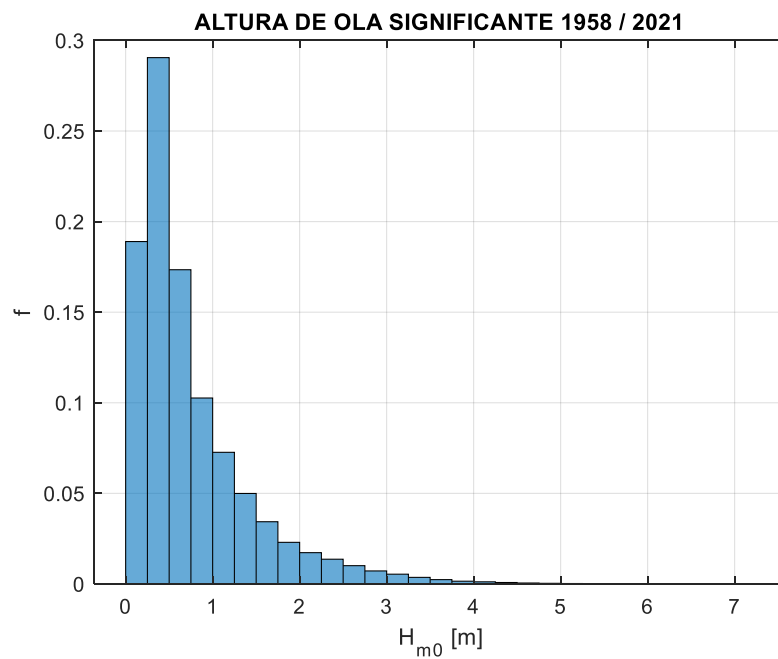


figura 15.- Histograma de altura de ola significativa

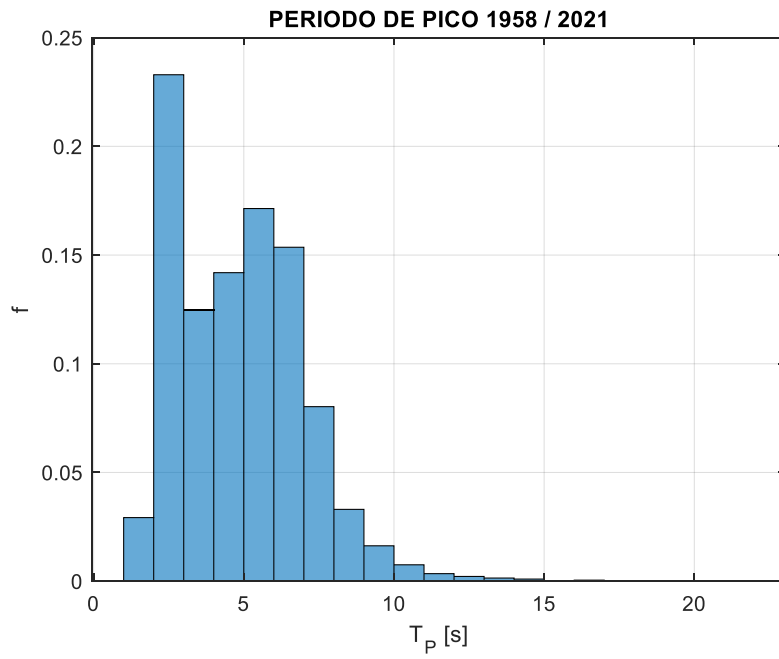


figura 16.- Histograma de periodos de pico

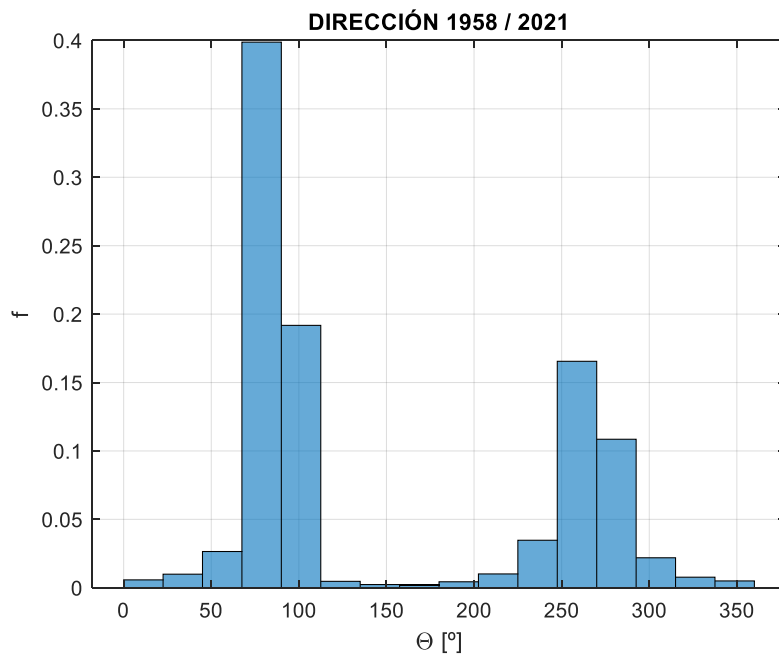


figura 17.- Histograma de direcciones

5.1.1.3. Tablas de frecuencias

Las tablas siguientes muestran las frecuencias en el caso de H_{m0} vs. T_p y H_{m0} vs. Dirección de procedencia.

		Tp [s]												
		1.0	3.0	5.0	7.0	9.0	11.0	13.0	15.0	17.0	19.0	21.0	23.0	TOTAL
Hs[m]	0.50	0.0000	0.2376	0.1028	0.0991	0.0321	0.0101	0.0022	0.0007	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.4849
	1.00	0.0000	0.0268	0.1263	0.0934	0.0180	0.0044	0.0018	0.0012	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.2724
	1.50	0.0000	0.0000	0.0376	0.0670	0.0134	0.0024	0.0009	0.0003	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.1216
	2.00	0.0000	0.0000	0.0019	0.0429	0.0106	0.0010	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0568
	2.50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0192	0.0110	0.0006	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0309
	3.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0029	0.0136	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0172
	3.50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0083	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0090
	4.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0038
	4.50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019
	5.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0007	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009
	5.50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004
	6.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
	6.50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
	7.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7.50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
TOTAL		0.0000	0.2644	0.2686	0.3246	0.1114	0.0225	0.0053	0.0024	0.0005	0.0003	0.0001	0.0000	1.0000

tabla 5 .- Frecuencias relativas Hs – Tp

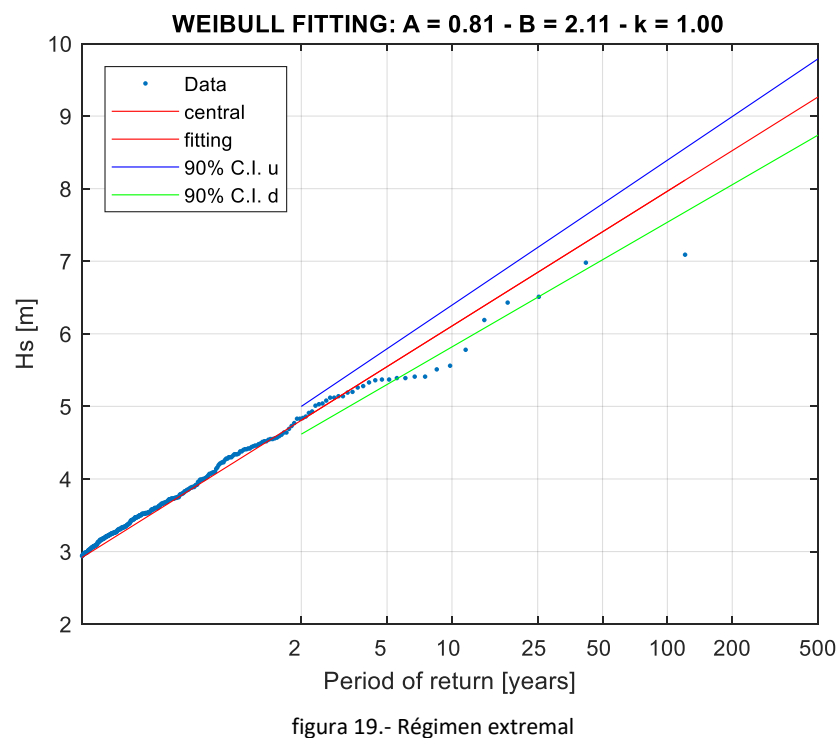
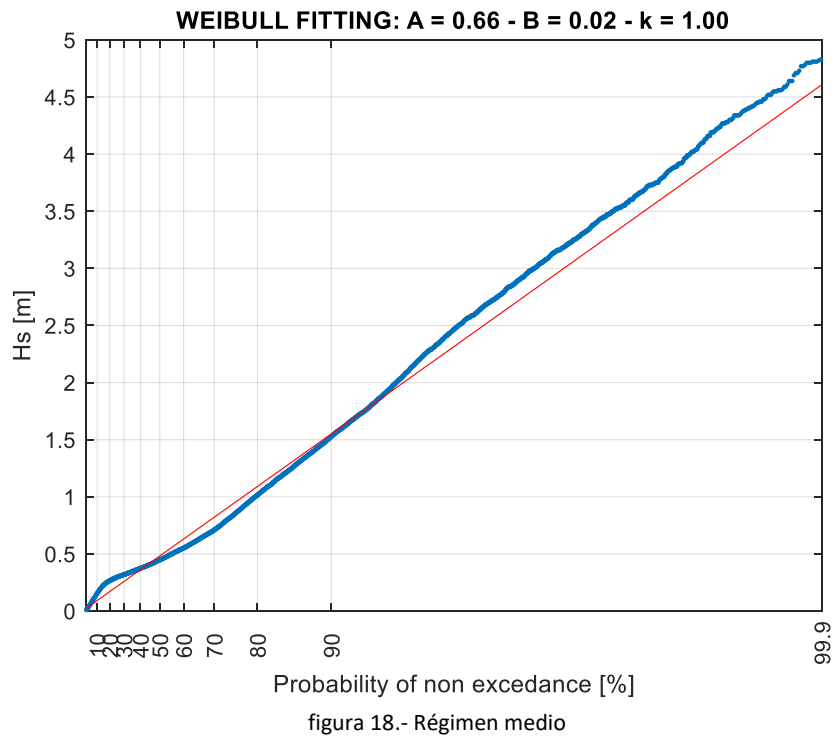
		Hs [m]														TOTAL
		0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50
Dir [°]	0.00	0.0045	0.0006	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0051
	22.50	0.0058	0.0007	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0065
	45.00	0.0137	0.0023	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0164
	67.50	0.0958	0.0215	0.0025	0.0005	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1204
	90.00	0.1244	0.1574	0.0872	0.0473	0.0287	0.0163	0.0087	0.0037	0.0019	0.0009	0.0004	0.0001	0.0001	0.0000	0.4771
	112.50	0.0093	0.0018	0.0005	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0117
	135.00	0.0022	0.0006	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0029
	157.50	0.0016	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021
	180.00	0.0024	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031
	202.50	0.0044	0.0017	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0062
	225.00	0.0129	0.0055	0.0005	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0191
	247.50	0.0454	0.0145	0.0029	0.0012	0.0005	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0649
	270.00	0.1101	0.0569	0.0261	0.0070	0.0015	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2026
	292.50	0.0368	0.0063	0.0010	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0445
	315.00	0.0107	0.0011	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0120
	337.50	0.0048	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053
Total:		0.4849	0.2724	0.1216	0.0568	0.0309	0.0172	0.0090	0.0038	0.0019	0.0009	0.0004	0.0001	0.0001	0.0000	1.0000

tabla 6 .- Frecuencias relativas Hs – Dirección

5.1.1.4. Regímenes de oleaje

Se han confeccionado los regímenes medio y extremal del oleaje. Los datos se han escogido de forma que sean homogéneos e independientes. Para ello se ha empleado el método POT, utilizando un umbral de 2.0 m en el caso del régimen extremal y 0.25 m en el caso del régimen medio.

Las figuras siguientes muestran los gráficos y parámetros de ajuste. La función de distribución empleada ha sido la Weibull triparmétrica.



Por tanto, la función de distribución de Weibull 3-P para cada régimen es:

$$\text{Régimen medio: } F(x) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{x-0.02}{0.66}\right)^1\right]} \quad [4]$$

$$\text{Régimen extremal: } F(x) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{x-2.11}{0.81}\right)^1\right]} \quad [5]$$

5.2 Límites de oleaje

Desde el Atlántico, prácticamente sólo puede llegar el swell de poniente, puesto que la punta de Tarifa y el cabo Espartel protegen de oleajes más al norte y más al sur, respectivamente. No obstante, la península de Tarifa ejerce una labor de protección del área de interés, a la cual únicamente llegan los oleajes difractados por la Punta de Tarifa. Esto se puede comprobar en las figuras siguientes, en las que se muestra el oleaje del Atlántico procedente de varias direcciones.

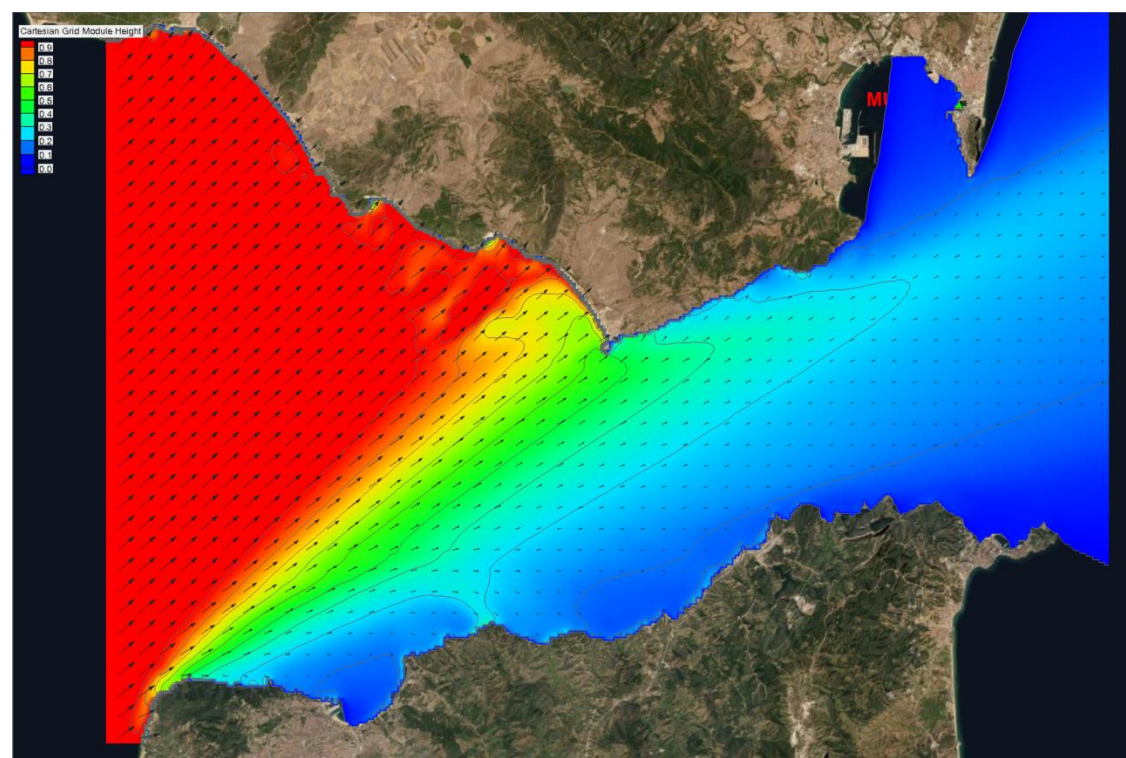


figura 20.- Swell 230º N

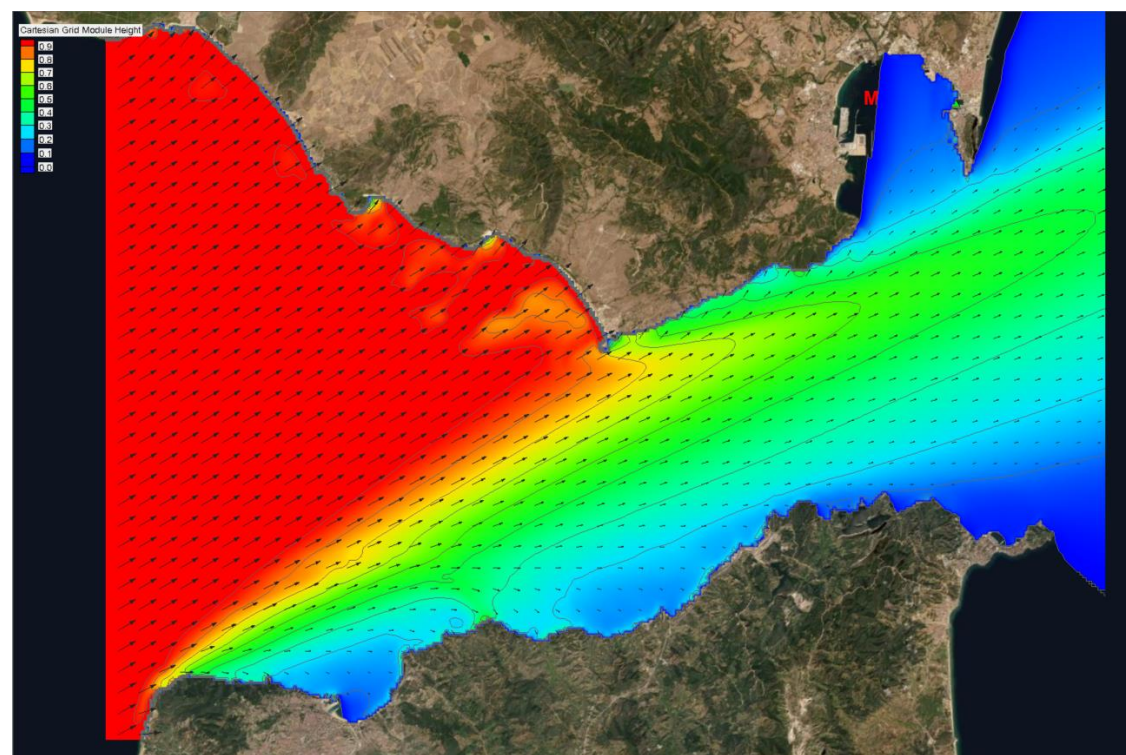


figura 21.- Swell 240º N

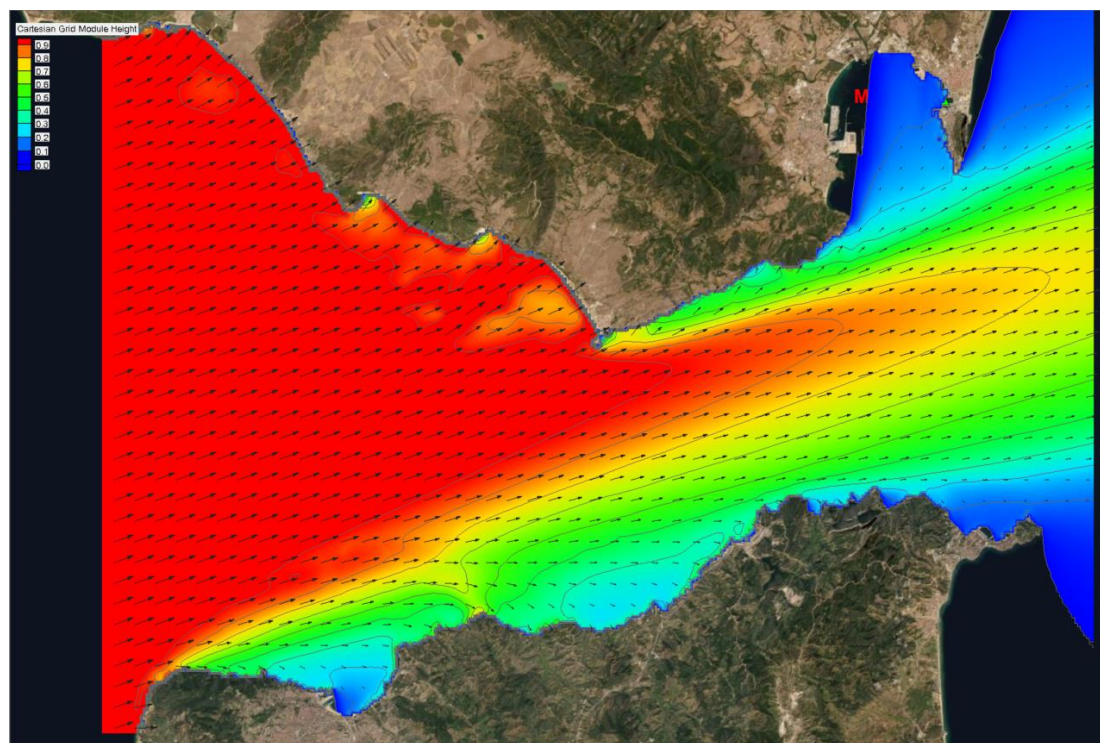


figura 22.- Swell 250°N

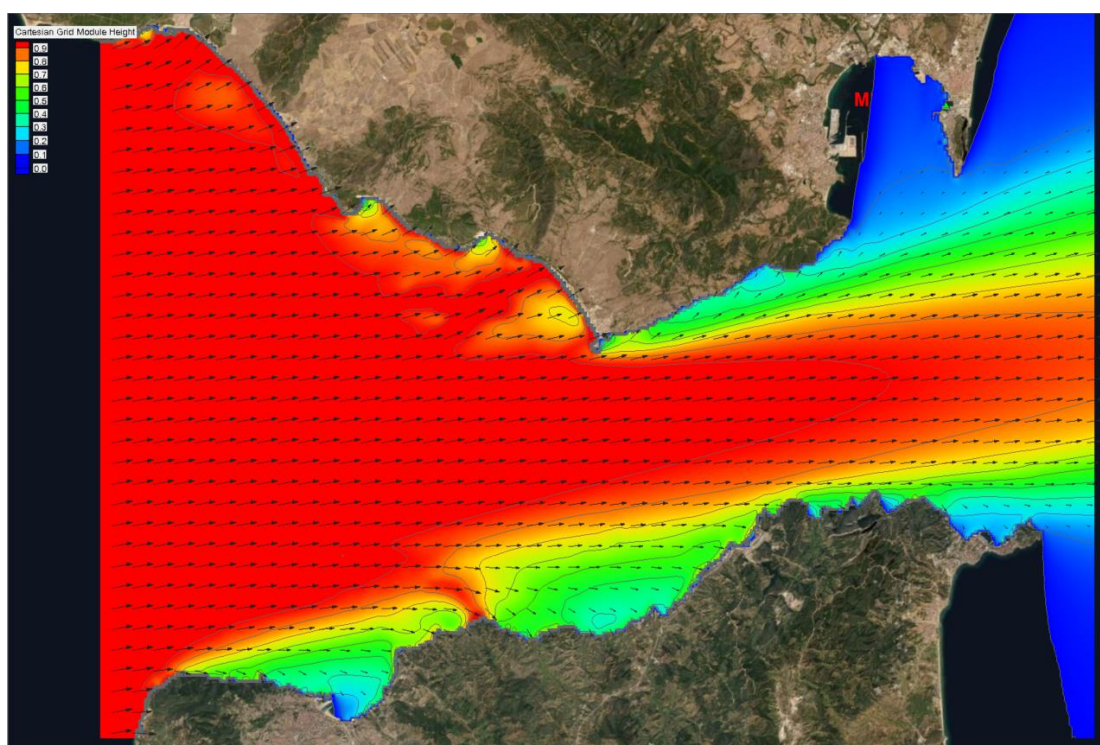


figura 23.- Swell 260°N

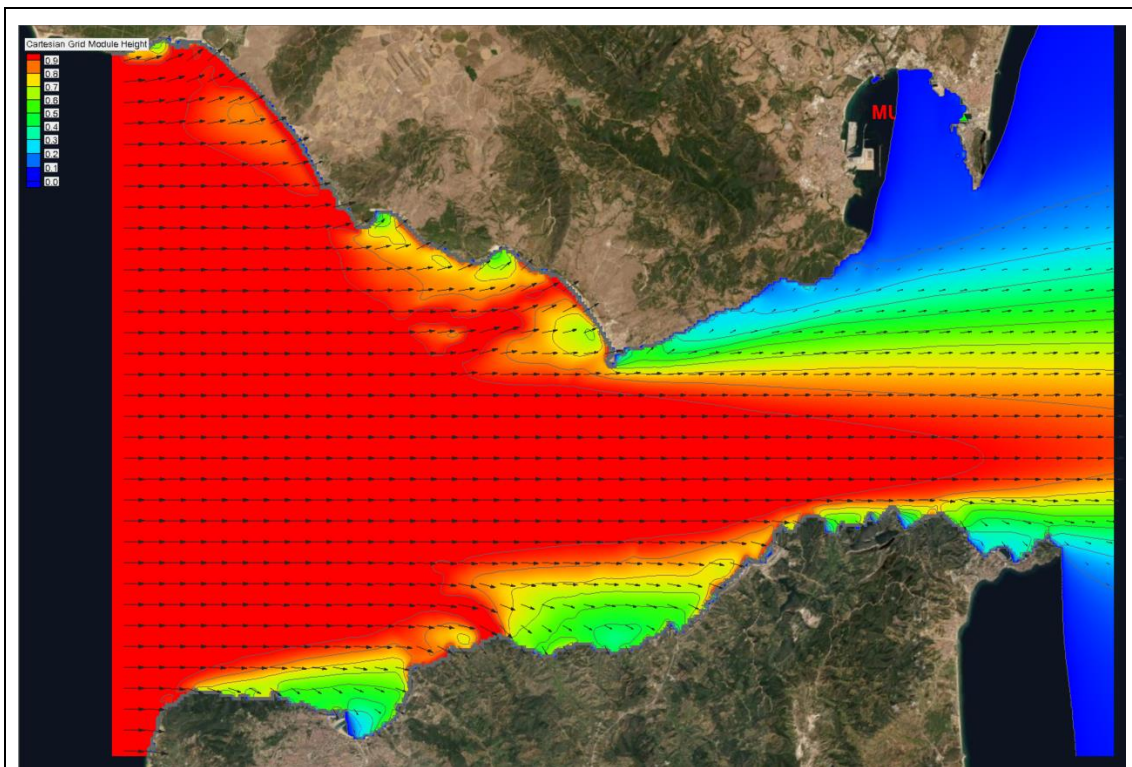


figura 24.- Swell 270°N

tabla 7 Oleaje procedente del océano Atlántico entrando en el Estrecho de Gibraltar

Las figuras siguientes (figura 25 a figura 33) muestran la entrada en el Estrecho de los oleajes procedentes del mar de Alborán. Se comprueba que únicamente los oleajes de levante (que son, además, los más frecuentes) pueden llegar a la zona de interés.

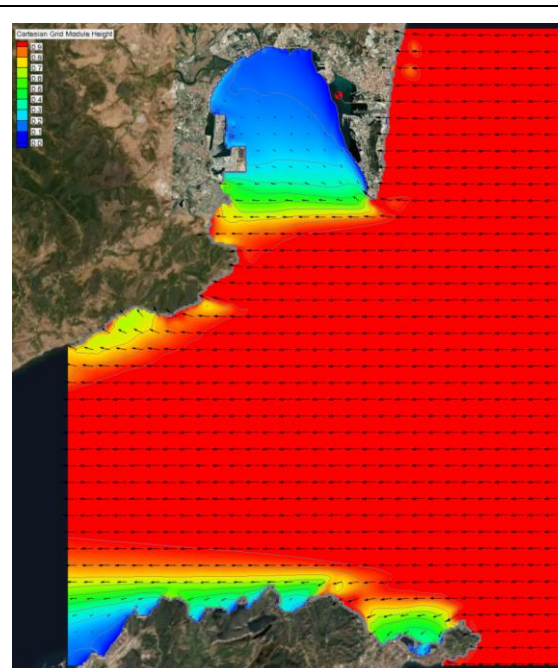


figura 25.- Swell 90°N

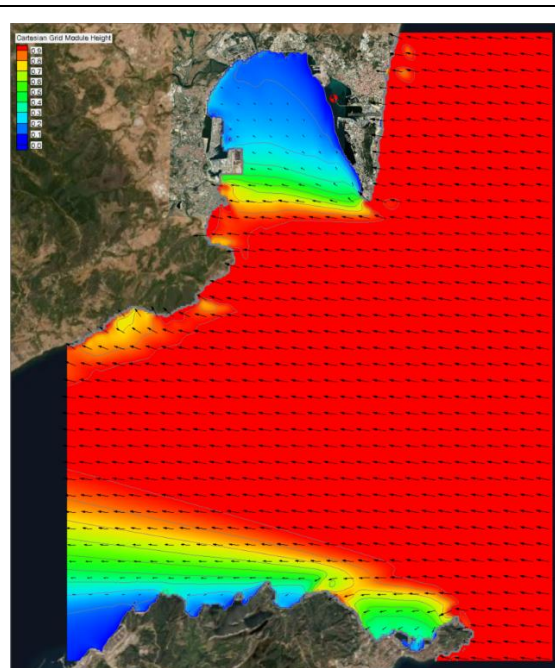


figura 26.- Swell 100°N

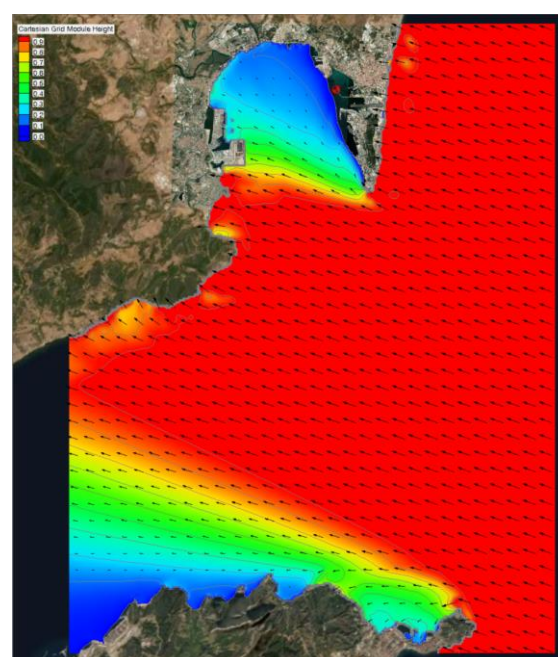


figura 27.- Swell 110°N

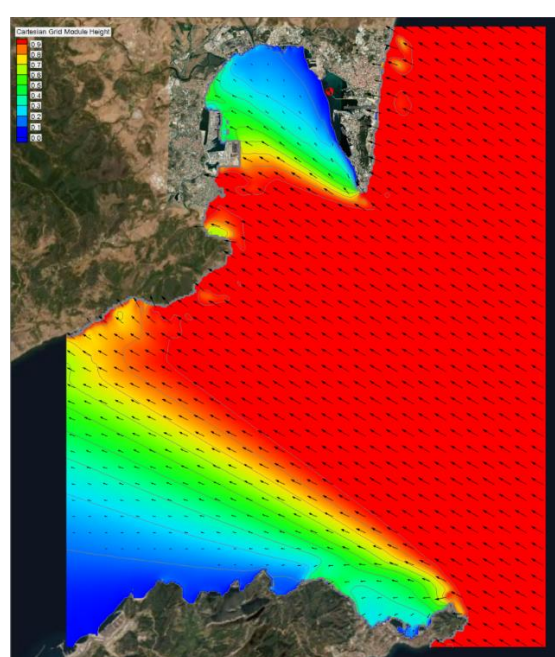


figura 28.- Swell 120°N

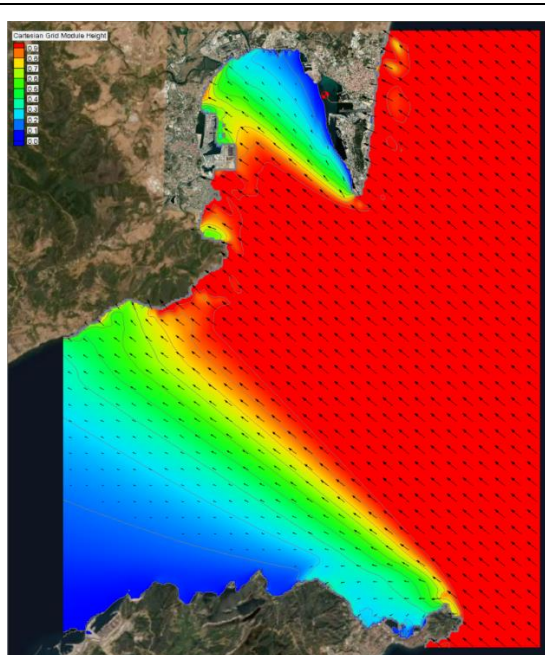


figura 29.- Swell 130°N

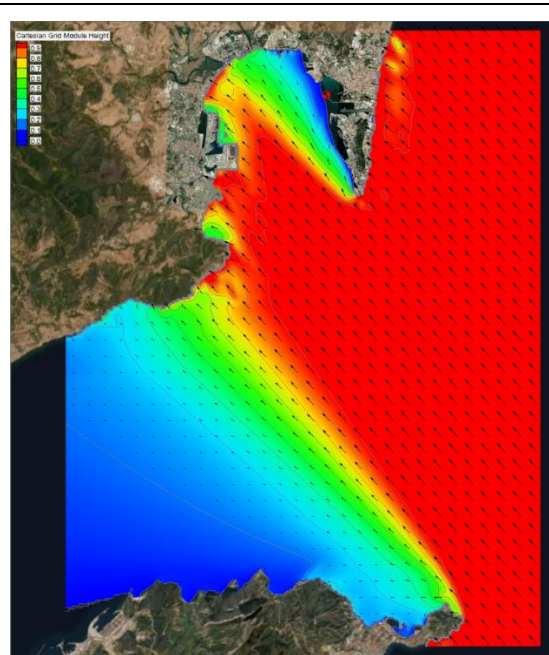


figura 30.- Swell 140°N

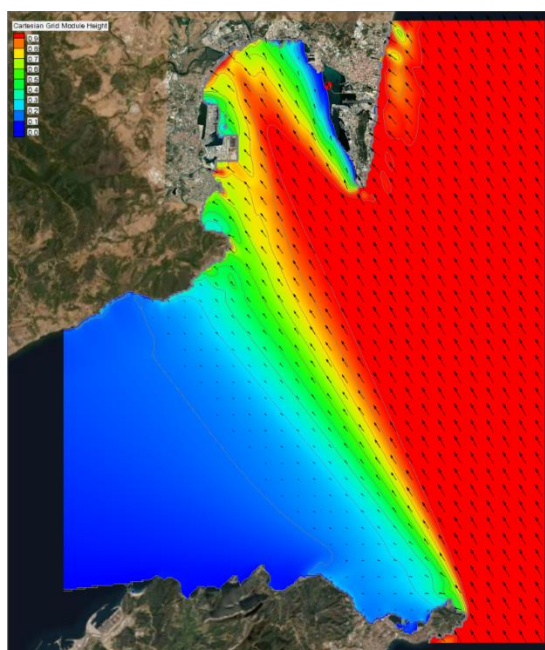


figura 31.- Swell 150°N

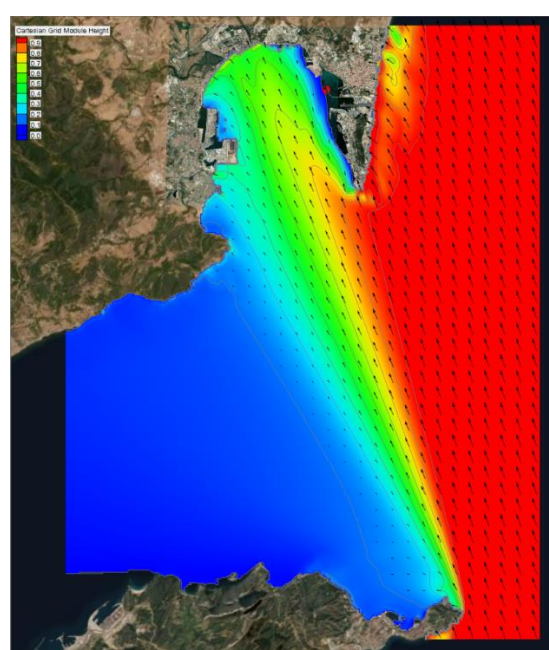


figura 32.- Swell 160°N

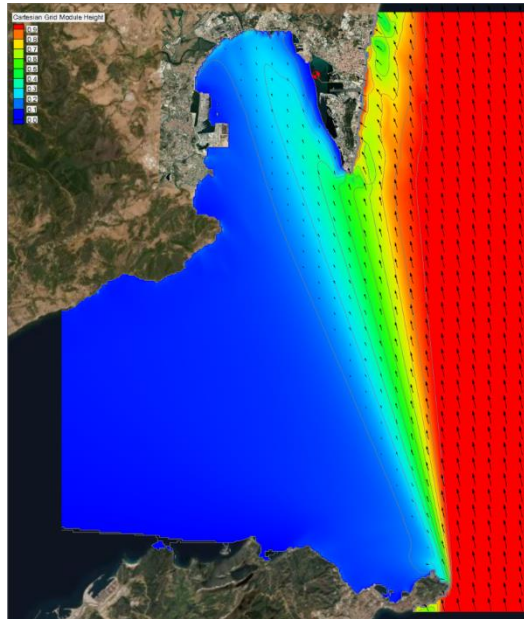


figura 33.- Swell 170°N

tabla 8 Mar de fondo penetrando en el Estrecho de Gibraltar desde el mar de Alborán.

Lo antedicho justifica que se estudien en concreto los oleajes procedentes del mar de Alborán, por ser los dominantes y reinantes, que pueden arribar al punto de cálculo sin obstáculos en su propagación.

5.3 Oleaje de cálculo

Dice el artículo 3 del Real Decreto 876/2014, de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento General de Costas.:

Son bienes de dominio público marítimo-terrestre estatal, en virtud de lo dispuesto en el artículo 132.2 de la Constitución y 3 de la Ley 22/1988, de 28 de julio:

1. *La ribera del mar y de las rías, que incluye:*
 - a) *La zona marítimo-terrestre o espacio comprendido entre la línea de bajamar escorada o máxima viva equinoccial y el límite hasta donde alcanzan las olas en los mayores temporales conocidos, de acuerdo con los criterios técnicos que establece el artículo 4 de este reglamento o, cuando lo supere, el de la línea de pleamar máxima viva equinoccial. Esta zona se extiende también por las márgenes de los ríos hasta el sitio donde se haga sensible el efecto de las mareas.*

En el artículo 4 se explica cómo deben calcularse los "mayores oleajes conocidos":

En la determinación de la zona marítimo-terrestre y de la playa, con arreglo a las definiciones contenidas en el artículo anterior, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- a) *Para fijar el límite hasta donde alcanzan las olas en los mayores temporales conocidos, se considerarán las variaciones del nivel del mar debidas a las mareas y el oleaje. Dicho límite será el alcanzado al menos en 5 ocasiones en un periodo*

de 5 años, salvo en aquellos casos excepcionales en que la mejor evidencia científica existente demuestre la necesidad de utilizar otro criterio.

Parece razonable, por tanto, escoger el menor de los cinco temporales máximos ocurridos en un quinquenio. El nivel del mar es difícil conocerlo en el momento de ocurrir el máximo temporal. Y finalmente de esa serie, se escogerá el máximo.

Los oleajes se obtienen a partir de los datos brutos de oleaje en el punto de obtención de datos, con ayuda de un código Matlab® al efecto. Se recogen en la tabla 9. De esta tabla se escoge el valor máximo de $H_{m0,5}$, que es el oleaje de cálculo cumpliendo lo prescrito por el Reglamento de Costas.

Quinquenios		Oleajes máximos				
De	A	$H_{m0,1}$ [m]	$H_{m0,2}$ [m]	$H_{m0,3}$ [m]	$H_{m0,4}$ [m]	$H_{m0,5}$ [m]
1958	1963	5.41	5.28	4.03	3.89	3.67
1959	1964	6.98	5.41	5.28	3.89	3.67
1960	1965	6.98	5.41	4.41	3.92	3.69
1961	1966	6.98	4.41	4.09	3.92	3.79
1962	1967	6.98	4.41	4.09	3.92	3.79
1963	1968	6.98	5.19	4.41	4.23	4.09
1964	1969	5.19	5.01	4.41	4.26	4.23
1965	1970	5.19	5.14	5.01	4.73	4.26
1966	1971	5.19	5.14	5.01	4.73	4.26
1967	1972	5.19	5.14	5.01	4.73	4.57
1968	1973	5.14	5.01	4.73	4.57	4.49
1969	1974	5.37	5.14	4.83	4.73	4.57
1970	1975	5.37	4.83	4.57	4.49	4.23
1971	1976	5.37	4.83	4.57	4.49	4.42
1972	1977	5.37	4.83	4.49	4.42	4.34
1973	1978	5.37	4.83	4.42	4.35	4.34
1974	1979	4.42	4.35	4.34	4.3	4.23
1975	1980	5.08	4.42	4.35	4.34	4.3
1976	1981	5.08	4.69	4.64	4.46	4.35
1977	1982	5.08	4.69	4.64	4.46	4.35
1978	1983	5.08	4.69	4.64	4.52	4.46
1979	1984	5.33	5.08	4.83	4.69	4.64
1980	1985	5.33	4.83	4.69	4.64	4.52
1981	1986	5.33	4.83	4.52	4.52	4.34
1982	1987	5.33	4.83	4.52	4.52	4.21
1983	1988	5.33	4.83	4.52	4.21	4.19
1984	1989	4.52	4.42	4.4	4.21	4.19
1985	1990	5.78	4.44	4.42	4.4	4.21

Quinquenios		Oleajes máximos				
De	A	$H_{m0,1}$ [m]	$H_{m0,2}$ [m]	$H_{m0,3}$ [m]	$H_{m0,4}$ [m]	$H_{m0,5}$ [m]
1986	1991	6.43	5.78	4.93	4.46	4.44
1987	1992	6.43	5.78	4.93	4.46	4.44
1988	1993	6.43	5.78	5.03	4.93	4.46
1989	1994	6.43	5.78	5.03	4.93	4.56
1990	1995	6.43	5.14	5.03	4.93	4.56
1991	1996	5.56	5.14	5.03	4.61	4.56
1992	1997	5.56	5.14	5.12	5.03	4.61
1993	1998	5.56	5.14	5.12	4.61	4.56
1994	1999	5.56	5.14	5.12	4.61	4.3
1995	2000	5.56	5.12	4.61	4.3	4.28
1996	2001	5.12	4.3	4.3	4.28	4.22
1997	2002	4.64	4.3	4.3	4.28	4.08
1998	2003	4.84	4.64	4.45	4.32	4.3
1999	2004	6.51	4.84	4.64	4.45	4.32
2000	2005	6.51	4.84	4.64	4.45	4.32
2001	2006	6.51	5.37	4.84	4.64	4.51
2002	2007	6.51	5.37	4.84	4.51	4.45
2003	2008	6.51	5.41	5.37	4.51	3.99
2004	2009	7.09	5.41	5.37	4.55	4.51
2005	2010	7.09	5.41	5.37	4.55	4.51
2006	2011	7.09	5.51	5.41	4.77	4.59
2007	2012	7.09	5.51	5.41	4.77	4.59
2008	2013	7.09	5.51	4.77	4.59	4.55
2009	2014	5.51	4.77	4.59	4.54	4.41
2010	2015	5.51	4.77	4.59	4.54	4.41
2011	2016	5.26	5.12	5.04	4.54	4.41
2012	2017	5.36	5.26	5.12	5.04	4.54
2013	2018	5.39	5.39	5.36	5.26	5.2
2014	2019	6.19	5.39	5.39	5.36	5.26
2015	2020	6.19	5.39	5.39	5.36	5.26
2016	2021	6.19	5.39	5.39	5.36	5.2
2017	2022	6.19	5.39	5.39	5.2	4.91

tabla 9 .- Oleajes máximos quinquenales en el nodo SIMAR

La altura de ola significativa de cálculo es

$$H_{m0} = 5.26 \text{ m}^1$$

Dado que se trata de obtener el nivel máximo, se calcula este nivel con la altura de ola máxima. Suponiendo que el oleaje de un temporal puede ajustar sus alturas según la función de distribución de Rayleigh, se aproxima la altura de ola máxima como:

$$H_{max} \sim 1.80 \cdot H_{m0} \quad [6]$$

Por lo tanto, la altura de ola de cálculo será:

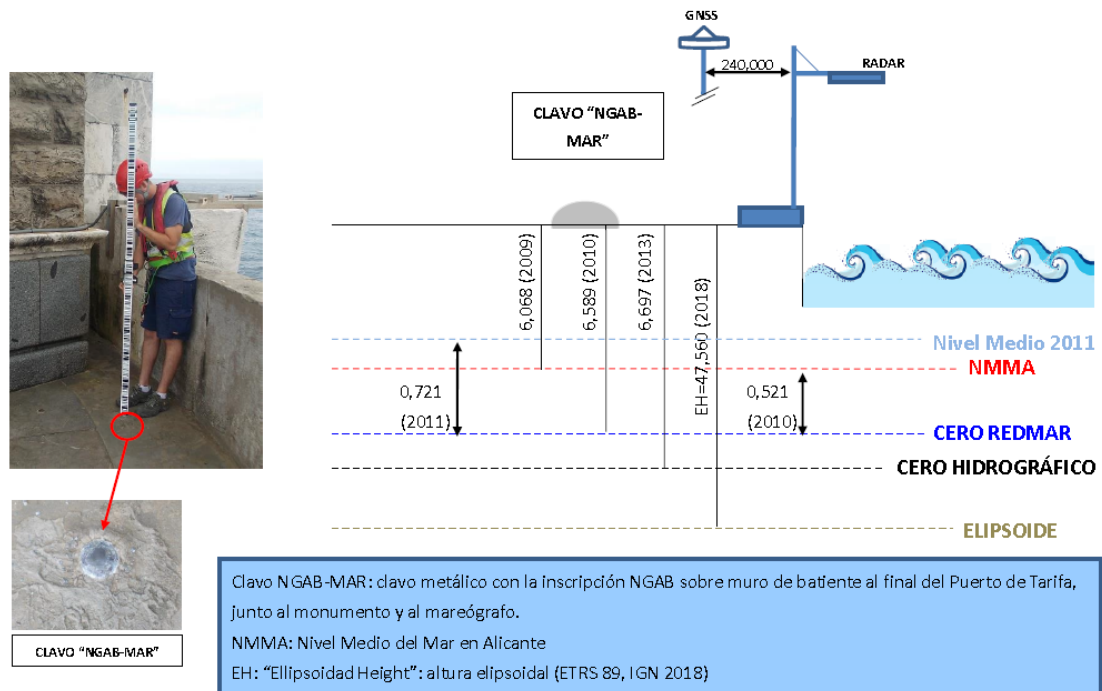
$$H_d = 9.47 \text{ m}$$

Y el periodo de pico (ajustado mediante la ecuación [3]):

$$T_p = 12.58 \text{ s}$$

5.4 Nivel del mar

Dada la complejidad de ubicar el nivel del mar para cada uno de los oleajes obtenidos, se ha procedido a emplear el nivel más frecuente. Para ello, se ha reproducido la onda de marea astronómica en las cercanías, empleando para ello los constituyentes armónicos de la onda de marea (tabla 11) en el mareógrafo de Tarifa, ubicado en el morro del dique del Sagrado Corazón (figura 34).



Nota: La posición relativa de Clavo y Mareógrafo está simplificada. NMMA: Cero IGN



figura 34.- Esquema del datum del mareógrafo de Tarifa (cotas en metros). Fuente: (REDMAR, 2019)

¹ Es importante resaltar que esta altura de ola resulta menor que la calculada en base a la Ley de Costas derogada, con la que se empleaba el máximo registrado, que en este caso resultaría ser $H_{m0,max} = 7.09 \text{ m}$, con una altura de ola máxima $H_{max} \sim 12.76 \text{ m}$.

Las relaciones entre los niveles de referencia son las siguientes:

NMMA
0.5210 m
CERO REDMAR
0.1080 m
CERO HIDROGRAFICO

tabla 10 .- Relaciones entre niveles de referencia en el mareógrafo de Tarifa

Los datos de niveles están referidos al cero REDMAR, y se corrigen antes de incluirlos en los cálculos de propagación de oleaje.

Armónico	frecuencia [ciclos/h]	Amplitud [m]	Fase [º]
Z0	0	68.78	0.00
T2	0.083219	0.96	66.25
SO3	0.122064	0.51	340.89
SO1	0.044603	0.29	332.86
SN4	0.162333	0.31	138.32
SK4	0.166895	0.20	116.50
SK3	0.125114	0.29	41.49
SIG1	0.035909	0.41	194.01
S4	0.166667	0.22	140.79
S2	0.083333	15.74	69.12
S1	0.041667	0.53	91.84
Q1	0.037219	0.45	210.61
P1	0.041553	0.70	137.22
NU2	0.079202	1.57	31.30
N2	0.078999	8.86	26.63
MU2	0.077689	1.93	14.85
MSK6	0.247406	0.16	67.33
MS4	0.163845	1.69	163.98
MO3	0.119242	0.77	279.34
MN4	0.159511	1.78	89.32
MK4	0.164073	0.53	151.39
MK3	0.122292	0.59	357.19
M8	0.322046	0.20	193.62
M6	0.241534	0.66	351.81
M4	0.161023	3.79	117.54
M2	0.080511	41.78	41.60
L2	0.082024	0.93	28.75
K2	0.083561	4.46	66.59

Armónico	frecuencia [ciclos/h]	Amplitud [m]	Fase [°]
K1	0.041781	2.59	129.37
H2	0.080625	0.56	152.66
EPS2	0.076177	0.48	6.65
3MK7	0.283315	0.13	61.64
2SM6	0.247178	0.15	76.21
2N2	0.077487	1.25	9.42
2MS6	0.244356	0.52	29.05
2MN6	0.240022	0.41	335.08
2MK6	0.244584	0.26	28.35
2MK5	0.202804	0.31	182.87

tabla 11 .- Constituyentes armónicas de la onda de marea astronómica en Tarifa. Fuente: Puertos del Estado

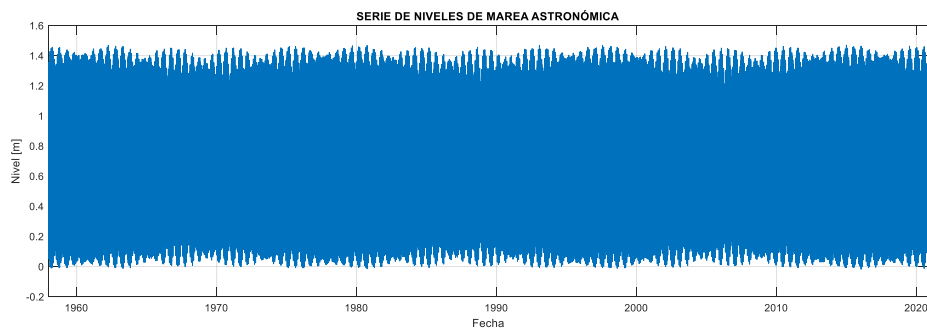


figura 35N.- Nivel del mar producido por la marea astronómica en los años a que se refiere la serie de oleaje

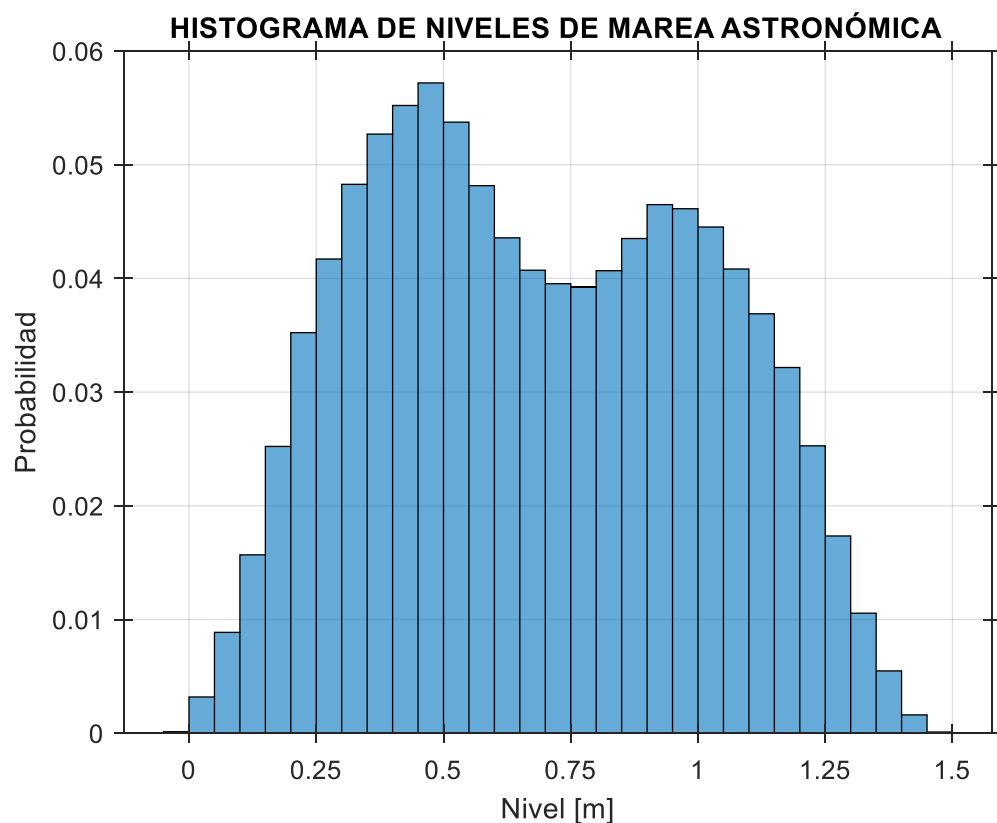


figura 36.- Histograma de niveles de marea astronómica

Se emplea un nivel de cálculo $\eta = 1.00$ m sobre el cero Redmar, lo que equivale a $\eta = 1.11$ m sobre el cero hidrográfico, y $\eta = 0.48$ m sobre el NMMA, referencia de la batimetría. No es probable que la marea meteorológica produzca un nivel elevado, al no existir apenas vientos normales a la costa en esta zona. Esto se comprueba en la parte derecha de la figura 39.

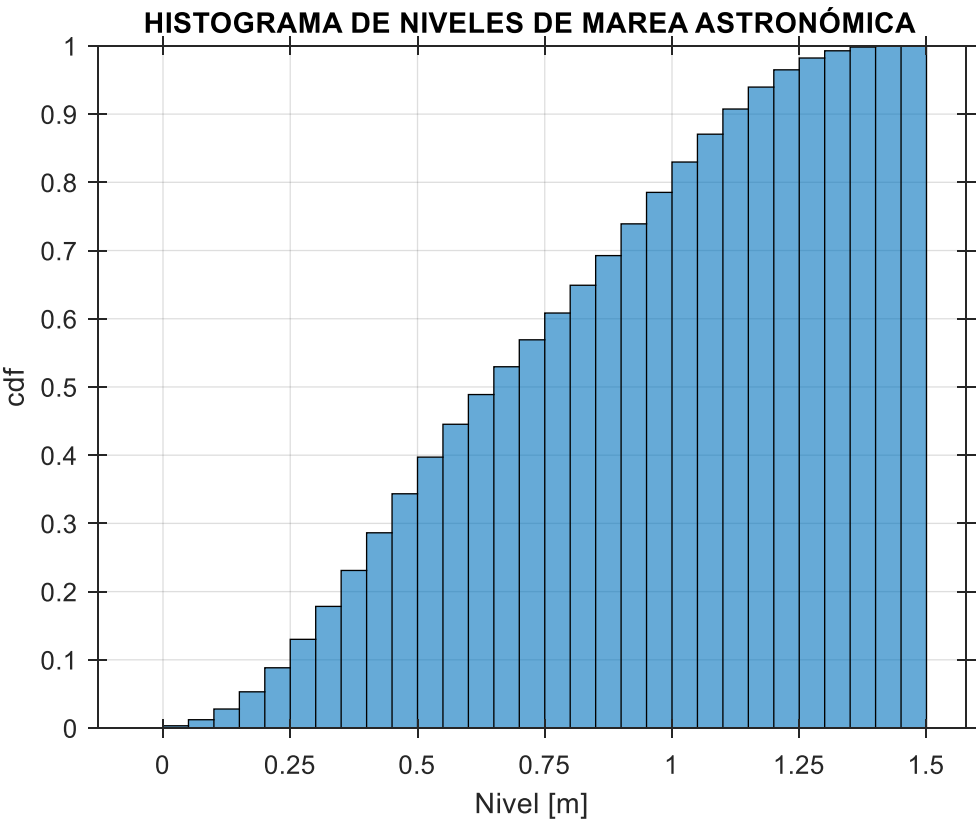


figura 37.- Probabilidad acumulada de la marea astronómica

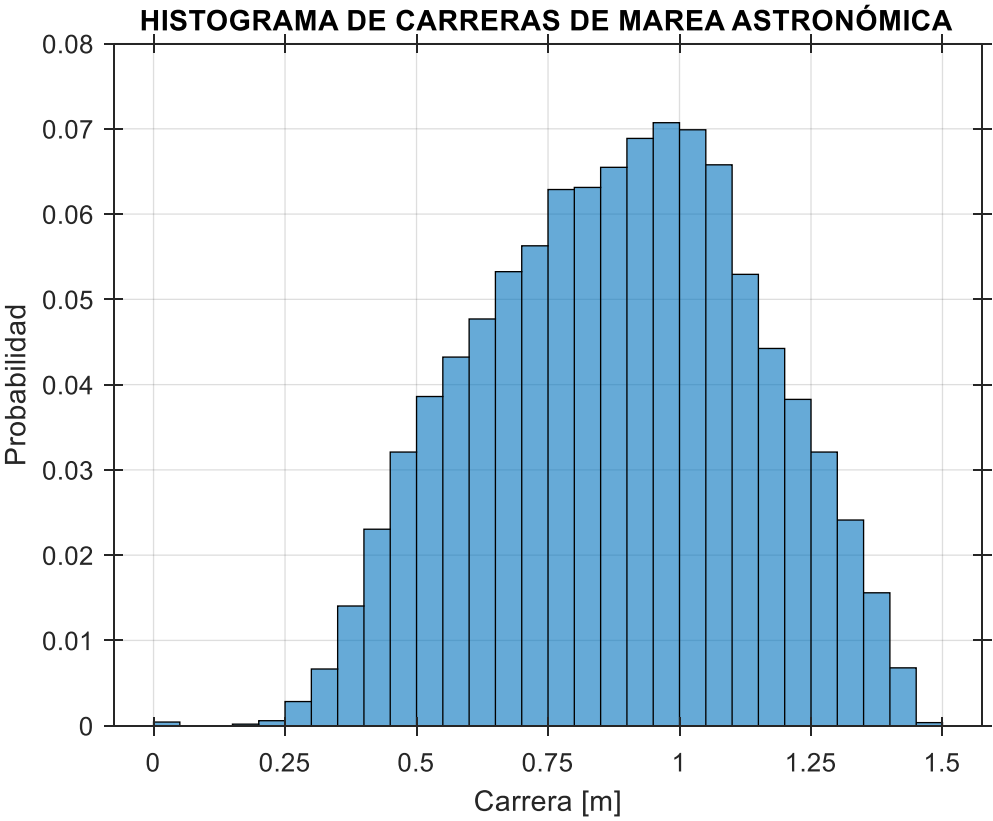


figura 38.- Histograma de carreras de marea astronómica

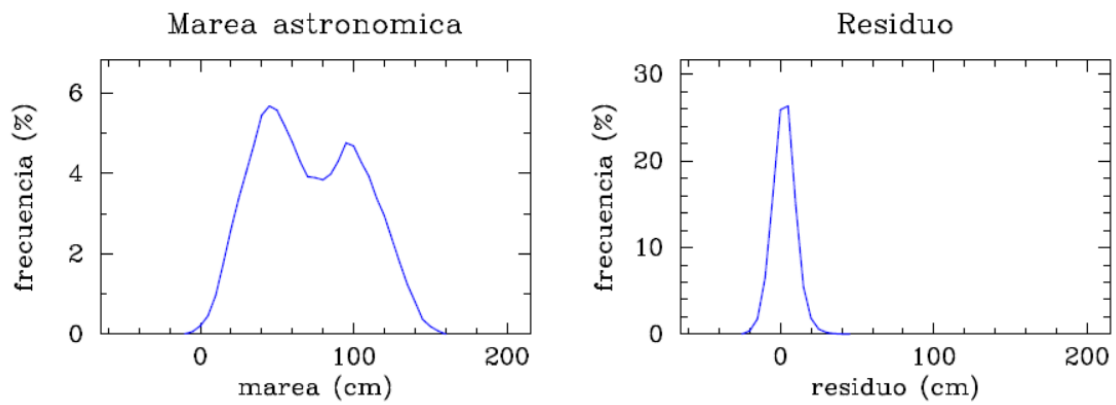


figura 39.- Histogramas de frecuencias de la marea astronómica y el residuo meteorológico. Fuente: (REDMAR, 2019)

6 PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

6.1 Dominios de cálculo

Se muestran a continuación ambos dominios de cálculo, el regional y el local.

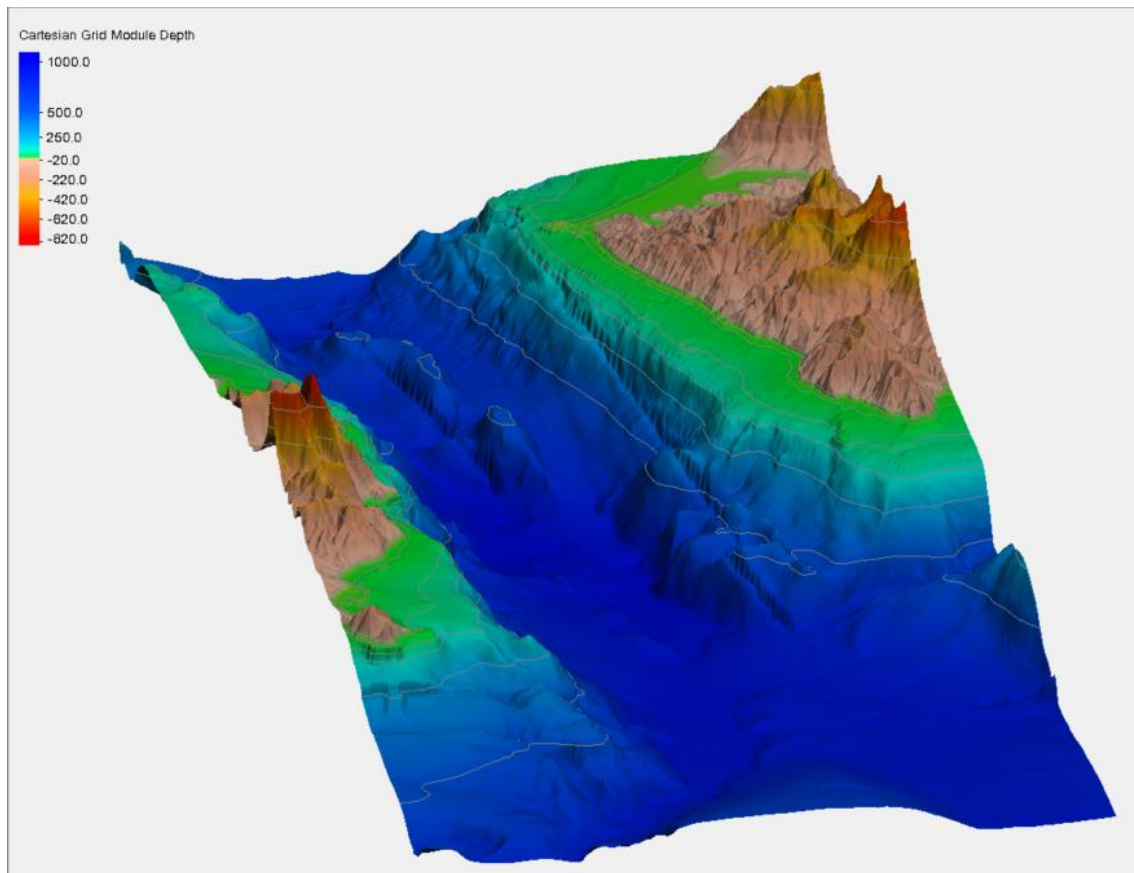


figura 40.- Batimetría regional en perspectiva

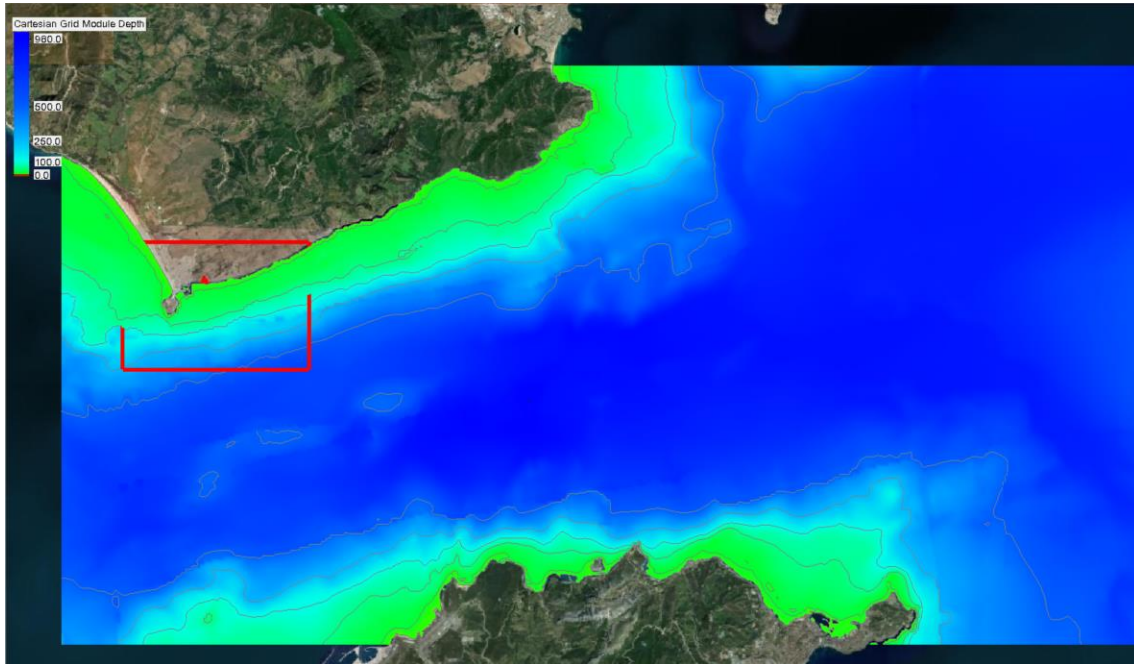


figura 41.- MDE de la batimetría regional en planta

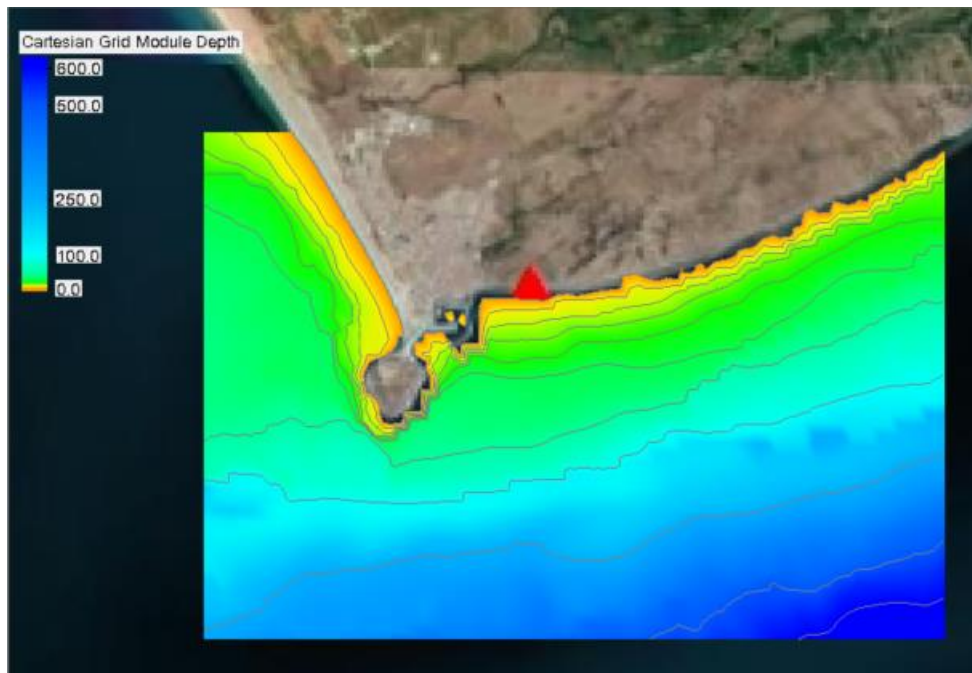


figura 42.- Malla local

6.2 Propagación del oleaje hasta las proximidades de la zona de estudio

La propagación del oleaje se muestra en las figuras siguientes. En la figura 43 se muestra la propagación general del oleaje, en tanto que en la figura 44 se puede observar la propagación en la zona de detalle, en la malla anidada.

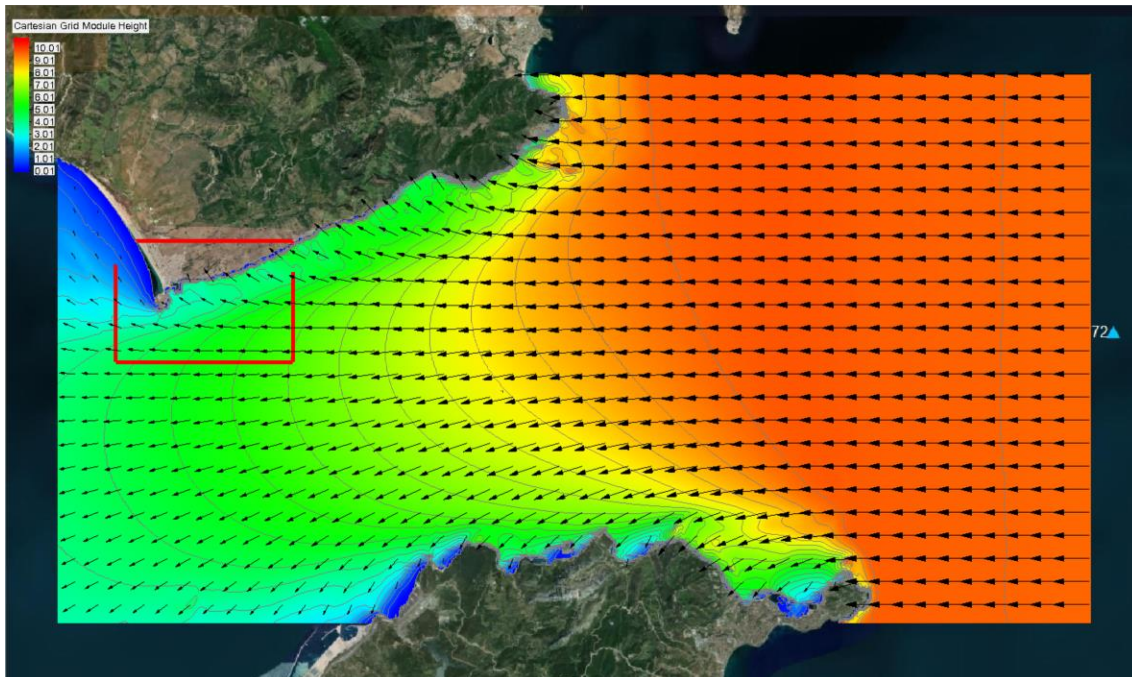


figura 43.- Propagación del oleaje en la malla regional

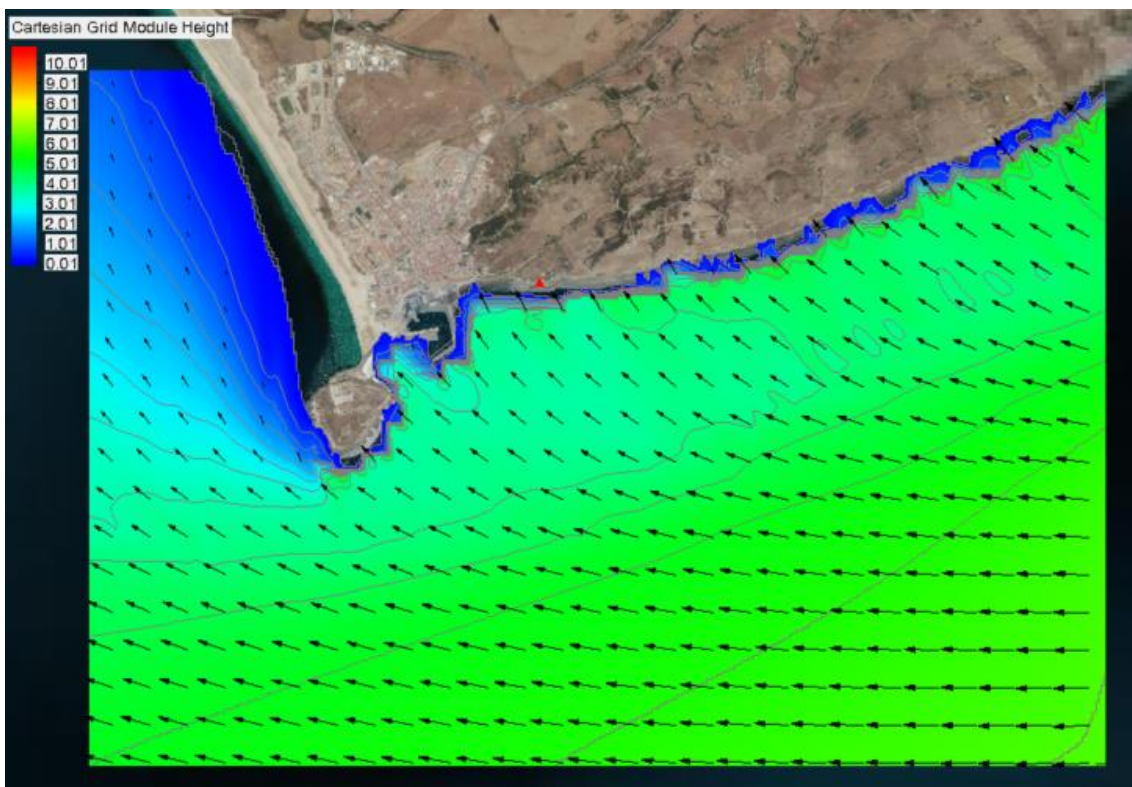


figura 44.- Propagación del oleaje en la malla local

Los datos propagados se muestran en la figura 45. Se obtiene un valor de la altura de ola máxima a 15 m de profundidad: $H_{\max} = 3.70$ m.

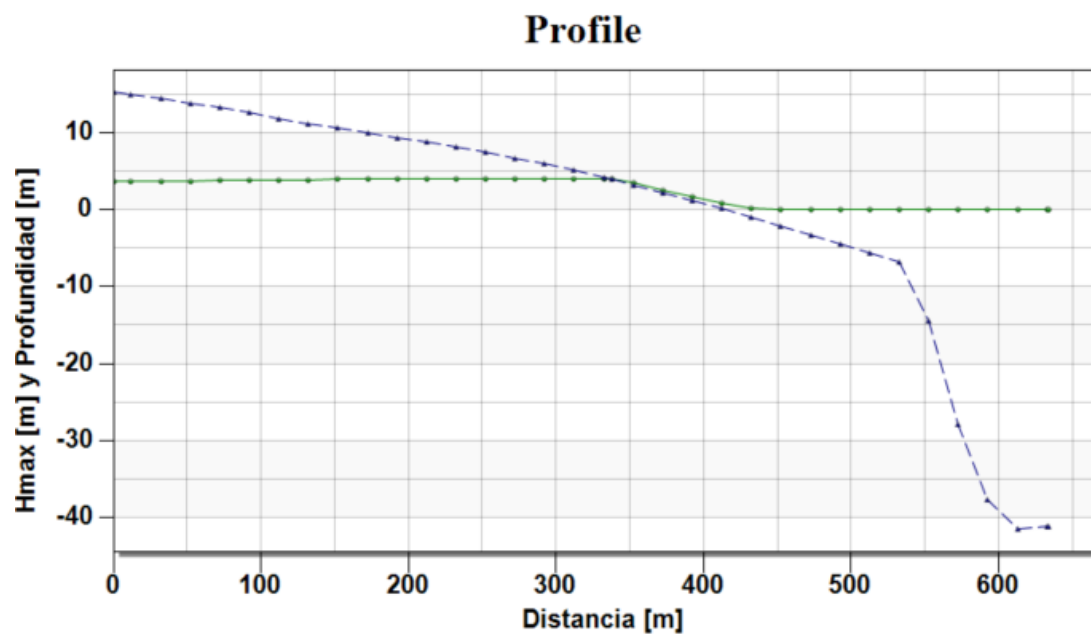


figura 45.- Profundidades y alturas de ola significativa en el perfil frente al punto de interés

6.3 Propagación hasta la costa

El perfil de cálculo se muestra en la figura 46.

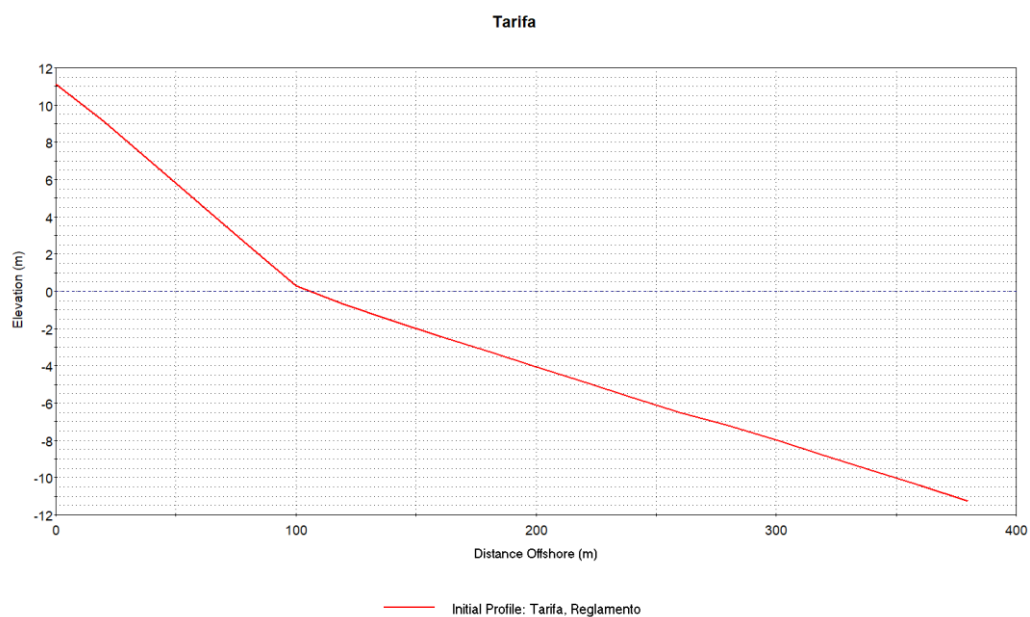


figura 46.- Perfil de cálculo

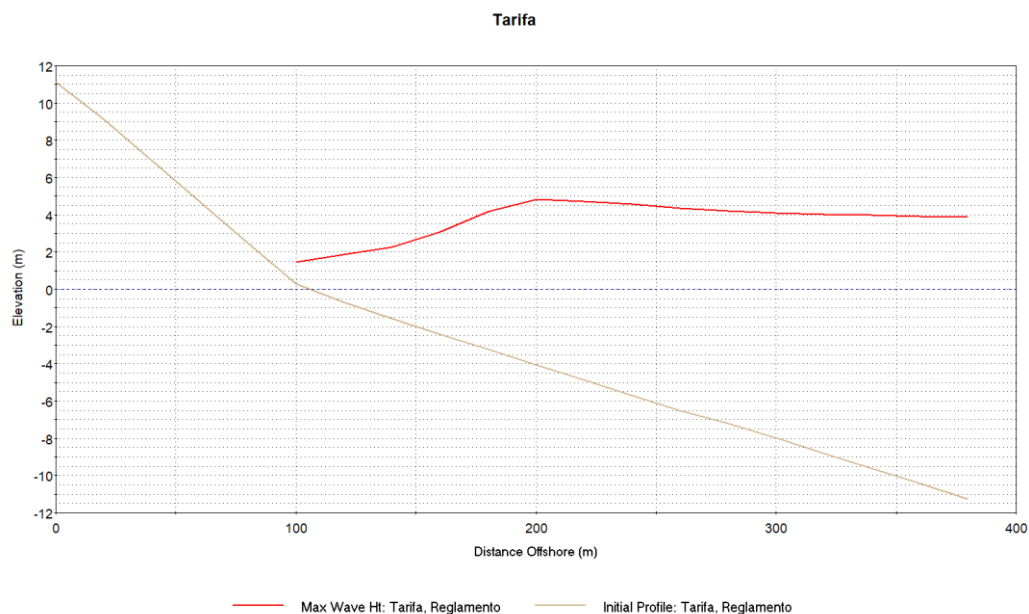


figura 47.- Altura de ola propagada

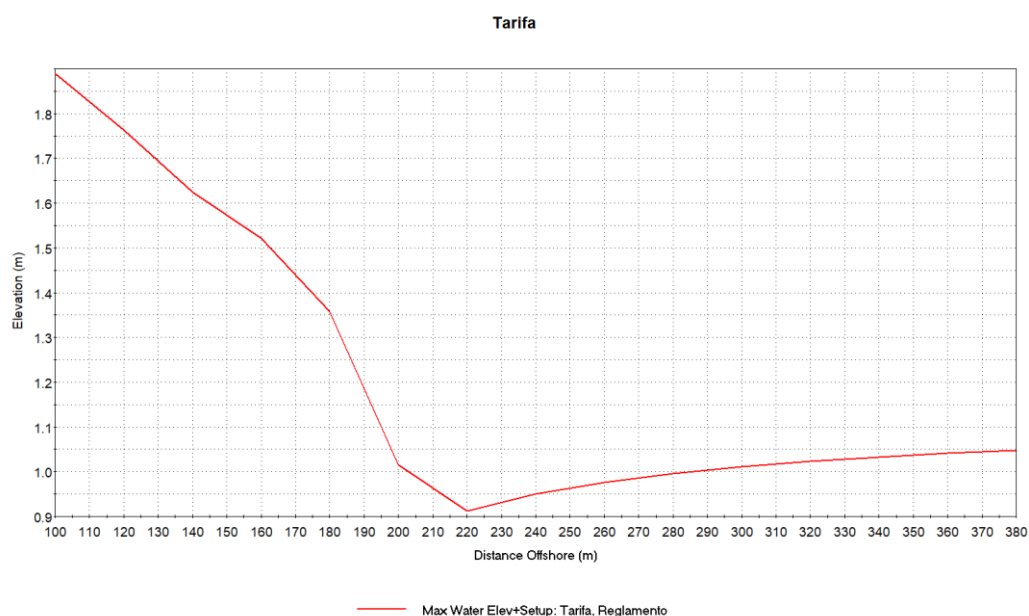


figura 48.- Máximo run-up

El máximo run-up, incluida la marea, resulta ser $\eta_{\max} = 1.9$ m (figura 48).

7 CONCLUSIONES

En el presente capítulo se recogen las conclusiones que se obtienen en el estudio. Se separan en varios subapartados con objeto de facilitar su comprensión.

1. El objetivo del trabajo es calcular el setup producido por el oleaje en las condiciones prescritas por el vigente Reglamento de Costas, según lo indicado al comienzo del informe.
2. En cuanto a los niveles de referencia, el nivel medio del mar en Alicante (dátum vertical empleado en este caso para la batimetría) se encuentra 0.521 m sobre el cero Redmar, y éste 0.1080 m sobre el cero hidrográfico.
3. Se han obtenido los cinco oleajes máximos producidos en cada quinquenio, desde la fecha de comienzo de la muestra de oleaje suministrada por Puertos del Estado,

en condiciones de homogeneidad e independencia. Se han considerado independientes los oleajes separados entre sí un mínimo de cinco días.

4. De los cinco oleajes del quinquenio, se considera que el nivel alcanzado por el más bajo es alcanzado también por los restantes, con lo que se cumpliría la prescripción mencionada para obtener la posición de la ribera del mar.
5. El nivel del mar se ha obtenido a partir de la marea astronómica, considerando que el viento no es capaz de producir elevaciones considerables, dada la proximidad de la costa africana y la profundidad de las aguas cercanas a la zona de estudio. Los residuos meteorológicos más probables son del orden de pocos centímetros (no se superan los 0.00 m con una probabilidad del 50 %, y la probabilidad de no superación del 99.95% da un valor de 0.33 m). Se ha fijado un nivel del mar $\eta = 1.00$ m (referido al cero REDMAR, que equivale a $\eta = 0.48$ m sobre el NMMA) para el cálculo que, aunque no presenta la máxima probabilidad, es el mayor de los dos picos más probables de la distribución de niveles.
6. Se ha empleado la ola máxima correspondiente a la significativa calculada según lo indicado en la conclusión 4ª, considerando que la altura de ola de un temporal se distribuye según una función de Rayleigh.
7. En estas condiciones, se ha calculado un nivel máximo (incluyendo marea astronómica, sobrelevación por rotura y run-up del oleaje) **$\eta = 1.9$ m**, referido al NMMA.

8 REFERENCIAS

- Mase, H., Oki, K., Hedges, T., & Li, H. (2005). Extended energy-balance-equation wave model for multidirectional random wave transformation. *Ocean Engineering* 32(8–9), 961-985.
- REDMAR. (2019). *Red de mareógrafos de Puertos del Estado. Puerto de Tarifa*. Madrid: Puertos del Estado.

ANEJO 1 : Modelos Matemáticos utilizados

A1.1 Introducción

Los modelos matemáticos utilizados son de propagación de oleaje. Se han utilizado varios tipos de modelos en función del objetivo del cálculo. En principio, se han realizado diferentes análisis del oleaje:

- A. Acercamiento del oleaje desde el punto de obtención de datos hasta las inmediaciones de la zona de interés. Se emplea un modelo de tipo espectral, que toma en consideración la mayor parte de los fenómenos que intervienen en la propagación del oleaje, y en todo caso, aquellos que se verifican entre la boya, o los puntos de retroanálisis y la Marina. Se emplea el modelo **CMSWave**, espectral, resuelto en diferencias finitas.

En las secciones siguientes se indican las características más importantes de CMS.

A1.2 Modelo CMSWave

El Sistema de Modelado Costero (CMS) ha sido un área de investigación y desarrollo del Programa de Investigación de *Coastal Inlets* (CIRP) en el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos - Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (USACE-ERDC), Laboratorio Costero e Hidráulico (CHL) desde 2006. Se construyó a partir de un grupo de modelos numéricos que se han estado desarrollando desde 2002.

Es un sistema coordinado de importantes modelos numéricos multidimensionales integrados para simular olas, corrientes, nivel del agua, transporte de sedimentos y cambios morfológicos en la zona costera.

El énfasis está en el funcionamiento de canales de navegación y los intercambios de sedimentos entre la ensenada y las playas adyacentes en la zona costera.

CMS ha sido verificado con datos de campo y laboratorio.

CMS-Wave (antes conocido como WABED) es uno de los componentes principales del Coastal Modeling System (CMS). WABED son las siglas de "Wave-Action Balance Equation Equation Diffraction". El modelo es una transformación espectral de ondas 2-D (promediado en fase). El término "promediado de fase" significa que ignora los cambios en la fase de la onda en el cálculo de la onda y otros procesos cercanos a la costa. Esta clase de modelos de olas representan cambios que ocurren solo en la densidad de energía de las olas. Originalmente fue construido para representar aproximaciones desarrolladas teóricamente tanto para la difracción de ondas como para la reflexión en un dominio cercano a la costa.

A1.2.1 Ecuaciones de gobierno

Ecuación de equilibrio de la acción de las olas con difracción. Teniendo en cuenta el efecto de una corriente horizontal ambiental en el comportamiento del oleaje, CMS-Wave se basa en la ecuación de equilibrio de acción de onda estacionaria (Maze 2001):

$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\sigma} \left[(C C_g \cos^2 \theta N_y)_y - \frac{C C_g}{2} \cos^2 \theta N_{yy} \right] - \epsilon_b N - S$	[1]
--	-----

donde

$$N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

es la densidad de acción de onda que se resolverá y es una función de la frecuencia σ y dirección θ .

$E(\sigma, \theta)$ es la densidad de onda espectral que representa la energía de las olas por unidad de superficie de agua por intervalo de frecuencia. En presencia de una corriente ambiental, la densidad de la acción

de las olas se conserva, mientras que la densidad espectral de las olas no (Bretherton y Garrett 1968; Whitham 1974).

Tanto la difracción de ondas como la disipación de energía se incluyen en la ecuación de gobierno. La implementación del esquema numérico se describe en otra parte de la literatura (Mase 2001; (Mase, Oki, Hedges, & Li, 2005)).

C y C_g son celeridad de onda y velocidad de grupo, respectivamente; x e y son las coordenadas horizontales; C_x , C_y y C_θ son la velocidad característica con respecto a x , y , θ respectivamente; N_y y N_{yy} denotan la primera y segunda derivadas de N con respecto a y , respectivamente; κ es un parámetro empírico que representa la intensidad del efecto de difracción; ϵ_b es la parametrización de la disipación de energía de ruptura de olas; S denota origen y sumidero adicionales (p. Ej., Fuerza del viento, pérdida por fricción del fondo, etc.) y término de interacción onda-onda no lineal.