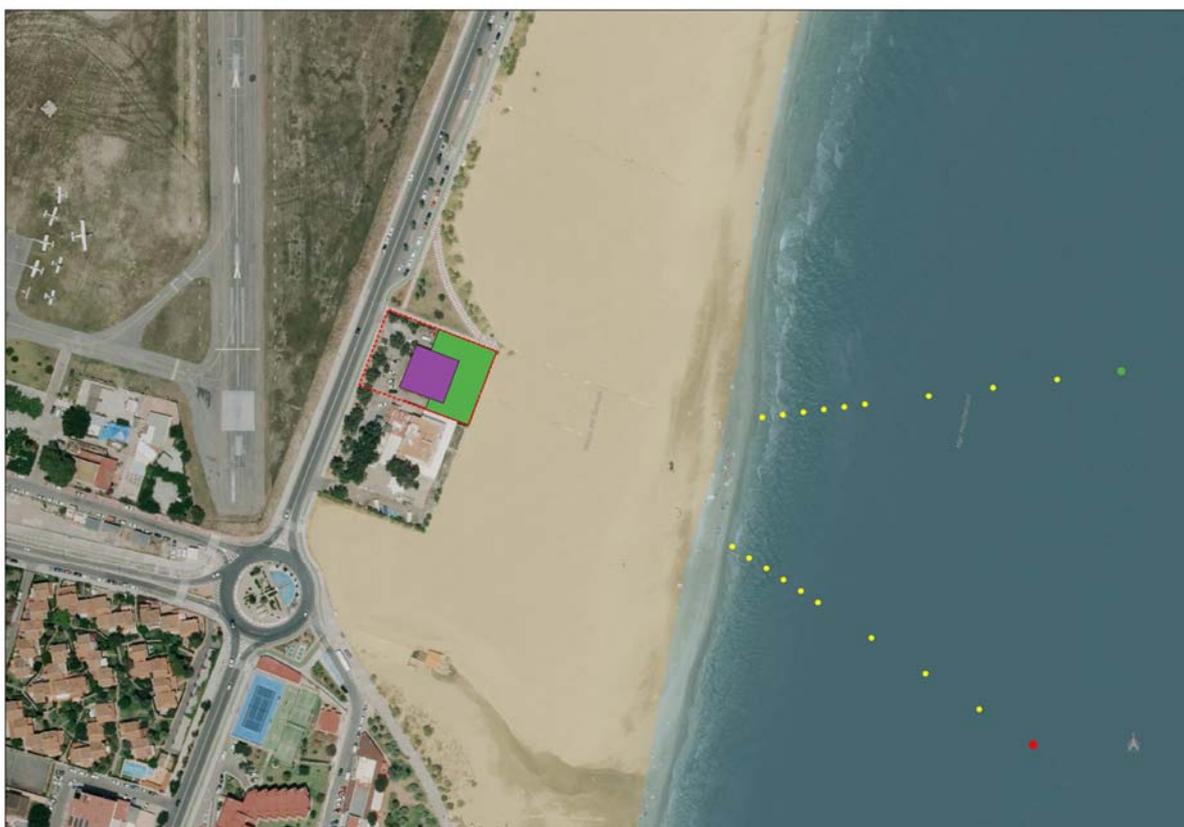

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

EN CENTRO DEPORTIVO NÁUTICO EN PLAYA DEL GURUGÚ CASTELLÓN DE LA PLANA (CASTELLÓN)



T.M. de Castellón (Castellón)

mayo 2019

Equipo Redactor

planifica

Autor

Pedro Millán Romero

Ing. Caminos, Canales y Puertos

Nº Col: 33.246

pedro.millan@planifica.org | Telf. 699 89 36 92

FICHA DE CONTROL

Código identificativo	Redacción		Validación	
	Técnico	Fecha	Responsable de área / Director técnico	Fecha
20190507_Eval_CC_ CDN_PG_v1	Pedro Millán Romero (PMR)	02/05/2019	Rafael Ibáñez Sánchez-Robles (RISR)	07/05/2019
20190920_Eval_CC_ CDN_PG_v2	Pedro Millán Romero (PMR)	23/09/2019	Rafael Ibáñez Sánchez-Robles (RISR)	25/09/2019

EQUIPO REDACTOR

Pedro Millán Romero, Ing. Caminos, Canales y Puertos

Javier Carmona Esteve, Ing. Industrial

Rafael Ibáñez Sánchez-Robles, Arquitecto

PLANIFICA INGENIEROS Y ARQUITECTOS, COOP. V.

planifica.org

NIF: F-12.963.930

C/ San Vicente, 4 -3º 12002_Castellón
C/ Literato Azorín, 20 - 5A 46006_Valencia

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETO	1
3	FUENTE DE DATOS	1
3.1	NIVEL DEL MAR	1
3.2	OLEAJE.....	2
4	DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL NIVEL DEL MAR	3
4.1	DATOS DE TENDENCIAS DEL NIVEL DEL MAR EN LOS MAREÓGRAFOS	3
4.2	EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE LOS MAREÓGRAFOS.....	5
5	PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO	6
5.1	CORRELACIÓN ENTRE DATOS DE LA BOYA Y NODO SIMAR 2102128	7
5.2	CORRECCIÓN DE LOS DATOS DEL PUNTO SIMAR 2085120.....	9
6	REGÍMENES MEDIOS	11
6.1	DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	11
6.2	DISTRIBUCIÓN SECTORIAL DEL OLEAJE	14
7	RÉGIMEN EXTREMAL ESCALAR Y OLEAJE DE CÁLCULO	20
7.1	DEFINICIÓN DE RÉGIMEN EXTREMAL	20
7.2	DEFINICIÓN DE TEMPORAL Y ANÁLISIS DE TEMPORALES EN PERIODO DE EVALUACIÓN.....	20
7.3	VIDA ÚTIL Y PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE LA ALTURA DE DISEÑO.....	21
7.4	RESULTADOS DEL ANÁLISIS	21
8	DINÁMICAS RESULTANTES DEL CAMBIO CLIMÁTICO	25

1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el artículo 85 "Proyecto para la ocupación o utilización del dominio público marítimo-terrestre" del Real Decreto 876/2014, de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento General de Costas en todas aquellas instalaciones y obras que pretendan ocupar parte del dominio público marítimo-terrestre, se introducirá la variable del cambio climático para tomar una decisión favorable o contraria a la ocupación.

El artículo 92 indica cuál es el contenido a incluir en la evaluación de los efectos del cambio climático. Este se desglosa en los siguientes puntos:

"1. La evaluación de los efectos del cambio climático incluirá la consideración de la subida del nivel medio del mar, la modificación de las direcciones de oleaje, los incrementos de altura de ola, la modificación de la duración de temporales y en general todas aquellas modificaciones de las dinámicas costeras actuantes en la zona, en los siguientes periodos de tiempo:

a) En caso de proyectos cuya finalidad sea la obtención de una concesión, el plazo de solicitud de la concesión, incluidas las posibles prórrogas.

b) En caso de obras de protección del litoral, puertos y similares, un mínimo de 50 años desde la fecha de solicitud.

2. Se deberán considerar las medidas de adaptación que se definan en la estrategia para la adaptación de la costa a los efectos del cambio climático, establecida en la disposición adicional octava de la Ley 2/2013, de 29 de mayo."

2 OBJETO

En consecuencia, el objeto del presente anejo es mostrar los resultados de la evaluación de los efectos del cambio climático en la playa del Gurugú, donde se propone la actividad de *Centro Deportivo Náutico*, propiedad del Círculo mercantil e industrial de Castellón, siguiendo los criterios establecidos en el artículo 92 del Reglamento General de Costas, aprobado según el Real Decreto 876/2014, de 10 de octubre.

3 FUENTE DE DATOS

3.1 Nivel del mar

Para analizar la posible evolución del nivel del mar en la zona de estudio, se han utilizado los datos recogidos por los mareógrafos de la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR), sitios en la costa peninsular mediterránea.

Los mareógrafos utilizados son tipo MIROS y utilizan la tecnología radar de barrido de frecuencias para la determinación del nivel del mar. Estos mareógrafos son de alta precisión y, en la actualidad, transmiten datos con intervalos de muestreo de 1 minuto.

Sin embargo, todos los informes publicados por Puertos del Estado están centrados en variaciones más lentas del nivel del mar, utilizando datos de promediado cada 5 minutos. Con estos datos, se obtienen series horarias que son el resultado de aplicar un filtro simétrico de 54 puntos a la serie histórica del nivel del mar, que elimina la energía de frecuencias altas presentes en los datos de 5 minutos, para que los resultados durante dichos periodos no se vean perturbadas.

Con dichos datos, se obtiene una serie histórica que nos permite analizar el nivel del mar en cada puerto.

A partir de los datos horarios, se calcula la serie del nivel medio diario eliminando las componentes diurna y semidiurna y aplicando un filtro de 119 puntos de centrado en mediodía. Con los datos de los niveles medio diarios, se obtienen los niveles medios mensuales.

Los niveles del mar y alturas de marea de referencia obtenidas a partir de los datos históricos disponibles para cada puerto, se representan en un diagrama que permite visualizar la variabilidad del nivel del mar en cada uno, a través de su representación a escala. Todos los niveles y alturas se muestran en centímetros y están referidas al cero del mareógrafo (cero REDMAR), que es, normalmente, el cero del puerto.

El problema del análisis de los datos obtenidos a través de la REDMAR es su gran variabilidad, incluso para puertos que se encuentran cercanos. Además, Puertos del Estado no ha realizado una estimación de los niveles medios en nodos distintos a los de la ubicación de los mareógrafos. En consecuencia, la incertidumbre asociada a la evolución del nivel del mar en la zona de análisis será muy elevada.

3.2 Oleaje

A la hora de obtener el clima del oleaje de la zona de estudio se dispone de dos fuentes principales de información:

- 1) los datos instrumentales de la boya de Tarragona, perteneciente a la Red de Boyas de Aguas Profundas de Puertos del Estado, también denominada Red Exterior; y
- 2) los datos de *hindcast* pertenecientes a la red de nodos SIMAR¹.

Cada una de las fuentes de datos anteriores presenta ciertas ventajas y ciertos inconvenientes, por lo que habrá que elegir metódicamente cuál de ellas es la que mejor representa el régimen de oleaje en la zona de estudio.

Por un lado, los datos de *hindcast* dependen de la bondad del modelo predictivo y de la fiabilidad del campo de vientos predefinido, por lo que, los valores de altura de ola, periodo y dirección resultan, en ocasiones, dudosos e incluso erróneos, y es necesario corregirlos para utilizarlos como fuente de datos representativa.

Por otro lado, los datos instrumentales disponibles en la zona, pertenecientes a la boya SeaWatch instalada frente a las costas de Tortosa, proporcionan medidas direccionales precisas del oleaje desde el año 2004. Sin embargo, la distancia de la boya con respecto a la costa y la particularidad de la ubicación en la punta del Delta del Ebro o Cap Tortosa hace que en este nodo se presenten dos efectos diferenciales respecto al régimen de oleaje en la zona de estudio. Estos son:

- 1) el efecto concentrador de energía del oleaje que produce el propio delta; y
- 2) la presencia del viento del NW o Cierzo, el cual afecta muy localmente a la zona del Delta, produciéndose con mucha frecuencia y con elevados valores de intensidad.

¹ El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros sintéticos y no proceden de medidas directas de la naturaleza. Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad. Fuente: *Puertos del Estado*.

Comentar también que, aunque la boya se ubique al norte de la zona de estudio, su proximidad y las características del sitio de medida hace que el *fetch* efectivo del oleaje sea similar en ambos sitios.

4 DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL NIVEL DEL MAR

4.1 Datos de tendencias del nivel del mar en los mareógrafos

Los informes publicados por la REDMAR muestran las siguientes tendencias anuales del nivel del mar en los puertos del mediterráneo peninsular.

Tendencias anuales de las estaciones de la REDMAR				
Serie	Tendencia (cm/año)	Error (cm/año)	Año inicial	Año final
Gandía	-0.13	±0.207	2008	2017
Valencia	0.422	±0.064	1993	2017
Sagunto	-0.126	±0.217	2007	2015
Barcelona	0.557	±0.060	1993	2017

Tabla 1. Tendencias anuales del nivel del mar en los Puertos del Mediterráneo Peninsular.
Fuente: REDMAR

Se muestran, a continuación, las gráficas correspondientes al análisis de las tendencias del nivel del mar en cada uno de los mareógrafos indicados anteriormente.

Mareógrafo de Gandía

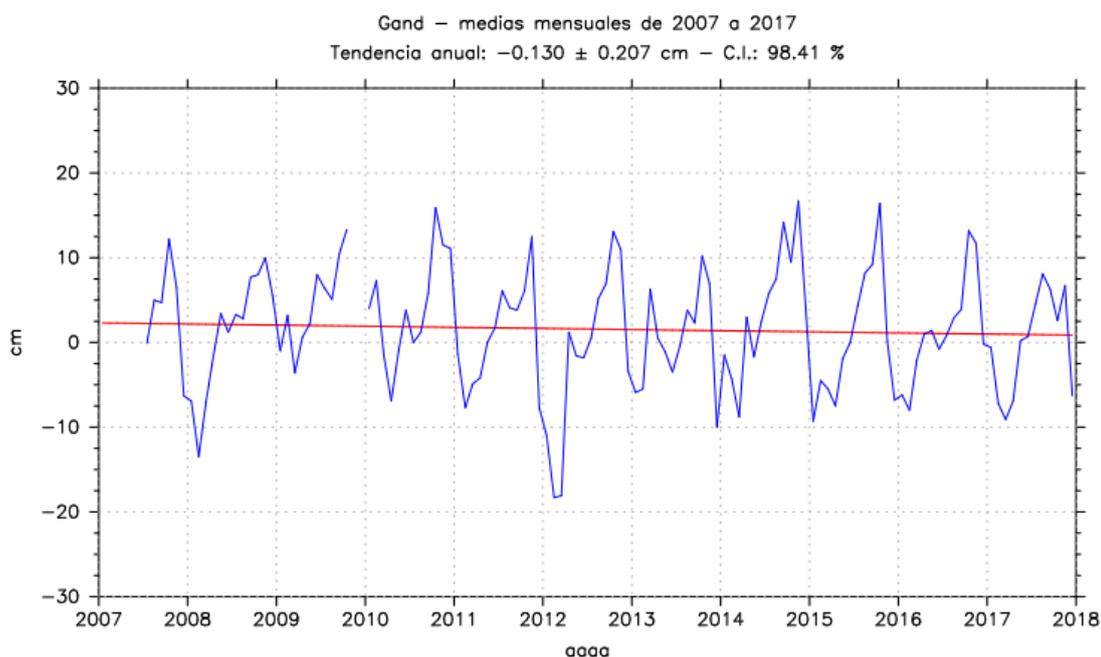


Ilustración 1. Mareógrafo de Gandía. Medias mensuales y tendencia del Nivel del Mar. Fuente: REDMAR.

Mareógrafo de Valencia

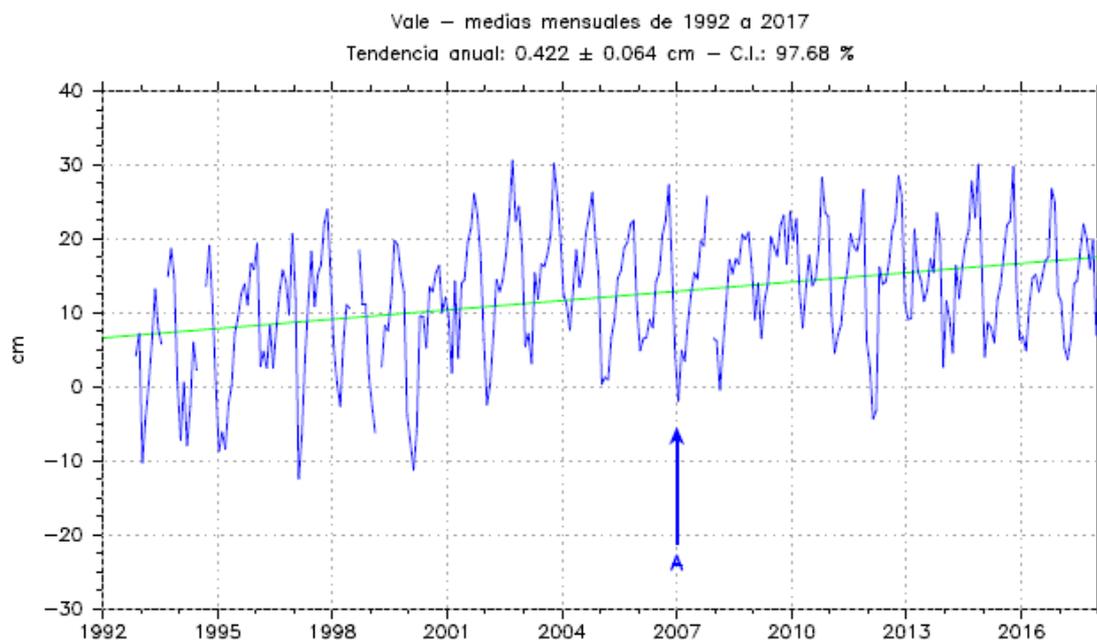


Ilustración 2. Mareógrafo de Valencia. Medias mensuales y tendencia del Nivel del Mar. Fuente: REDMAR.

Mareógrafo de Sagunto

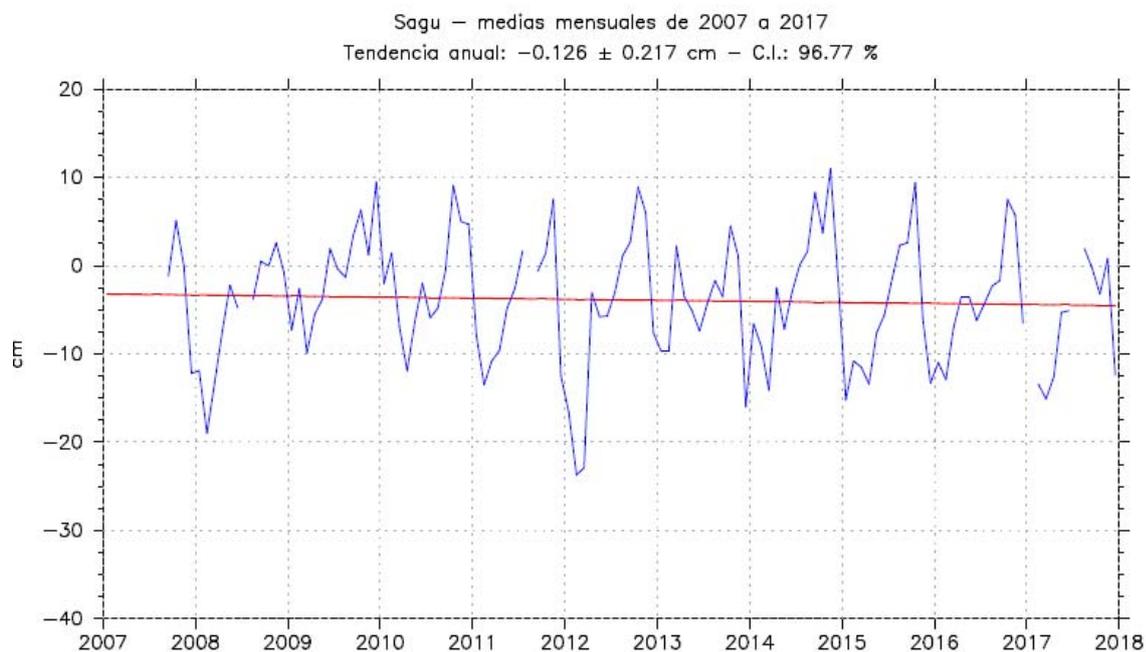


Ilustración 3. Mareógrafo de Sagunto. Medias mensuales y tendencia del Nivel del Mar. Fuente: REDMAR.

Mareógrafo de Barcelona

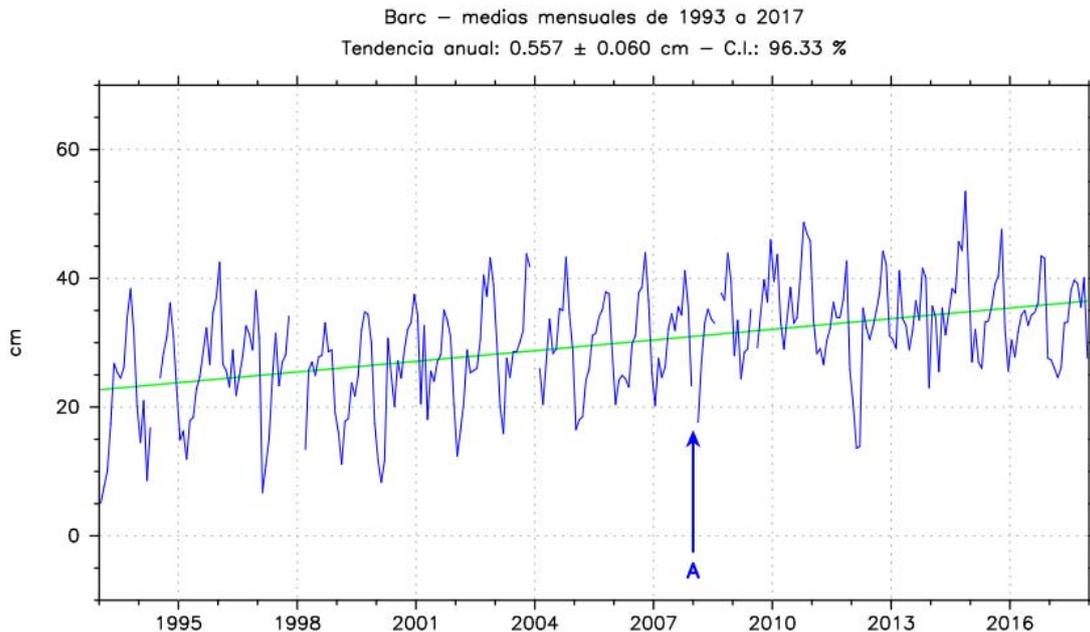


Ilustración 4. Mareógrafo de Barcelona. Medias mensuales y tendencia del Nivel del Mar.
Fuente: REDMAR.

4.2 Evaluación de los datos de los mareógrafos

De la tabla y las gráficas anteriores se desprende que existe una gran variabilidad en relación a la tendencia del nivel del mar en los diferentes puntos de análisis.

Se observa, sin embargo, que aquellos puertos que presentan un menor rango de incertidumbre asociada al nivel del mar son los que muestran tendencias ascendentes; Valencia y Barcelona.

Con el objeto de analizar el caso más desfavorable, se asume que en Castellón la tendencia será idéntica a la existente en el puerto de Barcelona, esto es:

Tendencia anual: 0.557 ± 0.060 cm.

Despreciando la incertidumbre asociada a la medida, el nivel del mar esperable en la zona de estudio y en diferentes periodos de retorno será el siguiente:

Periodo de retorno	Subida nivel del mar (cm)
1	0.557
5	2.785
10	5.570
20	11.140
30	16.710
40	22.280
50	27.850

Tabla 2. Subida del nivel del mar en la zona de estudio considerando situación similar a la del puerto de Barcelona (caso crítico del litoral peninsular mediterráneo). Fuente: Elaboración propia.

5 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO

Atendiendo a lo citado en el apartado 3.2, parece lógico utilizar el siguiente procedimiento para caracterizar el clima marítimo existente en la zona de estudio:

- En primer lugar, se procede a analizar los datos de la boya de Tarragona y los datos del *hindcast* efectuados en el nodo SIMAR más próximo a la misma (SIMAR 2102128).
- Posteriormente, se utilizará la correlación entre ambos puntos para corregir los resultados presentados para el nodo SIMAR sito frente a las costas de la playa del Gurugú, donde se ubica la actividad (SIMAR 2085120).
- Acto seguido, se compararán los datos corregidos y no corregidos correspondientes al nodo SIMAR 2085120, ubicado frente a las costas de Castellón.
- En caso de presentarse errores poco significativos entre los valores estimados por el *hindcast* en el nodo SIMAR 2085120 y los valores corregidos utilizando el método anterior, se despreciará la corrección.
- Con los resultados anteriores, se procederá a determinar los parámetros que definen los efectos del cambio climático en la playa del Gurugú, frente a la actividad propuesta.

En la siguiente tabla se muestran los datos que indican la posición geográfica de los puntos indicados anteriormente:

Información de los nodos de estudio				
Nomenclatura	Longitud	Latitud	Profundidad	Ubicación
Boya de Tarragona (2720)	1,47ºE	40,68ºN	688m	Frente a Cap de Tortosa
SIMAR 2102128	1,50ºE	40,67ºN	-	Junto a Boya de Tarragona
SIMAR 2085120	0,08º E	40,00 º N	-	Frente a costa de Castellón

Tabla 3. Información de los nodos de estudio. Fuente: Puertos del Estado.

La siguiente figura ilustra la ubicación de los nodos indicados anteriormente frente a las costas tarraconense y castellonense.

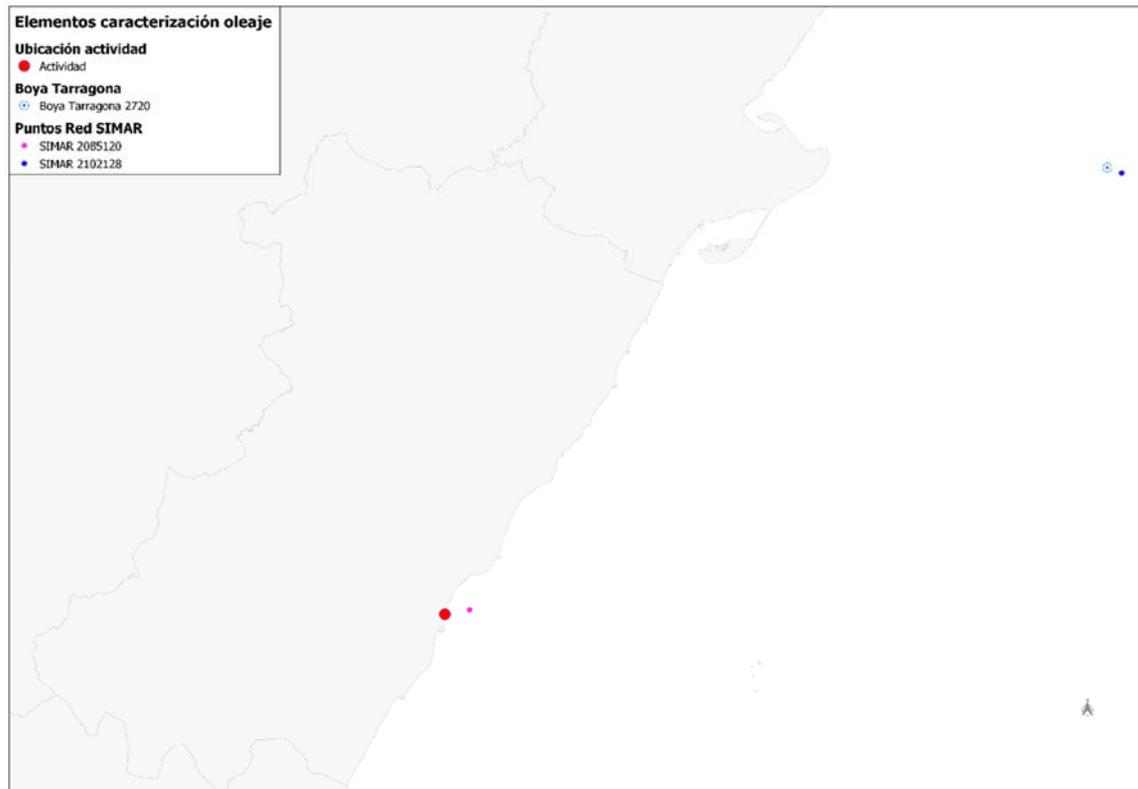


Ilustración 5. Ubicación actividad, boya de Tarragona y nodos de la red SIMAR

5.1 Correlación entre datos de la boya y nodo SIMAR 2102128

Para obtener la correlación entre los datos de la boya y el nodo SIMAR 2102128 ubicado junto a ella, se han comparado los valores escalares de la altura significativa de la ola (H_s) asociados a diferentes valores probabilidad, correspondientes a los regímenes medios² de ambas fuentes de datos.

En primer lugar, pues, se muestran los resultados de probabilidad de ocurrencia de una determinada altura significativa de ola (H_s) en la boya ubicada frente a las costas de Tarragona se muestran en la siguiente figura:

² El régimen medio de una serie temporal se define como el conjunto de estados de oleaje más probables que podemos encontrar. El régimen medio se describe, habitualmente, mediante una distribución teórica que ajusta dicha zona media o central del histograma. La distribución elegida para describir el régimen medio de oleaje es Weibull, cuya expresión es:

$$Fe(x) Fe(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-B}{A}\right)^C\right) \text{ donde:}$$

B: parámetro de centrado

A: parámetro de escala, que ha de ser mayor que 0

C: parámetro de forma, que suele moverse entre 0 y 3,5.

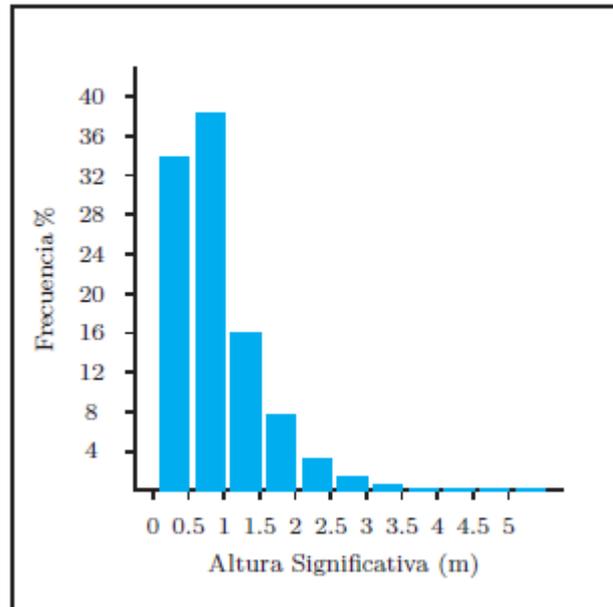


Ilustración 6. Altura significativa de la ola (H_s) en la boya de Tarragona entre los años 2004 y 2017. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

Por su parte, los resultados de probabilidad de ocurrencia de una determinada altura significativa de ola (H_s) en el punto SIMAR 2102128 ubicado junto a la boya se exponen a continuación:

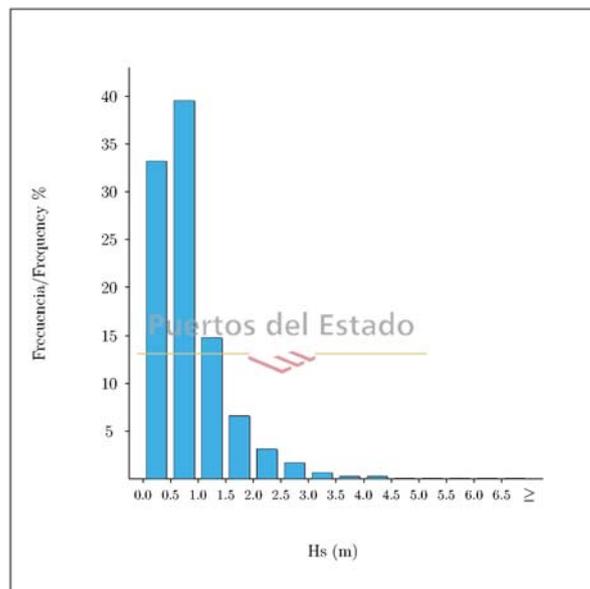


Ilustración 7. Altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2102128 entre 2004 y 2017. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico

A partir de esta información (de la cual también se dispone de datos en forma tabulada), se ha determinado la correlación existente entre ambas fuentes de datos. Dicha correlación se muestra en la siguiente gráfica:

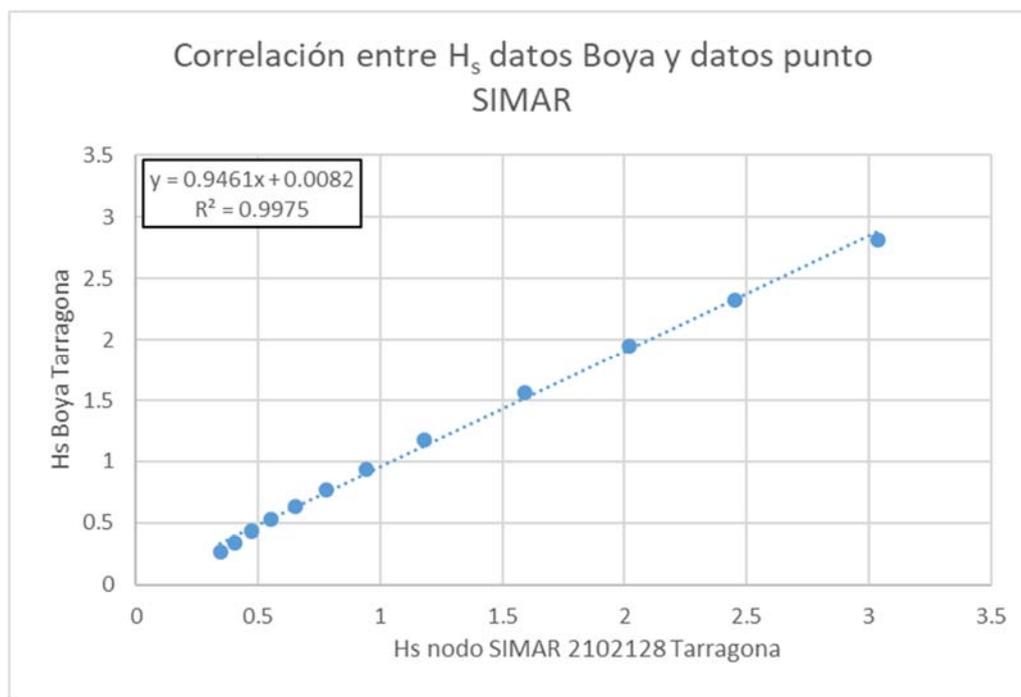


Ilustración 8. Correlación entre datos de la altura significativa (H_s) en la boya de Tarragona y en el punto SIMAR 2102128.

Como se observa en la gráfica anterior, la relación entre la altura de la ola significativa en la boya de Tarragona y el punto SIMAR 2102128 es la siguiente:

$$H_s \text{ Boya} = 0,9461 * H_s \text{ SIMAR} + 0,0082$$

En consecuencia, para corregir la altura de ola significativa H_s en el nodo SIMAR 2085120 se utilizará la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación 1: } H_s \text{ SIMAR Corregida} = 0,9461 * H_s \text{ SIMAR} + 0,0082$$

5.2 Corrección de los datos del punto SIMAR 2085120

El punto SIMAR 2085120, ubicado frente a la costa castellanense, presenta los siguientes datos escalares de altura significativa de la ola H_s:

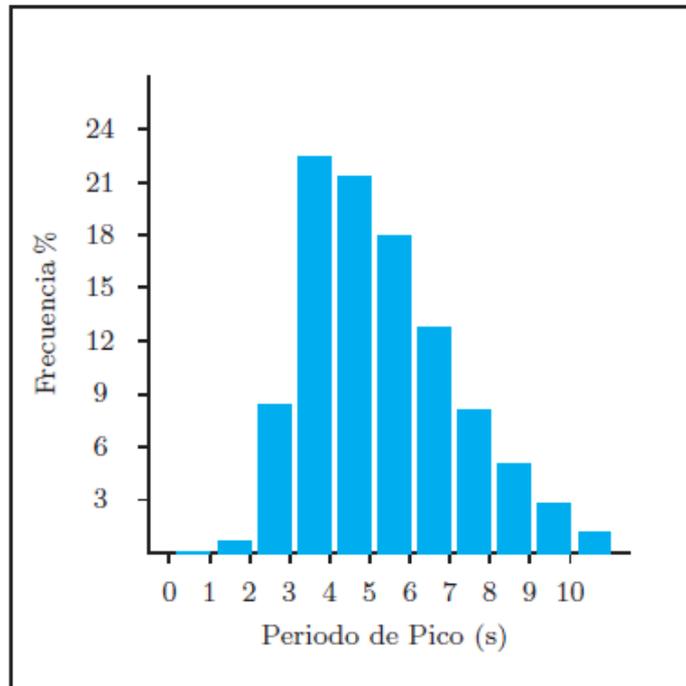


Ilustración 9. Altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2085120 entre 1958 y 2017. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

De acuerdo al informe publicado por Puertos del Estado para el Régimen Medio para dicho nodo, estos datos se corresponden a la siguiente probabilidad de no excedencia:

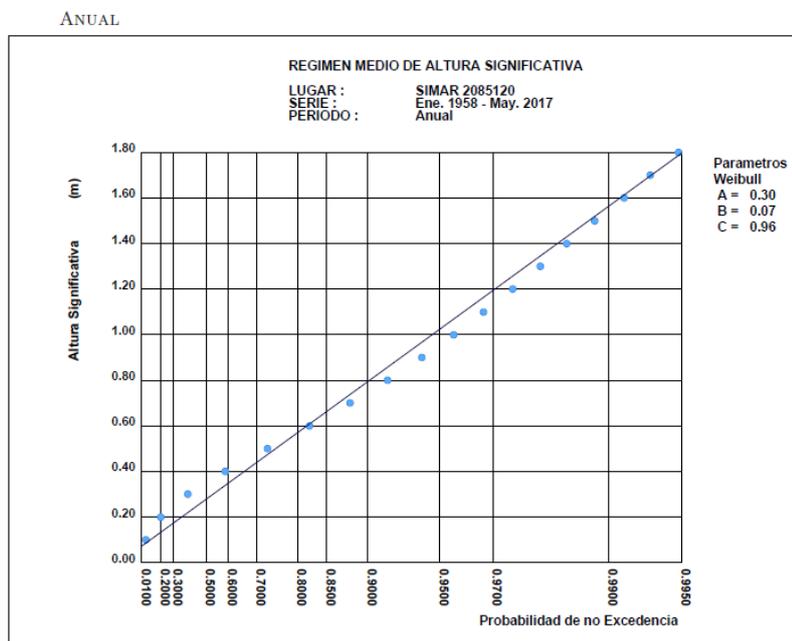


Ilustración 10. Régimen medio de altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2085120 entre 1958 y 2017. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

Utilizando los parámetros de la distribución de Weibull de esta función, se han obtenido las alturas significativas asociadas a diferentes probabilidades de no excedencia para posteriormente ser corregidas utilizando la Ecuación 1. Posteriormente, se ha procedido a calcular el error existente entre los valores estimados por el SIMAR y los valores corregidos. Todo ello se observa en la siguiente tabla:

Régimen medio en nodo SIMAR 2085120				
Probabilidad de no excedencia	H _s SIMAR Castellón	H _s SIMAR Castellón corregido	Abs (Hs SIMAR - Hs SIMAR corregido)	Error (%)
0.1	0.10	0.10	0.00	0%
0.2	0.13	0.13	0.00	0%
0.3	0.17	0.17	0.00	0%
0.4	0.22	0.22	0.00	0%
0.5	0.27	0.26	0.01	4%
0.6	0.34	0.33	0.01	3%
0.7	0.43	0.42	0.01	2%
0.8	0.56	0.54	0.02	4%
0.9	0.79	0.76	0.03	4%
0.95	1.01	0.96	0.05	5%
0.975	1.24	1.18	0.06	5%
0.99	1.54	1.47	0.07	5%
0.999	2.32	2.20	0.12	5%

Ilustración 11. Régimen medio de altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2085120 entre 1958 y 2017. Valores corregidos y cálculo de errores. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

Como se observa en la figura anterior, el error apenas alcanza el 5% para probabilidades de no excedencia comprendidas entre 0,95 y 0,999. En consecuencia, se entiende que los datos del *hindcast* como válidos.

6 REGÍMENES MEDIOS

6.1 Distribución de Weibull

Para el análisis de los regímenes medios del oleaje (anual y estacionales) frente a la costa castellonense se utilizan los datos publicados por Puertos del Estado para el nodo SIMAR 2085120.

Los resultados son los siguientes:

ANUAL

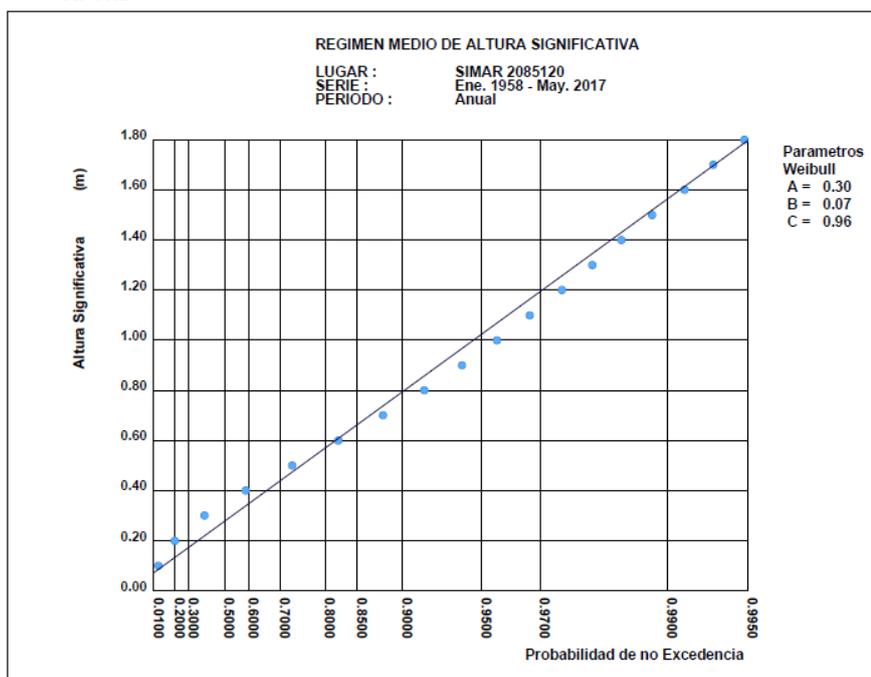


Ilustración 12. Régimen medio de altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2085120 entre 1958 y 2017. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

DICIEMBRE-FEBRERO

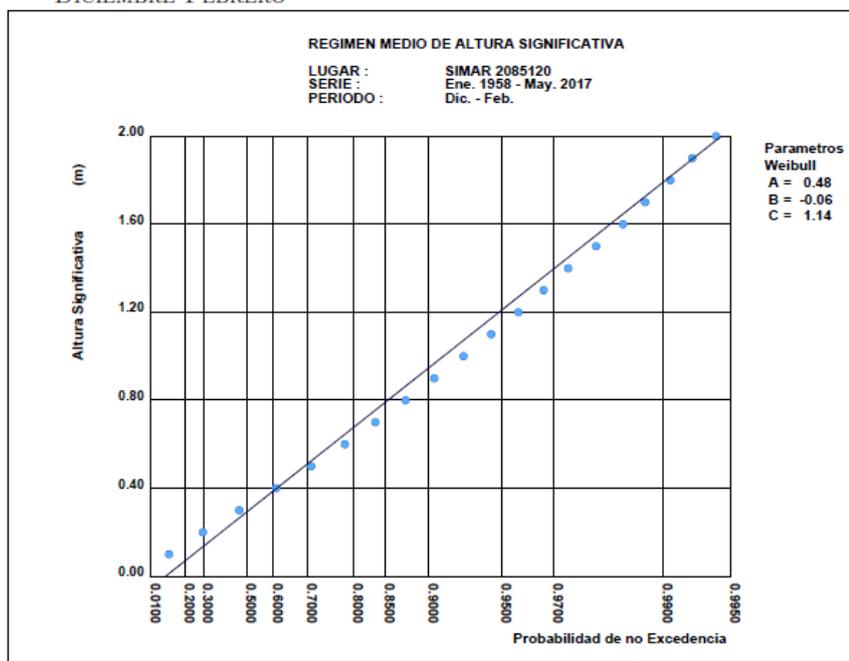


Ilustración 13. Régimen medio de altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2085120 entre 1958 y 2017. Periodo invernal. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

MARZO-MAYO

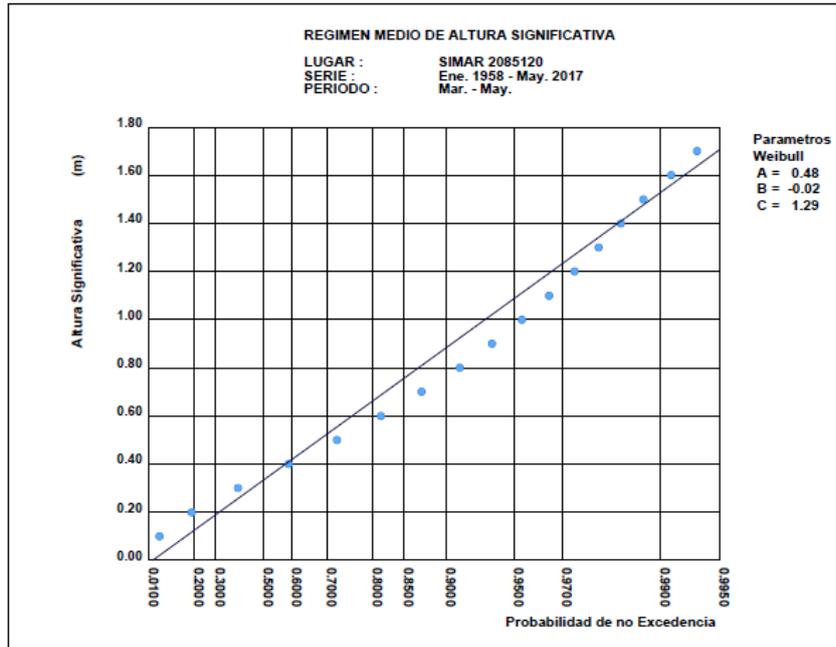


Ilustración 14. Régimen medio de altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2085120 entre 1958 y 2017. Periodo primaveral. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

RÉGIMEN MEDIO DE H_s ESTACIONAL

JUNIO-AGOSTO

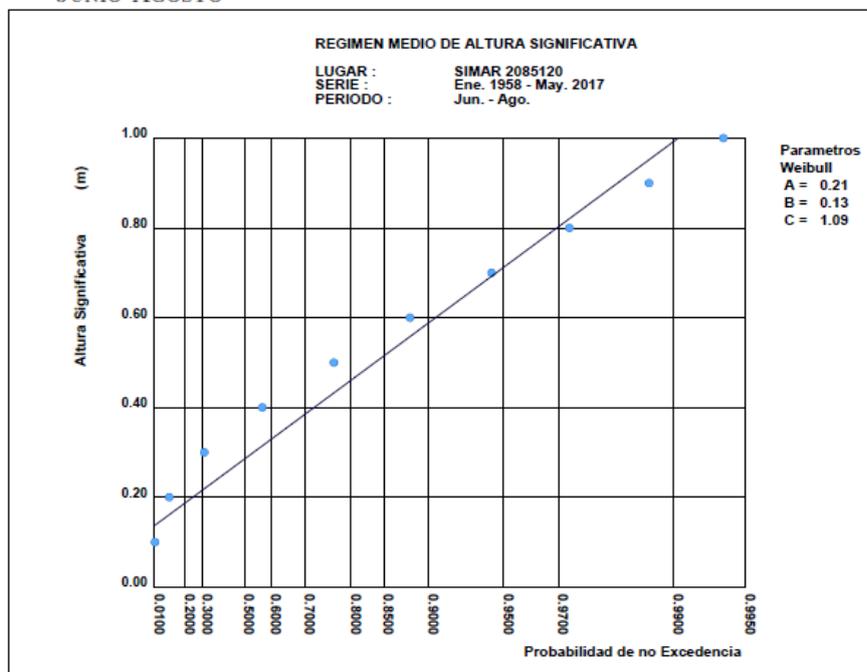


Ilustración 15. Régimen medio de altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2085120 entre 1958 y 2017. Periodo estival. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

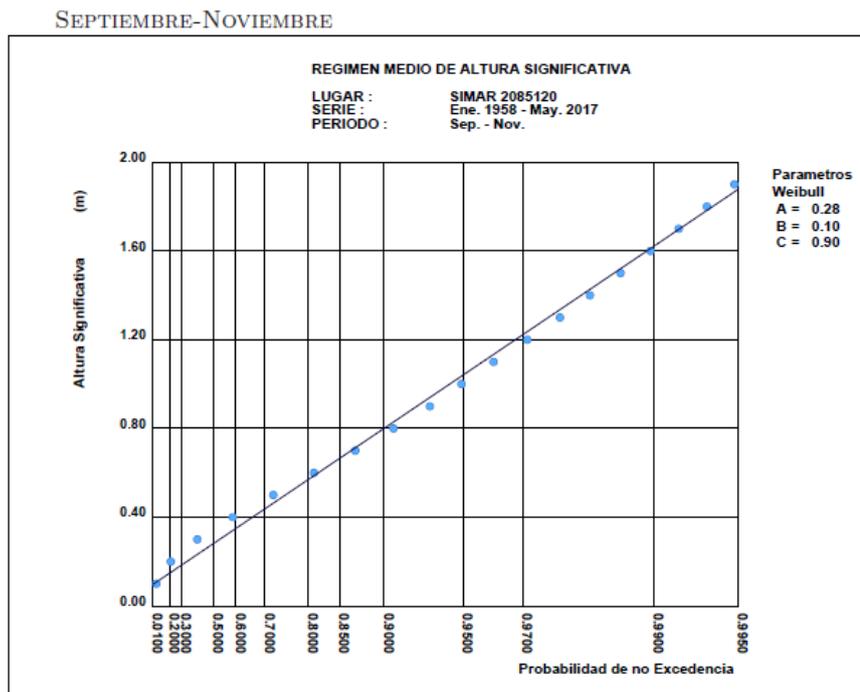


Ilustración 16. Régimen medio de altura significativa de la ola (H_s) en el punto SIMAR 2085120 entre 1958 y 2017. Periodo otoñal. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

6.2 Distribución sectorial del oleaje

Se muestra, a continuación, la rosa de oleaje en el nodo SIMAR sito frente a la costa castellanense.

La primera rosa que se muestra se corresponde a un periodo de análisis anual; siendo la serie analizada la comprendida entre los años 1958 y 2017.

ROSA DE ALTURA SIGNIFICATIVA

LUGAR : SIMAR 2085120

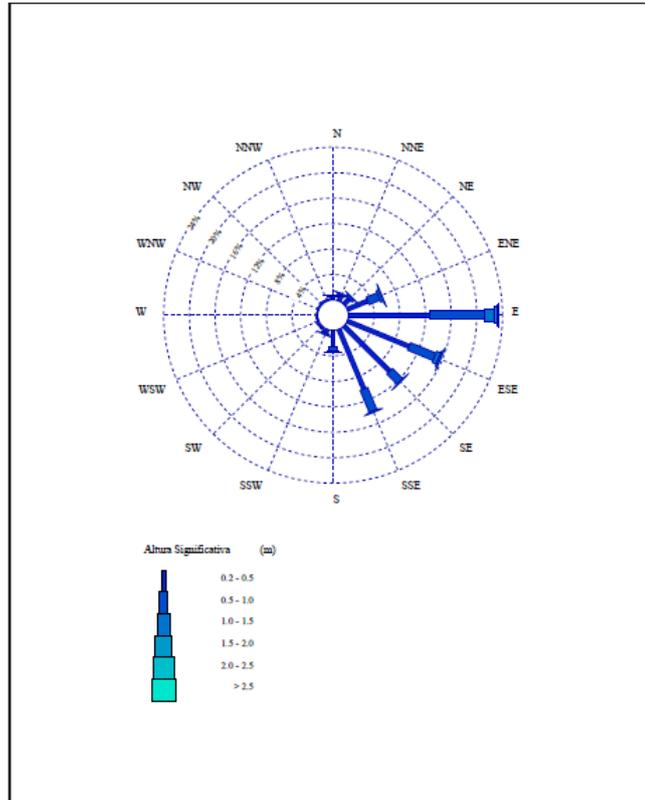
PERIODO : Anual

CRITERIO DE DIRECCIONES: Procedencia

SERIE ANALIZADA : Ene. 1958 - May. 2017

INTERVALO DE CALMAS : 0 - 0.2

PORCENTAJE DE CALMAS : 19.94 %



Ecuación 2. Rosa de altura significativa en función de la dirección de procedencia de la ola. Periodo anual. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

Posteriormente, también se muestra la rosa de oleaje correspondiente a cada uno de los periodos estacionales (primavera, verano, otoño e invierno).

3.4. ROSAS DE OLEAJE ESTACIONAL

ROSA DE ALTURA SIGNIFICATIVA

LUGAR : SIMAR 2085120

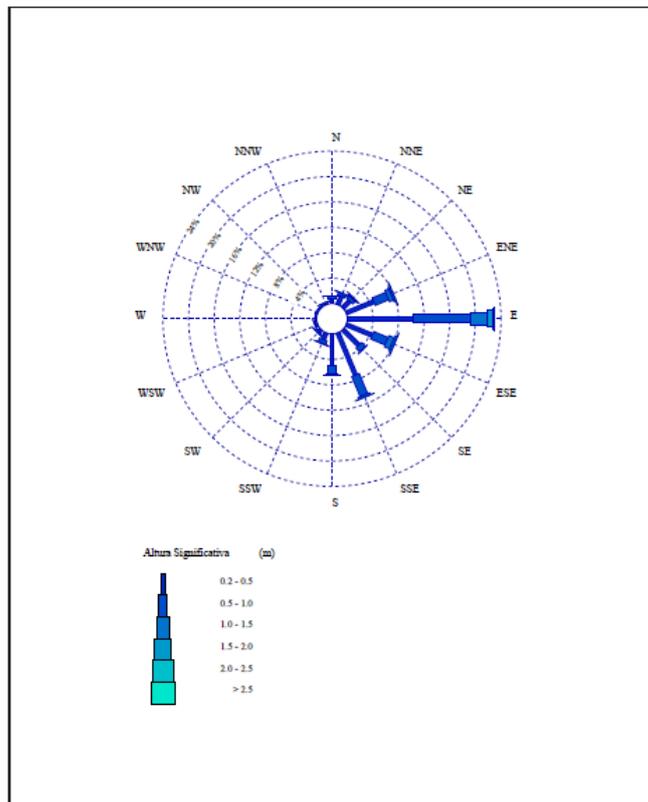
PERIODO : Dic. - Feb.

CRITERIO DE DIRECCIONES: Procedencia

SERIE ANALIZADA : Ene. 1958 - May. 2017

INTERVALO DE CALMAS : 0 - 0.2

PORCENTAJE DE CALMAS : 29.73 %



Ecuación 3. Rosa de altura significativa en función de la dirección de procedencia de la ola. Periodo invernal. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

ROSAS DE OLEAJE ESTACIONAL

ROSA DE ALTURA SIGNIFICATIVA

LUGAR : SIMAR 2085120

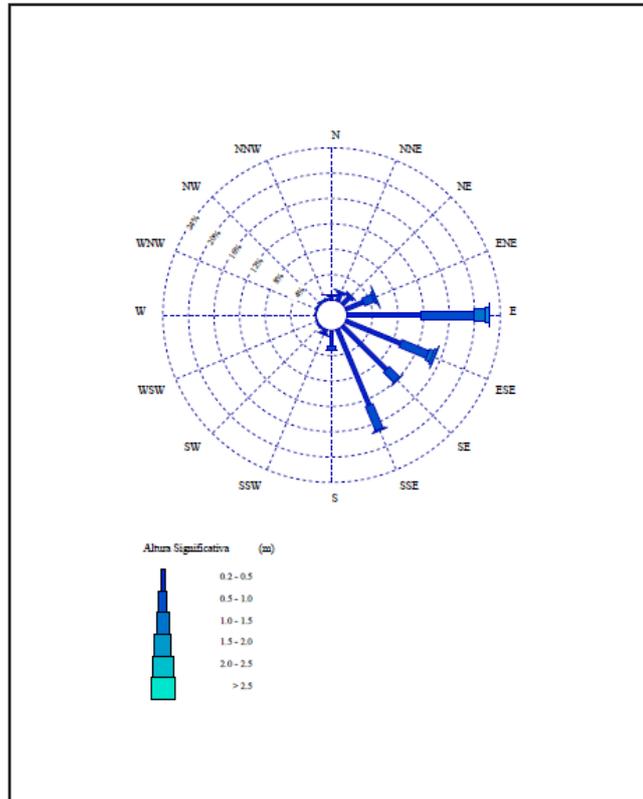
PERIODO : Mar. - May.

CRITERIO DE DIRECCIONES: Procedencia

SERIE ANALIZADA : Ene. 1958 - May. 2017

INTERVALO DE CALMAS : 0 - 0.2

PORCENTAJE DE CALMAS : 18.98 %



Ecuación 4. Rosa de altura significativa en función de la dirección de procedencia de la ola. Periodo primaveral. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

ROSAS DE OLEAJE ESTACIONAL

ROSA DE ALTURA SIGNIFICATIVA

LUGAR : SIMAR 2085120

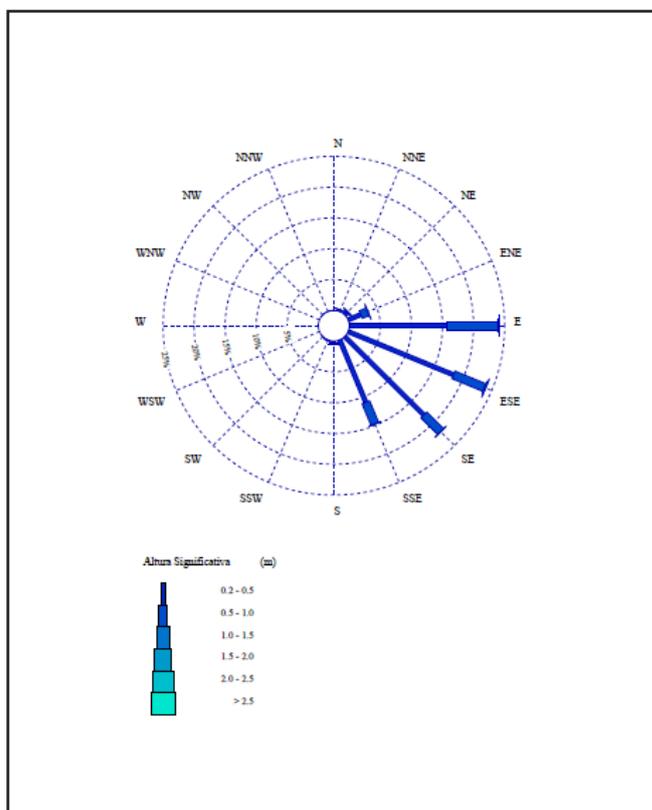
PERIODO : Jun. - Ago.

CRITERIO DE DIRECCIONES: Procedencia

SERIE ANALIZADA : Ene. 1958 - May. 2017

INTERVALO DE CALMAS : 0 - 0.2

PORCENTAJE DE CALMAS : 10.10 %



Ecuación 5. Rosa de altura significativa en función de la dirección de procedencia de la ola. Periodo estivo. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

ROSAS DE OLEAJE ESTACIONAL

ROSA DE ALTURA SIGNIFICATIVA

LUGAR : SIMAR 2085120

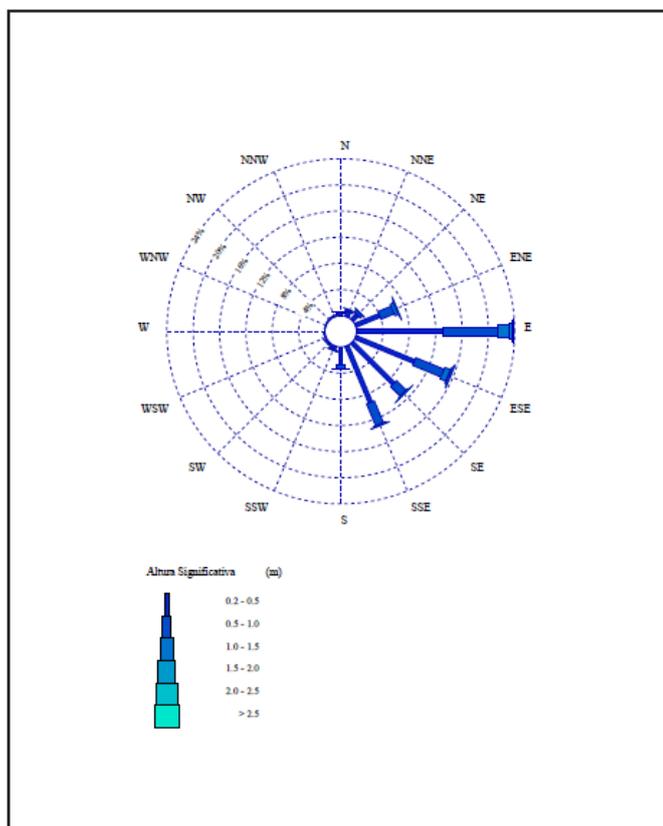
PERIODO : Sep. - Nov.

CRITERIO DE DIRECCIONES: Precedencia

SERIE ANALIZADA : Ene. 1958 - May. 2017

INTERVALO DE CALMAS : 0 - 0.2

PORCENTAJE DE CALMAS : 21.09 %



Ecuación 6. Rosa de altura significativa en función de la dirección de procedencia de la ola. Periodo otoñal. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

De las figuras anteriores se desprende que los oleajes más frecuentes en la costa castellonense proceden de ENE hasta SSE, siendo los oleajes más enérgicos los procedentes del levante (E).

Por otro lado, también resalta que en invierno la mayor parte de los oleajes proceden de E, mientras en el resto de periodos estacionales la distribución de los oleajes entre E y SSE está más repartida. También destaca que las estaciones que presentan valores de oleajes más enérgicos son otoño e invierno (valores de H_s más elevados), periodos en los que se concentran la mayor parte de los temporales frente a la costa castellonense.

La siguiente tabla muestra la relación entre la altura significativa de la ola y la dirección del oleaje para el nodo SIMAR sito frente a la costa castellonense.

Dirección	Hs (m)												Total	
	<=0.2	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	>5		
CALMAS	19.938													19.938
N 0		0.428	0.161	0.047	0.009	0.001	-	-	-	-	-	-	-	0.646
NNE 22.5		0.904	0.263	0.039	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	1.209
NE 45		1.165	0.407	0.075	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	1.652
ENE 67.5		3.445	1.816	0.394	0.098	0.034	0.009	0.005	-	-	-	-	-	5.801
E 90		12.696	8.435	1.643	0.438	0.143	0.027	0.003	-	-	-	-	-	23.385
ESE 112.5		10.434	4.28	0.669	0.231	0.066	0.013	0.004	0.003	-	-	-	-	15.7
SE 135		10.064	2.27	0.073	0.014	0.002	-	-	-	-	-	-	-	12.424
SSE 157.5		10.153	3.726	0.192	0.013	0.002	-	-	-	-	-	-	-	14.086
S 180		2.588	0.735	0.046	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-	3.374
SSW 202.5		0.591	0.264	0.027	0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	0.883
SW 225		0.21	0.099	0.009	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	0.321
WSW 247.5		0.129	0.025	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.157
W 270		0.075	0.008	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.084
WNW 292.5		0.055	0.011	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.068
NW 315		0.082	0.012	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.097
NNW 337.5		0.138	0.025	0.009	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	0.175
Total	19.938	53.157	22.537	3.231	0.823	0.248	0.05	0.012	0.005	-	-	-	-	100.00

Ecuación 7. Altura significativa de la ola H_s en función de la dirección para un periodo anual. Valores expresados en %. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico.

7 RÉGIMEN EXTREMAL ESCALAR Y OLEAJE DE CÁLCULO

7.1 Definición de régimen extremal

La seguridad y la operatividad de una instalación en la costa puede estar condicionada por la acción del oleaje en situación de temporal, es decir, en situaciones donde la altura del oleaje alcanza una intensidad poco frecuente.

Con el fin de acotar el riesgo que corre una instalación, debido a la acción del oleaje, es necesario tener una estimación de la frecuencia o probabilidad con la que se presentan temporales que superen una cierta altura significativa H_s de ola.

Un régimen extremal de oleaje, es precisamente, un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede presentar un temporal de una cierta altura de riesgo.

7.2 Definición de temporal y análisis de temporales en periodo de evaluación

De acuerdo a las definiciones Banco de Datos Oceanográficos del Estado, un temporal es aquella situación durante la cual la altura del oleaje supera un umbral determinado. El temporal, además, queda representado por el valor máximo de altura alcanzado por el oleaje durante un periodo de 5 días.

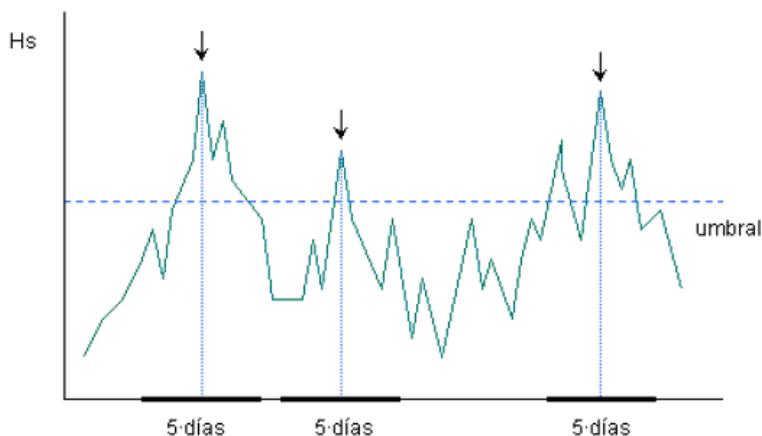


Ilustración 17. Selección de los valores de altura significativa H_s que representan el comportamiento extremal de una serie. Fuente: Banco de Datos Oceanográficos del Estado.

El método de selección de temporales descrito anteriormente se conoce como POT (Peak Over Threshold).

7.3 Vida útil y probabilidad de excedencia de la altura de diseño

En las publicaciones de Puertos del Estado para el análisis de los extremos máximos de oleaje por direcciones en boyas, se indica que:

Para garantizar un cierto nivel de seguridad en una obra expuesta a la acción del oleaje es necesario proyectarla de modo que esté acotada la probabilidad de que, durante un tiempo predeterminado, pueda fallar por excedencia de la altura de diseño. La especificación del grado de seguridad conduce a los siguientes conceptos:

- *Altura de Diseño: Al proyectar una obra se dimensiona de modo que sea capaz de soportar la acción de temporales con altura menor o igual a la Altura de Diseño.*
- *Vida Útil: La Vida Útil de un proyecto es el periodo de tiempo durante el cual es necesario garantizar la permanencia en servicio de una instalación.*
- *Probabilidad de Excedencia: Es la probabilidad de que al menos un temporal supere la Altura de Diseño dentro del tiempo de Vida Útil.*

La determinación de la Altura de Diseño y, por tanto, el nivel de seguridad, se realiza especificando el valor admisible de la Probabilidad de Excedencia de la Altura de Diseño durante el tiempo de Vida Útil. A su vez la Vida Útil y la Probabilidad de Excedencia admisible se determinan en función de los costos económicos y sociales de un posible fallo.

7.4 Resultados del análisis

Los datos publicados para el punto SIMAR sito frente a la costa de Castellón solo permiten caracterizar los máximos picos registrados en intervalos mensuales.

Para nuestro análisis, se han utilizado los datos registrados entre enero de 2004 y abril de 2019 a objeto de establecer los temporales del sistema, utilizándose como valor umbral una altura de ola de 2m. Los datos obtenidos de las condiciones extremales se ilustran en la siguiente figura:

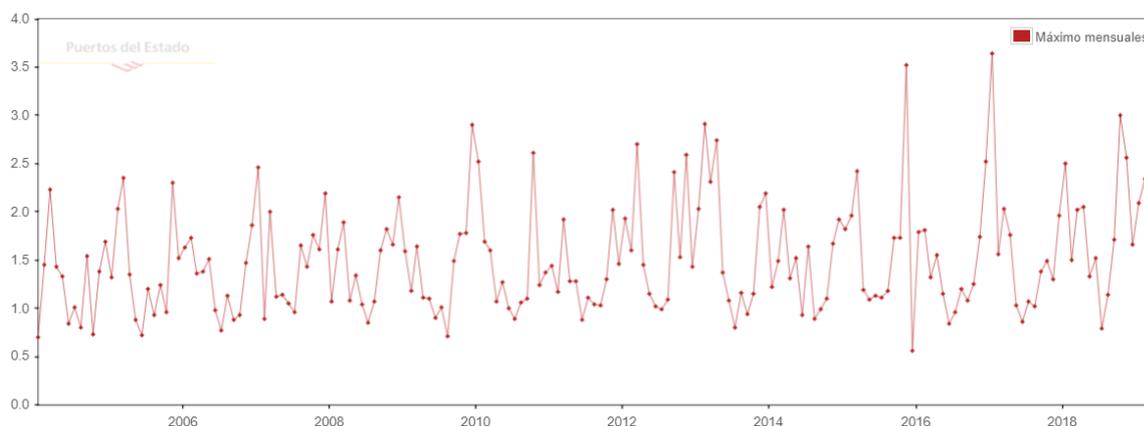


Ilustración 18. Valores máximos de la altura significativa H_s que representan el comportamiento extremal entre los enero de 2004 y abril de 2019. Fuente: Puertos del Estado.

Estos datos han sido tabulados en la siguiente tabla:

Altura significativa oleaje H_s			Altura significativa oleaje H_s		
Año	Mes	H_s	Año	Mes	H_s
2004	Marzo	2.23	2013	Abril	2.74
2005	Febrero	2.03	2013	Noviembre	2.05
2005	Marzo	2.35	2013	Diciembre	2.19
2005	Noviembre	2.30	2014	Marzo	2.02
2007	Enero	2.46	2015	Marzo	2.42
2007	Marzo	2.00	2015	Noviembre	3.52
2007	Diciembre	2.19	2016	Diciembre	2.56
2008	Diciembre	2.15	2017	Enero	3.64
2009	Diciembre	2.90	2017	Marzo	2.03
2010	Enero	2.52	2018	Enero	2.05
2010	Octubre	2.61	2018	Marzo	2.02
2011	Noviembre	2.02	2018	Abril	2.05
2012	Marzo	2.70	2018	Octubre	3.00
2012	Septiembre	2.41	2018	Noviembre	2.56
2012	Noviembre	2.59	2019	Enero	2.09
2013	Febrero	2.03	2019	Febrero	2.34
2013	Febrero	2.91	2019	Marzo	2.00
2013	Marzo	2.31	2019	Abril	3.18

Tabla 4. Máxima altura significativa del oleaje. Fuente: Elaboración propia a partir de datos publicados en la página web de Puertos del Estado.

Posteriormente, y por medio del método de los mínimos cuadrados, se ha procedido a ajustar los datos de la tabla anterior a la función de distribución de Weibull.

$$\text{Ecuación 8. } F_e(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-B}{A}\right)^C\right)$$

donde:

- B: parámetro de centrado
- A: parámetro de escala.
- C: parámetro de forma.

En el caso de estudio, los valores que adoptan los diferentes coeficientes de la expresión anterior son:

Coeficiente de escala (A)	Coeficiente de centrado (B)	Coeficiente de forma (C)
6,345	0,019	2,586

Tabla 5. Cálculo de los coeficientes de la distribución de Weibull. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de H_s máxima mensuales entre los años 2004 y 2019.

Con estos valores, se obtiene que la siguiente relación entre la altura de la ola H_{sr} asociada a un periodo de retorno, T_r .

T_r	H_{sr}	$H_{sr} + 1,65\sigma$
1	2.51	3.22
5	2.95	3.70
10	3.11	3.82
20	3.21	3.91
30	3.26	3.97
40	3.30	3.99
50	3.32	4.02

Tabla 6. Alturas de ola asociadas a determinados periodos de retorno y límite superior (banda de confianza al 90%) obtenidas mediante ajuste a una distribución de Weibull

Adicionalmente a esta altura de ola, en análisis extremal es igualmente importante el estimar los intervalos de confianza para las alturas de ola calculadas.

Los regímenes extremales incluidos en la Recomendaciones para Obras Marinas (ROM 0.3-91. Oleaje. Anejo I. Clima marítimo en el litoral español) estimados por el método POT (Goda, 1988), cuantificando su incertidumbre por medio del establecimiento de límites a ambos lados de la recta de ajuste asociados a un nivel de confianza del 90%, en general pueden considerarse razonablemente fiables para periodos de retorno inferiores a 20 veces el tiempo efectivo de medida considerado. Por tanto, si se acepta este criterio, en la mayor parte de los casos los regímenes extrémalos obtenidos podrían considerarse fiables como máximo para periodos de retorno entre 100 y 250 años.

En la tabla anterior se ha incluido también, pues, la altura de ola correspondiente al límite superior de la banda de confianza al 90%. Estos dan una medida del nivel de incertidumbre implicado y, ya que generalmente el análisis se realiza a partir de registros de datos relativamente cortos para obtener alturas a períodos de retorno grandes, el nivel de incertidumbre de la estima suele ser grande.

Por último, a la hora de interpretar el clima extremal, hay que considerar que, si bien el período de retorno representa el intervalo medio entre eventos sucesivos con una altura de ola igual o superior a una altura de ola significativa, ello no implica que la probabilidad de presentación de una altura de ola igual o superior en un intervalo menor sea nula o despreciable. Así, la probabilidad de excedencia o de presentación de una ola asociada a un período de retorno determinado, T_r , en un intervalo de tiempo L , viene dada por:

$$\text{Ecuación 9. } P_e = 100 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T_r} \right)^L \right]$$

Así, por ejemplo, existe una probabilidad de 18.29 % de que la altura de ola de período de retorno de 50 años se presente durante un período de 10 años, mientras que dicha probabilidad aumenta a 39.65 % si se considera un período de 25 años.

Por último, para acabar de definir el clima extremal, hay que caracterizar el período del oleaje de cálculo.

Así pues, se analiza la relación entre el período y la altura de ola para el punto SIMAR analizado. Dicha relación se muestra en la siguiente figura:

Hs (m)	Tp (s)											Total
	<=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	>10	
<=0.5	-	0.55	8.041	20.164	16.231	12.603	7.5	4.343	2.347	1.052	0.237	73.068
1	-	-	0.174	2.126	4.99	4.965	4.456	2.768	1.731	0.963	0.385	22.56
1.5	-	-	0.001	0.056	0.115	0.347	0.774	0.708	0.547	0.425	0.263	3.234
2	-	-	-	-	0.014	0.014	0.078	0.234	0.203	0.189	0.091	0.823
2.5	-	-	-	-	0.001	-	-	0.044	0.09	0.071	0.042	0.248
3	-	-	-	-	-	-	-	-	0.012	0.021	0.016	0.05
3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002	0.01	0.012
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	0.003	0.005
4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
>5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	-	0.55	8.216	22.346	21.351	17.928	12.809	8.098	4.93	2.724	1.048	100

Tabla 7. Tiempo de pico del oleaje Tp en función de la altura significativa Hs de la ola. Valores expresados en %. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico

Si se consideran los valores de Tp correspondientes a las alturas de ola utilizadas para obtener el clima extremal (superiores a 2m), sus valores varían en el intervalo 5s a mayor de 10s.

Por su parte, si elevamos la altura de oleaje a 3m, los periodos de pico Tp se incrementan hasta valores que oscilan entre los 9 segundos y mayores de 10 segundos.

En relación a esto, indicar que las previsiones del hindcast en el punto SIMAR 2085120 para el periodo comprendido entre 1958 y 2019 muestran los siguientes periodos de pico máximo frente a la altura significativa de la ola máxima para cada mes.

Punto SIMAR / SIMAR Point2085120 1958 - 2019			
Mes/Month	Hs Max./Max. Hs	Tp	Dir
Enero/January	3.64	9.97	72
Enero/January	3.64	9.88	74
Febrero/February	3.11	11.36	100
Marzo/March	2.72	9.01	97
Abril/April	3.18	8.27	74
Mayo/May	2.36	9.17	95
Mayo/May	2.36	9.26	96
Junio/June	2.18	8.13	102
Julio/July	1.64	6.30	70
Agosto/August	1.65	7.00	75
Septiembre/September	2.57	8.62	99
Octubre/October	3.04	9.80	99
Noviembre/November	3.99	11.36	106
Diciembre/December	3.52	11.36	104

Tabla 8. Tiempo de pico del oleaje T_p en función de la altura significativa H_s de la ola según datos del nodo SIMAR 2085120. Fuente: Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Área de medio físico

De la tabla anterior se extrae que la máxima altura significativa de la ola registrada entre 1958 y 2019 fue de 3,99m, siendo el periodo de pico de 11,36s.

8 DINÁMICAS RESULTANTES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) publicó en 2013 el informe con nombre "*Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*". De acuerdo a la publicación "*Impactos en la costa española por efecto del Cambio Climático*". De acuerdo al mismo:

Para el año 2065, las distintas proyecciones muestran que el incremento medio del nivel del mar a nivel global oscilará entre 0,24m y 0,30m. Incluyendo la incertidumbre; los rangos esperados podrían oscilar entre 0,17m y 0,38m.

Para el año 2100, por su parte, el informe muestra incrementos que pueden oscilar entre los 0,44m y los 0,74m. Incluyendo los valores de incertidumbre, estos valores podrían oscilar entre los 0,28m y los 0,98m.

Este incremento será debido al calentamiento de los océanos y las pérdidas de masa glaciares y mantos de hielo.

De acuerdo a la publicación "*Impactos en la costa española por efecto del Cambio Climático*":

- No se aprecian cambios relevantes en la magnitud de la energía del oleaje en la costa mediterránea. Las duraciones de excedencia de altura de ola estimadas, sin embargo, tienden a aumentar ligeramente a lo largo de la costa. En el periodo comprendido entre 1958 y 2001 el valor de $H_{s,12}$ en el Mediterráneo ha aumentado en torno a 0,0930m; lo que supone un incremento anual de 2,16mm.

En consecuencia, de mantenerse esta tendencia, en 50 años la altura del oleaje $H_{s,12}$ podría verse incrementada en 108,14mm.

- No se han producido variaciones en la dirección predominante del oleaje.

En consecuencia, es esperable que se mantengan las dominancias indicadas en el apartado 6.

- Por otro lado, el régimen medio del viento y marea meteorológica presenta una tendencia negativa, pero de muy pequeña escala. En el periodo comprendido entre 1958 y 2001 el incremento fue de $\delta H_s = -0,0318m$, lo que supone un diferencial de -0,74mm/año. De mantenerse esta tendencia, en 50 años la altura de ola significativa en régimen medio podría reducirse entorno a los 34mm.

En consecuencia, los valores de H_s esperables en régimen estacional serán similares a los existentes en la actualidad.

Castellón, septiembre de 2019

Pedro Millán Romero
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Nº Col: 33.246
(En representación del equipo técnico)