

# Trabajo Final de Máster

*Metodología para la obtención y análisis de las condiciones de oleaje en zonas sin datos instrumentales. Aplicación a la evaluación de los efectos del Cambio Climático en el diseño del dique de la ampliación de la zona Norte del Puerto de Veracruz (México).*

Autor : MARTÍNEZ CANTERO, Javier  
Tutor : GONZÁLEZ ESCRIVÁ, Jose Alberto  
Co-tutor : MOLINES LLODRÁ, Jorge

Curso 2016-2017  
UPV-ETSICCP



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Caminos, Canales y Puertos

Máster de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Junio 2017



---

# Resumen

Castellano

*Metodología para la obtención y análisis de las condiciones de oleaje en zonas sin datos instrumentales. Aplicación a la evaluación de los efectos del Cambio Climático en el diseño del dique de la ampliación de la zona Norte del Puerto de Veracruz (México)*

Las obras de abrigo juegan un papel esencial en el devenir de los Puertos. Éstos son el motor de la economía y han de asegurar la operatividad, funcionalidad y seguridad de sus infraestructuras. Por ello es necesario un correcto diseño de las obras de abrigo, como los diques. La determinación del clima marítimo es una fase fundamental en el diseño y mediante el código expuesto en este Trabajo Final de Máster, se podrá obtener con cierta fiabilidad datos relativos al oleaje en zonas geográficas que carezcan de instrumentos de medición o datos al respecto. La base de datos americana de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* es la base del algoritmo desarrollado.

El Cambio Climático tiene efectos sobre el clima marítimo, haciendo las estructuras costeras previsiblemente más vulnerables a las condiciones climáticas futuras. Este hecho puede hacer peligrar los requisitos de las obras de abrigo diseñadas.

Pudiendo obtener datos de oleaje en cualquier parte del mundo, este Trabajo Final de Máster analiza el oleaje característico del entorno del proyecto de Ampliación de la zona norte del Puerto de Veracruz. El análisis temporal del oleaje junto con las predicciones de incremento del nivel medio del mar propuestas por el *International Panel on Climate Change*, permiten hacer una predicción de las condiciones de oleaje a finales de siglo XXI. Éstas muestran el infradimensionamiento de la sección del dique de estudio frente a condiciones venideras. El rebase previsto aumentará sus descargas entre un 13% y 27%, mientras que la estabilidad del manto no podrá cumplir los requerimientos de diseño actuales, necesitando un incremento entre el 3% y 10% del peso de los elementos que lo conforman. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de incorporar en los diseños un factor que considere el Cambio Climático y la amenaza que este genera sobre las obras portuarias existentes y futuras.

**Palabras clave:** Diques, Oleaje, Cambio Climático, Nivel del mar, Altura de ola, Infradimensionamiento, Rebase, Estabilidad del manto

---

# Abstract

## English

*Methodology for obtaining and analysing the wave conditions in areas without instrumental data. Implementation to assess Climate Change effects on the breakwater design of the Veracruz North Port extension (Mexico).*

Coastal defense structures play a major role in the development of ports. As ports are central elements to the local economy, the operability, functionality and safety of their infrastructures must be ensured. Hence, a reliable design of their defense structures, like breakwaters, is needed. Determining the characteristics of the marine climate is fundamental to a breakwater design. By using the script provided in this Master Thesis, it is possible to obtain, with a certain reliability, data on wave conditions in geographic areas without measuring instruments or local data. The American database created by the *National Oceanic and Atmospheric Administration* lies at the basis of the script developed.

Climate Change affects marine weather conditions, making coastal structures predictably more vulnerable to future marine conditions. This fact could endanger the structural integrity of the designed breakwaters.

Due to the ability to obtain wave data in any part of the world, this Master Thesis is able to analyze the wave conditions of the surroundings of the project of Veracruz North Port extension. A temporal analysis of waves along with the predictions of sea level rise provided by the *International Panel on Climate Change*, allowed for future predictions of the marine climate at the end of the XXI century to be made. These conditions show that the breakwater cross section studied is under-designed against future conditions. Discharges due to overtopping will increase in a range from 13 % to 27 %, while the armour stability will need an increase between 3 % and 10 % of its elements weight to meet present design requirements. These results highlight the need to consider a design factor which will take into account Climate Change and its threat against existing and future port structures.

**Keywords:** Breakwaters, Waves, Climate Change, Sea Level, Wave height, Under-designed, Overtopping, Armour stability.

---

# Resum

## Valencià

*Metodologia per a l'obtenció i anàlisi de les condicions d'onatge en zones sense dades instrumentals. Aplicació a l'avaluació dels efectes del Canvi Climàtic en el disseny del dic de l'ampliació de la zona Nord del Port de Veracruz (Mèxic)*

Les obres d'abric juguen un paper essencial en l'esdevindre dels Ports. Estos són el motor de l'economia i han d'assegurar l'operativitat, funcionalitat i seguretat de les seues infraestructures. Per això és necessari un correcte disseny de les obres d'abric, com en el cas dels dics. La determinació del clima marítim és una fase fonamental en el disseny i per mitjà del codi exposat en este Treball Final de Màster, es podrà obtindre amb una certa fiabilitat dades relatives a l'onatge en zones geogràfiques que no tinguen instruments de mesura o dades d'onatge. La base de dades americanes de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* és la base de l'algorisme desenvolupat.

El Canvi Climàtic té efectes sobre el clima marítim, fent les estructures costaneres previsiblement més vulnerables a les condicions climàtiques futures. Este fet pot fer perillar els requisits de les obres d'abric dissenyades.

Podent obtindre dades d'onatge en qualsevol part del món, este Treball Final de Màster analitza l'onatge característic de l'entorn del projecte d'Ampliació de la zona nord del Port de Veracruz. L'anàlisi temporal de l'onatge junt a les prediccions d'increment del nivell mitjà del mar proposades per el *International Panel on Climate Change*, permeten fer una predicció de les condicions d'onatge a finals de segle XXI. Estes mostren l'infradimensionament de la secció del dic d'estudi enfront de condicions venidores. L'ultrapassament previst augmentarà les seues descàrregues entre un 13% i 7%, mentres que l'estabilitat del manto no podrà complir els requeriments de disseny actuals, requerint un increment entre el 3% i 10% del pes dels elements que ho conformen. Estos resultats posen de manifest la necessitat d'incorporar en els dissenys un factor que considere el Canvi Climàtic i l'amenaça que este genera sobre les obres portuàries existents i futures.

**Paraules clau:** Dics, Onatge, Canvi Climàtic, Nivell del mar, Altura d'onada, Infradimensionament, Ultrapassament, Estabilitat del manto

---

# Índice

<b>Tabla de contenidos</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Estructura del Trabajo Final de Máster . . . . .	2
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>3</b>
2.1. Importancia y tipos de bases de datos de oleaje . . . . .	3
2.2. Efectos del Cambio Climático sobre el clima marítimo . . . . .	5
2.2.1. Efectos del Calentamiento Global en zonas costeras . . . . .	6
2.2.2. Efectos del Calentamiento Global en estructuras costeras . . . . .	7
2.3. Resumen del capítulo 2 . . . . .	10
<b>3. Investigación</b>	<b>11</b>
3.1. Revisión de la literatura científica y estudio bases de datos de oleaje . . . . .	11
3.1.1. NOAA – Wave Watch III . . . . .	11
3.1.2. Puertos del Estado . . . . .	12
3.1.3. Ifremer . . . . .	13
3.1.4. Simorc . . . . .	15
3.1.5. Magic Sea Weed . . . . .	15
3.1.6. BMT Argoss . . . . .	16
3.1.7. Bases de datos instrumentales de interés . . . . .	18
3.2. Elección de base de datos NOAA y descripción . . . . .	20
3.2.1. Ámbito de estudio . . . . .	20
3.2.2. Obtención de archivos . . . . .	22
3.2.3. Desarrollo código para obtener datos de oleaje . . . . .	22
3.2.4. Comparación con la base de datos Argoss BMT . . . . .	23
3.3. Resumen del capítulo 3 . . . . .	23
<b>4. Evaluación de los efectos del Cambio Climático sobre el dique de Poniente de la ampliación del Puerto de Veracruz</b>	<b>24</b>
4.1. Introducción . . . . .	24
4.2. Antecedentes y motivación del Proyecto . . . . .	25
4.3. Diseño actual . . . . .	26
4.4. Metodología de diseño . . . . .	27
4.4.1. Principales Suposiciones . . . . .	27
4.4.2. Análisis estadístico de las series de datos de oleaje . . . . .	28
4.4.3. Correlación entre Altura de ola-Periodo . . . . .	35
4.4.4. Batimetría . . . . .	36
4.4.5. Nivel del mar . . . . .	36
4.4.6. Propagación del oleaje . . . . .	38
4.5. Diseño del manto . . . . .	38

4.5.1. Formulaciones . . . . .	38
4.5.2. Pieza y formulación escogidas . . . . .	40
4.6. Rebase . . . . .	40
4.7. Resultados . . . . .	41
4.7.1. Análisis de la Serie de datos 1979-2010 . . . . .	41
4.7.2. Obtención del periodo de retorno . . . . .	46
4.7.3. Análisis series de datos 1979-1994 y 1995-2010 . . . . .	47
4.7.4. Comparación condiciones de contorno entre 2010-2100 y necesidades de mejora del diseño . . . . .	48
4.8. Resumen del capítulo 4 . . . . .	52
<b>5. Conclusion</b>	<b>54</b>
<b>Anejos</b>	<b>I</b>
<b>A. Obtención de Archivos de las bases de datos</b>	<b>I</b>
A.1. Introducción . . . . .	I
A.2. Bases de datos diversas . . . . .	I
A.2.1. Ifremer . . . . .	I
A.2.2. Simorc . . . . .	IV
A.2.3. BMT Argoss . . . . .	V
A.3. Obtención de datos de la NOAA . . . . .	VII
A.3.1. Descarga de los archivos . . . . .	VII
A.3.2. Ejemplo de obtención de datos . . . . .	VII
<b>B. Códigos Matlab</b>	<b>X</b>
B.1. Altura de ola . . . . .	X
B.2. Dirección del oleaje . . . . .	XIV
B.3. Periodo Pico . . . . .	XVIII
<b>C. Funciones de ajuste</b>	<b>XXII</b>
C.1. Introducción . . . . .	XXII
C.2. Parámetros estadísticos . . . . .	XXII
C.3. Parámetros de diseño . . . . .	XXII
C.4. Transformación . . . . .	XXII
C.5. Estimación de parámetros . . . . .	XXIII
C.6. Funciones de distribución . . . . .	XXIII
C.6.1. Exponencial . . . . .	XXIII
C.6.2. Distribución Weibull . . . . .	XXIV
C.6.3. Distribución Gumbel . . . . .	XXIV
C.6.4. Distribución de Pareto Generalizada . . . . .	XXV
<b>D. Caracterización del oleaje</b>	<b>XXVI</b>
D.1. Introducción . . . . .	XXVI
D.2. Fase de estudio: 1979-2010 . . . . .	XXVII
D.2.1. Punto de estudio 1 . . . . .	XXVII
D.2.2. Punto de estudio 2 . . . . .	XXX
D.2.3. Punto de estudio 3 . . . . .	XXXIII
D.2.4. Comparación de los tres puntos . . . . .	XXXV
D.3. Fase de estudio: 1979-1994 . . . . .	XXXVI
D.3.1. Punto de estudio 1 . . . . .	XXXVI
D.3.2. Punto de estudio 2 . . . . .	XXXIX
D.3.3. Punto de estudio 3 . . . . .	XLII

---

D.3.4. Comparación de los tres puntos . . . . .	XLIV
D.4. Fase de estudio: 1995-2010 . . . . .	XLV
D.4.1. Punto de estudio 1 . . . . .	XLV
D.4.2. Punto de estudio 2 . . . . .	XLVIII
D.4.3. Punto de estudio 3 . . . . .	LI
D.4.4. Comparación de los tres puntos . . . . .	LIII
<b>E. Propagación del Oleaje</b>	<b>LIV</b>
E.1. Introducción . . . . .	LIV
E.2. Fase 1979-2010 . . . . .	LV
E.3. Fase 1979-1994 . . . . .	LVI
E.4. Fase 1995-2010 . . . . .	LVIII
<b>F. Rebase</b>	<b>LX</b>
<b>G. Descripción Geométrica de la Sección de estudio</b>	<b>LXIII</b>
<b>Referencias</b>	<b>LXXII</b>



---

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

La correcta determinación de las condiciones de oleaje es un factor decisivo para abordar proyectos de ingeniería marítima. Las fuentes de información de oleaje, viento, corrientes y niveles del mar disponibles por áreas geográficas pueden ser muy variables así como las condiciones climáticas generales, existiendo desde modelos y mediciones a escala planetaria hasta programas de instrumentación y medida de ámbito nacional, regional o incluso local. Asimismo, la elección de las herramientas para la aproximación de las condiciones de oleaje y viento (principalmente) debe ser adecuada a la escala temporal y espacial de los datos. El diseño de una obra marítima precisa de la obtención de datos fiables que permitan caracterizar el clima marítimo en la zona de actuación del entorno del proyecto, para poder mejorar la calidad de los diseños. Este Trabajo Final de Máster tiene como primer objetivo solventar dicho problema sin importar el área geográfica estudiada ni la existencia de datos instrumentales en el entorno, dotando a las obras marítimas de la seguridad y funcionalidad adecuadas.

En segundo lugar, el Cambio Climático es un factor a tener en cuenta al diseñar una obra marítima. Numerosos estudios muestran como las predicciones de nivel del mar o intensidad de los temporales, agravarán las consecuencias de este fenómeno sobre las construcciones portuarias. Por ello, un nuevo reto se presenta: la determinación de los efectos del Cambio Climático sobre las estructuras marítimas concebidas. El presente documento tiene como segundo objetivo, cuantificar en qué medida el Cambio Climático ha afectado y afectará al clima marítimo de un entorno particular, el área marítima cercana a la futura ampliación del Puerto de Veracruz en México. El diseño del dique de Poniente de este proyecto será evaluado, determinando su respuesta ante el oleaje y nivel del mar predicho como consecuencia del Cambio Climático. Una vez obtenida la variación de estos dos parámetros, se destacarán las deficiencias observadas presentando la necesidad de incorporar, en una fase adicional de estudio de este fenómeno o coeficiente de corrección de altura de ola o nivel del mar en los futuros proyectos, los efectos del Cambio Climático en el diseño de diques futuros.

---

## 1.2. Estructura del Trabajo Final de Máster

El Trabajo Final de Máster sigue el desarrollo mostrado a continuación:

- Capítulo 2, estado del arte sobre los datos relativos al oleaje empleados en obras marítimas, así como estudio de las recientes investigaciones realizadas relacionando Cambio Climático y consecuencias de este sobre diques.
- Capítulo 3, descripción de la metodología elaborada para la obtención de datos de oleaje a escala global, incluyendo el desarrollo de un código de programación *Matlab*.
- Capítulo 4, estudio de la influencia del Cambio Climático sobre el diseño del dique de Poniente de Veracruz a través de una comparación de los resultados de diseños efectuados en distintos años (2010 y 2100), incluyendo la predicción de la evolución de las condiciones marítimas.
- Capítulo 5, conclusiones acerca del desarrollo llevado a cabo y datos para futuras investigaciones.

---

## Capítulo 2

# Estado del Arte

### 2.1. Importancia y tipos de bases de datos de oleaje

De acuerdo con la Ley 2/2011 de Puertos del Estado y de la Marina Mercante <sup>[1]</sup>, un puerto marítimo es el “conjunto de espacios terrestres, aguas marítimas e instalaciones que, situado en la ribera de la mar o de las rías, reúna condiciones físicas, naturales o artificiales y de organización que permitan la realización de operaciones de tráfico portuario, y sea autorizado para el desarrollo de estas actividades por la Administración competente”. Dentro de estos puertos marítimos, encontramos las instalaciones portuarias definidas como “obras civiles de infraestructura y las de edificación o superestructura, así como las instalaciones mecánicas y redes técnicas de servicio construidas o ubicadas en el ámbito territorial de un puerto y destinadas a realizar o facilitar el tráfico portuario”.

Las obras marítimas, objeto de este trabajo, quedarían definidas como los proyectos de obra civil que tienen la función de satisfacer una de las actividades de las anteriormente citadas dentro del puerto. Su localización es más amplia que la propia de los puertos marítimos, pudiendo ser realizadas en el mar, ría o en la ribera de estas. Este tipo de obras, por la importancia económica y social que pueden conllevar, necesitan garantizar unos niveles mínimos de seguridad, operatividad y funcionalidad propios de las infraestructuras portuarias en general.

El diseño en España de este tipo de obra, puede estar fundamentado en las Recomendaciones de Obras Marítimas (*Programa ROM*). En ellas se recoge la metodología que se recomienda a nivel institucional seguir, para realizar una obra de cualquier índole marítimo. En su primer tomo, *ROM 0.0*<sup>[2]</sup>, recoge cuáles son los principales condicionantes de Proyecto que afectan al diseño de una obra marítima. Éstos son:

- La ubicación espacial (emplazamiento) y temporal (fases de proyecto)
- Los requisitos de explotación
- La geometría del tramo y del terreno
- Las propiedades (parámetros) del medio físico y de los materiales
- Los agentes que pueden interferir con la obra y el entorno y sus acciones

La mayor parte de los condicionantes citados dependen de decisiones tomadas a la hora de decidir el emplazamiento o el propio diseño de la obra considerada. Sin embargo, existen agentes que pueden interferir con la obra y el entorno, cuya caracterización es importante antes de comenzar a proyectar. Estos agentes pueden influir en los requisitos de seguridad, funcionalidad y operatividad, fundamentos de la *ROM*, y por lo tanto su conocimiento es de gran importancia antes de diseñar cualquier obra. Entre ellos, podemos distinguir:

---

## Agentes climáticos atmosféricos

- Viento
- Lluvia

## Agentes climáticos marítimos

- Manifestaciones asociadas a la dinámica marina

En base a lo citado por la *ROM 0.0*<sup>[2]</sup> “*todo proyecto de obra marítima deberá llevar el anejo ‘Estudio de los agentes climáticos’, en el cual se detallen los datos y los métodos utilizados para una correcta descripción y evaluación de los agentes climáticos incluyendo los ensayos de laboratorio, medidas de campo y datos utilizados*”.

El presente documento contempla el análisis y determinación de los agentes climáticos atmosféricos y marítimos en cualquier localización del mundo, para poder llevar a cabo cualquier proyecto de obra marítima a nivel global. En función de la localización geográfica, el proyecto de obra marítima deberá responder ante la normativa correspondiente en el país de actuación. Esta toma de contacto con la materia toma como referencia las recomendaciones de obras marítimas, las ya mencionadas *ROM* españolas, por ser consideradas un referente internacional<sup>[3]</sup> y dada la inexistencia de una legislación común en materia de obra marítima a nivel global. La problemática que promueve dicho estudio nace de la falta de datos relativos al oleaje y viento en países en vías de desarrollo o subdesarrollados. Estos datos son esenciales para poder concebir una obra marítima cumpliendo unos requisitos básicos de seguridad, operatividad y funcionalidad. La información requerida se corresponde con los siguientes parámetros:

- La altura de ola: distancia vertical entre cresta y seno precedente de la ola.
- El periodo asociado a la ola: intervalo de tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas o dos pasos ascendentes (o descendentes) consecutivos por el nivel medio.
- La dirección de incidencia del oleaje: caracteriza la procedencia de este.

Actualmente los datos relativos al oleaje pueden clasificarse en las tres categorías a continuación desarrolladas:

- Visuales
- Instrumentales
- Sintéticos

Los datos visuales suelen tener poca fiabilidad<sup>[4]</sup> debido a su carácter subjetivo. El dato de oleaje de tipo visual puede indicar además del valor estimado de altura de ola, su dirección. Se tiene constancia de datos de dicho tipo desde aproximadamente el siglo XIX. Los datos de carácter visual son obtenidos por buques en navegación, alejados de la costa, por lo que proporcionan en la mayoría de los casos datos del oleaje en aguas profundas. Normalmente no se disponen datos de dicha categoría en situación de temporal, dado que los buques no suelen navegar en malas condiciones. Cabe destacar que la condición de aguas profundas se cumple cuando:

$$\frac{d}{L} \geq 0,50 \quad (2.1)$$

Y por otro lado estamos ante aguas someras cuando se cumple la siguiente expresión:

$$\frac{d}{L} \leq 0,050 \quad (2.2)$$

Siendo:

- $d$ : calado del fondo marino
- $L$ : longitud de onda de la ola estudiada

Los datos instrumentales tienen mucha fiabilidad. Éstos pueden ser escalares (sin una dirección asociada), o direccionales. Tomando de referencia los datos proporcionados por la red de boyas de *Puertos del Estado*, los datos anteriores al año 2000 eran escalares mientras que los posteriores han sido direccionales. Dependiendo del año de instalación de la boya, los datos pueden venir siendo registrados desde la década de 1990 o desde años más recientes. Además, en función de la profundidad de fondeo de la boya, los datos pueden ser referidos a aguas someras o aguas profundas, lo que puede hacer necesaria una fase de propagación del oleaje en el diseño de la estructura marítima. En caso de temporal, la boya puede registrar valores de oleaje siempre y cuando no alcance su estado límite y rotura.

Los datos sintéticos tienen una fiabilidad media. Mediante un modelo se pueden obtener muchos datos, sin embargo, estos provienen de un modelo, lo que le resta fiabilidad. Los datos obtenidos proporcionan una direccionalidad del oleaje. Hay constancia de que pueden obtenerse datos de oleaje sintéticos desde inicios del siglo XX. Los datos obtenidos pueden caracterizar el oleaje en aguas profundas. No existe problema de fallo del dispositivo de medición en caso de temporal pues es un dato sintético realizado a partir de un modelo numérico teórico.

Todo lo dictado queda recogido en la siguiente tabla 2.1

**Tabla 2.1:** Caracterización de los tipos de oleaje

Dato	Fiabilidad	Direccionalidad	Cantidad de años	Aguas profundas	Avería/Temporal
Visual	Poca	Sí	Desde s.XX	Sí	No hay navegación
Instrumental	Mucha	Escalar o Direccional	1990 o posterior	Sí/No	Condicionado
Sintético	Media	Sí	s.XX	Sí	Limitaciones del modelo

## 2.2. Efectos del Cambio Climático sobre el clima marítimo

El calentamiento global asociado al Cambio Climático es uno de los principales problemas que concierne a la sociedad moderna. Un incremento de las temperaturas globales puede ser el origen del aumento del nivel medio del mar como han señalado varios informes científicos en las últimas décadas<sup>[5]</sup>. En un futuro próximo, un continuo desarrollo de este fenómeno, puede provocar impactos serios en las zonas costeras.

En el año 2007, el *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, realizó proyecciones del posible incremento de la temperatura media global para finales del siglo XXI. El rango de aumento de temperatura oscila entre 2 y 7 grados centígrados según las previsiones<sup>[6]</sup>. En cuanto al aumento del nivel del mar, se espera que ascienda entre 26 y 55 centímetros para finales del siglo XXI, a causa del calentamiento global.

El aumento de la temperatura global, generará mayor evaporación del agua del mar, intensificando las precipitaciones y los ciclones tropicales. Se hacen esfuerzos para frenar el Cambio

---

Climático, ya sea reduciendo o limitando las emisiones de gases de efecto invernadero, desarrollo de energías renovables y uso de recursos no renovables con menor intensidad de carbono, entre otras medidas. Pese a estas, el futuro sigue siendo incierto y los modelos de predicción realizados por el *IPCC* recogen los posibles escenarios de variación del nivel del mar, en función de la eficacia de las decisiones tomadas por los países con respecto al problema.

Por todo ello, no es un asunto baladí ver la afección que este fenómeno, de importancia global, puede tener sobre las obras marítimas existentes. Numerosos autores han comenzado a investigar sobre este tema. *Isobe, 2013*<sup>[7]</sup>, realizó estudios sobre la influencia de una posible variación los diferentes parámetros de diseño sobre las estructuras. De este modo, resaltó de forma conceptual el posible problema en el diseño actual de estructuras, que infravaloran los posibles cambios de altura de ola y nivel del mar asociados al Cambio Climático. *Burcharth et al, 2014*<sup>[8]</sup>, destacó la necesidad de rediseñar ciertos diques daneses al verificar que estos no cumplirían los requisitos de funcionalidad y seguridad a causa de la variación de la altura de ola e incremento nivel del mar en el emplazamiento analizado. *Theoharris K. et al, 2015*<sup>[9]</sup> y *Nata et al, 2016*<sup>[10]</sup> mostraron las deficiencias de diques en varios puertos griegos ante posibles variaciones del nivel del mar, basando su estudio en los datos propuestos por el *IPCC* y proyecciones básicas del cambio de altura de ola obtenido mediante estudio de vientos. Finalmente, *Esteban M. et al, 2011*<sup>[11]</sup>, considera la necesidad de incluir de algún modo el Cambio Climático en el diseño de los diques.

Las últimas investigaciones al respecto centran sus estudios en los efectos del Cambio Climático sobre diques, resaltando la importancia de los fenómenos de rebase y la incidencia, en menor medida<sup>[9][10]</sup>, del aumento de la altura de ola considerada en el diseño del dique.

### **2.2.1. Efectos del Calentamiento Global en zonas costeras**

Se expondrán a continuación algunos de los impactos potenciales en las zonas costeras o portuarias del Cambio Climático y centraremos el estudio en los aspectos que conciernen al cambio en los datos de diseño de obras portuarias basando la explicación en los estudios de *Isobe, 2013*<sup>[7]</sup>.

El Cambio Climático es un factor esencial a considerar en la protección de estructuras costeras. El aumento del nivel medio del mar asociado a temporales más severos, suponen una amenaza sobre las estructuras costeras existentes. Este proceso aumenta el riesgo de crecidas, acelera la erosión de playas y provoca daños en estructuras costeras presentes. Todos estos cambios, tendrían efectos significativos sobre toda la zona costera. La figura siguiente refleja a modo de síntesis los principales problemas causados por estas variaciones.

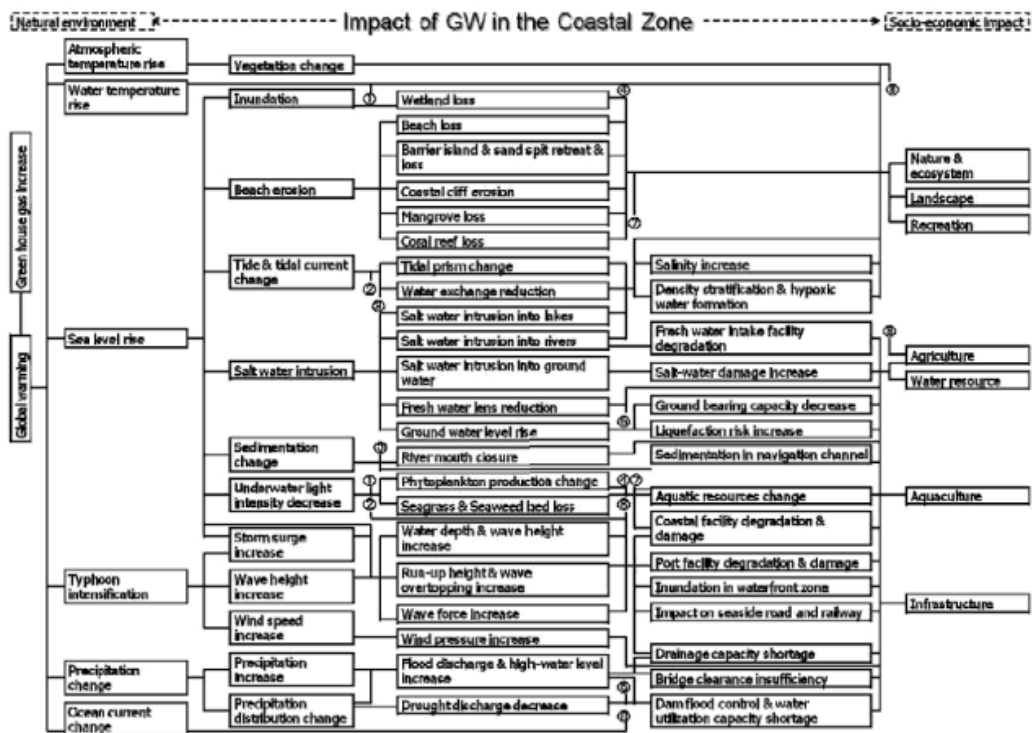


Figura 2.1: Impacto del Cambio Climático en áreas costeras *Isobe, 2013*<sup>[7]</sup>

El diseño inicial y modernización de las estructuras existentes deben estar adaptados a los retos de ingeniería costera que se presentan actualmente.

De acuerdo con lo dictado por el *IPPC* se prevé un incremento del nivel del mar. Efectos como el rebase, serán agravados por la crecida del nivel del mar<sup>[8][9][10]</sup>. Los estudios llevados a cabo por *Chini N. et al, 2012*<sup>[12]</sup> mostraron como el rebase sobre estructuras con periodo de retorno asociado de 100 años, se vería incrementado hasta diez veces por una crecida de 1 metro en el nivel del mar. En aguas someras, un mayor nivel del mar se asocia a una mayor altura de ola, dado que la rotura de ola es menos severa. *Isobe, 2013*<sup>[7]</sup>, analizó la influencia del incremento de los niveles de agua y velocidad de viento en efectos como el rebase, remonte, estabilidad del manto del dique y estabilidad de cajones en aguas someras. *Burcharth et al. (2014)* <sup>[8]</sup>, centró su investigación en proponer soluciones para “actualizar” los revestimientos en estructuras con manto rocoso, modificando el perfil estructural y añadiendo elementos. Para ello, ambos autores citados realizaron un análisis coste-eficiencia de las soluciones y concluyeron que las estructuras podían ser adaptadas mediante costes moderados.

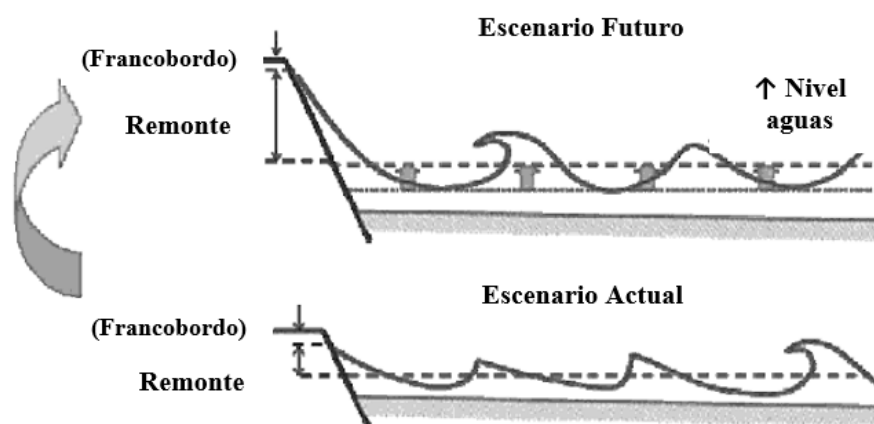
### 2.2.2. Efectos del Calentamiento Global en estructuras costeras

Con la aparición del Cambio Climático, varios fenómenos clave en la interacción oleaje-estructura pueden verse modificados. Los principales problemas serán desarrollados a continuación.

## Remonte

A causa del aumento del nivel medio del mar, los efectos asociados al remonte se ven incrementados en estructuras verticales o diques costeros. En la figura 2.2 se puede apreciar como, a consecuencia de una crecida del nivel medio del agua, el remonte experimentado es mayor. Esto provocaría la necesidad de incrementar la altura de la estructura presente con el fin de evitar problemas asociados al remonte.

Un incremento del nivel del mar, provocaría un cambio en este parámetro y una variación de las condiciones iniciales de diseño de la estructura. El calado cercano a la estructura aumentaría, acercando a la estructura el punto de rotura del oleaje. Esta situación hace que la altura de ola y el remonte a pie de la estructura sean mayores que en una situación de diseño. Por ello, la altura de coronación de la estructura debería ser aumentada teniendo en cuenta los dos factores que varían: el nivel del mar y la altura de ola.

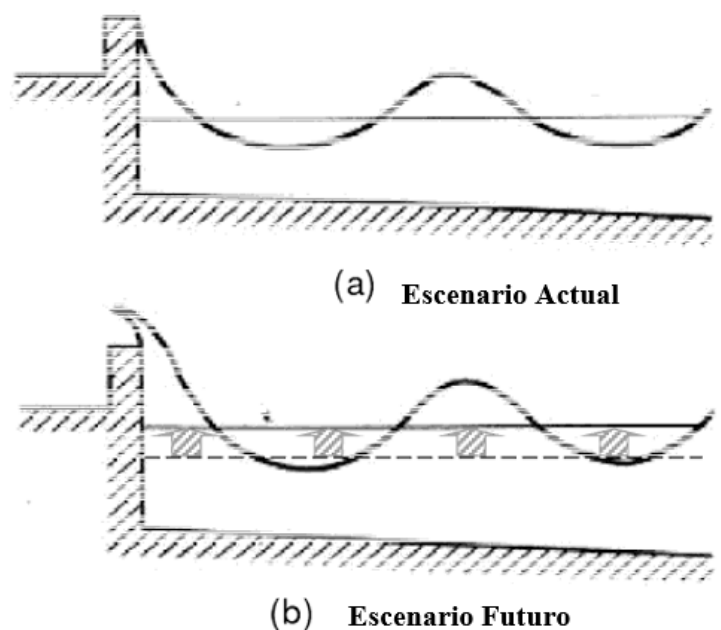


**Figura 2.2:** Secuencia del crecimiento del remonte a causa del incremento del nivel del mar  
*Isobe, 2013*<sup>[7]</sup>

## Rebase

Otro de los efectos asociados al crecimiento del nivel del mar y de la magnitud del oleaje, es el rebase. Dado que la altura de coronación de una estructura costera se corresponde con la cota mínima necesaria para cumplir con unos niveles de rebase, una pequeña modificación en el nivel del mar o altura de ola, modifica completamente estos niveles. La figura 2.3 ilustra esta situación.





**Figura 2.3:** Secuencia del incremento del rebase por crecida del NMM *Isobe, 2013*<sup>[7]</sup>

Tomando como base la fórmula propuesta por *EurOtop 2016*, ecuación 4.2<sup>[13]</sup>, para el diseño de estructuras frente a situación de rebase, se observa cómo a mayor altura de ola  $H_{m0}$ , una mayor altura de coronación  $R_c$  en la estructura es necesaria. Un incremento de altura de ola, generaría una mayor descarga  $q$  (l/s/m) en situación de temporal, agravando las consecuencias asociadas al rebase. Además, el incremento del nivel del mar, provocaría una disminución del francobordo de la estructura  $R_c$ . Los demás parámetros que definen la descarga durante el rebase son: el parámetro de similitud por rompiente  $\xi_{m-1,0}$ , el ángulo del talud  $\alpha$  y los coeficientes de reducción por: ángulo de incidencia de la ola  $\gamma_\beta$ , fricción  $\gamma_f$ , existencia de una berma  $\gamma_b$  y existencia de un muro  $\gamma_\nu$ . Un aumento de la altura de ola y del nivel del mar, afecta directamente a este parámetro de diseño.

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left(-4,75 \cdot \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_\nu}\right) \quad (2.3)$$

### Estabilidad del dique

La estabilidad del dique disminuye a causa del aumento de la flotabilidad de la estructura y la fuerza del oleaje. La situación queda recogida en la figura 2.4. Ambos factores, incremento del oleaje y crecimiento del nivel del agua, afectan directamente a la estabilidad de los diques.

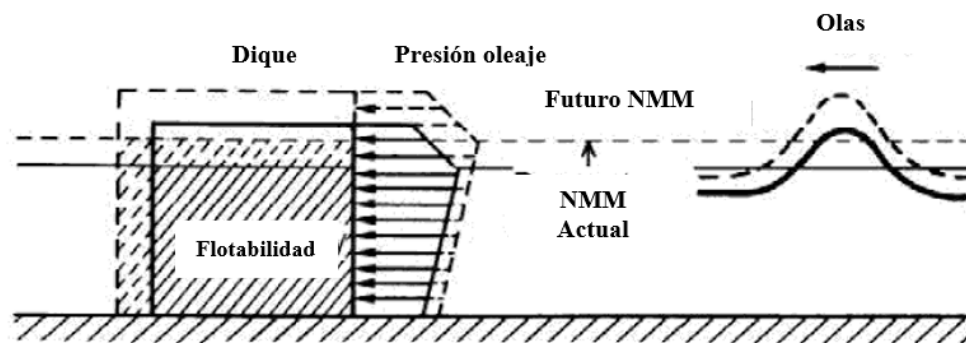


Figura 2.4: Impacto del aumento del NMM y magnitud del oleaje en un dique *Isobe, 2013*<sup>[7]</sup>

### Tamaño de elementos del manto

Haciendo un uso práctico de la formulación propuesta por *Hudson*, es posible ver la influencia de la altura de ola sobre el peso del elemento del manto a diseñar.

$$W = \frac{\rho_r \cdot g \cdot H^3}{K_D \cdot \left(\frac{\rho_r}{\rho} - 1\right)^3 \cdot \cot \alpha} \quad (2.4)$$

Dónde  $W$  es el peso necesario de la pieza del manto protector,  $H$  la altura de ola significativa de diseño,  $\rho_r$  es la densidad del elemento del manto,  $\rho$  es la densidad del agua,  $\alpha$  el ángulo de la pendiente del talud de la estructura,  $K_D$  el coeficiente de estabilidad de la pieza y  $g$  se corresponde con la aceleración de la gravedad.

De acuerdo con la ecuación 2.4, el peso requerido viene incrementado proporcionalmente por el cubo de la altura de ola, lo que significa que una pequeña variación de la altura de ola puede resultar en un incremento importante del peso del elemento del manto. Tanto la altura de ola como el aumento del nivel del mar provocan cambios en el peso del elemento diseñado. Esto significa que con las previsible variaciones de NMM y altura de ola, el manto existente en algunos diques perderá estabilidad.

### 2.3. Resumen del capítulo 2

El oleaje y el nivel del mar son factores clave para el diseño de estructuras marítimas. Condicionan el diseño y dimensionamiento de aspectos esenciales de la estructura: cota de coronación y características del elemento que conforma el manto. Siguiendo con los estudios realizados hasta la actualidad, este proyecto tiene como objetivo destacar la influencia del Cambio Climático a nivel global, tomando el caso de estudio en México. La metodología empleada seguirá los pasos ya propuestos por investigaciones realizadas y propondrá pasos a seguir en caso de querer realizar un estudio similar en cualquier parte del mundo. Se mostrará como obtener los datos de oleaje en cualquier área geográfica deseada y ver cómo ha evolucionado la magnitud de la altura de ola, para destacar la posible influencia en futuros diseños y modificaciones estructurales en obras marítimas que dependen de este parámetro tan influyente. Además se identificará la posible necesidad de incluir de algún modo el efecto del Cambio Climático a la hora de diseñar un dique.

---

## Capítulo 3

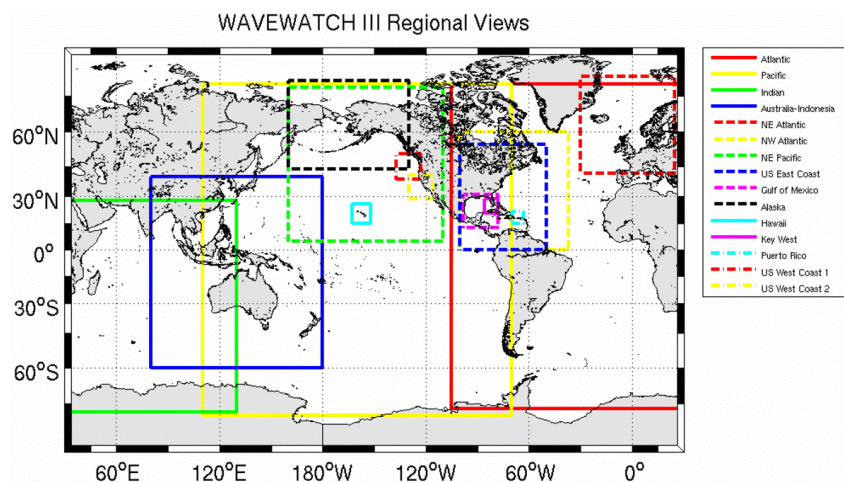
# Investigación

### 3.1. Revisión de la literatura científica y estudio bases de datos de oleaje

Esta sección describe las principales bases de datos de oleaje existentes y consultables mediante herramientas web dispuestas por empresas, instituciones u organismos públicos. Dicha descripción viene fundamentada por una revisión de la literatura existente, así como una búsqueda con cierto nivel de detalle de las diferentes bases de datos vía interfaz web. Esta búsqueda tiene como objetivo final determinar una metodología de obtención de datos de oleaje fiables en cualquier zona geográfica del mundo.

#### 3.1.1. NOAA – Wave Watch III

*WW-III* es un modelo mediante el cual es posible obtener series sintéticas de datos de oleaje en un emplazamiento concreto.. Es la tercera generación de modelos de oleaje creados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. Los datos son obtenidos por medio de un modelo analítico resuelto mediante métodos numéricos empleando parametrización física de los elementos participantes. El desarrollo y ecuaciones relativas al modelo quedan fuera del alcance de este trabajo, por lo tanto, una descripción básica del funcionamiento del modelo se muestra con el fin de dar al lector una visión generalista de la metodología empleada por este. Para información más detallada, puede referirse al Manual<sup>[14]</sup>. *WW-III* se centra en el análisis espectral del oleaje, transformando la información espectral en un determinado oleaje con una determinada dirección. Presupone que las propiedades del medio (profundidad del fondo marino y corriente) así como el campo de variación del oleaje varían en escalas temporales y espaciales más grandes que la escala de variación de una única ola. En cuanto a la extensión geográfica cubierta por este modelo, cubre una amplia región del mundo con sus datos sintéticos. Como queda reflejado en la figura 3.1 cubre datos en casi todas las aguas existentes, excepto en islas del océano Pacífico.



**Figura 3.1:** Área geográfica cubierta por WW-III (NOAA)<sup>[15]</sup>

Los primeros datos obtenidos datan del año 1979, existiendo datos disponibles hasta fechas recientes (primeros meses del año 2017). Los datos se actualizan periódicamente y son consultables tras un procesado previo vía un algoritmo para dicho efecto. Actualmente, existe una base de datos proporcionada por la *NOAA*, con datos de oleaje cada tres horas. Hasta el momento la organización americana ha realizado dos fases de estudio de datos. La segunda de ellas empleando un modelo más riguroso de transformación de datos atmosféricos en datos de oleaje.

- Fase 1: desde 1979 hasta 2009 empleando *WW-III* v3.14
- Fase 2: desde 1979 hasta 2009 empleando *WW-III* v5.16

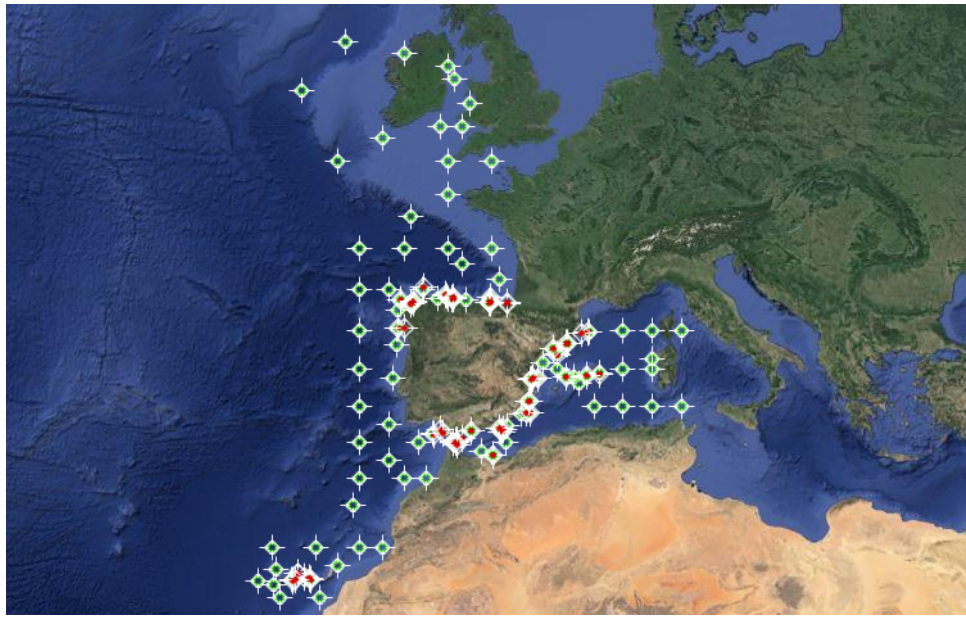
Recurriendo a la herramienta *WW-III* se obtienen datos brutos de series históricas relativas al oleaje (altura de ola, dirección, periodo y viento) durante el periodo deseado, siempre y cuando esté comprendido entre las fechas citadas.

**Tabla 3.1:** Resumen características WW-III

Clasificación	
Base de datos	NOAA , WW-III
Área Geográfica	Aguas y costas del Atlántico, Pacífico, Índico y Mediterráneo
Tipo de dato	Sintético
Periodo de datos	1979-presente
Obtención de datos	Necesidad código informático

### 3.1.2. Puertos del Estado

Desde la página web de *Puertos del Estado*<sup>[16]</sup> se ofrece la posibilidad de descargar libre y gratuitamente productos elaborados a partir de las series de datos medidos por boyas reales y puntos sintéticos (modelo aplicado). Son consultables los informes anuales para cada estación de medida en el año meteorológico (desde Diciembre del año anterior hasta Noviembre, ambos meses incluidos). Estos informes están en formato estándar y tienen una actualización periódica. Por otro lado, se pueden consultar informes de régimen medio y extremal para el oleaje y el nivel del mar en aquellas estaciones en las que se tienen series de datos medidos lo suficientemente extensas como para considerar los resultados estadísticamente representativos. La red de Puertos del Estado proporciona datos alrededor de la costa española y mares territoriales españoles. El área cubierta por dicha base de datos queda limitada a aguas contiguas al territorio español.



**Figura 3.2:** Área geográfica cubierta por Puertos del Estado<sup>[16]</sup>

Los primeros datos obtenidos datan de la década de 1990, obteniéndose datos aproximadamente desde 1999 hasta hoy en día (2017). Los datos se actualizan constantemente y los informes anualmente. La red de Puertos del Estado proporciona datos instrumentales y sintéticos a su vez. El usuario puede determinar la naturaleza de los datos mediante una leyenda de colores (*rojo*: dato instrumental y *verde*: dato sintético). Además, dicho ente permite consultar informes con datos previamente analizados estadísticamente.

**Tabla 3.2:** Resumen características Puertos del Estado

Clasificación	
Base de datos	Puertos del Estado
Área Geográfica	Aguas territoriales españolas
Tipo de dato	Sintético - Instrumental
Periodo de datos	1990 - presente
Obtención de datos	Acceso libre

### 3.1.3. Ifremer

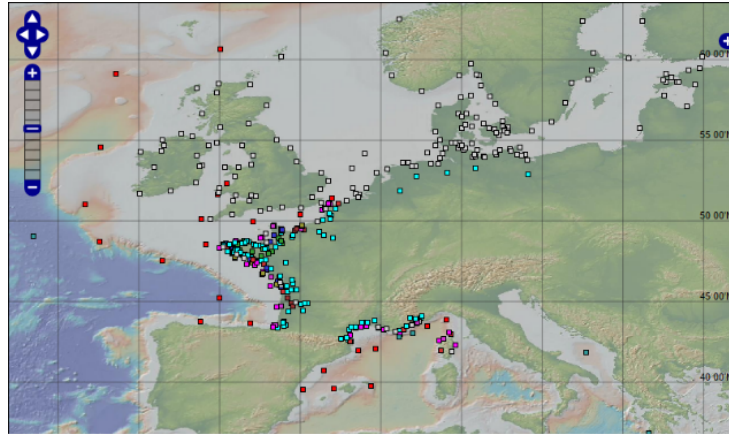
El instituto francés de investigación sobre el medio marino *Ifremer*, pone a disposición de cualquier usuario una plataforma interactiva que recoge numerosas redes de estaciones de medición que caracterizan física y químicamente el oleaje. Se puede estudiar, en algunas de las estaciones de medida, la altura de ola significativa, la altura de ola máxima y dirección del viento, lo que mediante las suposiciones pertinentes, puede ser útil para caracterizar el oleaje. Tras analizar las diferentes redes que presentes en la plataforma, se determina que contienen información útil, con respecto a la caracterización del oleaje, las siguientes redes de medición:

- Red *Candhis*: Centro de archivos de oleaje in situ nacional. Proporciona, datos brutos cada hora, gráficos mensuales de altura de ola y datos analizados estadísticamente.
- Red *Shom Ronim*: Red de observación de nivel del mar. Utilización de mareógrafos para captar información relativa al oleaje. De esta red solo una boya es útil para el análisis.

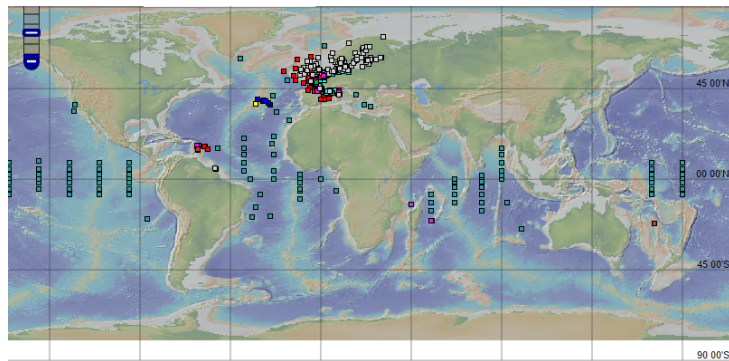
---

La boya situada cerca de la isla de Mayotte (alrededor de Madagascar), proporciona datos relativos a la altura de ola.

La plataforma de *Ifremer* incorpora varias redes de medida de oleaje. Uniendo todas ellas, se cubre la costa francesa, Madagascar, antiguas colonias francesas en Centro-América, y un tramo de la dorsal oceánica (cuya información carece de importancia). Se refiere al lector al anejo A en caso de querer consultar cómo obtener dichos datos.



**Figura 3.3:** Área geográfica cubierta por Ifremer en Europa<sup>[17]</sup>



**Figura 3.4:** Área geográfica cubierta por Ifremer en el mundo<sup>[17]</sup>

La serie de datos obtenidos depende del año de colocación de la estación de medida. En muchos casos, las series de datos son relativamente cortas, pues la mayoría de las boyas se colocaron a partir del año 2000 y han tomado datos hasta la actualidad o durante periodos de tiempo determinados.

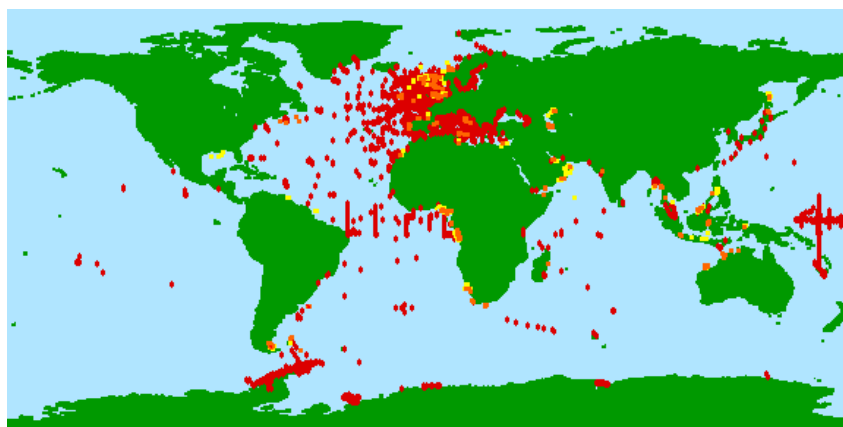
La mayoría de datos proporcionados son instrumentales. Dependiendo de la red estudiada los datos proporcionados serán datos brutos o analizados estadísticamente. En el caso de las tres redes mencionadas anteriormente, permiten consultar datos tanto brutos como analizados estadísticamente.

**Tabla 3.3:** Resumen de características de Ifremer

Clasificación	
Base de datos	Ifremer
Área Geográfica	Aguas territoriales francesas y antiguas colonias francesas
Tipo de dato	Instrumental
Periodo de datos	Por lo general 2000 - presente
Obtención de datos	Acceso libre

### 3.1.4. Simorc

Empresas de extracción minera como *British Petroleum*, *Total* o *Shell*, disponen de una red de estaciones de medidas cercanas a sus plataformas de extracción. Mediante la aplicación dispuesta en el portal web de *Simorc*, se puede acceder a informes.



**Figura 3.5:** Área geográfica cubierta por Simorc en el mundo

Entre las tres compañías citadas y la base de datos *SeaDataNet Metocean data*, cubren una región amplia en el mundo. Los datos recogidos son registrados mediante instrumentación o muestran resultados sintéticos.

De acuerdo con la información proporcionada por la administración de dicha plataforma, actualmente la base de datos *Simorc* contiene más de 5300 series de datos, cubriendo más de 2000 años de metadatos relativos a océanos. En caso de requerir información acerca del oleaje en algún punto específico, es necesario contactar con las empresas citadas y realizar una petición formal. Más información sobre esta base de datos viene recogida en el anejo A. Dependiendo del punto de estudio, los periodos de recopilación de datos son variables.

**Tabla 3.4:** Resumen de características de Simorc

Clasificación	
Base de datos	Simorc
Área Geográfica	Aguas marítimas de fachada Este de América, Europa, Asia, África
Tipo de dato	Sintético - Instrumental
Periodo de datos	Muy variable
Obtención de datos	Petición formal necesaria

### 3.1.5. Magic Sea Weed

*Magic Sea Weed* es un portal de predicciones meteorológicas para actividades en aguas marítimas en Internet. Es una base de datos interesante porque, de acuerdo con su descripción, contiene información detallada de condiciones de oleajes históricos y miles de fotografías. Las

mediciones se realizan mediante boyas marinas (dato instrumental) y webcams (observación) entre otras herramientas.

*Magic Sea Weed* cubre casi 3000 playas en 180 países alrededor del mundo. Para obtener un mayor detalle sobre si la localización indicada contiene puntos estudiados por dicha compañía, es necesario realizar una búsqueda sencilla en su portal web.

La plataforma web proporciona datos históricos relativos al clima marítimo en el entorno de la playa que se desee estudiar. Sin embargo, sólo figuran series históricas de oleaje con un máximo de 15 días de antigüedad. *Magic Sea Weed* realiza diariamente un registro de características de oleaje, por lo que mediante una petición formal o suscripción a la plataforma, es posible consultar series de datos mayores a 15 días.

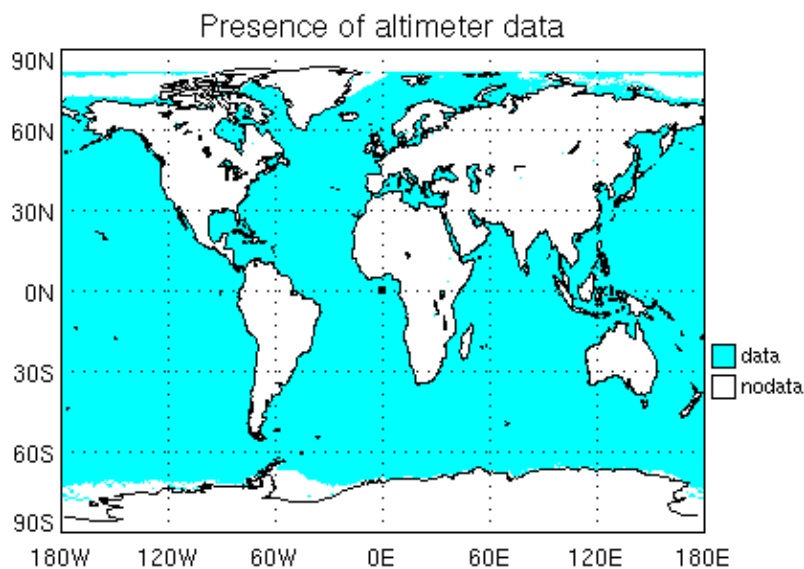
**Tabla 3.5:** Resumen de características de Magic Sea Weed

Clasificación	
Base de datos	Magic Sea Weed
Área Geográfica	Playas de todo el mundo
Tipo de dato	Sintético - Instrumental
Periodo de datos	Variable
Obtención de datos	Petición formal de las series históricas necesaria

### 3.1.6. BMT Argoss

*BMT Argoss* proporciona datos de alta precisión relativos al viento y oleaje en cualquier parte del mundo.

Sus usuarios pueden especificar el área geográfica de estudio y descargar, mediante suscripción, los datos estadísticos o brutos relativos al oleaje del entorno analizado. Sus datos son sintéticos y basados en un modelo calibrado a largo plazo, según la región de estudio y obtenidos mediante observaciones de satélite.



**Figura 3.6:** Área geográfica cubierta por BMT Argoss<sup>[18]</sup>

La base de datos proporciona información desde el año 1992 hasta el presente.



---

**Tabla 3.6:** Resumen de características de BMT Argoss

Clasificación	
Base de datos	BMT Argoss
Área Geográfica	Global
Tipo de dato	Sintético
Periodo de datos	1992 - presente
Obtención de datos	Previa suscripción

### 3.1.7. Bases de datos instrumentales de interés

En esta sección se citan bases de datos instrumentales en función del continente de estudio. Dicho listado puede ser de utilidad para ajustar datos sintéticos en la práctica profesional. En estos listados se recogen algunas de las bases de datos citadas.

**Tabla 3.7:** Bases de datos instrumentales en Europa (*Último acceso Mayo 2017*)

País	Organismo
Ártico	FUGRO [ <a href="http://www.oceanor.info/barents_sea/">http://www.oceanor.info/barents_sea/</a> ]
España	Puertos del Estado [ <a href="http://www.puertos.es/">http://www.puertos.es/</a> ]
Francia y colonias	CANDHIS [ <a href="http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/">http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/</a> ]
Grecia	Poseidon [ <a href="http://www.poseidon.hcmr.gr/onlinedata.php">http://www.poseidon.hcmr.gr/onlinedata.php</a> ]
Irlanda	Marine Institute [ <a href="https://www.marine.ie/Home/site-area/data-services/data-servicesdata/buoys">https://www.marine.ie/Home/site-area/data-services/data-servicesdata/buoys</a> ]
Islandia	IMA [ <a href="http://www.vegagerdin.is/">http://www.vegagerdin.is/</a> ]
Islas Feroe	[ <a href="http://lv.fo/database/">http://lv.fo/database/</a> ]
Israel	HMMS [ <a href="http://isramar.ocean.org.il/isramar2009/Hadera/default.aspx/">http://isramar.ocean.org.il/isramar2009/Hadera/default.aspx/</a> ]
Italia	Idromare [ <a href="http://www.idromare.it/">http://www.idromare.it/</a> ]
Mar Báltico	FIMR [ <a href="http://en.ilmatieteenlaitos.fi/wave-height">http://en.ilmatieteenlaitos.fi/wave-height</a> ]
Reino Unido	MAWS [ <a href="http://www.metoffice.gov.uk/public/weather/marine-observations/?tab=marineObsMap">http://www.metoffice.gov.uk/public/weather/marine-observations/?tab=marineObsMap</a> ]
Portugal	HIP [ <a href="http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php">http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php</a> ]
-	Simorc [ <a href="http://www.simorc.org/welcome.asp">http://www.simorc.org/welcome.asp</a> ]

**Tabla 3.8:** Bases de datos instrumentales en Norte América (*Último acceso Mayo 2017*)

País	Organismo
Canadá	MEDS [ <a href="http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/waves-vagues/index-eng.htm">http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/waves-vagues/index-eng.htm</a> ]
Estados Unidos	NODC [ <a href="https://www.nodc.noaa.gov/BUOY/">https://www.nodc.noaa.gov/BUOY/</a> ]

---

**Tabla 3.9:** Bases de datos instrumentales en Asia (*Último acceso Mayo 2017*)

País	Organismo
China	NMEFC [ <a href="http://dell1500sc.nmefc.gov.cn/neargoos/protected/index.htm">http://dell1500sc.nmefc.gov.cn/neargoos/protected/index.htm</a> ]
Corea	KORDI [ <a href="http://near-goos.kordi.re.kr/">http://near-goos.kordi.re.kr/</a> ]
India	NOIT [ <a href="http://www.niot.res.in/">http://www.niot.res.in/</a> ]
Japón	NOWPHAS [ <a href="https://nowphas.mlit.go.jp/eng/">https://nowphas.mlit.go.jp/eng/</a> ]

**Tabla 3.10:** Bases de datos instrumentales en Oceanía (*Último acceso Mayo 2017*)

País	Organismo
Australia	Bureau of Meteorology [ <a href="http://www.bom.gov.au/products/IDS65031.shtml">http://www.bom.gov.au/products/IDS65031.shtml</a> ]

---

## 3.2. Elección de base de datos NOAA y descripción

A partir de las bases de datos de oleaje expuestas, la proporcionada por la *NOAA* cubre una mayor extensión geográfica, facilitando datos a partir de un modelo implementado, en cualquier parte del globo terráqueo y gratuitos. A diferencia del resto de bases de datos que proporcionan resultados de mediciones, local o regionalmente, en su mayoría. Estos últimos pueden ser de utilidad en caso de querer calibrar los resultados obtenidos mediante el modelo de *WW-III*.

En base a la información meteorológica recopilada desde la *NOAA*, han podido obtener datos de oleaje a través del modelo *WW-III*. Éste propaga el oleaje mediante un modelo espectral de generación por oleaje, dando al usuario la posibilidad de emplear los datos obtenidos directamente por su modelo. Los datos de la *NOAA* muestran resultados del parámetro estudiado con valor significativo cada 3 horas.

La serie de datos consta de datos en un periodo de 31 años, hasta la fecha de publicación de este *TFM*, por lo que un análisis estadístico posterior de los datos brutos permitirá obtener una función que se ajuste a estos y represente la evolución de los parámetros estudiados según un periodo de retorno asociado. En caso de no disponer de red de datos instrumentales en el entorno de estudio, la base de datos de la *NOAA* puede ser de gran utilidad para la fase de diseño del proyecto. Existen zonas costeras en países africanos o sudamericanos, donde las mediciones de datos de oleaje son menos frecuentes o inexistentes. En estas zonas, abordar un proyecto marítimo necesita de una caracterización fiable del oleaje. Es por ello, que recurrir al modelo propuesto es una buena opción para poder realizar un correcto diseño de las obras marítimas.

Sólo contempla el análisis en aguas suficientemente profundas, por lo que en caso de que la obra diseñada se sitúe en aguas someras, será necesario efectuar un proceso de propagación. Para ello debe disponerse la batimetría desde el punto del modelo analizado hasta el emplazamiento de la obra. Esta información puede ser obtenida en *Navionics Webapp*<sup>[19]</sup>. La necesaria propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la zona de actuación y las hipótesis tenidas en cuenta para la introducción de datos en los ábacos del *Shore Protection Manual*<sup>[20]</sup> serán tratadas en apartados posteriores. Programas informáticos como el *Swan*<sup>[21]</sup> o *SwanOne*<sup>[21]</sup> realizan la propagación en función del perfil batimétrico con mayor detalle, sin embargo, a falta de bases de datos muy rigurosas de batimetría, se empleará para dicho efecto lo citado por el *Shore Protection Manual*.

Las principales características relativas al tipo de dato, área geográfica cubierta y periodo de datos ofrecidos quedan recogidas en la tabla 3.1. Este apartado se centra en la explicación y funcionamiento de dicha base de datos, de la que posteriormente se pueden extraer los datos relativos al oleaje.

### 3.2.1. Ámbito de estudio

En base al emplazamiento de la obra, los datos de oleaje necesarios para su diseño se situarán en un área geográfica concreta. La base de datos de la *NOAA* proporciona bases de datos relativos a zonas con mayor precisión o una base de datos global, donde la precisión es menor.

*WW-III* funciona mediante celdas o *grids* que conforman las aguas, excluyendo las continentales. Todas las cuadrículas toman datos de la batimetría *ETOPO 1* como referencia. *ETOPO 1* es un modelo del relieve de la Tierra con precisión de 1 minuto que integra la topografía terrestre

y batimetría global. Fue concebido mediante numerosas bases de datos tanto regionales como globales<sup>[22]</sup>. En función del área geográfica de estudio, se puede escoger un rango de resolución determinado, cuya nomenclatura se recoge en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9.

Name	Grid label	Latitude	Longitude	Resolution (lat x lon)
Global	glo_30m	90°S : 90°N	180°E : 180°W	1/2° x 1/2°
Arctic	ao_30m	55°N : 90°N	180°E : 180°W	1/2° x 1/2°
Mid-Globe	mid_30m	65°S : 65°N	180°E : 180°W	1/2° x 1/2°
Antarctic	ac_30m	90°S : 55°S	180°E : 180°W	1/2° x 1/2°

**Figura 3.7:** Nomenclatura de las celdas del modelo (separación 30 minutos), rango y resolución<sup>[23]</sup>

Name	Grid label	Latitude	Longitude	Resolution (lat x lon)
East Coast US	ecg_10m	0°N : 55°N	100°W : 50°W	1/6° x 1/6°
West Coast US	wc_10m	25°N : 50°N	150°W : 110°W	1/6° x 1/6°
Alaska	ak_10m	44°N : 75°N	140°E : 120°W	1/6° x 1/4°
Pacific Isl.	pi_10m	20°S : 30°N	130°E : 145°W	1/6° x 1/6°
Australia	oz_10m	50°S : 0°N	105°E : 165°E	1/6° x 1/6°
North Sea	nsb_10m	42°N : 75°N	28°W : 31°E	1/6° x 1/4°
Mediterranean	med_10m	30°S : 48°N	7°W : 43°E	1/6° x 1/6°
NW Indian O.	nwio_10m	20°S : 31°N	30°E : 70°E	1/6° x 1/6°

**Figura 3.8:** Nomenclatura de las celdas del modelo (separación 10 minutos), rango y resolución<sup>[23]</sup>

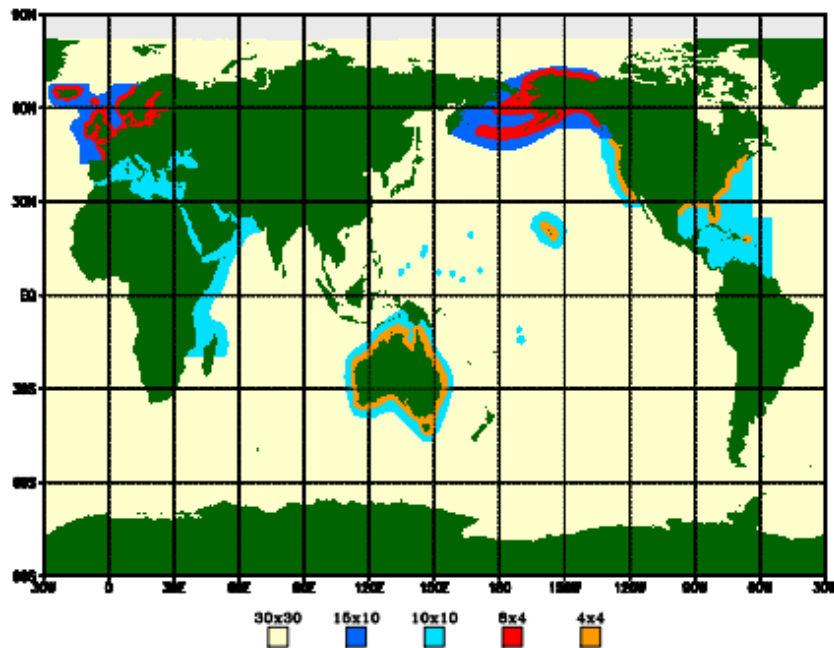
Name	Grid label	Latitude	Longitude	Resolution (lat x lon)
East Coast US	ecg_4m	15°N : 47°N	101°W : 60°W	1/15° x 1/15°
West Coast US	wc_4m	15°N : 50°N	165°W : 116°W	1/15° x 1/15°
Alaska	ak_4m	48°N : 74°N	165°E : 122°W	1/15° x 2/15°
Australia	oz_4m	50°S : 0°N	105°E : 165°E	1/15° x 1/15°
North Sea	nsb_4m	42°N : 68°N	28°W : 31°E	1/15° x 2/15°

**Figura 3.9:** Nomenclatura de las celdas del modelo (separación 4 minutos), rango y resolución<sup>[23]</sup>

Conocida la región de estudio, es necesario conocer la base de datos a la que se recurrirá, del modo que será enunciado en posteriores apartados. A efectos de este proyecto, el estudio se centra en el análisis de datos de oleaje en cualquier parte del mundo, por lo que el código de obtención de información relativa al oleaje se centrará en la base de datos global. El modelo de la base de datos global presenta celdas de dimensiones 30'x30'.

De modo genérico, las dimensiones de la celda del modelo de estudio serán aproximadamente de 55 km x 51 km. Esto significa que cualquier punto situado en el entorno de esa área proporcionará los mismos valores. Por lo tanto, a la hora de escoger los puntos de estudio, se debe prestar especial atención a la distancia entre estos puntos, para evitar repetir celda de estudio en el modelo que proporcione los mismos datos.

A modo de resumen de las tablas expuestas, la siguiente imagen recoge la resolución más precisa de las celdas del modelo en función del entorno de estudio.



**Figura 3.10:** Dominio Global. Resolución de las celdas del modelo expresada en minutos<sup>[23]</sup>

### 3.2.2. Obtención de archivos

El procedimiento seguido para obtener los archivos queda descrito con detalle en el anejo A

### 3.2.3. Desarrollo código para obtener datos de oleaje

Tomando como base el código *Matlab* dispuesto en el trabajo académico de *Niclasen, B. A., 2010:13* <sup>[24]</sup> se ha desarrollado un código *Matlab* capaz de automatizar la lectura de la base de datos proporcionada por la *NOAA* con el fin de disponer una hoja de cálculo con el listado de las variables deseadas en orden cronológico, para poder ser analizadas estadísticamente después.

Los códigos mencionados proporcionan listados de datos referentes a la altura de ola significativa, dirección del oleaje o periodo pico del oleaje. Quedan recogidos en el anejo B del documento.

---

### 3.2.4. Comparación con la base de datos Argoss BMT

Un estudio llevado a cabo en fases posteriores del proyecto ha mostrado que la diferencia media entre los datos proporcionados por la *NOAA* y *Argoss BMT* (mediante suscripción) es del orden de un 6,3%. Estos resultados se han obtenido mediante el análisis de los *Puntos 1, 2 y 3* descritos en el apartado 4.7.1. El periodo temporal de estudio viene limitado por los datos proporcionados por ambas bases de datos, como puede observarse en las tablas 3.6 y 3.1. El periodo de comparación va desde el año 1992 hasta el años 2009 ambos incluidos. La tabla siguiente recoge los resultados correspondientes a esta comparación básica.

**Tabla 3.11:** Comparación de datos entre las series 1992-2009 de la *NOAA* y *BMT Argoss*, tras analizar 52812 datos de altura de ola  $H_s$

Punto	$H_s$ promedio (m) <i>NOAA</i>	$H_s$ promedio (m) <i>BMT Argoss</i>	$\Delta H_s$ (%)
Punto 1	1,12	1,18	6,00
Punto 2	1,14	1,20	5,30
Punto 3	1,10	1,19	7,70

### 3.3. Resumen del capítulo 3

Las bases de datos mencionadas en dicho capítulo permiten al lector conocer mejor las fuentes de información relativa a datos de oleaje tan importantes en la fase de diseño de un proyecto. En caso de no poder hacer uso de una base de datos instrumental, debido a la inexistencia de ella, es posible emplear datos sintéticos proporcionados por modelos como es el caso del *WW-III* que, mediante observaciones meteorológicas, proporciona datos con cierta fiabilidad relativos al oleaje. Ante la inexistencia de datos, recurrir a un modelo como este puede ser la opción más económica, que puede ser apoyada por estudios de oleaje en el entorno de la obra, si los plazos del diseño lo permiten.

Mediante el código proporcionado, el usuario puede transformar los archivos proporcionados por la *NOAA* en una hoja de cálculo conteniendo lecturas de oleaje del modelo cada 3 horas, por un periodo de 31 años (1979-2009 inclusive). Una vez obtenidos estos datos “brutos”, deberán ser analizados estadísticamente de modo que puedan ser empleados para fines ingenieriles. Dicho análisis será explicado y realizado en posteriores capítulos.

---

## Capítulo 4

# Evaluación de los efectos del Cambio Climático sobre el dique de Poniente de la ampliación del Puerto de Veracruz

### 4.1. Introducción

Los objetivos de este capítulo son varios. En primer lugar mostrar la utilidad del código implementado para obtener datos de oleaje en un emplazamiento que carece de datos instrumentales. Por otro lado, se quiere cuantificar el grado de afección del Cambio Climático al diseño del manto de una obra marítima de principal importancia en los puertos, como es el dique. El caso práctico se centra en el Proyecto de ampliación Norte del Puerto de Veracruz y en particular, el dique de Poniente. El dique de poniente diseñado en 2010 será sometido a condiciones marítimas futuras. Los parámetros considerados en la comparación de diseños son la estabilidad del manto y el rebase. El diseño actual será comparado con un hipotético diseño realizado en 2100. Para ello, se deberán analizar las previsiones de crecida del nivel del mar y de altura de ola. La determinación de la proyección de altura de ola se realiza mediante un análisis de este dato en dos periodos: 1979-1994 y 1995-2010. Realizando un análisis estadístico del oleaje en estos periodos se determina cómo ha variado el oleaje en los últimos 31 años, pudiendo realizar una proyección a futuro.

El diseño del manto viene marcado por una altura de ola considerada. El objetivo de esta parte es ver la evolución temporal de los datos analizados con el fin de determinar como varía la altura de ola y consecuentemente ver cómo el cambio climático afecta a esta obra en particular, pudiendo realizar diseños poco seguros o que no cumplan la función para la que fue diseñada. Para ello, se extraerán series de datos mediante el código mostrado en A y mencionado en el capítulo 3. Se extraerán datos para tres periodos:

- Enero 1979 - Diciembre 2009
- Enero 1979 - Diciembre 1994
- Enero 1995 - Diciembre 2010

Dichas series serán analizadas estadísticamente con el fin de caracterizar el oleaje asociado al periodo de retorno de diseño. La serie 1979-2010 es necesaria para obtener el periodo de retorno de la ola de diseño, no especificado por el documento oficial consultado. De este modo se podrá comparar como ha evolucionado el oleaje asociado al periodo de retorno de diseño en los dos otros periodos de tiempo (1979-1994 y 1995-2010).

La comparación realizada permitirá realizar predicciones sobre posibles cambios del oleaje para



finales del siglo XXI. La extrapolación a futuro de la variación de la altura de ola se combina con posibles escenarios de variación del nivel del mar expuestos por el *IPCC*.

Una vez obtenidos estos parámetros de diseño para el año 2100, se podrá ver en qué medida la estructura está infradimensionada y qué efectos tiene el Cambio Climático sobre esta.

## 4.2. Antecedentes y motivación del Proyecto

El desarrollo potencial del puerto de Veracruz depende del crecimiento en el volumen de importaciones y exportaciones de su área de influencia. En 2010 ésta afectaba a cerca de 60 millones de consumidores de los 17 estados de la República Mexicana. Estos datos son un reflejo de como el crecimiento de la economía Mexicana está ligado al incremento de sus importaciones y exportaciones.



**Figura 4.1:** Vista aérea Puerto de Veracruz actual<sup>[25]</sup>

De acuerdo con los diferentes informes realizados por las Autoridades Competentes acerca de la influencia portuaria en la economía del entorno, el tráfico total del actual Puerto de Veracruz aumentó anualmente con un 14 % de media entre 1995 y 2000. En los periodos desde 2000 a 2005, el incremento medio fue del orden del 3%.

En los años posteriores a 2005, dicho crecimiento fue poco significativo. Una de las razones principales de ello, es la limitada longitud de atraque en los muelles de carga especializada para contenedores, la profundidad limitada para el atraque de buques con calado superior a los 13,00 m, así como la falta de espacios en el recinto portuario que permitan la creación de nuevos puntos de atraque.

El desarrollo del proyecto de ampliación del Puerto de Veracruz obedece a la necesidad de atender los incrementos sustanciales de carga que llegan al puerto, sumado al crecimiento global de la economía y de nuevas tecnologías aplicadas en el comercio marítimo, pudiéndose ver reflejados en buques de eslora superior a los 390 metros, calados de más de 15 metros y mangas del entorno de los 50 metros, que deben ser manipulados por infraestructuras portuarias adaptadas, obteniendo una disminución en los costes globales en la cadena de transporte.

El objetivo del proyecto es atender las demandas de la región central del país en materia de exportación e importación de mercancías por vía marítima, con el objetivo de cumplir con los puntos fijados en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 de México.

### 4.3. Diseño actual

La ampliación del Puerto de Veracruz atendiendo a la *Declaración de Impacto Ambiental*<sup>[26]</sup> consta de una serie de obras portuarias. Las figuras 4.2, 4.3b y 4.3a, resumen las principales actuaciones contempladas.



Figura 4.2: Terminales contempladas en la Ampliación



(a) Dique de Oriente

(b) Dique de Poniente

Figura 4.3: Ubicación de los dique

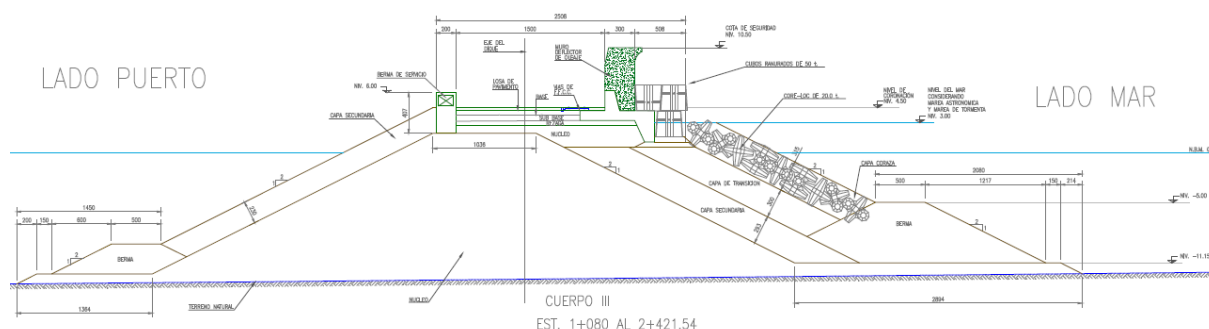
Esta aplicación práctica contempla centrarse en el estudio del diseño del dique por la funcionalidad y seguridad que proporciona a las infraestructuras portuarias posteriores. El análisis se centra en particular en analizar la sección más significativa en cuanto a volumen de material y coste del dique de Poniente.

El dique rompeolas de Poniente tiene una longitud total de 4300 m. La sección analizada es la representativa del tramo con PK 1+080 hasta 2+421, cuyo objetivo es proteger las aguas portuarias y la terminal de granel. El estudio se centra en el talud del lado del mar. En lo que respecta al diseño, el dique tiene unos taludes de diseño de 2:1 a barlovento y 2:1 a sotavento. La cota del dique coronación se sitúa a la cota +10,50 sobre el nivel del mar de referencia del

proyecto, el nivel de bajamar.

Consta de cuatro capas, manto, filtro, capa secundaria y núcleo. El manto viene formado por elementos Core-Loc de 20 toneladas en el talud. Se escogió este elemento por las facilidades que ofrece en construcción, fiabilidad técnica, incremento de trabazón aportado y coste. El espesor de la capa de Core-Loc es de 3,35 m de acuerdo con las prescripciones técnicas aportadas.

Los detalles de la sección transversal de diseño ofrecida por la *Declaración de Impacto Ambiental del proyecto* se puede consultar en el anejo G.



**Figura 4.4:** Sección de estudio, PK 1+080 al 2+421

## 4.4. Metodología de diseño

### 4.4.1. Principales Suposiciones

#### Principal modo de rotura

El diseño de un dique es el resultado del ensamblaje del diseño de una serie de elementos que lo conforman, cada uno atendiendo a un modo de fallo que puede ser diferente. El diseño del dique de Poniente analizado ha contemplado entre otros los modos de fallo: el rebase y la estabilidad del manto.

Analizando la evolución del oleaje y del nivel del mar, se verificará si el dique seguirá cumpliendo los requisitos de diseño, ante los modos de fallo citados, en un futuro.

#### Altura de ola de diseño del manto del dique actual

La falta de datos relativos a la altura de ola de diseño hace necesaria su obtención antes de comenzar la comparación. Mediante el peso del elemento del manto, es posible determinar la altura de ola de diseño. Además, la obra se proyectó en el año 2010, por lo que se hará uso de los datos de oleaje del periodo 1979-2010 para obtener el periodo de retorno asociado a la ola de diseño proporcionada por el elemento del manto. Este desarrollo se puede consultar en la sección 4.7.2

---

## 4.4.2. Análisis estadístico de las series de datos de oleaje

### Introducción

El diseño del dique se realiza en base a las condiciones de contorno de la obra estudiada. Varios de los principales parámetros que marcan el diseño del mismo son: la altura de ola incidente en la estructura, el nivel del mar en dicha situación e intensidad de la corriente en el entorno. No es posible obtener dichos valores sin previamente haber analizado una serie de datos que los caracterice. Por ello, el primer paso a seguir en el diseño del dique es estudiar las condiciones meteorológicas en el emplazamiento de la obra con el fin de determinar los valores de los parámetros citados.

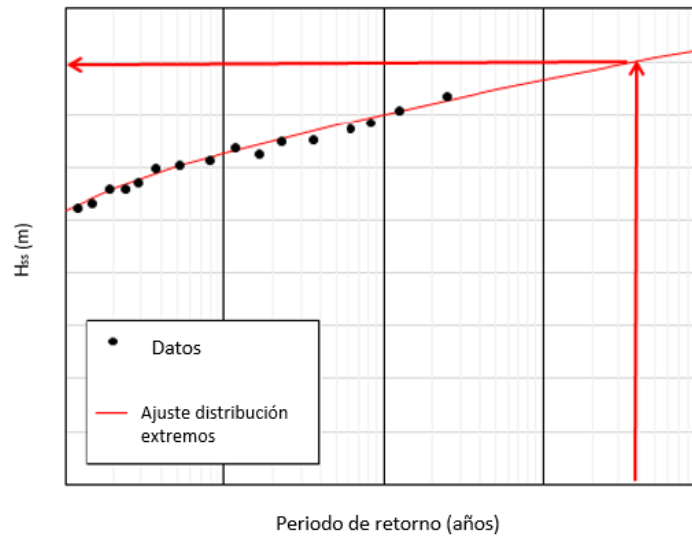
Este apartado describe el procedimiento empleado de forma teórica para obtener el valor de la altura de ola de diseño de la obra marítima considerada. La metodología propuesta contempla los siguientes pasos:

- Selección de un periodo de retorno. El diseño se realizará para oleajes en condiciones “extremas”, para las que el diseño sea capaz de no fallar.
- Análisis de la serie de datos obtenida mediante un modelo numérico, observación u otros medios. .
- Es habitual que la serie de datos manipulada sólo contenga datos relativos a un periodo corto (de 10 a 20 años), quedando por debajo del periodo de retorno escogido para el diseño del dique. Esto supone que la serie analizada no contempla periodos de retorno elevados, haciendo necesaria una extrapolación estadística de la serie.
- Es habitual que la serie de datos estudiada se corresponda con un punto alejado de la ubicación del proyecto, en aguas profundas. Por ello, resulta necesario realizar una propagación del oleaje desde el punto de toma de datos, en aguas profundas, hasta el emplazamiento de la futura obra. La propagación permite obtener el oleaje a pie de dique.

Los dos últimos puntos pueden ser estudiados en orden inverso, dependiendo de la ubicación del proyecto y las preferencias del diseñador.

### Principio general

La serie de datos original será filtrada mediante la fijación de un valor umbral de altura de ola. En esta nueva serie obtenida, sólo se tendrán olas por encima del citado umbral y cada temporal tendrá un periodo de retorno determinado. Ciertas funciones pueden ajustarse a este tipo de series con el objetivo de poder determinar para grandes periodos de retorno cuales son los valores de la altura de ola (Figura 4.5).



**Figura 4.5:** Principio de extrapolación de los datos

A continuación se citan ciertas consideraciones importantes en la obtención de la altura de ola de diseño.

- Se debe disponer de una serie de datos de temporales, no únicamente observaciones de altura de ola en periodos temporales aleatorios. El procesamiento de la serie de datos original se explicará más adelante.
- El análisis estadístico a largo plazo describe las diferencias entre eventos tipo temporal. Se describe de este modo la altura de ola genérica de un temporal mediante el parámetro de la altura de ola significativa de la temporal, denotada  $H_{ss}$ .
- Se asume que los datos seguirán una distribución de probabilidad concreta. El análisis no se centra únicamente en ajustar una función a los datos, sino en ver qué función se ajusta mejor a la distribución de datos considerados. El estudio llevado a cabo contempla el ajuste de las siguientes funciones que caracterizan eventos extremales:
  - Exponencial
  - Weibull
  - Gumbel
  - Pareto Generalizada

Los detalles sobre los procesos de ajuste de la función dependen de las propiedades matemáticas de las funciones, consultables en el anejo C. No existe una razón formal por la que los valores extremales de altura de ola deban seguir una de estas distribuciones en particular y no existe ningún consenso a nivel internacional que regule el uso de éstas.

- La extrapolación realizada es correcta en términos estadísticos únicamente si los datos empleados son homogéneos e independientes. La independencia de estos es asumida al suponer temporales separadas en el tiempo. Los datos de oleaje pueden provenir de dos familias distintas de oleaje: tipo *sea*, mar de viento o tipo *swell*, mar de fondo. Una serie de datos que mezcle ambos tipos de oleaje no puede ser considerada homogénea. Del mismo modo, no podemos mezclar oleajes con direcciones distintas. Por ello, un análisis previo

---

de los datos iniciales es necesario para poder manipular datos homogéneos en cuanto a dirección y tipo de oleaje.

- Extrapolar supone asumir un procedimiento estadístico por el cual se asume que la altura de ola puede crecer indefinidamente sin limitaciones físicas. Por ejemplo, efectos debidos a aguas someras como la rotura de la ola, limitaciones geográficas o el fetch, son aspectos no incluidos en este proceso. Por ello, los resultados obtenidos serán tratados desde un punto de vista ingenieril para entender mejor el posible comportamiento real. Por ello es necesario contemplar la posible rotura del oleaje en aguas someras, considerando la teoría de rotura en orilla de McCowan ( $0,78=H_b/d_b$ )<sup>[27]</sup>
- El análisis estadístico siempre se realiza usando probabilidades por temporal. Sin embargo, en la fase de diseño interesa conocer los periodos de retorno y probabilidades por año. Es por ello que, además de conocer la altura de ola, se necesita conocer la distribución temporal de esta. En especial, se requiere conocer el número de temporales por año  $N_s$ . Este parámetro relaciona la probabilidad estadística y la probabilidad anual tomada en cuenta en diseño.

### Ecuación de Poisson

La distribución de Poisson permite analizar estadísticamente el número de ocurrencias de un evento extremal. Esta distribución predice la probabilidad de que ocurra un determinado evento en un determinado número de ocasiones, durante un periodo específico. Esto es válido para los procesos analizados cuya duración es más corta que el periodo de tiempo analizado. En el caso práctico realizado, se emplea esta distribución para modelar el número de temporales de una cierta magnitud que ocurren durante un año. El evento definido será “ocurrencia de un temporal con una altura de ola significativa  $H_s$ , suficientemente alta como para dañar gravemente la estructura” y  $X$  será el número de veces que dicho temporal ocurre en un año. La probabilidad de que dicho temporal ocurra  $k$  veces por año viene representada por la siguiente expresión:

$$P_r(X = k) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!} \quad (4.1)$$

La distribución viene únicamente definida por el parámetro  $\lambda$  que representa el valor esperado del número de ocurrencias por año. Este parámetro es igual a la inversa del periodo de retorno  $R$ .

$$R = \frac{1}{\lambda} \quad (4.2)$$

En la práctica ingenieril, no es necesario conocer el número exacto de temporales que ocurren, ya que la estructura, presumiblemente, fallará cuando ocurra el evento, por lo tanto, carece de importancia conocer si volverá a ocurrir el evento en cuestión. En otras palabras, la probabilidad de fallo  $p_f$  es igual a la probabilidad de que la temporal ocurra al menos una vez, por lo tanto:

$$\begin{aligned} p_f &= P_r(X \geq 1) = P_r(X \neq 0) \\ &= 1 - P_r(X = 0) \\ &= 1 - \frac{\lambda^0 \cdot e^{-\lambda}}{0!} \\ &= 1 - e^{-\lambda} \end{aligned} \quad (4.3)$$

---

Esta es la probabilidad de fallo durante el periodo de análisis seleccionado, que es un año. Normalmente los estudios se centran en probabilidades de fallo asociados a largos periodos, como por ejemplo la vida útil de la estructura  $T_L$ . Se puede calcular dicha probabilidad como la probabilidad de que la estructura falle un año cualquiera:

$$p_f = 1 - e^{-\lambda} \quad (4.4)$$

La probabilidad de que la estructura no falle en un año cualquiera:

$$p_s = 1 - p_f = e^{-\lambda} \quad (4.5)$$

La probabilidad de que la estructura no colapse  $T_L$  veces en una serie:

$$p_{s,T_L} = p_s^{T_L} = e^{-\lambda T_L} \quad (4.6)$$

Finalmente, la probabilidad de que dicha estructura falle alguna vez en  $T_L$  años es:

$$p_{f,T_L} = 1 - e^{-\lambda T_L} \quad (4.7)$$

Esta ecuación se denomina la ecuación de Poisson porque deriva de la distribución de Poisson. Con el fin de realizar el diseño es más conveniente expresar dicha ecuación en términos de  $R$  en vez de  $\lambda$ .

$$p_{f,T_L} = 1 - e^{-\frac{T_L}{R}} \quad (4.8)$$

La ecuación expuesta tiene importancia ya que proporciona diseños seguros para estructuras en el ámbito de la ingeniería marítima y es útil para comprobar las posibles consecuencias.

Para periodos de retorno grandes, la ecuación de Poisson puede ser aproximada por  $p_f \approx T_L/R$ , cuyo valor puede ser empleado de modo orientativo.

## Definiciones

La diferencia entre la probabilidad de ocurrencia del temporal y la probabilidad anual de ocurrencia de este, puede traer consigo cierta confusión, por lo que es conveniente realizar una definición de ambos términos antes de continuar con el desarrollo teórico del análisis estadístico.

- La probabilidad de no excedencia  $P$  se define como la probabilidad de que un determinado temporal tenga una altura de ola significativa menor (o igual) a un valor concreto. Matemáticamente, esto se corresponde con la definición de la función de distribución acumulada (cdf),  $F_H(H_{ss})$  de los valores extremos considerados.

$$P = F_H(H_{ss}) = P_r(H \leq H_{ss}) = P_r(H_{ss} \text{ no es excedida en el temporal}) \quad (4.9)$$

- La probabilidad de excedencia  $Q$  viene definida como la probabilidad de que un temporal tenga una altura de ola significativa mayor a un cierto valor.

$$Q = 1 - P = P_r(H \geq H_{ss}) = P_r(H_{ss} \text{ excedida en el temporal}) \quad (4.10)$$

- El número de excedencias esperadas por año  $\lambda$  viene definido como la media anual que una temporal con una altura de ola determinada o superior ocurre. Este es el parámetro de la distribución de Poisson que se ha comentado anteriormente. En un sentido matemático estricto, esto no es una probabilidad pues el valor puede ser superior a 1, pero para valores de  $\lambda$  pequeños, se puede interpretar que el parámetro representa la probabilidad anual de que una temporal sea superada.
- El periodo de retorno  $R$  es el periodo de tiempo medio entre dos temporales consecutivos con una altura de ola significativa al menos igual a  $H_{ss}$ . Esta es la manera más común de expresar la condición de diseño deseada.

Los dos primeros conceptos quedan definidos en un contexto estadístico, mientras que los dos últimos quedan definidos en un contexto de diseño. Pueden transformarse entre ellos mediante las definiciones expuestas a continuación:

$$Q = 1 - P \quad (4.11)$$

$$\lambda = Q \cdot N_s \quad (4.12)$$

$$R = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{Q \cdot N_s} \quad (4.13)$$

$$Q = \frac{1}{R \cdot N_s} = \frac{\lambda}{N_s} \quad (4.14)$$

Dónde  $N_s$  es el número de temporales observados anualmente en una ubicación determinada. Los cuatro parámetros  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  y  $\lambda$  serán función de  $H_{ss}$ . En otros términos, dichos parámetros tendrán valores para cada altura de ola significativa considerada. La esencia de un análisis de valores extremales es establecer dicha relación y conseguir la altura de ola significativa de diseño  $H_{ss}$ , ligada a un valor de  $R$ .

### Selección del periodo de retorno

El periodo de retorno de diseño puede obtenerse a nivel local por normas o estándares, especificaciones de clientes o mediante análisis de optimización económica. Ante la ausencia de mayores especificaciones, el periodo de retorno puede determinarse a partir de una estimación aceptable de probabilidad de fallo del dique durante su vida útil  $p_{fL}$ . Si la vida útil es  $T_L$  años, entonces la probabilidad de fallo aceptable por año  $p_{fa}$  y su correspondiente periodo de retorno  $R$  se pueden calcular a partir de la ecuación de Poisson. El valor de la probabilidad de fallo puede tomarse de referencias como la *ROM*<sup>[28]</sup> o Recomendaciones de diseño italianas, propuestas por el *PIANC*<sup>[29]</sup>

Cabe especificar que por fallo, se entiende inicio del daño en elementos estructurales. Este suceso puede ser aceptado un número de veces durante la vida útil de la estructura, dependiendo de la estrategia de mantenimiento del agente portuario responsable y la accesibilidad a los diferentes tramos de la estructura.

Por otro lado, la posibilidad de fallo puede ser un factor muy importante si al ocurrir se comprometen intereses de las infraestructuras u operaciones portuarias. El diseñador debe realizar un buen análisis del contexto de la estructura y de la posibilidad de fallo de esta. Debe distinguirse



---

entre estado límite último (ELU) y de servicio (ELS), para poder seleccionar los diferentes periodos de retorno para cada uno.

En general las consecuencias de fallo de los diques son principalmente económicas. Habitualmente no se esperan pérdidas de vida o grandes daños. En base a este aspecto se ha de decidir qué periodo de retorno queremos para la estructura marítima diseñada.

En el diseño estudiado el periodo de retorno asociado a la altura de ola de diseño  $R$  es desconocido y se deducirá en el apartado 4.7.2 mediante el peso del elemento del manto.

### **Ensamblaje de la serie de datos**

El siguiente paso a seguir en este proceso se corresponde con el ensamblaje de los datos observados, base de la extrapolación estadística que será realizada. Como se ha explicado anteriormente, las series de datos consultables pueden venir presentadas en uno de los siguientes formatos:

- Series de datos relativos a una ubicación, tomados mediante una boya, observaciones de satélite o modelos de predicción de datos.

Es importante considerar que las observaciones no son registros continuos de cada altura de ola individual, sino más bien de la altura de ola significativa en un campo de oleaje, en un lapso de tiempo (3 horas en el ejemplo del *NOAA*). Una buena base de datos ofrece información adicional como velocidad de viento, dirección de oleaje y periodo del oleaje medidos al mismo tiempo que el registro de alturas de ola.

- Tabla de frecuencia mostrando el número de ocurrencias de una determinada altura de ola significativa, normalmente asociada a periodo y dirección. En ciertos casos el número de ocurrencias está tabulado o pueden aparecer únicamente porcentajes del número total de observaciones realizadas.

El caso de estudio se centra en la primera opción mencionada.

### **Filtrado de datos**

Una vez obtenida la base de datos de oleaje original, esta deberá modificarse con el fin de transformar las observaciones individuales en temporales, y ajustarse a los criterios estadísticos de independencia y homogeneidad explicados en 4.4.2.

Este último criterio requiere que dividamos la serie de datos en series conteniendo datos de una misma población, que consideraremos provocados por el mismo fenómeno meteorológico. De este modo, se puede separar oleaje tipo mar de fondo del mar de viento, basado en la pendiente del oleaje entre otras observaciones.

Por otro lado, separar los datos de oleaje en base a la dirección de procedencia caracterizará diferentes poblaciones de datos. Esto es útil para el análisis estadístico llevado a cabo, permitiendo diseñar de acuerdo con la dirección de procedencia del oleaje. Además, esto permite descartar oleajes provenientes de direcciones que aparentemente no afectarán a la estructura.

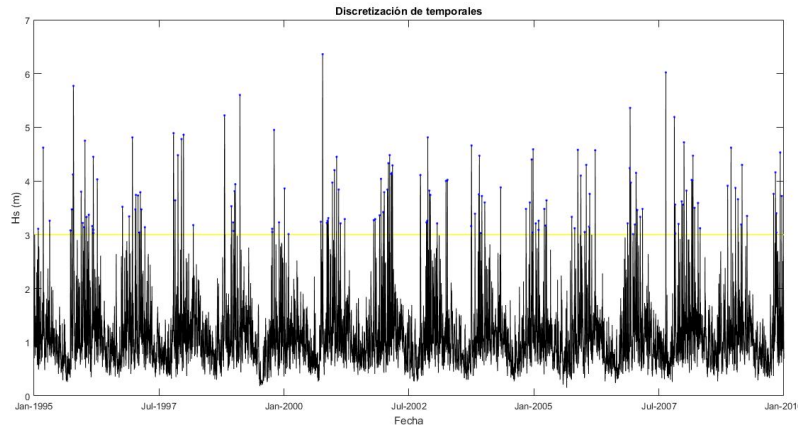
Si los requisitos para homogeneizar los datos son excesivamente rigurosos, es posible que la serie de datos obtenida sea muy corta para un análisis posterior. En estas situaciones el diseñador debe tomar una decisión de compromiso entre calidad y cantidad de los datos analizados.

## Obtención de temporales de diseño

Una serie de datos de oleajes observados proporciona una buena base para el análisis de valores extremales, pero no puede ser utilizada sin un procesamiento previo. La serie original solo aporta observaciones mientras que en la fase de diseño es necesario considerar una serie de temporales en sentido estadístico. Las observaciones sucesivas separadas por minutos u horas pueden pertenecer al mismo temporal. Dicho temporal sólo debería ser contabilizado una vez en el análisis estadístico. Desde el punto de vista del diseño, el estudio considerará el pico de la altura de ola de cada temporal, descartando el análisis de las olas previas o posteriores a este pico.

El método escogido para procesar la serie de datos de oleaje en temporales se corresponde con análisis *Peak-over-threshold* o *PoT*. En este análisis, un temporal es definido de modo arbitrario como un periodo de tiempo en el que la altura de ola observada es superior a un umbral considerado. Dicho proceso puede realizarse mediante un código de cálculo que identifique las alturas de ola superiores al umbral y proporcione las alturas de ola máxima o pico de cada temporal. Únicamente los valores máximos (picos) de las alturas de ola durante el periodo de excedencia serán extraídos, considerándose la altura de ola de temporal  $H_{s,s}$ , descartando el estudio del resto de valores. Es posible visualizar dicha explicación mediante la figura A.13. Se realizará un análisis *PoT* avanzado, contemplando la posibilidad de contabilizar solo un temporal (y su pico asociados pico) si existen dos temporales en menos de 24 horas.

El número de temporales por año  $N_s$  viene proporcionado directamente por la base de datos obtenida al realizar el análisis *PoT*. Por ejemplo, si la serie de datos cubre 15 años de observaciones y después del análisis *PoT* se contabilizan 150 temporales, entonces:  $N_s=150/15=10$  tormentas por año.



**Figura 4.6:** Distribución de temporales en PoT

La amplitud de la serie de datos de temporales obtenidos será función del umbral escogido. Si el umbral es elevado, se obtendrán menos temporales (menos datos para analizar y mayor incertidumbre en el estudio). Si el umbral es demasiado bajo, menos puntos serán descartados y estos no representarán correctamente los temporales (en un punto límite si se fijara el umbral en 0 m, nuestra base de datos sería la original). El umbral se escoge en base a una fase previa en la que mediante prueba-error hasta obtener una serie de datos razonable. Una buena aproximación para un proceso inicial es obtener  $N_s=10$  temporales por año.

---

## Probabilidades de excedencia y no excedencia

Una vez procesada la serie de datos, se procede a determinar el periodo de retorno asociado a cada altura de ola de la serie filtrada. Se puede identificar cada pico con una numeración, realizando un ranking  $i$  desde la altura de ola más baja hasta la más alta,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ . De este modo se pueden calcular las probabilidades de excedencia y no excedencia de los puntos obtenidos del siguiente modo:

$$P_i = \frac{i}{N + 1} \quad (4.15)$$

$$Q_i = 1 - P_i \quad (4.16)$$

Estas fórmulas no son las únicas empleadas, pueden emplearse las propuestas por GODA (2000). Sin embargo, a efectos de este estudio, se considerará la formulación citada en las expresiones 4.15 y 4.16.

## Métodos de extrapolación

El proceso mostrado trata de responder a la problemática: *¿Cuál es la altura de ola  $H_{ss}$  asociada a un periodo de retorno  $R$  determinado?* Antes de llegar a este apartado se ha debido obtener la serie de datos relativos a la altura de ola de temporal  $H_{ss,i}$  y su correspondiente probabilidad de excedencia  $Q_i$  por temporal. Es necesario traducir el periodo de retorno objetivo  $R$  a una probabilidad de excedencia objetivo  $Q$  y obtener la altura de ola  $H_{ss}$  correspondiente, ya sea mediante interpolación o extrapolación de la serie de datos.

Normalmente, las series de datos no cubren grandes periodos y la probabilidad de excedencia requerida suele ser baja, con altos periodos de retorno, lo que hace necesario recurrir a métodos de extrapolación. La transformación de  $R$  a  $Q$  puede realizarse en base a la formulación expuesta en 4.13. Como se ha descrito en la introducción, se extrapolarán los datos en base a una de las siguientes funciones:

- Exponencial

$$P = 1 - e^{-\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}} \quad (4.17)$$

- Weibull

$$P = 1 - e^{-\left(\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.18)$$

- Gumbel

$$P = e^{-e^{-\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}}} \quad (4.19)$$

- Pareto Generalizada

$$P = 1 - \left(1 + \alpha \frac{H_{ss} - \gamma}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (4.20)$$

El estudio de los parámetros necesarios para el ajuste de dichas funciones puede ser consultado en el anejo C

### 4.4.3. Correlación entre Altura de ola-Periodo

Pese a la dispersión de datos observables en la relación altura de ola  $H_{ss}$  y periodo pico  $T_p$ , es posible obtener una relación entre dichos parámetros que permita estimar el valor del periodo pico para cualquier altura de ola estudiada.

El proceso escogido contempla la obtención de dos parámetros de una función lineal que relacionen los parámetros citados. De este modo deberán obtenerse los parámetros  $a$  y  $b$ , presentes en la ecuación 4.21.

$$T_p = a\sqrt{H_{ss}} + b \quad (4.21)$$

#### 4.4.4. Batimetría

La batimetría del entorno de estudio ha sido obtenida mediante la aplicación *Navionics Webapp*<sup>[19]</sup>. La compañía *Navionics* cuenta la base de datos más extensa en batimetría tanto en mar como zonas de navegación fluviales. Muchos de estos datos han sido recopilados por levantamiento de datos in-situ mediante herramientas de sensor remoto, como por imágenes de satélite o láser-escaner aéreo. Mediante esta plataforma se ha determinado el perfil del fondo marino, dato necesario para la propagación del oleaje desde aguas profundas, donde se ubica el punto de obtención de datos de oleaje, a aguas someras, cercanas al emplazamiento del dique.

#### 4.4.5. Nivel del mar

##### Nivel del mar de 1995 y actual

A efectos del análisis de la altura de ola, se ha considerado un nivel constante de NMM, para poder apreciar cómo ha variado la altura de ola en estos periodos. El proyecto emplea como Datum el nivel de bajamar. El presente estudio considerará este nivel del mar para realizar los análisis entre 1979 y 2010.

La amplitud de marea y por lo tanto máximo nivel del agua a partir del cero considerado, es obtenido mediante los datos del proyecto. El nivel de pleamar se sitúa a +3,00 m sobre el nivel de bajamar.

##### Evolución del nivel del mar

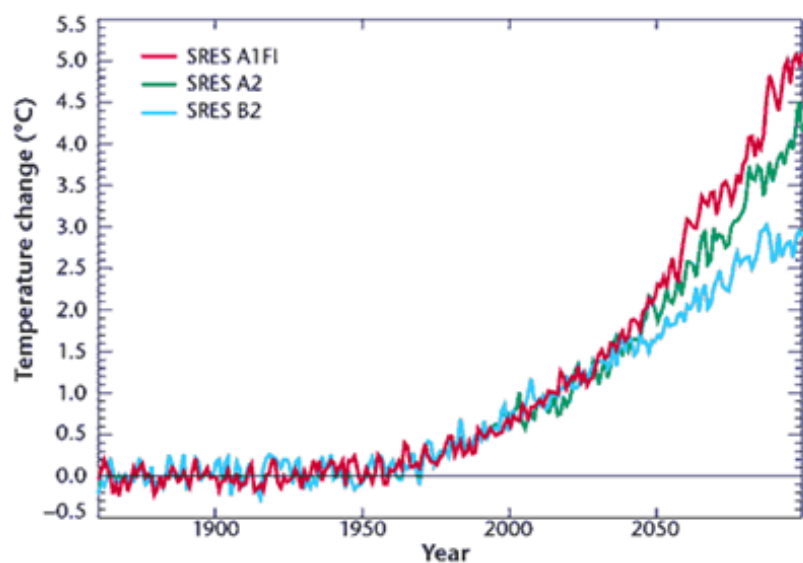
Existen numerosos estudios que relacionan el cambio climático con la subida del nivel medio del mar. Este fenómeno vendría provocado principalmente por la fusión del hielo de las superficies terrestres con hielo (Antártica) consecuencia directa del acelerado incremento de temperaturas que la Tierra está experimentando en el último siglo. Otros efectos no considerados, característicos de otras parte del mundo, como el hundimiento a causa de bombeo de acuíferos o extracciones incontroladas de gas u otros recursos, como puede ser el caso en Yakarta (Indonesia), hacen que el nivel del mar con respecto a la línea de costa, crezca con el paso de los años.



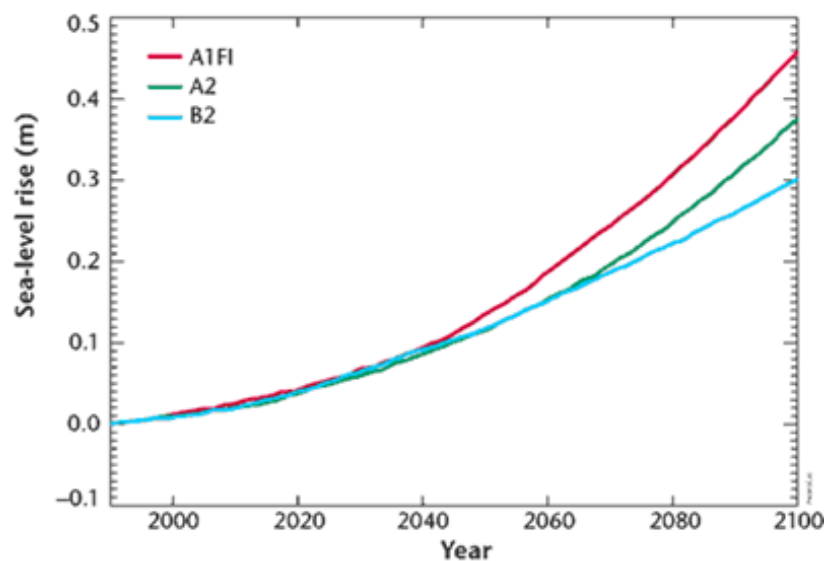
**Figura 4.7:** Zonas vulnerables al aumento del NMM, *IHE-UNESCO*<sup>[30]</sup>

De acuerdo con los estudios proporcionados por *IHE-UNESCO*<sup>[30]</sup>, la zona de Veracruz se sitúa en una zona vulnerable al aumento del NMM, como puede verse en la figura 4.7. Por ello, es interesante considerar varios escenarios en el futuro de NMM combinados con una predicción de altura de ola que se obtendrá mediante una extrapolación de la evolución de altura de ola entre las funciones extremales obtenidas para el diseño del dique en las fases de estudio (1979-1994 y 1995-2010).

El *IPCC*<sup>[6]</sup> contempla diferentes escenarios a futuro que relacionan aumento de la temperatura de la tierra y del agua con el aumento del NMM. Los modelos aplicados en figuras 4.10 y 4.9 son predicciones, aplicables en función de la evolución de numerosos factores que no serán expuestos. Este estudio se centrará en observar qué ocurre en el diseño del manto y respuesta del dique ante el rebase, si se combinan altura de ola en un futuro con los principales escenarios de cambio del NMM propuestos por el *IPCC*<sup>[6]</sup>.



**Figura 4.8:** Escenarios de predicción de fluctuación de la temperatura global *IPCC, 2007*<sup>[6]</sup>



**Figura 4.9:** Escenarios de predicción de fluctuación del NMM *IPCC, 2007*<sup>[6]</sup>

Las predicciones del *IPCC* para 2100, quedan recogidas en la tabla 4.9. En ella se expone un intervalo de aumento de NMM ligado a un incremento de la temperatura media global.

**Tabla 4.1:** Escenarios IPCC

Escenario	Incremento de Temperatura (°C)	Rango Incremento del NMM(m)	Incremento medio NMM (m)
A1F1	4,0	0,26-0,59	0,43
A2	3,4	0,23 - 0,51	0,37
B2	2,4	0,20-0,41	0,31

Las predicciones medias de incremento del NMM serán consideradas en el estudio de estabilidad del manto y rebase del dique de Veracruz en un escenario futuro. La carrera de marea considerada será la misma, sin embargo, el cambio climático puede afectar directamente a la amplitud de la marea.

#### 4.4.6. Propagación del oleaje

La propagación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras cercanas a pie de dique, se ha realizado mediante los ábacos proporcionados por el *Shore Protection Manual*<sup>[20]</sup>. Una de las premisas supuestas para realización la propagación del oleaje mediante dichos ábacos es la disposición de isobatas paralelas entre ellas, como realizan otros programas como *SWANOne*<sup>[21]</sup>. En su trayectoria desde aguas profundas hasta aguas someras el oleaje sufre los efectos de la refracción y shoaling hasta alcanzar la obra estudiada. Estos efectos son considerados por el citado manual, y se contemplan en la formulación siguiente:

$$H_d = H_0 \cdot k_r \cdot k_s \quad (4.22)$$

Donde:

- $k_r$  - Coeficiente refracción
- $k_s$  - Coeficiente shoaling
- $H_0$  - Altura de ola en aguas profundas
- $H_d$  - Altura de ola en la zona de proyecto

El *Shore Protection Manual* incorpora los efectos de shoaling y refracción en un único coeficiente. Este puede obtenerse mediante uno de los ábacos propuestos <sup>[20]</sup>. Conocida la altura de ola significativa en aguas profundas, la profundidad a pie de dique y el periodo del oleaje en aguas profundas, es posible obtener el coeficiente  $K_{rs}$ .

Los datos relativos al input y output, así como la metodología empleada para la obtención de los coeficientes de shoaling y refracción a partir de los ábacos pueden ser consultados en el anejo E.

## 4.5. Diseño del manto

### 4.5.1. Formulaciones

El caso práctico estudiado tiene como objetivo poner de manifiesto en qué medida el posible incremento de uno de los principales parámetros de diseño, la altura de ola, puede afectar a la estabilidad del manto. Por ello, el interés no reside tanto en afinar u optimizar el diseño sino en

---

cuantificar esta afección.

Una de las formulaciones propuestas para asegurar la estabilidad del manto es la de *Hudson* (1953,1959 y 1961), propuesta tras investigaciones realizadas tras la Segunda Guerra Mundial. Basó sus ensayos en olas regulares en el laboratorio de Vicksburg, Estados Unidos. Se basa principalmente en un análisis dimensional y ajuste de datos. Todos los parámetros desconocidos están implícitos en el factor  $K_D$  (tipo de tormenta, daños aceptables, etc...). Esta fórmula ha sido actualizada en numerosas ocasiones, incluso para incluir oleajes aleatorios (*SPM 1984*<sup>[20]</sup> y *el Coastal Engineering Manual 2002*<sup>[31]</sup>), resultando en la versión más reciente de la formulación de *Hudson*:

$$W = \frac{\rho_s \cdot g \cdot H_{1/10}^3}{K_D \cdot (\Delta - 1)^3 \cdot \cot \alpha} \quad (4.23)$$

Dónde:

- $W$ : Peso del elemento
- $\rho_s$ : Densidad del elemento del manto
- $H_{1/10}$ : Altura de ola representativa del décimo superior;  $H_{1/10} = 1,27 H_{1/3}$  (De acuerdo con *Rock Manual 1984*)
- $\alpha$ : Ángulo del talud
- $\Delta$ :  $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$

Para diques conformados por rocas, esta fórmula no se suele emplear actualmente.

Una formulación más moderna surgió tras los estudios realizados por *Van der Meer* (1988). Los ensayos realizados, distinguían entre olas tipo *plunging* y *surging*. Las investigaciones realizadas dieron como resultado las ecuaciones básicas empleadas actualmente por el *Rock Manual*<sup>[32]</sup>.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_{pl} P^{0,18} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5} \quad \text{para olas tipo plunging} \quad (4.24)$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = c_s P^{-0,13} \left( \frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \quad \text{para olas tipo surging} \quad (4.25)$$

Dónde:

- $H_s$ : Altura de ola de temporal de diseño
- $D_{n50}$ : Diámetro nominal del elemento
- $c_{pl}$ : Coeficiente de forma del elemento con olas tipo *plunging*
- $c_s$ : Coeficiente de forma del elemento con olas tipo *surging*
- $\alpha$ : Ángulo del talud
- $P$ : Permeabilidad
- $S$ : Nivel de daño
- $N$ : Número de olas por temporal
- $\xi_m$ : Parámetro de similitud por rompiente

---

## Comparación Hudson y Van der Meer

Comparando las dos fórmulas expuestas, la influencia de la altura de ola, densidad del material y densidad relativa son similares. Los coeficientes considerados son diferentes. En el caso de disponer pendientes muy elevadas en el talud (cercanas al ángulo natural de reposo) *Hudson* y *Van der Meer* no proporcionan resultados del todo fiables. Por otro lado, disponer de pendientes generosas, permite que el oleaje transporte materiales a través del talud, siendo un factor no contemplado por Hudson en su formulación.

De acuerdo con los estudio realizados por *Verhagen et al.* [33] para pendientes entre 1V:1,5H y 1V:3H, no existe diferencia apreciable entre las formulaciones de *Van der Meer* y *Hudson*. La formulación de *Iribarren*, no desarrollada en este estudio, quedaría para el diseño de taludes muy tendidos.

### Formulación empleada

La formulación de *Hudson* es escogida para el resto del análisis desarrollado por los siguientes motivos:

- Su uso expandido en la práctica
- Su sencillez al disponer de menos parámetros
- Su proporción de resultados similares a la formulación de Van der Meer (1988) cuando la pendiente está entre 1V:1,5H y 1V:3H, siendo 1V:2H en el caso del diseño de Veracruz.
- Cumplir con el objetivo de cuantificar si el diseño variará considerablemente o no, sin necesidad de realizar un diseño óptimo de la obra en cuanto a estabilidad del manto.

#### 4.5.2. Pieza y formulación escogidas

El elemento escogido para conformar el manto del dique poniente de Veracruz es el Core-Loc. El diseño de dicha pieza no debe superar las 20 a 25 toneladas de peso, y se debe prestar especial atención a su fragilidad al ser un elemento con esbeltez. Los problemas asociados a estos aspectos presentes en los Dolos motivaron al *US Army Corps of Engineers* a desarrollar el Core-Loc, pieza similar pero con menores problemas de rotura.

Con lo expuesto, y considerando los estudios acerca del Core Loc proporcionados por *Melby and Turk, 1997*[34], el core-loc puede ser dimensionado mediante las fórmulas 4.26 y 4.27, resultado del desarrollo de la formulación de *Hudson*.

$$\frac{H_s}{\Delta d_n} = 3,7 \quad \text{Inicio de daño, } N_{od}=0 \quad (4.26)$$

$$\frac{H_s}{\Delta d_n} = 4,1 \quad \text{Fallo, } N_{od} \geq 0,5 \quad (4.27)$$

A efectos de este estudio se considerará la expresión 4.26 empleada para diseño del manto con una altura de ola que produzca daños iniciales en el manto.

## 4.6. Rebase

Se calculará la variación del rebase con el dique actual en el año 2010 y en el año 2100, viendo en qué medida la posible variación del clima marítimo afectará al rebase. Cuanto mayor sea el rebase, mayores serán las consecuencias sobre las partes internas del puerto protegidas por el



dique, tal y como se ha explicado en el apartado 2.2.2

El estudio del rebase se realizará mediante la herramienta de cálculo *Overtopping neural network*<sup>[35]</sup> disponible en la página web de *Deltares*. Para el diseño, evaluación de seguridad o rehabilitación de estructuras costeras, es necesario realizar un análisis del rebase. La red neurológica de rebase proporcionada por *Deltares* es una herramienta de predicción de las descargas debidas al rebase medio en estructuras costeras.

Para poder realizar el análisis se debe contar con la definición geométrica del dique, nivel del mar y altura de ola de diseño para este criterio. A efectos del análisis, la altura de ola de diseño de rebase será la misma que la altura de ola de diseño de estabilidad del manto (con el mismo periodo de retorno asociado). La explicación detallada de los elementos necesarios para realizar el cálculo pueden consultarse en el anejo F.

## 4.7. Resultados

### 4.7.1. Análisis de la Serie de datos 1979-2010

#### Puntos de estudio

Para proceder a determinar la altura de ola de diseño del dique de poniente de Veracruz, se han tomado tres puntos diferentes alejados de la costa. Los puntos se encuentran en el Golfo de México, su ubicación exacta queda recogida en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2:** Ubicación puntos de estudio

Punto	Latitud	Longitud
Punto 1	20°34'18.73"N	95°54'20.08"O
Punto 2	20°26'58.62"N	95°2'8.82"O
Punto 3	19°22'16.04"N	94°1'13.96"O



**Figura 4.10:** Ubicación puntos de estudio (PC) Google Earth, (Mayo 2017)

---

## Obtención serie de datos de oleaje

Mediante los códigos *Matlab* desarrollados en el anejo B se obtienen los datos relativos a altura de ola  $H_s$ , dirección del oleaje y periodo pico de este  $T_p$ .

El primer dato tiene fecha de 01 de enero de 1979 (0:00 horas) y la última observación realizada se corresponde con el 01 de enero de 2010 (0:00 horas), proporcionando un total de 31 años de datos.

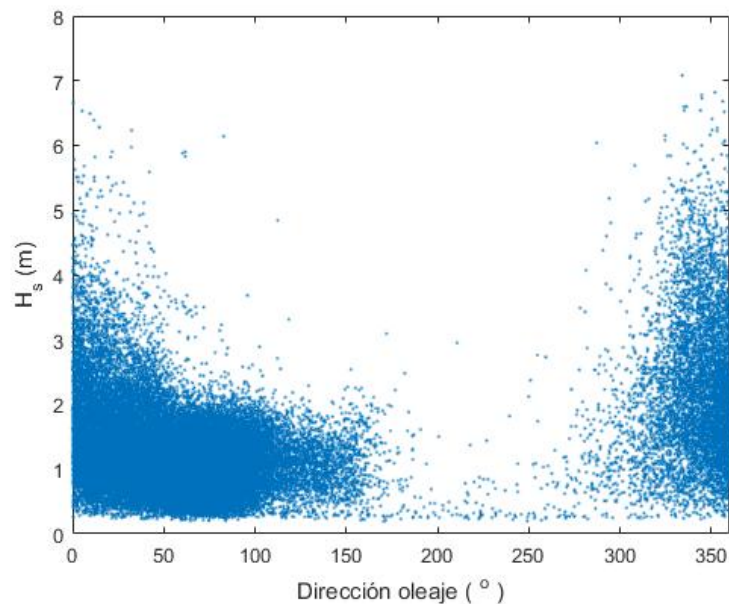
Se obtienen archivos de texto relativos a los datos mencionados para cada uno de los puntos expuestos. Los archivos de texto pueden ser empleados para un análisis posterior.

Para una mayor comprensión acerca del proceso seguido, la explicación considerará el punto más representativo y limitante a la hora de diseñar el dique. Este es el *Punto 2*. Los datos representativos de los otros dos puntos y la comparación entre puntos pueden ser consultados en el anejo D y el apartado D.2.4, respectivamente.

## Filtrado de la serie

Se realiza una representación gráfica de la relación altura de ola frente a periodo de ola y dirección del oleaje. De este modo se puede observar:

- Existe un oleaje predominante proveniente del Noreste-Noroeste. Existen dos picos entre las direcciones  $-30^\circ\text{N}$  y  $30^\circ\text{N}$ . El mayor de los dos picos tiene mayor interés de cara a posteriores análisis de la altura de ola. En base a esto se filtra la base de datos tomando únicamente el oleaje en direcciones comprendidas entre los siguientes intervalos  $[0^\circ, 100^\circ]$  y  $[340^\circ, 360^\circ]$ . Esto se puede observar en las figuras 4.11 y 4.12



**Figura 4.11:**  $H_s$  frente a dirección *Punto 2*

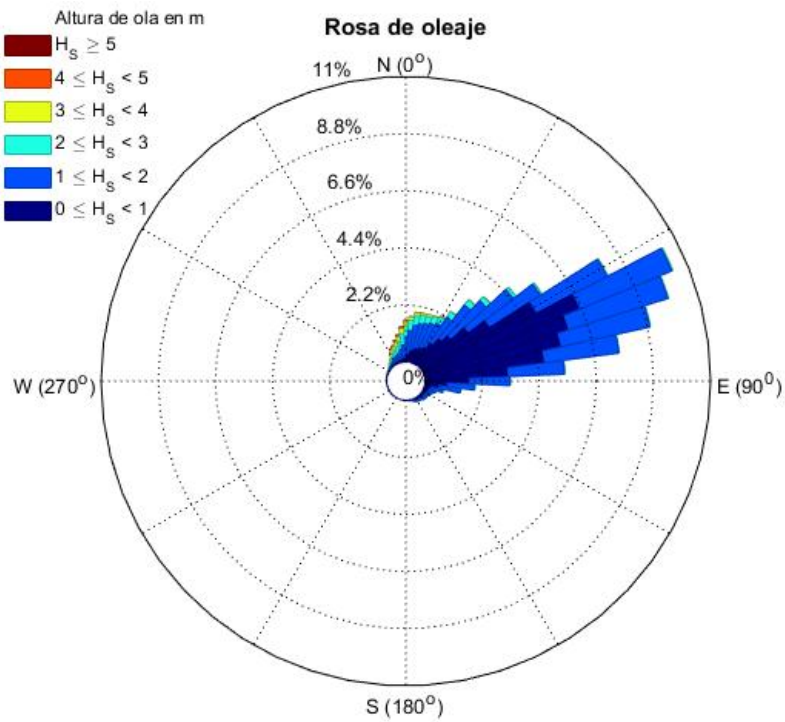


Figura 4.12: Rosa de oleaje *Punto 2*

- El oleaje caracterizado es de tipo swell (largos periodos con alturas relativamente bajas), como puede apreciarse en la figura 4.13.

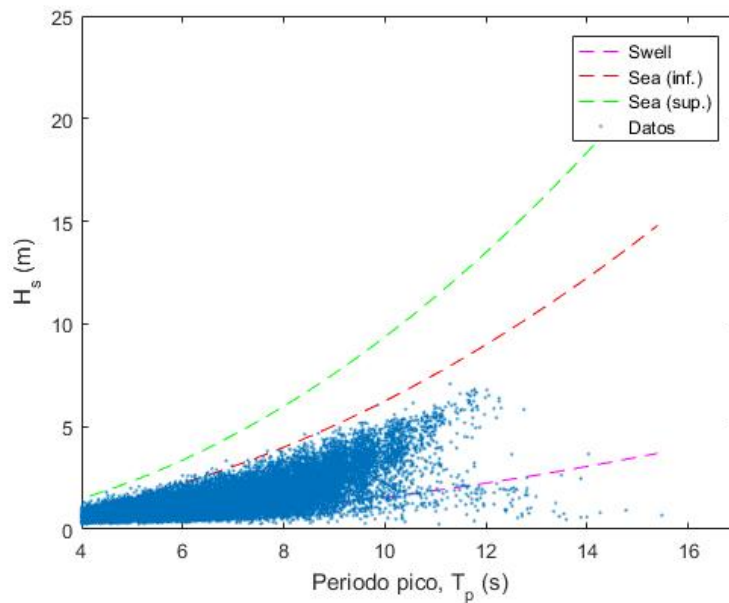


Figura 4.13: Tipo de oleaje según pendiente *Punto 2*

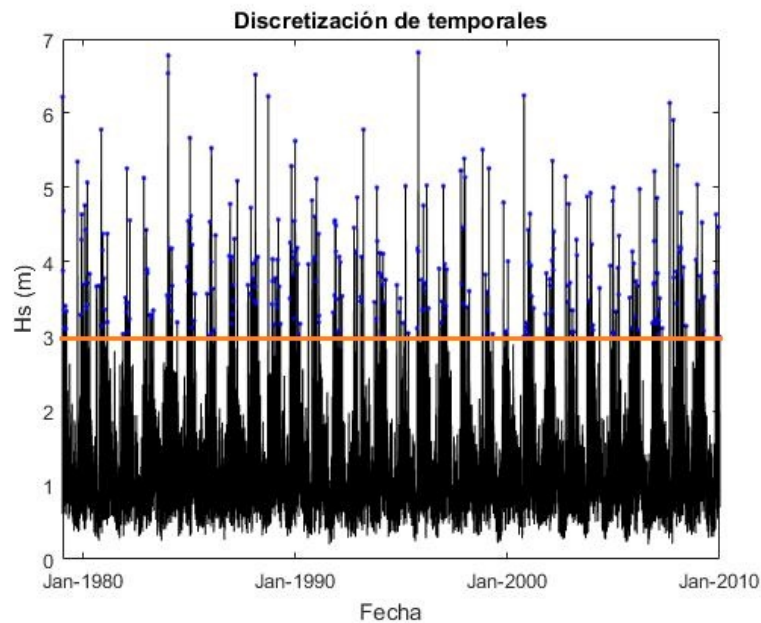
## Método PoT

En base a un proceso iterativo realizado y con el objetivo de obtener un valor de 10 temporales anuales, se fijan los umbrales para cada uno de los puntos estudiados. El anejo D recoge con detalle las gráficas empleadas, cuyos criterios quedan recogidos en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3:** Criterios análisis PoT

Punto	Umbral (m)	$N_s$
Punto 1	3,05	10,03
Punto 2	2,97	10,03
Punto 3	2,70	10,13

El análisis *PoT* en el *Punto 2* viene recogido gráficamente en la figura 4.14



**Figura 4.14:** Análisis PoT, umbral=2,97 m

## Ajuste de funciones de distribución de extremos-Regresión Lineal

Una vez procesadas las fases anteriores, se puede proceder a ajustar las funciones de distribución de extremos (Exponencial, Weibull, Gumbel y Pareto Generalizada). El objetivo en esta fase es determinar los parámetros de distribución  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . Denotaremos los valores *verdaderos* por determinar como  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  y los estimados como  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{\gamma}$ .

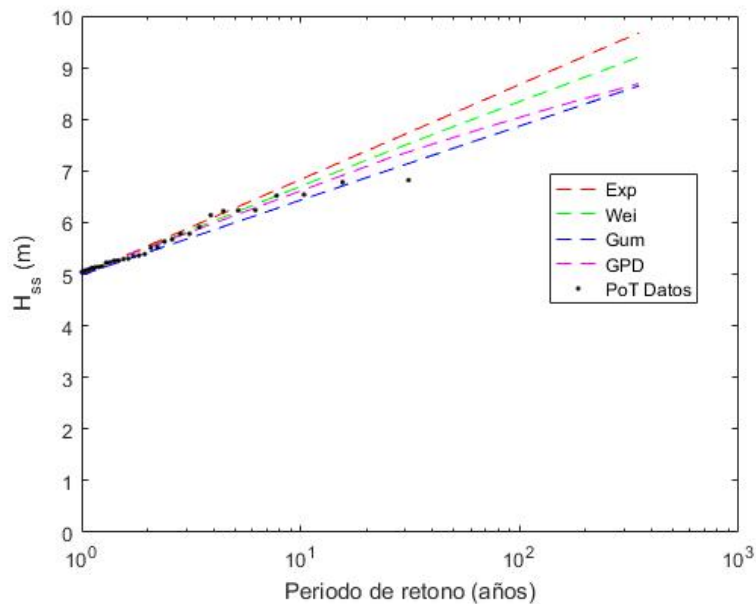
El primer paso consiste en ordenar los datos filtrados mediante el método PoT desde la menor hasta la mayor altura de ola de temporal y calcular las probabilidades de excedencia  $Q_i$  y no excedencia  $P_i$ , cuya formulación se ha expuesto en el apartado 4.4.2. Se ha empleado la regresión lineal para obtener los parámetros de las distribuciones, por lo que se ha procedido a calcular las variables linealizadas  $X_E$ ,  $X_G$ ,  $X_W$  y  $X_P$  para las distribuciones Exponencial, Gumbel, Weibull y Pareto respectivamente. Las fórmulas empleadas pueden consultarse en el anejo C.

Las variables  $X_W$  y  $X_P$  dependen de la elección del valor del parámetro  $\hat{\alpha}$ , que ha de ser estimado. Se ha seguido un proceso prueba-error hasta determinar el valor más adecuado de dicho parámetro.

El siguiente paso contempla el trazado  $H_{ss,i}$  en función de  $X_i$  y con ello representar las líneas de regresión lineal  $H_{ss}=A+B.X$  (Figura 4.15). Los valores de A y B para el *Punto 2* pueden ser consultados en la tabla D.11. Los valores de los parámetros de la distribución se obtienen a partir de estos parámetros de regresión, y dado el modo en que se ha definido la linealización de  $X_E$ ,  $X_G$ ,  $X_W$  y  $X_P$ , se obtiene que  $\hat{\beta}=B$  y  $\hat{\gamma}=A$ .

**Tabla 4.4:** Parámetros de distribuciones, *Punto 2*

Distribución	A	B	$\alpha$
Exponencial	3,148	0,799	-
Gumbel	3,587	0,619	-
Weibull	3,069	0,909	1,10
Pareto Generalizada	3,094	0,916	-0,075



**Figura 4.15:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados en el *Punto 2*

Obtenidos los valores de  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\beta}$  y  $\hat{\gamma}$  para todas las distribuciones, es posible calcular el valor de  $H_{ss}$  para cada valor de  $Q$  usando la fórmula de la distribución inversa (anejo C). Si se realiza dicho cálculo para todos los valores de  $Q_i$ , se obtiene una predicción del valor de altura de ola  $H_{ss,pred,i}$ , pudiendo ser comparado a la serie de datos original de altura de ola sobre umbral  $H_{ss,i}$ . Se define el error la bondad de ajuste de la distribución mediante el error cuadrático medio.

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{ss,i} - H_{ss,pred,i})^2} \quad (4.28)$$

Los valores del error cuadrático medio para cada distribución quedan recogidos en la tabla 4.5. Se ha empleado del mismo modo dicho cálculo para optimizar los valores de  $\hat{\alpha}$  en las distribuciones Weibull y Pareto Generalizada, obteniendo de este modo el menor valor del error cuadrático medio posible.

---

**Tabla 4.5:** Error cuadrático medio según distribución, *Punto 2*

Distribución	Error Cuadrático Medio
Exponencial	0,102
Gumbel	0,083
Weibull	0,069
Pareto Generalizada	0,066

### Oleaje en aguas profundas

Con los resultados presentados anteriormente se puede calcular la altura de ola de diseño para cualquier periodo de retorno  $R$  deseado. Hasta ahora sólo se había tratado el concepto estadístico de probabilidad de excedencia  $Q$ . Es posible traducir los resultados obtenidos a parámetros de diseño. Para cualquier valor de  $R$ , le corresponde una probabilidad de excedencia calculada como:

$$Q = \frac{1}{R \cdot N_s}$$

Sabiendo el valor de  $R$  y  $N_s$  se puede despejar el valor de la altura de ola correspondiente a ese periodo de retorno mediante la inversa de la distribución de extremos para cada función estudiada. La figura 4.15 refleja los resultados gráficos junto con los datos originales. Los pares de puntos  $[H_{s,s,i}, Q_i]$  obtenidos permiten realizar dicha representación gráfica donde las coordenadas  $Q_i$  han sido transformadas en  $R_i$  usando la ecuación siguiente.

$$R_i = \frac{1}{Q_i \cdot N_s}$$

### Función escogida

Tras analizar la información gráfica proporcionada por la figura 4.15 y la tabla de valores del error cuadrático medio, la función Weibull proporciona uno de los menos errores cuadráticos medios y cubre la mayor parte de los datos representados por la serie estudiada, sin quedar tanto del lado de la seguridad como la función exponencial ni tanto del lado de la inseguridad para periodos de retorno bajos como las funciones Gumbel o Pareto Generalizada. El oleaje en el *Punto 2* expuesto, sigue una una función Weibull definida por los parámetros expuestos en la tabla D.11.

#### 4.7.2. Obtención del periodo de retorno

##### Principio

La falta de datos por parte del proyecto hace necesario realizar este apartado intermedio en el desarrollo del análisis. Para obtener el periodo de retorno asociado a la ola de diseño es necesario estudiar el propio diseño del manto. La sección estudiada viene conformada por Core-Loc de 20 toneladas. En primer lugar se debe determinar el diámetro nominal  $d_n$  de la pieza. Para ello, se recurre a la expresión 4.29. Partiendo de la base de que el hormigón empleado tiene una densidad de  $\rho_s = 2200 \frac{kg}{m^3}$ , el diámetro nominal es de: 2,08 metros.

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_s}} = 2,08m \quad (4.29)$$

Haciendo uso de la expresión 4.26 es posible despejar la altura de ola asociada al diámetro nominal del elemento. De este modo se obtiene que la altura de ola de diseño es de 8,88 m. Se

---

verifica que la altura de ola no rompa, pues  $0,78 \cdot d = 0,78 \cdot 13,15 > 8,88$  m.

Analizando el *Punto 2* y su propagación es posible obtener el periodo de retorno asociado a esta altura de ola. Es necesario deshacer la propagación realizada en el apartado 4.7.2. Tras realizar dicho proceso, el periodo de retorno obtenido para la ola de diseño del manto es  $R=250$  años.

Este dato será empleado en apartados posteriores para comparar la evolución en el tiempo de la altura de ola asociada a un periodo de retorno  $R=250$  años.

### Propagación del oleaje a aguas someras

Una vez obtenidos los datos relativos al oleaje en aguas profundas, este ha sido propagado hasta la ubicación de la obra estudiada. Para obtener el periodo de retorno asociado, se ha tanteado hasta obtener a pie de dique una altura de ola que cumpla con el criterio de diseño mencionado en este apartado. La transformación realizada puede consultarse en el anejo E. La tabla siguiente recoge la información del oleaje a pie de dique y el ángulo de incidencia de este, obtenidos tras realizar la propagación del oleaje.

**Tabla 4.6:** Altura de ola en aguas profundas y propagada de los puntos de estudio en fase 1979-2010, *Punto 2*

Punto	$H_0$ (m)	$K_r \cdot K_s$	$\alpha$ ( $^\circ$ C)	$H_d$ (m)
Punto 2	8,97	0,988	12,50	8,87

La altura de ola a pie de dique es de  $8,87 \approx 8,88$  metros, tal y como requiere el apartado anterior.

### 4.7.3. Análisis series de datos 1979-1994 y 1995-2010

#### Procedimiento

El análisis de las series citadas se realiza de modo análogo al análisis expuesto en el apartado 4.7.1 para la serie 1979-2010. Los resultados intermedios pueden consultarse en los anejos D y E, donde se exponen los datos de oleaje en aguas profundas y las características de este una vez propagadas respectivamente.

A la vista de los resultados obtenidos, se pueden observar las siguientes cuestiones:

- En los 15 años de desfase entre las series, existe una tendencia de crecimiento de la altura de ola.
- No se han tenido en cuenta variaciones del nivel del mar en el análisis de la fluctuación de la altura de ola de diseño.
- Los tres puntos analizados sirven de base para fijar tres posibles escenarios de variación de la altura de ola, como se puede observar en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7:** Comparación altura de ola de diseño con  $R=250$  años, en los periodos de estudio

Punto de Estudio	$H_d$ (m) 1979-1994	$H_d$ (m) 1995-2010	Variación
Punto 1	8,12	8,14	+0,02
Punto 2	8,91	8,99	+0,08
Punto 3	7,96	7,98	+0,02

## Evolución de la altura de ola

A la vista de los resultados, se pueden generar tres tipos de escenarios de evolución de la altura de ola, simplemente extrapolando linealmente el incremento de la altura de ola a futuro, tomando los tres puntos estudiados. Un escenario medio, un escenario de máximo incremento y un escenario de menor incremento. Estas variaciones se han constatado para un periodo de 15 años. Suponiendo que el diseño se realizó en 2010, se realiza una extrapolación de dicha tendencia a 90 años vista desde el año 2010, para el año 2100. La variación prevista viene recogida en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8:** Comparación altura de ola de diseño con  $R=250$  años, en los periodos de estudio

Escenario	Incremento en Periodo de 15 años (m)	Incremento en Periodo de 90 años (m)
Medio	0,038	0,16
Máximo	0,074	0,30
Mínimo	0,02	0,08

### 4.7.4. Comparación condiciones de contorno entre 2010-2100 y necesidades de mejora del diseño

#### Procedimiento

Este apartado recoge el comportamiento del dique diseñado en 2010 frente a modos de fallo como el rebase y la estabilidad del manto ante variaciones de las condiciones de contorno inducidas por el Cambio Climático. Los principales parámetros de diseño que varían debido al Cambio Climático son la altura de ola y el nivel del mar. Se ha obtenido una serie de escenarios de variación de estas condiciones para el año 2100, pudiendo ver en qué medida el dique de Poniente en Veracruz cumplirá con los requisitos para los que fue diseñado.

#### Predicción de altura de ola

Como se ha mencionado en el apartado 4.7.3, se contemplan tres posibles escenarios de variación de la altura de ola a pie de dique. Estos vienen reflejados en la tabla 4.9. Estos serán estudiados en combinación con la variación del nivel del mar para poder observar cómo varía el comportamiento actual del dique ante estas variaciones.

**Tabla 4.9:** Escenarios Altura de ola Periodo de retorno  $R=250$  años, para 2100

Escenario	Incremento Altura de ola (m)
Escenario 1	0,30
Escenario 2	0,16
Escenario 3	0,08

#### Predicción del nivel del mar

Tal y como recoge el apartado 4.4.5, los escenarios de variación del nivel medio del mar considerados son:

**Tabla 4.10:** Escenarios Nivel del Mar

Escenario	Incremento medio NMM (m)
Escenario A	0,43
Escenario B	0,37
Escenario C	0,31



## Escenarios combinados

Este apartado contempla el estudio combinado del incremento de altura de ola combinado con el incremento del nivel del mar. Con ello, según el escenario previsto se puede observar la altura de ola esperada. La altura de ola obtenida, se compara a la altura de ola rotura para poder determinar que valor es limitante. En ningún caso la altura de ola de rotura es limitante. Los resultados se recogen en la tabla 4.11.

**Tabla 4.11:** Altura de ola Periodo a pie de dique  $H_d$  (m) con periodo de retorno  $R=250$  años combinando escenarios en año 2100

Escenario	Escenario A	Escenario B	Escenario C
Escenario 1	9,13	9,13	9,13
Escenario 2	9,03	9,03	9,03
Escenario 3	8,95	8,95	8,95

Se analizarán los escenarios más representativos. El más desfavorable, el más favorable y el escenario intermedio. A la vista de los resultados, estos serán: 1-A, 3-C y 2-B respectivamente.

## Respuesta de la estructura

Se realiza una comparación entre el dimensionamiento de la pieza del manto y de respuesta ante rebase, con las condiciones de contorno actuales (a fecha de 2010) y con las condiciones de contorno estimadas mediante los tres escenarios propuestos para el año 2100.

**Tabla 4.12:** Diferencia de peso del elemento 2010-2100

Escenario	Peso Requerido (t)	Variación (%)
Escenario Actual	20,00	-
Escenario 1-A	21,94	10 %
Escenario 2-B	21,23	6,15 %
Escenario 3-C	20,67	3,35 %

**Tabla 4.13:** Diferencia de rebase 2010-2100

Escenario	Descarga (l/s/m)	Variación (%)
Escenario Actual	674,00	-
Escenario 1-A	858,30	27,34 %
Escenario 2-B	812,70	20,58 %
Escenario 3-C	761,20	12,94 %

A la vista de los resultados, el diseño actual no ha tenido en cuenta las variaciones climáticas debidas al Cambio Climático, haciendo que la estructura esté infradimensionada ante condiciones extremas a finales del presente siglo.

El escenario más pesimista al respecto, muestra el infradimensionamiento de los elementos del manto, que necesitarían incrementar su peso en la sección estudiada, cerca de un 22 %. Por otro lado, de no variar el diseño actual, en el año 2100, el rebase asumido por el puerto puede incrementarse hasta un 27,34 %.

El escenario intermedio y el más optimista, muestran que la pieza del manto necesitaría incrementar su peso entre un 6 % y 3 % respectivamente. Los resultados significativos aparecen con las descargas debidas al rebase. En el mejor de los casos, el rebase aumentará cerca de un 13,00 %.

Los resultados observados pueden poner en entredicho las funciones de funcionalidad y seguridad aportadas por el dique de Poniente. Este problema ha de ser tratado y tenido en cuenta antes de llevar a cabo la obra de ampliación del Puerto de Veracruz.

### Comparación con estudios realizados por el IH Cantabria

El Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, *IHCantabria*, pone a disposición de cualquier usuario un visor<sup>[36]</sup> que permite consultar efectos del Cambio Climático sobre algunos puertos. La resolución del visor no es la adecuada al grado de detalle requerido para el diseño de un proyecto de obra marítima, aunque puede utilizarse para obtener una caracterización a priori de la zona. Los resultados obtenidos son comparados a los de este modelo. El visor muestra los efectos del Cambio Climático en el año 2040. Las figuras 4.16, 4.17a y 4.17b reflejan los resultados propuestos por el *IHCantabria* en el entorno de la obra estudiada.

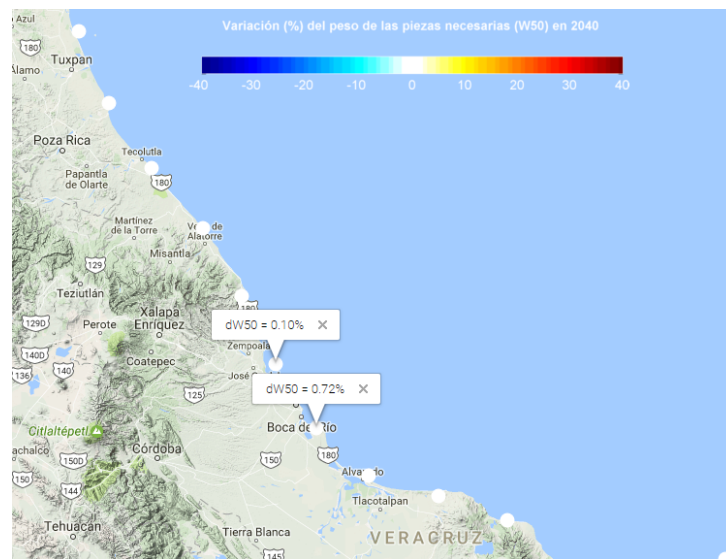


Figura 4.16: Variación del peso de la pieza del manto prevista para 2040

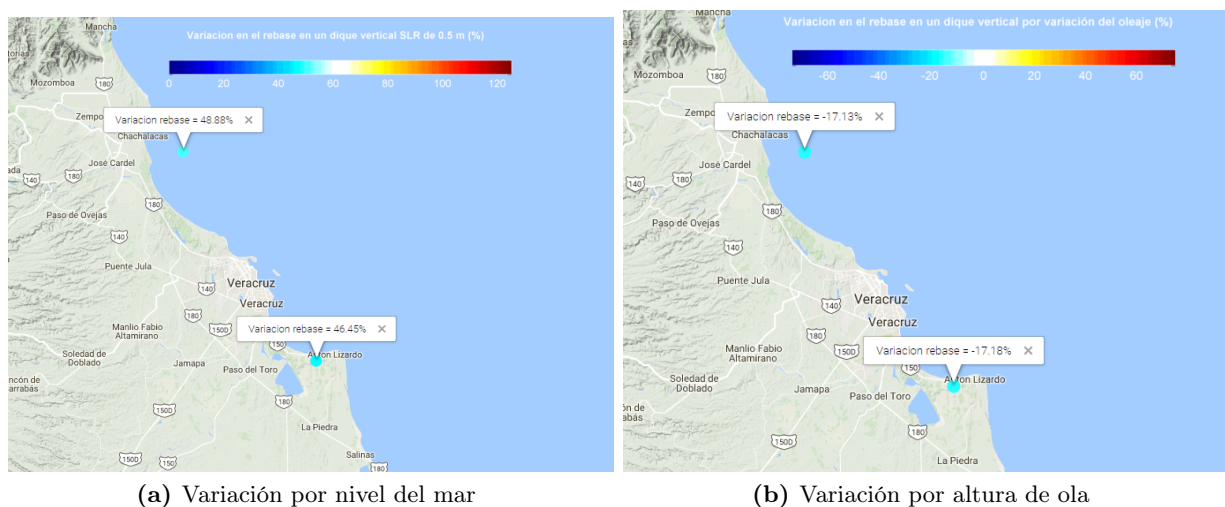


Figura 4.17: Variación del rebase prevista para 2040

Los resultados obtenidos en el estudio se enmarcan dentro de la tendencia mostrada por el *IHCantabria*. La figura 4.17 considera que en 2040 los niveles del mar ascenderán hasta 50 centí-

---

metros, escenario muy similar al más desfavorable propuesto por el organismo *IPCC*, con la gran diferencia de que este último propone esta situación para 2100. Se observa que combinando los resultados de rebase por altura de ola y nivel del mar expuesto en las figuras 4.17a y 4.17a, se obtiene un 30 % de incremento del rebase en los puertos del entorno de Veracruz. Este resultado concuerda en orden de magnitud pero no en periodo con los resultados obtenidos.

Cabe destacar que el estudio detallado llevado a cabo propone una mejora sustancial del peso de los elementos del manto comparado con el incremento previsto por el *IHCantabria*. Este último, propone para 2040 un incremento del orden del 0,50 % de media, del peso de los elementos que conforman los diques. El estudio llevado a cabo aumenta dicho crecimiento, previendo un aumento para 2100 de entre el 3 % y el 10 %.

### Deficiencias del diseño actual

De continuar con el diseño actual, pueden aparecer problemas de funcionalidad, operatividad y seguridad a largo plazo en el futuro Puerto de Veracruz. Por ello, este estudio propone medidas básicas para mantener en el año horizonte las mismas condiciones de diseño que en 2100.

En primer lugar, las piezas del manto deberían tener un peso cercano a las 22 toneladas en la sección de estudio, de lo contrario quedarían infradimensionadas para las condiciones de oleaje del año 2100. Se pueden estudiar otras soluciones como la disposición de una berma que aminore los efectos del oleaje sobre el manto en su parte superior siguiendo las recomendaciones de *Van Gent et al. 2012*<sup>[37]</sup>

La segunda medida propuesta es el incremento de altura del muro en cerca de 85 centímetros, las variaciones de nivel del mar en el peor de los escenarios estudiados (1-A), el rebase sea el mismo que en condiciones de diseño básicas para el año 2010.

### Diseño propuesto

Identificadas las deficiencias de la sección del dique de Poniente de la Ampliación del Puerto de Veracruz, se procede a realizar un diseño básico con las mejoras identificadas. Este diseño se basa en el escenario más restrictivo de todos, proporcionando el diseño más conservador, para apreciar cual será la mayor variación estructural posible. Este planteamiento es coherente en los países subdesarrollados o en vías de desarrollo, en los que no puede asegurarse un mantenimiento adecuado en el tiempo. El resultado gráfico de este diseño y su comparación con el diseño actual puede consultarse en el anejo G.

#### *Diseño del manto*

El manto constará de elementos tipo Core-Loc con un peso medio de 22 toneladas. El diámetro nominal correspondiente basa su cálculo en la ecuación 4.29. El valor de este parámetro es  $d_n=2,15$  metros. El espesor del manto se corresponde con una capa simple de Core-Loc, por lo tanto el espesor que debiera considerarse es de 2,15 metros. Sin embargo, el diseño actual confiere un mayor espesor, por lo tanto, se incrementará este espesor en proporción al incremento de peso de la pieza, pasando de 3,15 metros actuales a 3,45 metros de espesor.

#### *Capas inferiores*

Siguiendo las recomendaciones del *Rock Manual*<sup>[32]</sup>, la primera capa de roca tras el manto tendrá un peso de  $M_{50} = M_{pieza}/10=10$  toneladas. Su espesor será de 3,15 metros, siguiendo la recomendación de disponer un espesor del doble del diámetros nominal.

La capa secundaria vendrá conformada por elementos de peso que cumplan las condiciones siguientes citadas por el *Rock Manual*:

$$M_{50} = \frac{M_{50a}}{10 - 15} \quad (4.30)$$

$$d_{n50} = \frac{d_{n50a}}{2,2 - 2,5} \quad (4.31)$$

El peso medio del árido dispuesto será de 600 kilogramos en esta capa con un diámetro nominal medio de 0,65 metros aproximadamente.

#### Núcleo

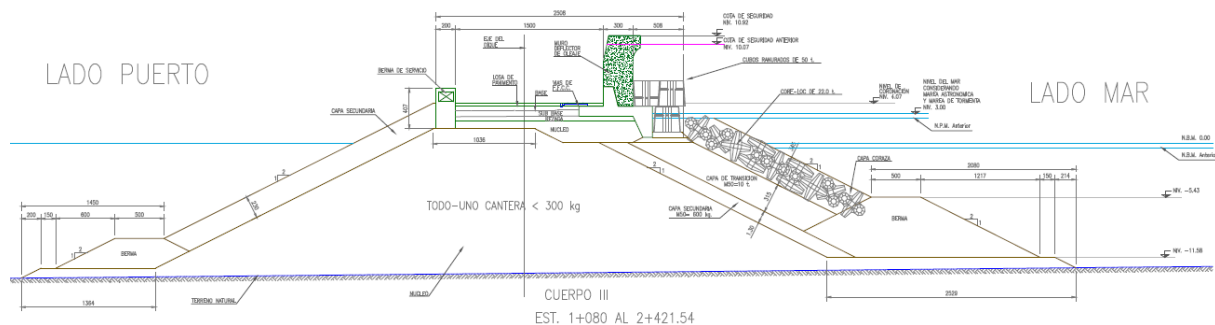
El núcleo vendrá conformado con todo-uno de cantera con peso inferior a 300 kg, para cumplir las exigencias de filtro.

#### Muro

El muro original diseñado verá aumentada su coronación en 0,85 metros para cumplir las condiciones de rebase actuales, bajo condiciones de diseño en 2100.

#### Otros elementos

Este estudio se centra en especial en el manto y altura de coronación del dique. Por ello, el resto de elementos y su configuración no han sido diseñados de forma óptima. El pie de dique, el talud dispuesto y elementos auxiliares dispuestos en el diseño original se han respetado.



**Figura 4.18:** Diseño propuesto de la Sección de estudio, PK 1+080 al 2+421

## 4.8. Resumen del capítulo 4

El proyecto de Ampliación del Puerto de Veracruz viene motivado por la necesidad de incrementar las infraestructuras marítimas que facilitan el comercio internacional. El Cambio Climático supone una amenaza para el desarrollo de actividades portuarias. De no tener en cuenta este fenómeno, las actividades portuarias pueden verse interrumpidas con mayor frecuencia con el paso de los años y mayor desarrollo de los efectos generados por el Cambio Climático. El dique de Poniente es un elemento esencial que confiere seguridad y funcionalidad al Puerto protegido.

---

Su diseño es esencial y se ha observado el infradimensionamiento de este ante los modos de fallo de estabilidad del manto y rebase. De acuerdo con los escenarios de variación de altura de ola y nivel del mar, tomando como horizonte el año 2100, las piezas que conforman el manto deberían tener un peso entre [3 % - 10 %]. Por otro lado, el rebase se verá incrementado entre [13 % - 27 %]. Esta amenaza debe ser considerada por las autoridades, con el fin de tomar medidas al respecto o realizar un seguimiento de estas variaciones y poder actuar a tiempo.

Los resultados muestran la necesidad de considerar de algún modo la incertidumbre asociada a los efectos del Cambio Climático. Como puede observarse, existen resultados de posibles infradimensionamientos de las estructuras marítimas a causa de no considerar este fenómeno. Los resultados propuestos tanto en este estudio como los estudios llevados a cabo por el *IHCantabria*, resaltan esta necesidad.

---

## Capítulo 5

# Conclusion

El Trabajo Final de Máster desarrollado ha explorado las distintas fuentes de datos de oleaje existentes, ya sean de tipo instrumental o sintético. Esto ha permitido decidir qué base de datos puede ser empleada a nivel genérico para los proyectos de obra marítimo, sin tener que recurrir a la realización de una labor de búsqueda previa antes de cada proyecto de obra marítima. La falta de datos relativos al oleaje en zonas geográficas donde no se dispone de las herramientas necesarias para poder caracterizar este factor, ha sido solucionada mediante el código desarrollado a través de este trabajo. El código extrae datos de oleaje en aguas profundas a una escala global y con precisión cercana a la de las bases de datos de pago existentes como *Argoss BMT*. El código implementado extrae datos de la base de datos de la *NOAA* en cualquier emplazamiento deseado. Estos datos caracterizan el oleaje proporcionando información acerca de la altura de ola, periodo pico y dirección del oleaje. Además de poner a disposición de cualquier usuario este código, el estudio realizado sobre las bases de datos existentes, facilita la búsqueda de información relativa al oleaje en cualquier continente, pudiendo consultar, en algunos casos, los datos instrumentales proporcionados por organismos internacionales.

Por otro lado, se ha expuesto detalladamente la metodología seguida para diseñar el dique de Poniente de Veracruz frente a modos de fallo como el rebase o estabilidad del manto. El procedimiento tradicional de caracterización del oleaje de diseño ha permitido realizar una estimación del incremento de la altura de ola. Esta estimación extrapolada en combinación con el crecimiento del nivel del mar ha permitido generar varios escenarios de condiciones marítimas en el año 2100. Seguidamente, se ha comparado la respuesta del dique de Poniente actual frente a condiciones de diseño actuales y en el año 2100. De este modo se ha dado respuesta al segundo de los objetivos fijados. El código desarrollado ha permitido conocer la evolución temporal del oleaje en el entorno de la futura Ampliación Norte del Puerto de Veracruz. Esta evolución positiva en magnitud en combinación con los escenarios de variación del nivel medio del mar propuestos por el *IPCC*, han facilitado la identificación las deficiencias en el diseño de un dique moderno, diseñado en 2010, ante los posibles efectos asociados al Cambio Climático sobre el clima marítimo. Los resultados han mostrado como los efectos debidos al rebase serán entre un 13% y 27% mayores, reafirmando la tendencia seguida en investigaciones recientes y las llevadas a cabo por el *IH Cantabria*, que sitúan en un 30% el incremento de efectos asociados al rebase tras un incremento del nivel del mar de cincuenta centímetros en el entorno de Veracruz. El incremento de altura de ola muestra que el diseño de la sección estudiada del dique de Poniente de Veracruz, quedaría infradimensionada en el año 2100, no pudiendo asegurar la estabilidad del manto. El peso de los elementos del manto debería considerar esta variación e incrementarse entre un 3% y 10%. Estos resultados difieren con los propuestos por el *IH Cantabria*, pues este organismo propone la necesidad de aumentar entre un 0,10% y 0,72% el peso de los elementos del manto en el entorno de Veracruz para el año 2040. Suponiendo un incremento lineal, se pueden comparar los resultados relativos al peso de los elementos del manto. Todos estos resultados pueden consultarse en la tabla resumen 5.1. Este Trabajo Final de Máster sigue una metodología específica

con el nivel de precisión adecuado al diseño de obras marítimas, mientras que los resultados del *IH Cantabria* son más generales.

**Tabla 5.1:** Efectos asociados al incremento de  $H_s$  y  $NMM$  en el año 2100 con respecto al año 2010 y comparación con resultados del *IH Cantabria*

Efectos	Estudio realizado	<i>IH Cantabria</i>
Incremento Rebase (%)	13-27	30
Peso del elemento manto (%)	3-10	0,40-2,90

Todo ello pone de manifiesto la necesidad de incorporar en un diseño actual la incertidumbre asociada a los efectos del Cambio Climático. Existe una necesidad de introducir un posible coeficiente corrector en la altura de ola y nivel del mar, dependiendo del emplazamiento de la obra. De este modo se cubrirían los requerimientos de seguridad, operatividad y funcionalidad de la estructura durante su vida útil. La gestión de la situación puede ser flexible. Se deben considerar estos efectos en un futuro, pero las mejoras aportadas al dique para hacer frente a estas condiciones variables pueden ser progresivas. De este modo se evita una rehabilitación costosa que puede provocar un gasto innecesario, dado que todos los resultados hasta la fecha están basados en predicciones. Un plan previsor puede ahorrar costes a largo plazo y proporciona una gestión flexible y adaptable a la situación.

La metodología empleada para evaluar la respuesta del dique ante el clima marítimo futuro puede ser empleada para el mismo propósito en cualquier otro dique del mundo. Puede ser de utilidad para conocer con detalle, y basando el estudio en fuentes pioneras de investigación (*NOAA* e *IPCC*), el futuro comportamiento de la estructura marítima ante las predicciones de altura de ola y nivel del mar debidos al Cambio Climático. Esta información puede ser empleada para realizar un gestión flexible del mantenimiento y rehabilitación de diques u otras obras marítimas, así como para obras de nueva construcción.

El procedimiento llevado a cabo puede realizarse con más rigor mediante la disposición de más datos del entorno de la obra y de un análisis estadístico completo, teniendo en cuenta las variables de diseño y su posible desviación. Las obras marítimas diseñadas suelen tener un gran margen de seguridad, teniendo una probabilidad de fallo asociada a un modo de fallo, inferior al inicialmente decidido. Por ello, un estudio de nivel probabilístico II o III dará resultados más fiables al respecto y permitirá conocer cual es la probabilidad de fallo asociada al modo de fallo estudiado. Realizando la comparación entre la probabilidad de fallo inicialmente indicada en diseño y la probabilidad de fallo obtenida mediante las condiciones de contorno en el año 2100, por ejemplo, mostrará con claridad si de verdad la estructura sigue cumpliendo los requisitos de diseño previstos. Este Trabajo Final de Máster ha identificado el futuro problema ligado a los cambios en las condiciones del clima marítimo que afectan y afectarán a diseños ya realizados y por realizar.

---

## Anejo A

# Obtención de Archivos de las bases de datos

### A.1. Introducción

Este apartado tiene como objetivo guiar al lector en las labores de búsqueda on-line de bases de datos de oleaje. Se mostrará la manera de obtener datos relativos al oleaje de las principales fuentes no españolas mostradas, así como una descripción detallada de la obtención y estudio de la base de datos del *NOAA*.

### A.2. Bases de datos diversas

#### A.2.1. Ifremer

El enlace <http://www.ifremer.fr/co-en/><sup>[17]</sup> permite al usuario acceder a una plataforma interactiva. En ella, el usuario puede acceder a uno de los puntos de medición situados en la cartografía mundial. La figura A.1 muestra las diferentes redes de datos que existen. En el capítulo 3 se han citado las redes más importantes de esta base de datos, explicadas a continuación.

Networks	
■	Bouées météo
■	Candhis
■	Climaat
■	Débits
■	EMSO-ESONET Antares seafloor observatory
■	EMSO-ESONET Momar seafloor observatory
■	IMEDIA 2012
■	Marel
■	Mesurho
■	MyOcean eulerian platforms
■	OceanSITES moorings
■	Pluviométrie
■	Réseau des îles
■	Sea-levels
■	Shom-Ronim
■	Shom-SoneI-Refmar
■	Smatch Conchylicole

Figura A.1: Leyenda base de datos Ifremer



Se muestra a modo orientativo los pasos a seguir para obtener los datos relativos al oleaje en las redes *Candhis* y *Shom Ronim*.

## Candhis

Pulsando sobre una de las marcas del color correspondiente a esta red, accederemos directamente a un enlace en el que podremos obtener los datos deseados en función de la cantidad de información que este contenga. Cabe mencionar que el periodo de datos proporcionados por el punto es variable.

A modo de ejemplo, uno de los puntos de la costa francesa proporciona la siguiente información.

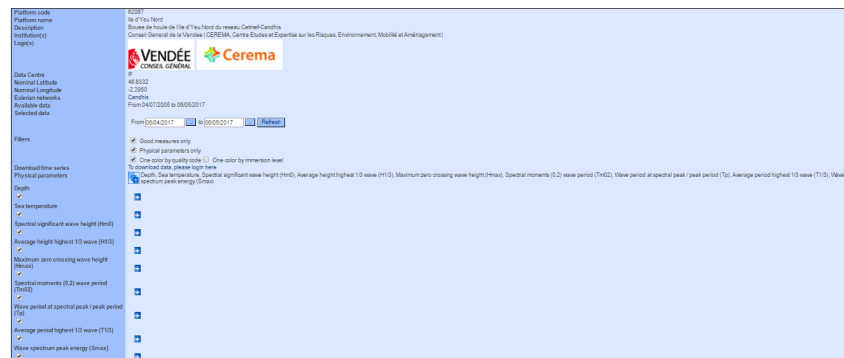


Figura A.2: Pantalla de datos red Candhis

Existe un acceso directo a la página oficial, más sencilla de manipular, de esta red de datos de oleaje: <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/carte/><sup>[38]</sup>. En ella, se debe acceder a la opción *Carte de campagnes* situada en el menú. Esta opción redirecciona a una plataforma que muestra los puntos con datos de oleaje. Accediendo a uno de estos, deberemos dirigirnos a la parte inferior de la página donde aparece un listado de gráficos (figura A.4)

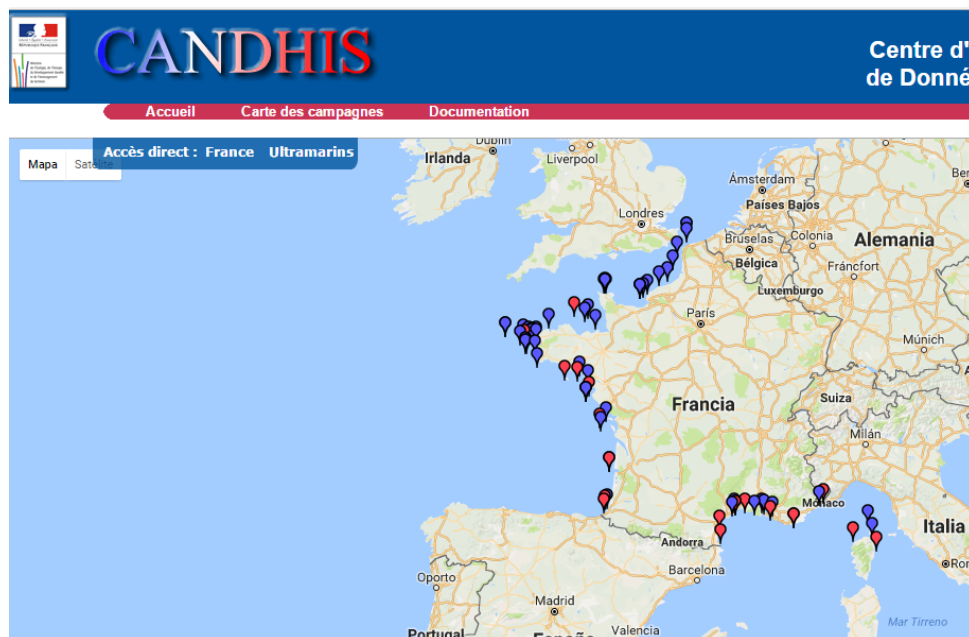
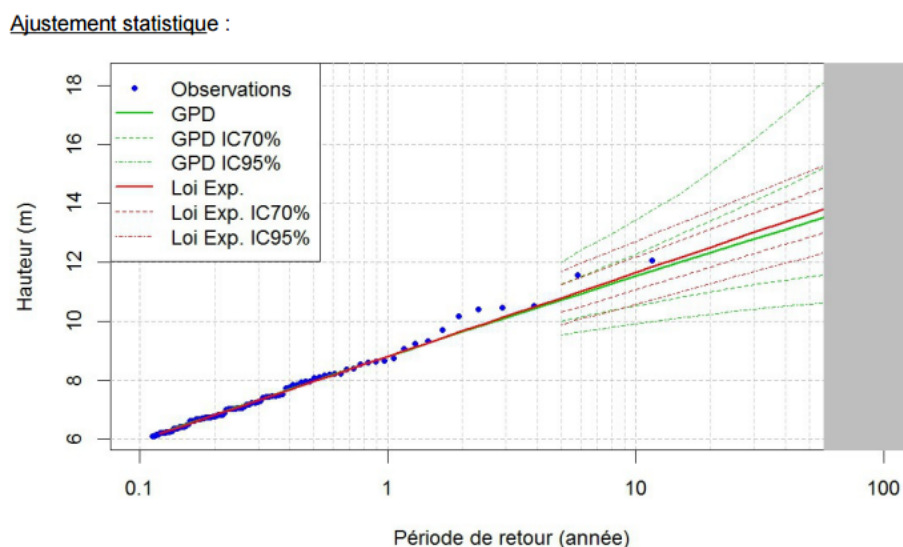


Figura A.3: Pantalla de datos red Candhis



**Figura A.4:** Pantalla particular punto escogido

Escogiendo la opción de fichas sintéticas, se obtendrá un resumen de los datos de oleaje así como funciones  $H_s-R$  útiles para el diseño. La figura A.5 muestra una gráfica ejemplo que aparece en el informe escogido.



**Figura A.5:** Ajuste de funciones  $H_s-R$  presentes en los informes Candhis

### Shom Ronim

Pulsando sobre una de las marcas del color correspondiente a esta red, accederemos directamente a una nueva página en la que podremos obtener los datos deseados, en función de la cantidad de información que este contenga. El periodo de datos proporcionados por el punto es variable.

A modo de ejemplo, uno de los puntos de la costa africana proporciona la siguiente información.

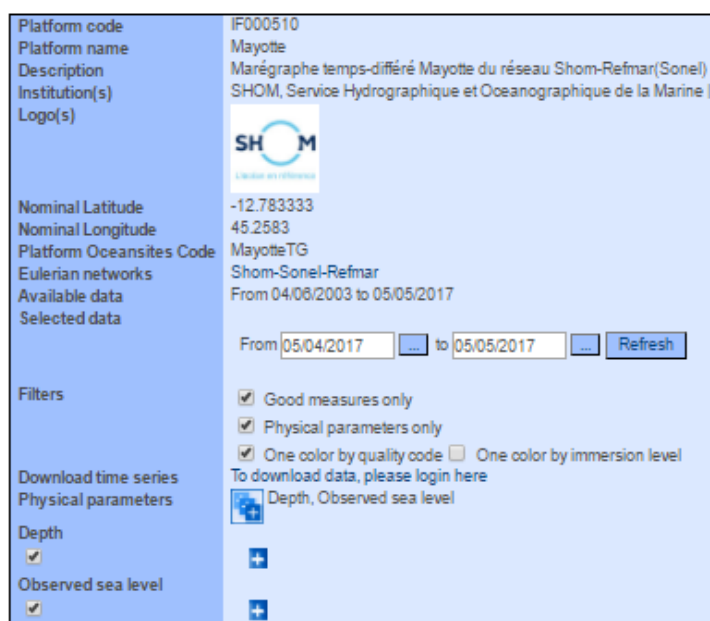


Figura A.6: Pantalla de datos red Shom Ronim

Esta base de datos es más interesante para conocer el nivel del mar en un instante dado, la profundidad en el punto y su variación.

### A.2.2. Simorc

La base de datos *Simorc*, <http://www.simorc.org/><sup>[39]</sup>, es de acceso restringido. Para acceder a la plataforma interactiva de datos, se debe escoger la opción *Data Access* en la misma página citada (figuraA.7).



Figura A.7: Acceso pantalla interactiva de datos *Simorc*

La administración de la web especificó que la metabase de datos es accesible sin contraseña y que contiene más de 5300 series de datos, cubriendo más de 2000 años de datos oceánicos, incrementándose gradualmente.

*Simorc* comparte datos con la organización *SeaDataNet* de acceso gratuito, cuyo enlace es

<https://www.seadatanet.org/><sup>[40]</sup>. Esta última, cruza bases de datos como la base *Candhis* explicada anteriormente y otras europeas. En la cartografía mundial disponible en *Simorc*, los puntos pertenecientes a *SeaDataNet* aparecen en rojo.

Sin embargo, los datos obtenidos por empresas relacionadas con el sector de la energía, sólo pueden ser obtenidos previa petición y sabiendo qué punto o qué plataforma (y nombre) se pretende estudiar (figura A.8).

#	Data set name	Variables	Platform type	Instrument	Water depth (m)	SIMORC data id	Show
<input type="checkbox"/>	TORMORE_POSTQC	Administration and dimensions > Administration and dimensions Physical oceanography > Currents	subsurface mooring	current profilers	620	1327025	Show
<input checked="" type="checkbox"/>	C10709_SEDC0714	Administration and dimensions > Administration and dimensions Physical oceanography > Currents Water column temperature and salinity	offshore structure	current profilers	620	1103137	Show
<input type="checkbox"/>	T08_ADCP	Administration and dimensions > Administration and dimensions Physical oceanography > Currents	subsurface mooring	current profilers	500	968119	Show

**Figura A.8:** Pantalla de petición de datos

Tras contactar con los administradores de la página, se registró un usuario con perfil no académico. Cada petición de datos será transmitida directamente a su propietario, ya sea *Shell*, *TOTAL* o *BP*. Para realizar la petición se ha de seleccionar el punto requerido y usar los datos creados para este propósito.

- Username: Javier
- Contraseña: PUV528

### A.2.3. BMT Argoss

*BMT Argoss* es una base de datos de pago. Para consultarla, se ha de acceder al enlace siguiente: <http://www.waveclimate.com/><sup>[18]</sup>. En caso de tener cuenta de usuario, se podrá acceder.

La pantalla principal requiere que el usuario introduzca el punto de estudio, y el área cubierta por el modelo, como muestra la figura A.9.

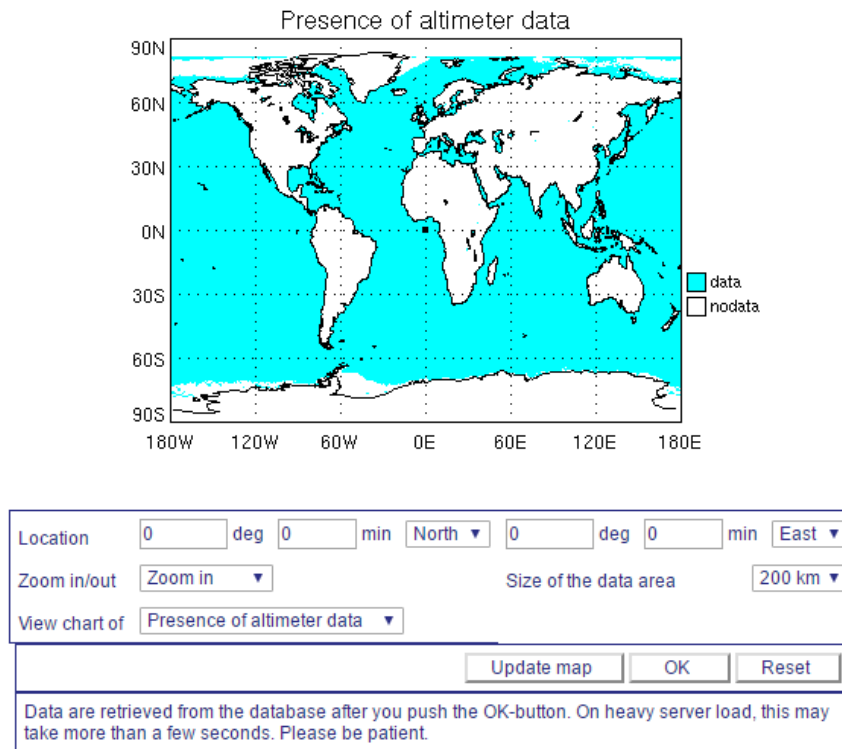


Figura A.9: Pantalla inicial de introducción de datos<sup>[18]</sup>

Una vez escogido el lugar de estudio, se accede a la opción *Timeseries* (figura A.10). Una vez dentro, se podrá descargar la hoja de cálculo con los datos relativos al oleaje necesarios para caracterizar el clima marítimo en toda obra marítima.



Figura A.10: Acceso a la serie de datos<sup>[18]</sup>

---

## A.3. Obtención de datos de la NOAA

### A.3.1. Descarga de los archivos

El usuario debe disponer en su ordenador el software *Degrib*, decargable en la dirección [https://www.weather.govmdl/degrib\\_download](https://www.weather.govmdl/degrib_download)<sup>[41]</sup>, que le permitirá proceder con el análisis de la base de datos de la NOAA.

La base de datos se encuentra en Internet y es de acceso gratuito. Para obtener datos relativos a la fase 1 de análisis (descrita en 3.1.1), es aconsejable realizar dicha operación desde un ordenador con sistema operativo *MAC OS* o *LINUX* para evitar realizar un mayor número de operaciones previas. En caso de disponer un sistema operativo *WINDOWS*, se aconseja emplear el navegador *Internet Explorer* para la descarga de estos archivos pues al emplear otros, el fichero obtenido a día de hoy, queda dañado y no se puede manipular. Previo a su empleo, será necesario descomprimir el archivo con extensión *.gz* mediante programas como *Winzip*, *7-zip* o *PowerArchiver*.

Para obtener datos relativos a la fase 2 (descrita en 3.1.1), cualquier navegador puede ser empleado y se evita la fase de descompresión de archivos, pues estos ya están descomprimidos.

La fase 2 es más interesante a efectos del análisis, no sólo por la mayor rapidez en la obtención de datos, sino por la mayor precisión del modelo *WW-III* empleado en su última versión y modelos más actualizados que dan mayor precisión al modelo.

El directorio que recoge los datos en función de la fase se encuentra en el siguiente enlace:

- <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/nopp-phase1><sup>[42]</sup>
- <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/nopp-phase2><sup>[43]</sup>

En el siguiente apartado se muestra un ejemplo de obtención del archivo.

### A.3.2. Ejemplo de obtención de datos

Este ejemplo muestra a modo de tutorial las fases a seguir para obtener los datos relativos al oleaje de Enero de 1979.

## Índice de /pub/history/nopp-phase2

---






Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
 [directorio principal]		
 197901/		24/1/17 21:06:00
 197902/		24/1/17 21:12:00
 197903/		24/1/17 21:17:00
 197904/		24/1/17 21:22:00

Figura A.11: Directorio Datos Hindcasting NOAA

Las carpetas con datos están ordenadas por mes. Así pues, es posible acceder a la carpeta que proporciona datos de Enero de 1979 (recuadro rojo).

---

## Índice de /pub/history/nopp-phase2/197901/

---






Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
 [directorio principal]		
 coll/		24/1/17 21:01:00
 grib/		24/1/17 21:02:00
 partitions/		24/1/17 21:05:00
 points/		24/1/17 21:06:00

Figura A.12: Subcarpeta Datos fecha 01/1979 NOAA

Dentro del mes indicado, aparecen tres subcarpetas. De estas, los archivos “grib” son los que serán interesantes para proseguir con la extracción de datos. Este tipo de archivo es el que contiene la información relativa a las propagaciones.









 multi_reanal.ecg_4m.dp.197901.grb2	15.4 MB	22/11/16 18:36:00
 multi_reanal.ecg_4m.hs.197901.grb2	11.3 MB	22/11/16 18:36:00
 multi_reanal.ecg_4m.tp.197901.grb2	12.0 MB	22/11/16 18:36:00
 multi_reanal.ecg_4m.wind.197901.grb2	23.5 MB	22/11/16 18:36:00
 multi_reanal.glo_30m_ext.dp.197901.grb2	57.0 MB	22/11/16 18:36:00
 multi_reanal.glo_30m_ext.hs.197901.grb2	28.8 MB	22/11/16 18:36:00
 multi_reanal.glo_30m_ext.tp.197901.grb2	35.6 MB	22/11/16 18:37:00
 multi_reanal.glo_30m_ext.wind.197901.grb2	85.8 MB	22/11/16 18:37:00

Figura A.13: Subcarpeta Grib fecha 01/1979 NOAA

Dentro de la carpeta Grib aparecen muchos archivos con extensión *.grb2*. Se explica a continuación, de manera detallada, la nomenclatura que explica el nombre de un archivo genérico. Se toma por ejemplo el siguiente archivo:

Multi\_reanal.[Grid ID].[Variable].[aaaamm].grb2

- **Grid ID:** En base al GRID ID proporcionado, se conoce la localización geográfica del entorno analizado. Para ello, se ha de conocer la nomenclatura empleada por WW-III en cuanto a resolución y base de datos geo localizada.
- **Variable:** Por otro lado, cada celda puede proporcionar los valores de una de las siguientes variables:
- **aaaamm:** Este campo irá rellenado según el año de estudio (aaaa) y el mes del mismo año analizado (mm). A modo de ejemplo, se especifica a continuación la información que puede extraerse del archivo encuadrado en la Fig. 14

---

**Tabla A.1:** Variables base de datos NOAA

Variable	Descripción
Wind	Proporciona la dirección y velocidad del viento, interpolando datos entre los datos de entrada y salida de la celda del modelo
$h_s$	Proporciona la altura de ola significativa
$T_p$	Proporciona el periodo pico del espectro analizado
$D_p$	Proporciona la dirección media del oleaje. Se expresa en nomenclatura náutica ( $0^\circ$ a $360^\circ$ , donde $0^\circ$ es el Norte)

**Multi\_reanal.glo\_30m\_ext.hs.197901.grb2**

- **Grid ID:** Dicho archivo proporciona datos de la base de datos Global (glo) con una resolución de 30 minutos (30m).
- **Variable:** La variable que se puede analizar mediante el mismo es la altura de ola en la fecha considerada.
- **aaaamm:** El año de estudio es 1979 y el mes Enero (01).



---

## Anejo B

# Códigos Matlab

Código Matlab para la obtención de las series de oleaje. Cabe destacar que por motivos del software las tildes serán suprimidas en la explicación del código.

### B.1. Altura de ola

```
1 %Codigo para la Obtencion de Datos de Altura de ola.
2 %
3 % Utilidad: TFM
4 % Autor: MARTINEZ CANTERO, Javier
5 % Tutor: GONZALEZ ESCRIVA, Jose Alberto
6 % Co tutor: MOLINES LLODRA, Jorge
7 %
8 % Comentarios:
9 % 1) Esta funcion usa deGrib para exportar .grib .grib2 archivos a
   %     ASCI
10 %     para ciertos puntos del dominio Grib. Para que esta funcion
   %     sea
11 %     empleada, es necesario instalar degrib.exe.
12
13 % 2) El modelo estudiado es mallado con intervalo de aprox. 50 km.
14 %     De ese modo puntos separados por una distancia menor daran
   %     mismos
15 %     resultados.
16 %
17 % 3) Los resultados difieren un 6.3% de la base de datos de pago
   %     Argoss
18 %     BMT, consultable en internet.
19
20 % Referencia:
21 % B.A. NICLASSEN, NWW3 as part of SAR Weather: Initial
22 % investigation and thoughts on how to proceed,
23 % University of the Faroe Islands, 2010:13
24
25 % ORGANIZACION PREVIA
26 % Eliminar manualmente los archivos generados en la carpeta 'Results
   % ', (Se
```

```

27 % puede automatizar pero la extensin del c digo seria muy larga).
28 % Automaticamente el programa borrara los demas archivos generados.
29
30 FileName = 'C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme\Datos.xlsx';
31 if exist(FileName, 'file') == 2
32     delete(FileName);
33 end
34
35 FileName = 'C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme\newfile.txt';
36 if exist(FileName, 'file') == 2
37     delete(FileName);
38 end
39
40 %INTRODUCCION DE DATOS (INPUT)
41
42 % 1) FECHAS
43 % Fecha de inicio del estudio:
44 YY_start = 1979; MM_start=01;
45
46 % Fecha fin del estudio:
47 YY_end = 2009; MM_end=12;
48
49 % 2) LOCALIZACION BASE DE DATOS
50 % Camino archivos analizables [base de datos] archivos degrib.
51
52 name_in='C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme';
53
54 % 3) PUNTO DE ESTUDIO
55 % Localizacion punto de estudio (Latitud y Longitud en formato
    decimal)
56 % * Para conversion es posible emplear la siguiente pagina:
57 % https://www.fcc.gov/media/radio/dms decimal
58 % * 0 90 N (+); 0 90 S ( ) // 0 90 E (+); 0 90 W ( )
59
60 lat_1='00.000000'; lon_1='00.000000';
61
62 % FIN INTRODUCCION DATOS (INPUT)
63
64 % 4) RUTA EJECUTABLE (BIN) DEGRIB
65 % Es necesario tener instalado programa Degrib.
66 % Localizar directorio donde estan localizados los ejecutables de
    Degrib
67 % ((bin) e indicar ruta a continuacion:
68
69 cd C:\ndfd\degrib\bin
70
71 for YY=YY_start:YY_end;
72     for MM=MM_start:MM_end;
73

```

```

74     Out_name_1=[name_in '\Results\Hs_' num2str(YY) num2str(MM) '.txt'];
75
76     % Bucle para enviar todos los datos por mes a un solo archivo de
77     texto.
78
79     disp(['Now reading date: Y=', num2str(YY), ' M=', num2str(MM)]);
80
81     dir_name=name_in;
82
83     % Caminos a todos los archivos correctamente descargados en
84     directorio
85
86     if MM<=9
87
88         path_0=[dir_name, '\multi_reanal.glo_30m_ext.hs.' num2str(YY)
89                 '0' num2str(MM) '.grb2'];
90
91     else
92
93         path_0=[dir_name, '\multi_reanal.glo_30m_ext.hs.' num2str(YY)
94                 num2str(MM) '.grb2'];
95
96     end
97
98     % Verificar que los archivos existen (existe = 0 si no, ==2 si Ok)
99
100    e0=exist(path_0, 'file');
101
102    if e0==2
103
104        str=['degrib ', path_0, ' P pnt ', lat_1, ', ', lon_1, ' >> ',
105            Out_name_1]; dos(str);
106
107    else
108
109        disp(' File error')
110
111    end
112
113 end
114
115 cd (name_in)
116
117 for YY=YY_start:YY_end;
118     for MM=MM_start:MM_end;
119
120         Texto=[name_in '\Results\Hs_' num2str(YY) num2str(MM) '.txt'];
121
122         fid=fopen(Texto);

```

---

```
120     s=textscan(fid, '%s %s %s %s %s', 'headerlines', 1);
121     fclose(fid);
122     ss=[s{:}];
123     fid1=fopen('newfile.txt', 'a+');
124
125     for k=1:size(ss, 1)
126
127         fprintf(fid1, '%s %s %s %s %s\r\n', ss{k,:});
128
129     end
130
131     fclose(fid1);
132
133     f = fopen('newfile.txt');
134     c = textscan(f, '%s %s %s %s %s', 'delimiter', ',', ' ');
135     fclose(f);
136     xlswrite('Datos.xlsx', [c{:}])
137
138
139     end
140 end
```

---

## B.2. Dirección del oleaje

```
1 %Codigo para la Obtencion de Direccion del oleaje.
2 %
3 % Utilidad: TFM
4 % Autor: MARTINEZ CANTERO, Javier
5 % Tutor: GONZALEZ ESCRIVA, Jose Alberto
6 % Co tutor: MOLINES LLODRA, Jorge
7 %
8 % Comentarios:
9 % 1) Esta funcion usa deGrib para exportar .grib .grib2 archivos a
   ASCII
10 % para ciertos puntos del dominio Grib. Para que esta funcion
   sea
11 % empleada, es necesario instalar degrib.exe.
12
13 % 2) El modelo estudiado es mallado con intervalo de aprox. 50 km.
14 % De ese modo puntos separados por una distancia menor darn
   mismos
15 % resultados.
16 %
17 % 3) Los resultados difieren un 6.3% de la base de datos de pago
   Argoss
18 % BMT, consultable en internet.
19
20 % Referencia:
21 % B.A. NICLASEN, NWW3 as part of SAR Weather: Initial
22 % investigation and thoughts on how to proceed,
23 % University of the Faroe Islands, 2010:13
24
25 % ORGANIZACION PREVIA
26 % Eliminar manualmente los archivos generados en la carpeta 'Results
   ', (Se
27 % puede automatizar pero la extensin del c digo seria muy larga).
28 % Automaticamente el programa borrara los demas archivos generados.
29
30 FileName = 'C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme\Datos.xlsx';
31 if exist(FileName, 'file') == 2
32     delete(FileName);
33 end
34
35 FileName = 'C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme\newfile.txt';
36 if exist(FileName, 'file') == 2
37     delete(FileName);
38 end
39
40 %INTRODUCCION DE DATOS (INPUT)
41
42 % 1) FECHAS
43 % Fecha de inicio del estudio:
```

---

```

44 YY_start = 1979; MM_start=01;
45
46 % Fecha fin del estudio:
47 YY_end = 2009; MM_end=12;
48
49 % 2) LOCALIZACION BASE DE DATOS
50 % Camino archivos analizables [base de datos] archivos degrib.
51
52 name_in='C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme'
53
54 % 3) PUNTO DE ESTUDIO
55 % Localizacion punto de estudio (Latitud y Longitud en formato
    decimal)
56 % * Para conversion es posible emplear la siguiente pagina:
57 % https://www.fcc.gov/media/radio/dms decimal
58 % * 0 90 N (+); 0 90 S ( ) // 0 90 E (+); 0 90 W ( )
59
60 lat_1='00.000000'; lon_1='00.000000';
61
62 % FIN INTRODUCCION DATOS (INPUT)
63
64
65
66 % 4) RUTA EJECUTABLE (BIN) DEGRIB
67 % Es necesario tener instalado programa Degrib.
68 % Localizar directorio donde estn localizados los ejecutables de
    Degrib
69 % (bin) e indicar ruta a continuacion:
70
71 cd C:\ndfd\degrib\bin
72
73 for YY=YY_start:YY_end;
74     for MM=MM_start:MM_end;
75
76         Out_name_1=[name_in '\Results\Direccion_' num2str(YY) num2str(MM) '
            .txt'];
77
78 % Bucle para enviar todos los datos por mes a un solo archivo de
    texto.
79
80
81     disp(['Now reading date: Y=', num2str(YY), ' M=', num2str(MM)]);
82
83     dir_name=name_in;
84
85 % Caminos a todos los archivos correctamente descargados en
    directorio
86
87     if MM<=9
88

```

---

```

89     path_0=[dir_name, '\multi_reanal.glo_30m_ext.dp.' num2str(YY)
90           '0' num2str(MM) '.grb2'];
91
92     else
93         path_0=[dir_name, '\multi_reanal.glo_30m_ext.dp.' num2str(YY)
94               num2str(MM) '.grb2'];
95     end
96
97     % Verificar que los archivos existen (existe = 0 si no, ==2 si Ok)
98
99     e0=exist(path_0, 'file');
100
101     if e0==2
102
103
104         str=['degrib ',path_0, ' P pnt ',lat_1, ',',lon_1, ' >> ',
105             Out_name_1]; dos(str);
106
107     else
108         disp(' File error')
109
110     end
111 end
112
113 end
114
115 cd (name_in)
116
117 for YY=YY_start:YY_end;
118     for MM=MM_start:MM_end;
119
120         Texto=[name_in '\Results\Direccion_' num2str(YY) num2str(MM) '
121               .txt'];
122
123         fid=fopen(Texto);
124         s=textscan(fid, '%s %s %s %s %s', 'headerlines', 1);
125         fclose(fid);
126         ss=[s{:}];
127         fid1=fopen('newfile.txt', 'a+');
128         for k=1:size(ss, 1)
129             fprintf(fid1, '%s %s %s %s %s\r\n', ss{k,:});
130         end
131         fclose(fid1);
132
133         f = fopen('newfile.txt');
134         c = textscan(f, '%s %s %s %s %s', 'delimiter', ',', ' ');
135         fclose(f);
136         xlswrite('Datos.xlsx', [c{:}])

```

---

136

137

138       end

139   end



---

### B.3. Periodo Pico

```
1 %Codigo para la Obtencion del periodo pico asociado a una altura de
   ola .
2 %
3 % Utilidad: TFM
4 % Autor: MARTINEZ CANTERO, Javier
5 % Tutor: GONZALEZ ESCRIVA, Jose Alberto
6 % Co tutor: MOLINES LLODRA, Jorge
7 %
8 % Comentarios:
9 % 1) Esta funcion usa deGrib para exportar .grib .grib2 archivos a
   ASCII
10 % para ciertos puntos del dominio Grib. Para que esta funcion
   sea
11 % empleada, es necesario instalar degrib.exe.
12
13 % 2) El modelo estudiado es mallado con intervalo de aprox. 50 km.
14 % De ese modo puntos separados por una distancia menor daran
   mismos
15 % resultados.
16 %
17 % 3) Los resultados difieren un 6.3% de la base de datos de pago
   Argoss
18 % BMT, consultable en internet.
19
20 % Referencia:
21 % B.A. NICLASEN, NWW3 as part of SAR Weather: Initial
22 % investigation and thoughts on how to proceed,
23 % University of the Faroe Islands , 2010:13
24
25 % ORGANIZACION PREVIA
26 % Eliminar manualmente los archivos generados en la carpeta 'Results
   ', (Se
27 % puede automatizar pero la extensin del c digo seria muy larga).
28 % Automaticamente el programa borrara los demas archivos generados.
29
30 FileName = 'C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme\Datos.xlsx';
31 if exist(FileName, 'file') == 2
32     delete(FileName);
33 end
34
35 FileName = 'C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme\newfile.txt';
36 if exist(FileName, 'file') == 2
37     delete(FileName);
38 end
39
40 %INTRODUCCION DE DATOS (INPUT)
41
42 % 1) FECHAS
```

---

```

43 % Fecha de inicio del estudio:
44 YY_start = 1979; MM_start=01; %DD_start=01;
45
46 % Fecha fin del estudio:
47 YY_end = 2009; MM_end=12; %DD_end=31;
48
49 % 2) LOCALIZACION BASE DE DATOS
50 % Camino archivos analizables [base de datos] archivos degrib.
51
52 name_in='C:\Users\user\Desktop\TFM\NOAA_programme'
53
54 % 3) PUNTO DE ESTUDIO
55 % Localizacion punto de estudio (Latitud y Longitud en formato
    decimal)
56 % * Para conversion es posible emplear la siguiente pagina:
57 % https://www.fcc.gov/media/radio/dms decimal
58 % * 0 90 N (+); 0 90 S ( ) // 0 90 E (+); 0 90 W ( )
59
60 lat_1='00.000000'; lon_1='00.000000';
61
62 % FIN INTRODUCCION DATOS (INPUT)
63
64 % 4) RUTA EJECUTABLE (BIN) DEGRIB
65 % Es necesario tener instalado programa Degrib.
66 % Localizar directorio donde estan localizados los ejecutables de
    Degrib
67 % (bin) e indicar ruta a continuacion:
68
69 cd C:\ndfd\degrib\bin
70
71 for YY=YY_start:YY_end;
72     for MM=MM_start:MM_end;
73
74         Out_name_1=[name_in '\Results\Periodo_' num2str(YY) num2str(MM) '.
            txt'];
75
76 % Bucle para enviar todos los datos por mes a un solo archivo de
    texto.
77
78
79         disp(['Now reading date: Y=', num2str(YY), ' M=', num2str(MM)]);
80
81         dir_name=name_in;
82
83 % Caminos a todos los archivos correctamente descargados en
    directorio
84
85         if MM<=9
86
87             path_0=[dir_name, '\multi_reanal.glo_30m_ext.tp.' num2str(YY)

```

---

```

87         '0' num2str(MM) '.grb2'];
88
89     else
90
91         path_0=[dir_name, '\multi_reanal.glo_30m_ext.tp.' num2str(YY)
92             num2str(MM) '.grb2'];
93
94     end
95
96     % Verificar que los archivos existen (existe = 0 si no, ==2 si Ok)
97
98     e0=exist(path_0, 'file');
99
100
101     if e0==2
102
103         str=['degrib ',path_0, ' P pnt ',lat_1, ',',lon_1, ' >> ',
104             Out_name_1]; dos(str);
105
106     else
107         disp(' File error ')
108     end
109 end
110
111 end
112
113 cd (name_in)
114
115 for YY=YY_start:YY_end;
116     for MM=MM_start:MM_end;
117
118         Texto=[name_in '\Results\Periodo_' num2str(YY) num2str(MM) '.
119             txt'];
120
121         fid=fopen(Texto);
122         s=textscan(fid, '%s %s %s %s %s', 'headerlines', 1);
123         fclose(fid);
124         ss=[s{:}];
125         fid1=fopen('newfile.txt', 'a+');
126         for k=1:size(ss, 1)
127             fprintf(fid1, '%s %s %s %s %s\r\n', ss{k,:});
128         end
129         fclose(fid1);
130
131         f = fopen('newfile.txt');
132         c = textscan(f, '%s %s %s %s %s', 'delimiter', ',', ' ');
133         fclose(f);
134         xlswrite('Datos.xlsx', [c{:}])

```

135

end

136 end

---

## Anejo C

# Funciones de ajuste

### C.1. Introducción

Este apéndice recoge la descripción de parámetros y funciones empleados en el análisis estadístico de las series que han permitido la obtención última de una función que se ajuste a los datos de manera que se pueda determinar la relación  $H_{ss}$  - R.

### C.2. Parámetros estadísticos

$P$  = Función de distribución acumulada =  $CDF = F_H(H)$   
= Probabilidad de no excedencia  
=  $P_r$ (Altura de ola  $H_{ss}$  no es excedida en el temporal)

$Q = 1 - P$   
= Probabilidad de excedencia  
=  $P_r$ (Altura de ola  $H_{ss}$  es excedida en el temporal)

### C.3. Parámetros de diseño

$\lambda = Q \cdot N_s$   
= Número anual esperado de temporales con una altura de ola superior a  $H_{ss}$   
 $\approx P_r$ (Altura de ola  $H_{ss}$  es excedida una vez por lo menos anualmente)  
= No es una probabilidad en sentido estadístico estricto

$N_s$  = Número de temporales anuales

$R$  = Periodo de retorno =  $1/\lambda$

### C.4. Transformación

Se muestran las relaciones empleadas para transformar parámetros estadísticos a parámetros de diseño y vice versa.

$$R = \frac{1}{Q \cdot N_s}$$

$$Q = \frac{1}{R \cdot N_s}$$

## C.5. Estimación de parámetros

$\alpha, \beta, \gamma =$  Parámetros verdaderos

$\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma} =$  Parámetros estimados desde datos

- Regresión lineal: Ajustar la pendiente (B) e interceptar (A) en la línea de regresión a través de datos linealizados usando por ejemplo el método de mínimos cuadrados y estimando parámetros como funciones de A y B.
- Método de los momentos: calculando la media de los datos muestreados  $\bar{H}$ , y la varianza de la muestra  $s_H^2$  de los datos y estimar parámetros como funciones de  $\bar{H}$  y  $s_H$ . Noten la diferencia entre la varianza  $s_H^2$  y la desviación estándar  $s_H$ .

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N H_{ss,i}$$

$$s_H^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (H_{ss,i} - \bar{H})^2$$

## C.6. Funciones de distribución

### C.6.1. Exponencial

En este apartado se desarrolla la formulación empleada para transformar los datos de la serie muestral en una función exponencial ajustada:

**No excedencia**

$$P = 1 - e^{-\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}}$$

**Excedencia**

$$Q = e^{-\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}}$$

**Inversa**

$$H_{ss} = \gamma - \beta \cdot \ln Q$$

**Regresión Lineal**

$$H_{ss,i} = A + B \cdot X_{E,i}$$

$$X_{E,i} = -\ln Q_i$$

$$\hat{\beta} = \beta$$

$$\hat{\gamma} = \gamma$$

**Método de los momentos**

$$\hat{\beta} = s_H$$

$$\hat{\gamma} = \bar{H} - \hat{\beta}$$

---

### C.6.2. Distribución Weibull

En este apartado se desarrolla la formulación empleada para transformar los datos de la serie muestral en una función Weibull ajustada:

**No excedencia**

$$P = 1 - e^{-\left(\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}\right)^\alpha}$$

**Excedencia**

$$Q = e^{-\left(\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}\right)^\alpha}$$

**Inversa**

$$H_{ss} = \gamma + \beta(\ln(-Q))^{\frac{1}{\alpha}}$$

**Regresión Lineal** (Para un valor de  $\hat{\alpha}$  dado)

$$H_{ss,i} = A + B \cdot X_{W,i}$$

$$X_{W,i} = (\ln(1/Q_i))^{\frac{1}{\hat{\alpha}}}$$

$$\hat{\beta} = B$$

$$\hat{\gamma} = A$$

**Método de los momentos** (Para un valor de  $\hat{\alpha}$  dado)

$$\hat{\beta} = \frac{s_H}{\sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{\hat{\alpha}}) - (\Gamma(1 + \frac{1}{\hat{\alpha}}))^2}}$$

$$\hat{\gamma} = \bar{H} - \hat{\beta} \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{\hat{\alpha}})$$

$\Gamma(x)$  = Función Gamma

### C.6.3. Distribución Gumbel

En este apartado se desarrolla la formulación empleada para transformar los datos de la serie muestral en una función Gumbel ajustada:

**No excedencia**

$$P = e^{-e^{-\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}}}$$

**Excedencia**

$$Q = 1 - e^{-e^{-\frac{H_{ss}-\gamma}{\beta}}}$$

**Inversa**

$$H_{ss} = \gamma - \beta \cdot \ln(-\ln(1 - Q))$$

**Regresión Lineal**

$$H_{ss,i} = A + B \cdot X_{G,i}$$

$$X_{G,i} = -\ln(-\ln(1 - Q_i))$$

$$\hat{\beta} = B$$

$$\hat{\gamma} = A$$

---

## Método de los momentos

$$\hat{\beta} = s_H \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

$$\hat{\gamma} = \bar{H} - \hat{\beta} \cdot \epsilon$$

$$\epsilon = \text{Constante de Euler-Mascheroni} = 0,5772$$

### C.6.4. Distribución de Pareto Generalizada

En este apartado se desarrolla la formulación empleada para transformar los datos de la serie muestral en una función de Pareto Generalizada ajustada:

#### No excedencia

$$P = 1 - \left(1 + \alpha \frac{H_{ss} - \gamma}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\alpha}}$$

#### Excedencia

$$Q = \left(1 + \alpha \frac{H_{ss} - \gamma}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\alpha}}$$

#### Inversa

$$H_{ss} = \gamma + \beta \left(\frac{Q^{-\alpha} - 1}{\alpha}\right)$$

#### Regresión Lineal (Para un valor de $\hat{\alpha}$ dado)

$$H_{ss,i} = A + B \cdot X_{P,i}$$

$$X_{P,i} = \frac{Q^{-\hat{\alpha}} - 1}{\hat{\alpha}}$$

$$\hat{\beta} = B$$

$$\hat{\gamma} = A$$

#### Método de los momentos

$$\hat{\beta} = s_H \cdot \sqrt{(1 - \hat{\alpha})^2 (1 - 2\hat{\alpha})}$$

$$\hat{\gamma} = \bar{H} - \frac{\hat{\beta}}{1 - \hat{\alpha}}$$



---

## Anejo D

# Caracterización del oleaje

### D.1. Introducción

Este apartado recoge los principales resultados obtenidos de la caracterización del oleaje en los puntos de estudio en aguas profundas. Los pasos citados en el desarrollo del documento, han servido para realizar el análisis estadístico del oleaje en aguas profundas, previo a su propagación hasta el emplazamiento de la obra. Se mostrará para cada fase de estudio y cada punto de estudio la siguiente información:

- Dirección predominante de oleaje
- Homogeneidad del tipo de oleaje
- Rosa de oleaje, mostrando la intensidad relacionada con la dirección y probabilidad de ocurrencia
- Resultados del análisis  $PoT$
- Ajuste de las funciones de distribución extremales

Una vez presentada la información básica, se realizará una comparación entre los puntos de estudio correspondiente a una misma fase con el objetivo de mostrar qué punto de estudio es más interesante desde el punto de vista del diseño del dique. Estos resultados de comparación contendrán información de la altura de ola propagada, este procedimiento queda desarrollado en el anejo E. Además se mostrarán los coeficientes que permiten estimar el periodo pico  $T_p$  a partir de la altura de ola obtenida, siguiendo la explicación propuesta en el apartado 4.4.3

## D.2. Fase de estudio: 1979-2010

### D.2.1. Punto de estudio 1

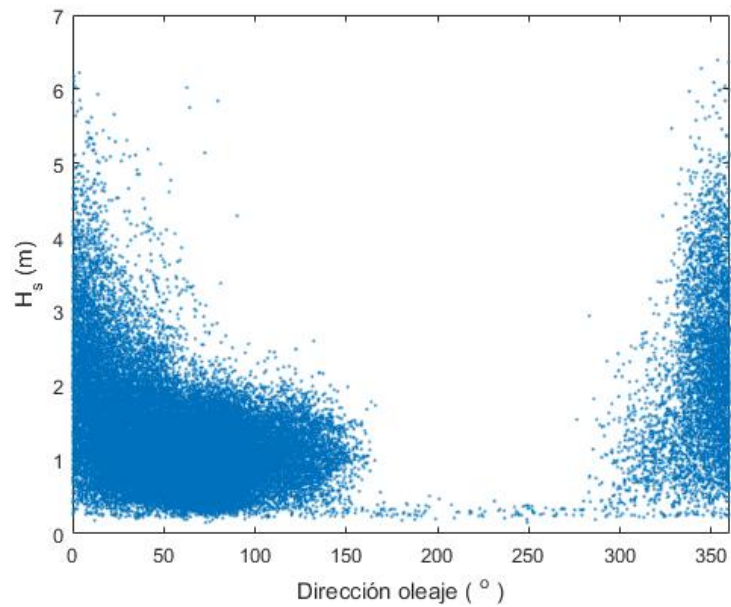


Figura D.1:  $H_s$  frente a dirección

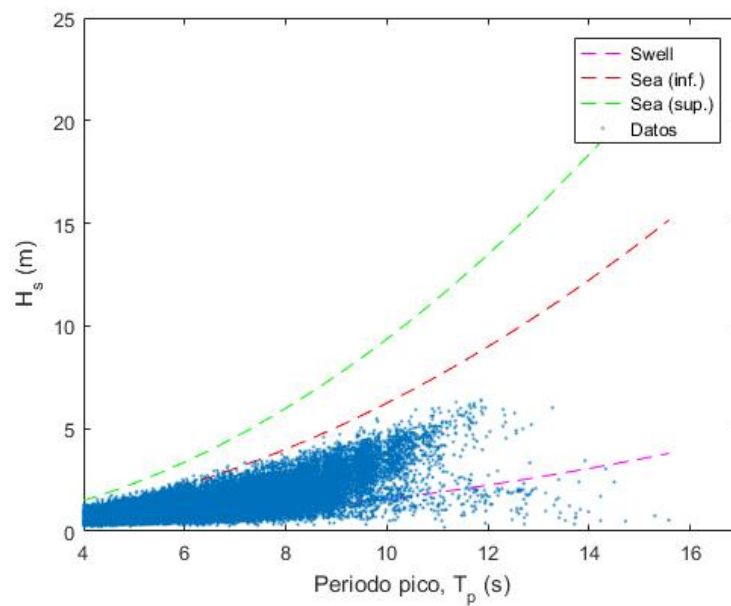


Figura D.2: Tipo de oleaje según pendiente

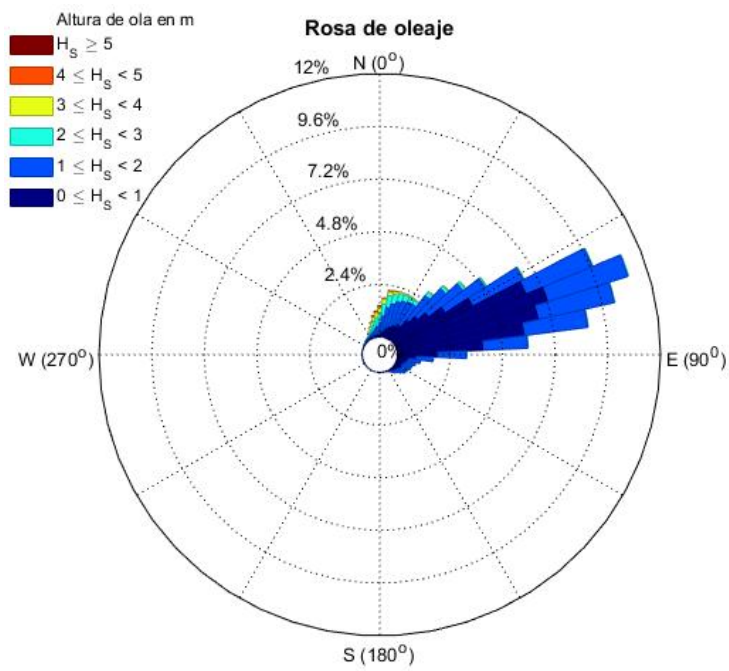


Figura D.3: Rosa de oleaje

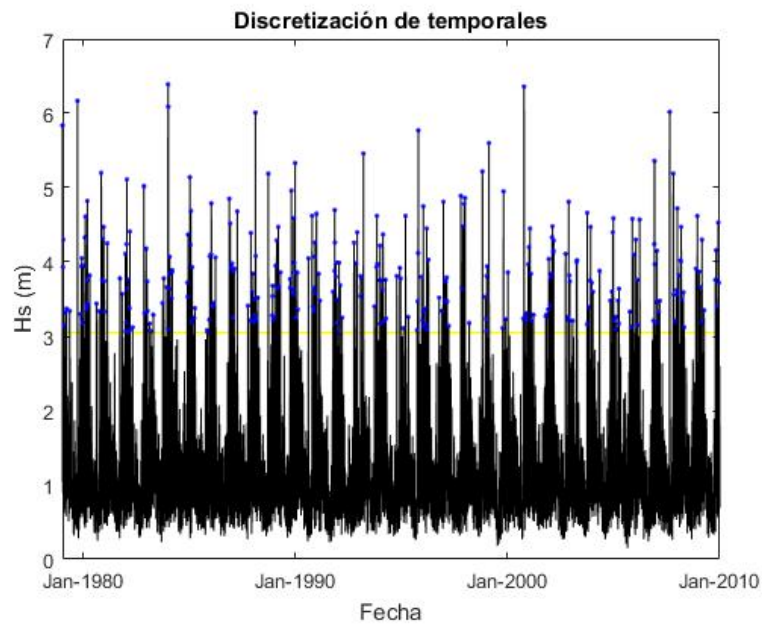
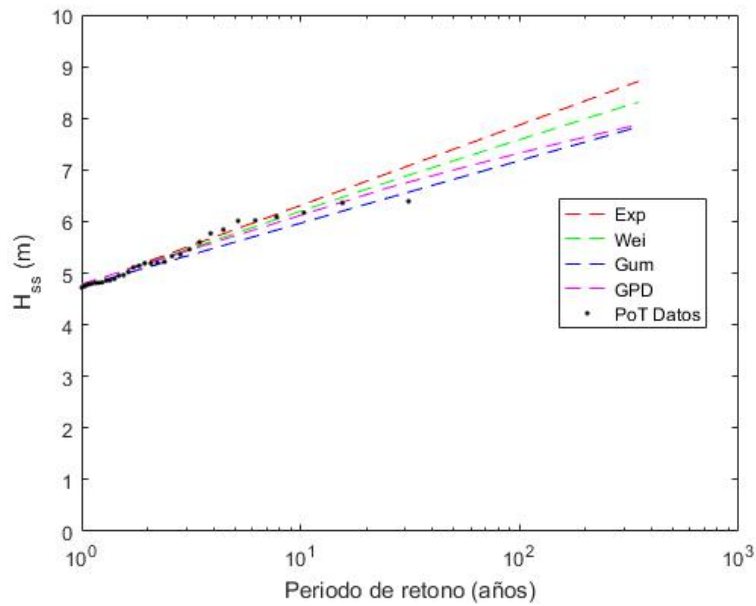


Figura D.4: Análisis PoT, umbral=3,05 m



**Figura D.5:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.1:** Parámetros de distribuciones, *Punto 1*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	3,194	0,677	-	0,080
Gumbel	3,566	0,523	-	0,079
Weibull	3,127	0,769	1,10	0,057
Pareto Generalizada	3,148	0,774	-0,075	0,058

La función Weibull proporciona el error cuadrático medio mínimo, además de ajustarse mejor para bajos periodos de retorno a los datos observados. Por otro lado, no queda tanto del lado de la seguridad (pudiendo sobredimensionar el dique) en el caso de grandes periodos de retorno.

## D.2.2. Punto de estudio 2

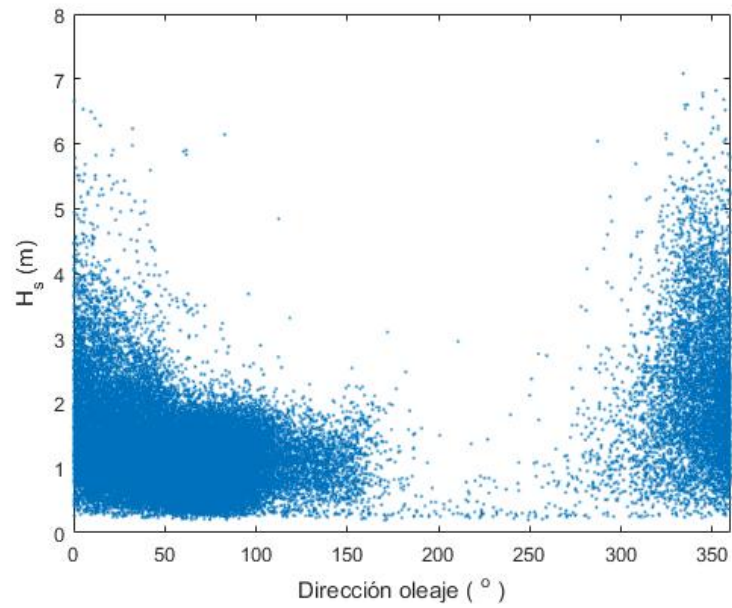


Figura D.6:  $H_s$  frente a dirección

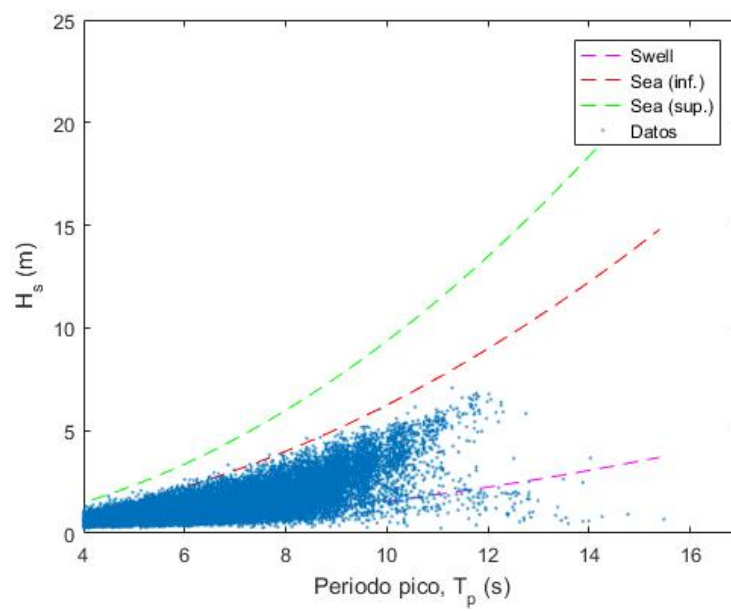


Figura D.7: Tipo de oleaje según pendiente

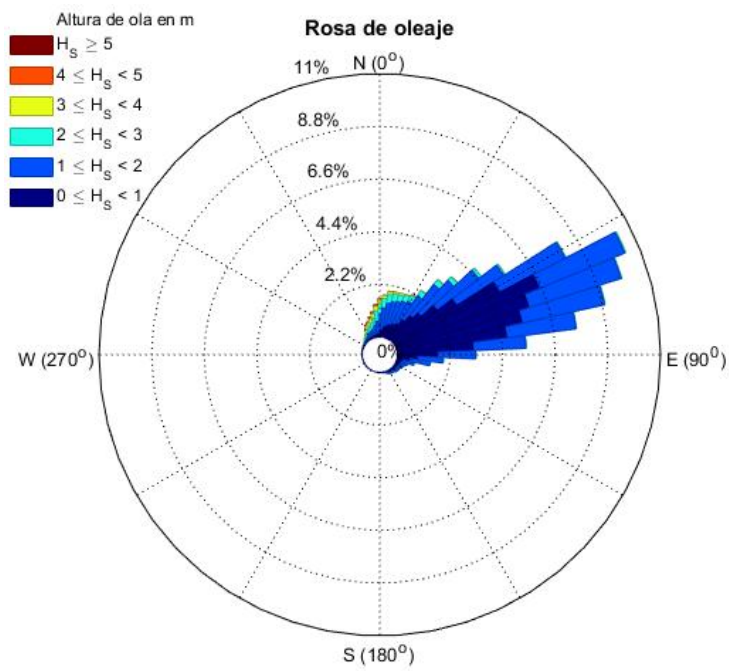


Figura D.8: Rosa de oleaje

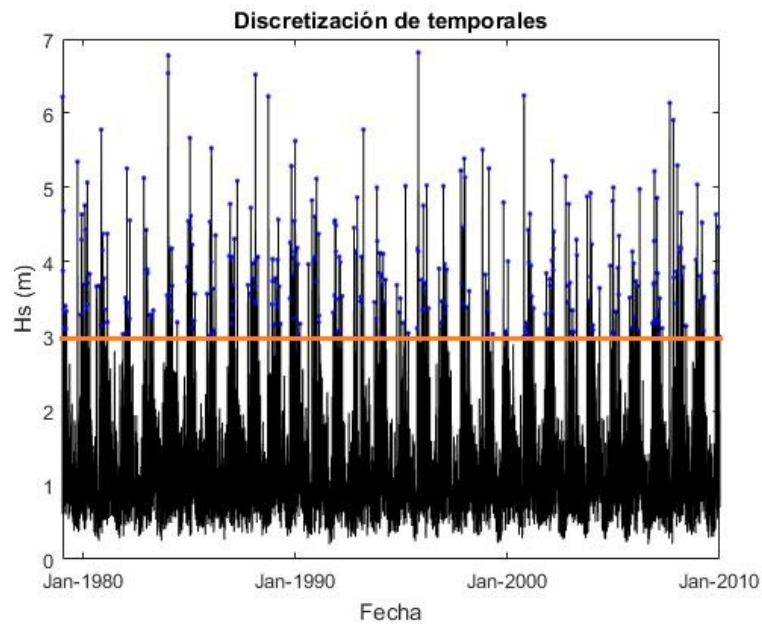
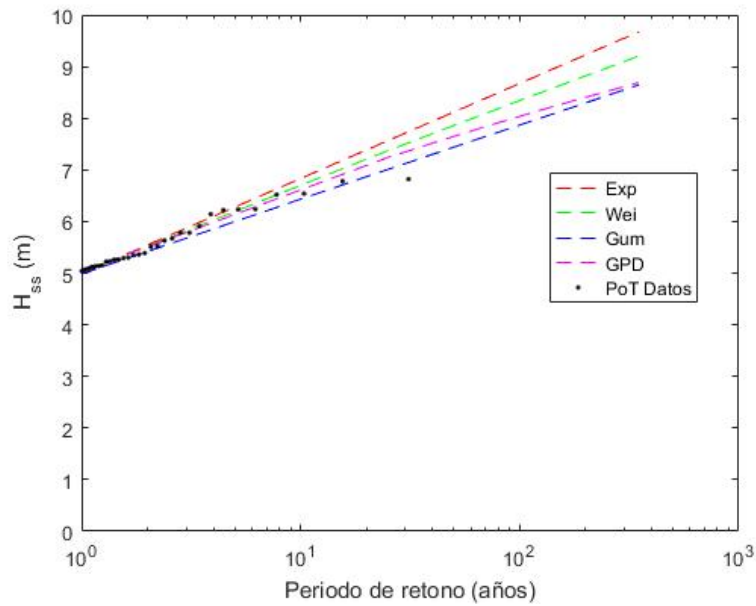


Figura D.9: Análisis PoT, umbral=2,97 m



**Figura D.10:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.2:** Parámetros de distribuciones, *Punto 2*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	3,148	0,799	-	0,102
Gumbel	3,587	0,619	-	0,083
Weibull	3,069	0,909	1,10	0,069
Pareto Generalizada	3,094	0,916	-0,075	0,066

Las funciones Weibull y Pareto proporcionan el error cuadrático medio mínimo, además de ajustarse mejor para bajos periodos de retorno a los datos observados. Por otro lado, la distribución Weibull queda más del lado de la seguridad que la función Pareto para grandes periodos de retorno, por lo que se escoge la función Weibull.

### D.2.3. Punto de estudio 3

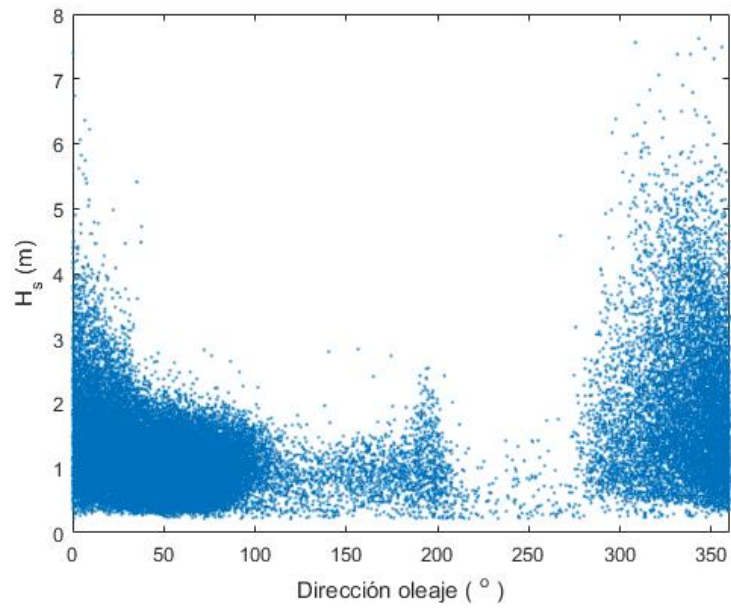


Figura D.11:  $H_s$  frente a dirección

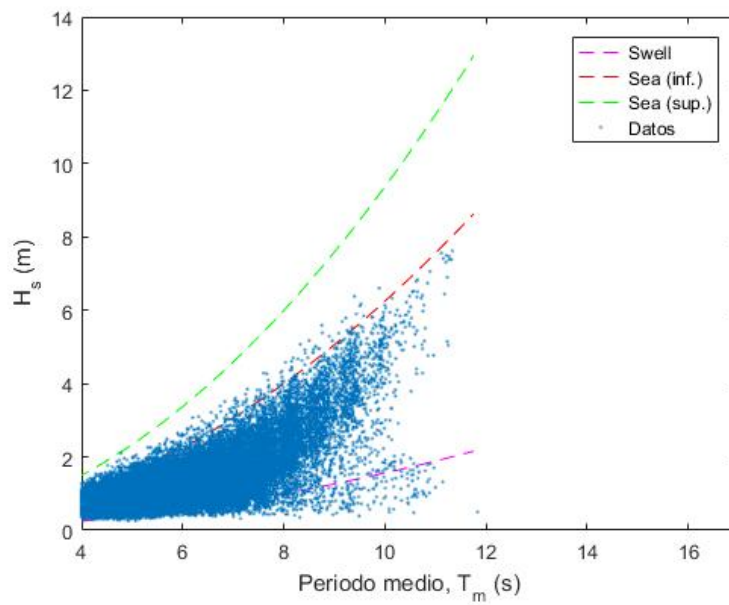


Figura D.12: Tipo de oleaje según pendiente



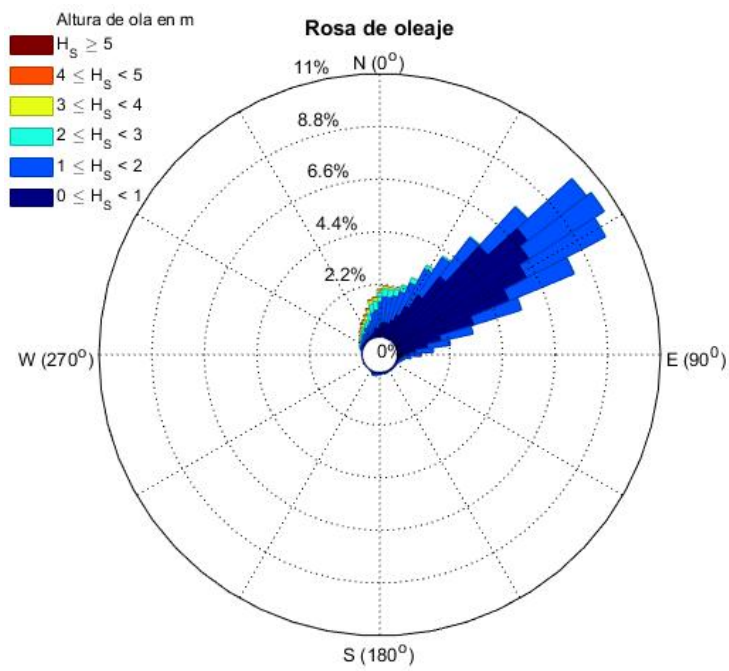


Figura D.13: Rosa de oleaje

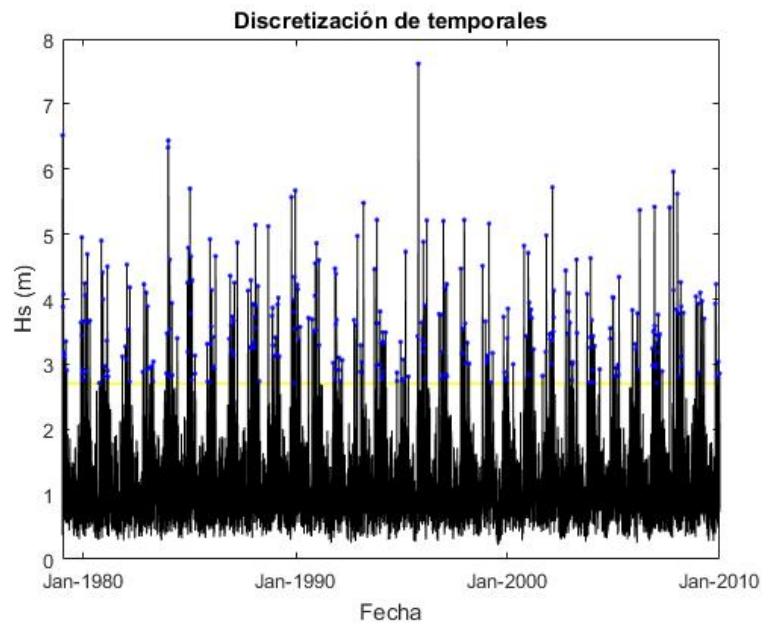
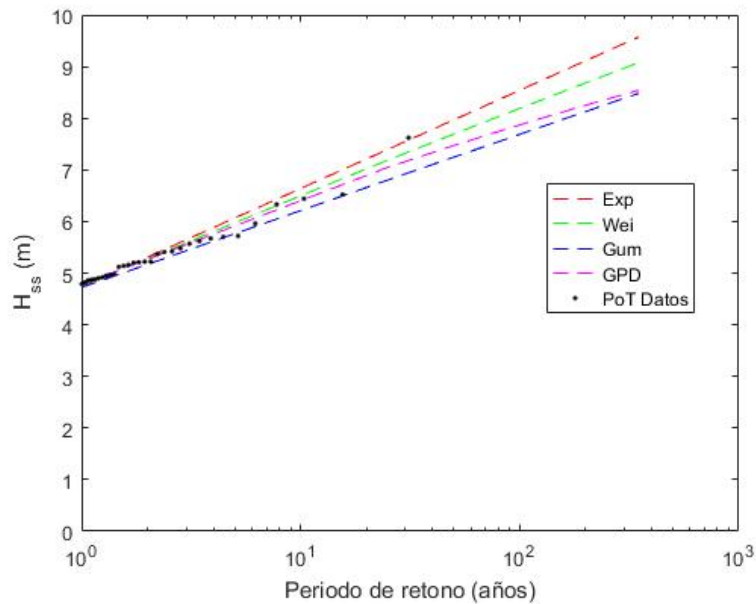


Figura D.14: Análisis PoT, umbral=2,70 m



**Figura D.15:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.3:** Parámetros de distribuciones, *Punto 3*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	2,825	0,826	-	0,083
Gumbel	3,280	0,637	-	0,098
Weibull	2,745	0,938	1,10	0,055
Pareto Generalizada	2,771	0,945	-0,075	0,059

La función Weibull proporciona el error cuadrático medio mínimo, además de ajustarse mejor para bajos periodos de retorno a los datos observados. Por otro lado, no queda tanto del lado de la seguridad (pudiendo sobredimensionar el dique) en el caso de grandes periodos de retorno (caso contrario a la función exponencial).

#### D.2.4. Comparación de los tres puntos

**Tabla D.4:** Altura de ola en aguas profundas y propagada de los puntos de estudio en fase 1979-2010

Punto	$H_0$ (m)	Coficiente $a$	Coficiente $b$	$H_d$ (m)
Punto 1	8,12	4,08	1,49	7,98
Punto 2	8,97	3,62	2,39	8,87
Punto 3	8,84	3,50	2,85	7,87

Tras observar la altura de ola propagada en la tabla D.4, el *Punto 2* proporcionaría el diseño más conservador. Por ello, el documento contempla el análisis de este punto. Las siguientes fases analizadas también contemplan el análisis de este punto. Se mostrarán también los resultados relativos a los demás puntos para que el lector compruebe la diferencia entre ellos.

### D.3. Fase de estudio: 1979-1994

#### D.3.1. Punto de estudio 1

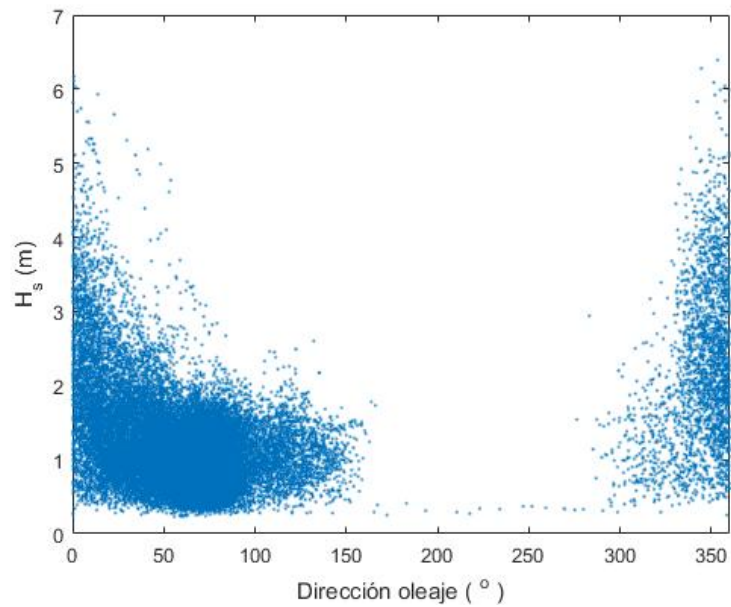


Figura D.16:  $H_s$  frente a dirección

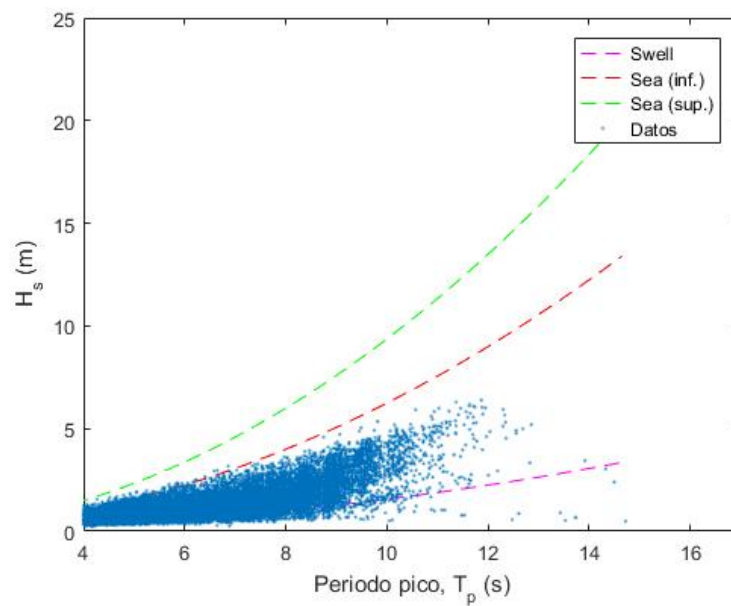


Figura D.17: Tipo de oleaje según pendiente

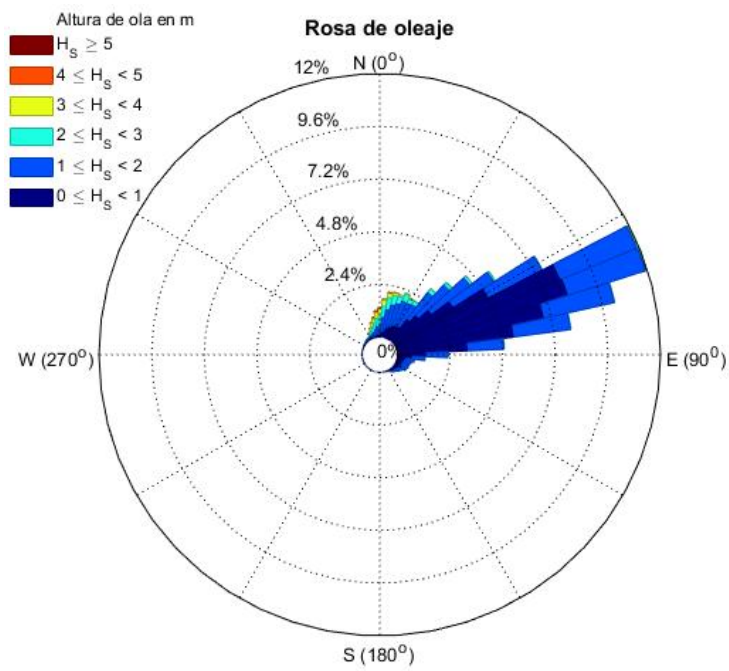


Figura D.18: Rosa de oleaje

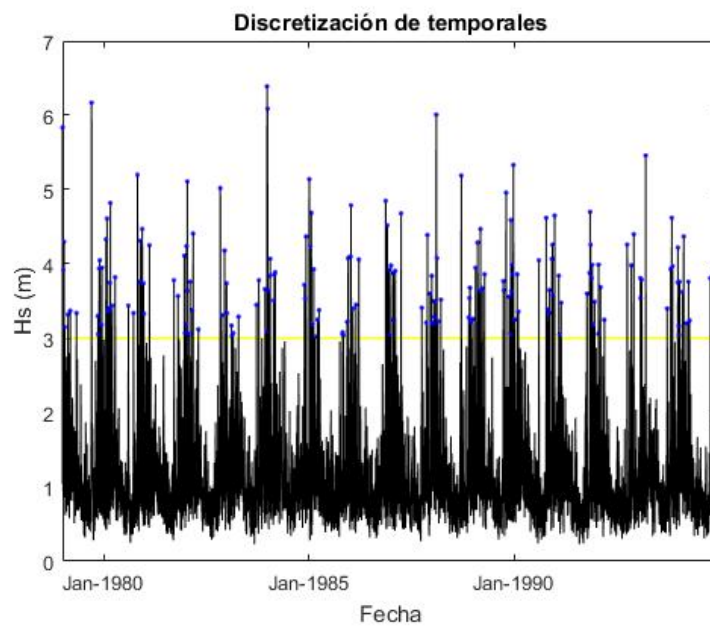
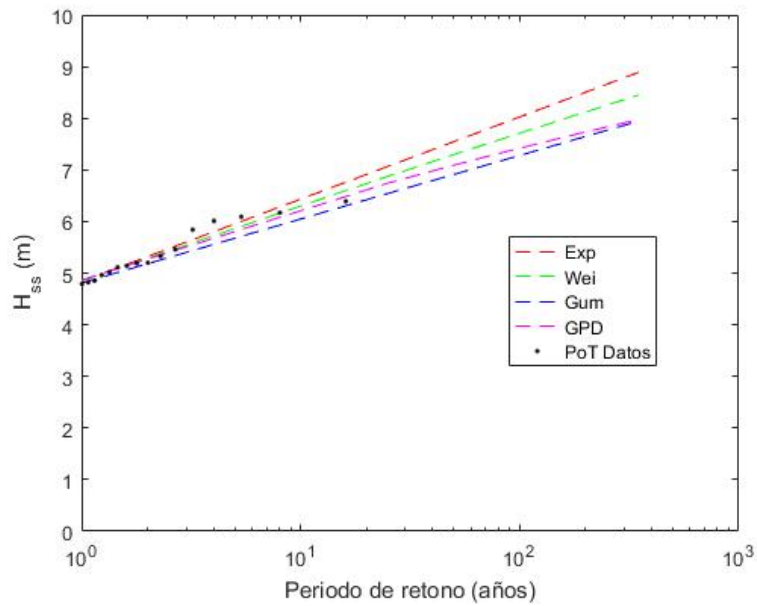


Figura D.19: Análisis PoT, umbral=3,00 m



**Figura D.20:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.5:** Parámetros de distribuciones, *Punto 1*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	3,159	0,691	-	0,078
Gumbel	3,540	0,531	-	0,086
Weibull	3,113	0,756	1,10	0,062
Pareto Generalizada	3,117	0,787	-0,075	0,067

Se escoge la función Weibull por los motivos ya mencionados anteriormente, en el apartado D.2.1.

### D.3.2. Punto de estudio 2

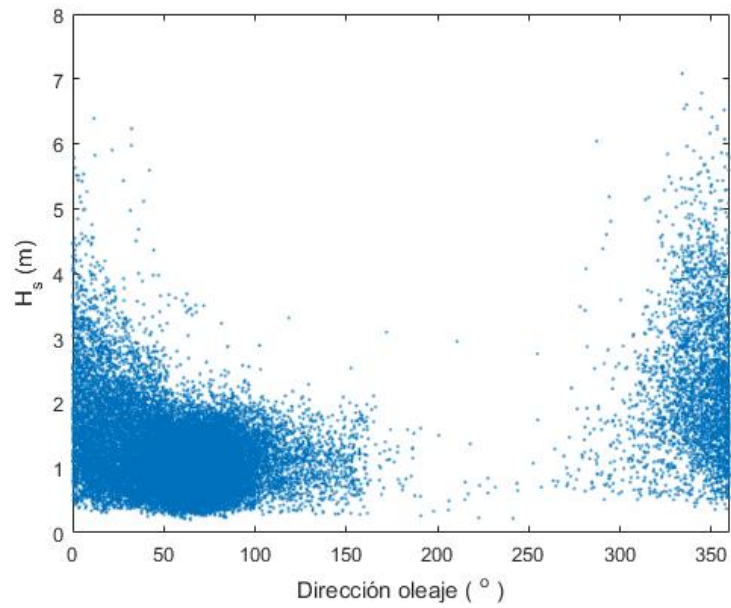


Figura D.21:  $H_s$  frente a dirección

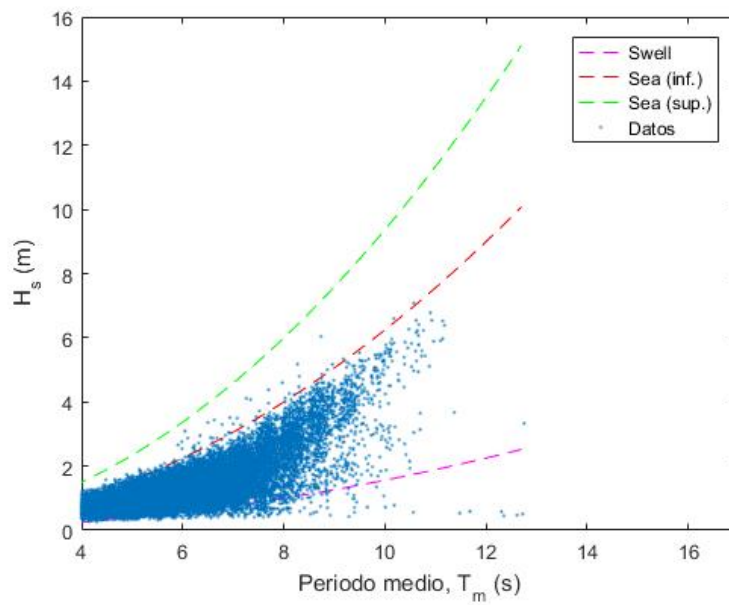


Figura D.22: Tipo de oleaje según pendiente

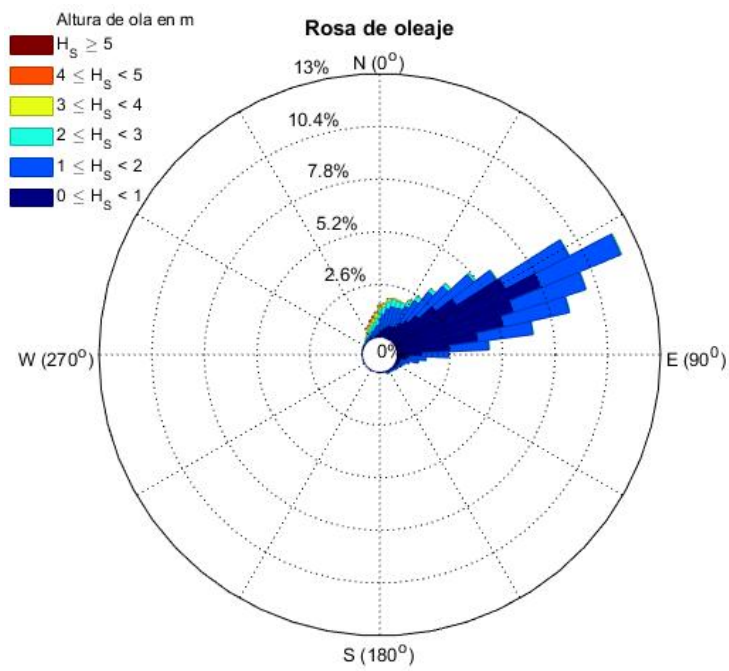


Figura D.23: Rosa de oleaje

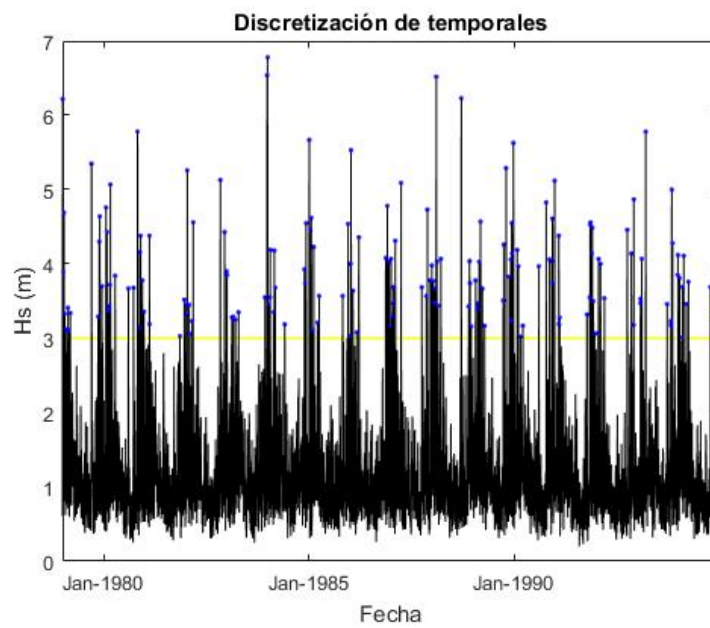
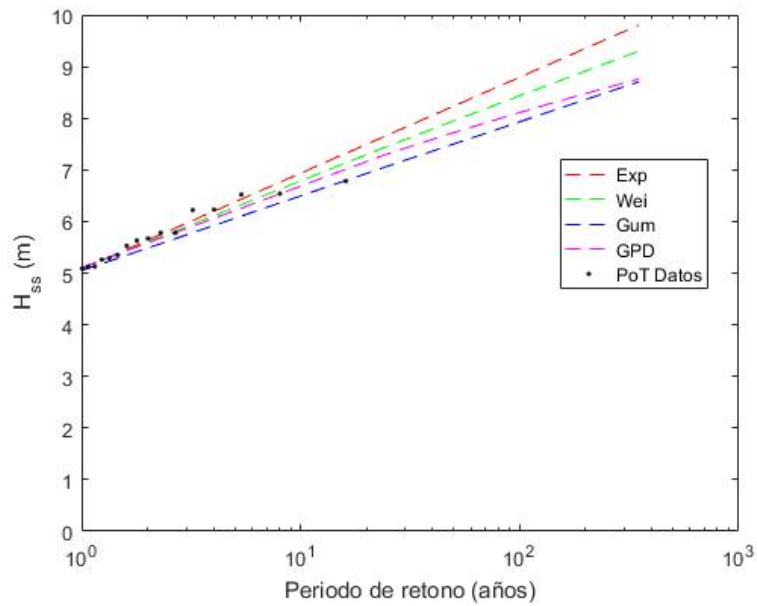


Figura D.24: Análisis PoT, umbral=3,00 m



**Figura D.25:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.6:** Parámetros de distribuciones, *Punto 2*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	3,178	0,807	-	0,082
Gumbel	3,623	0,619	-	0,099
Weibull	3,102	0,914	1,10	0,061
Pareto Generalizada	3,128	0,919	-0,075	0,063

Se escoge la función Weibull por los motivos ya mencionados anteriormente, en el apartado D.2.1.



### D.3.3. Punto de estudio 3

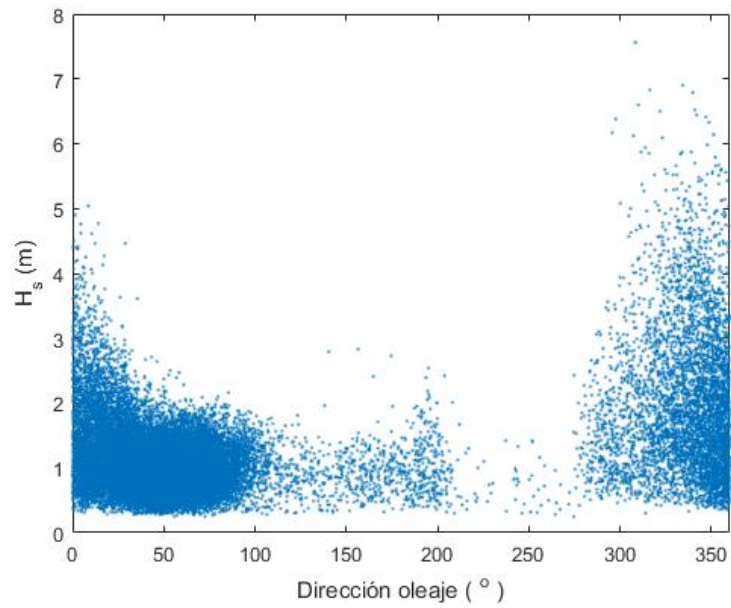


Figura D.26:  $H_s$  frente a dirección

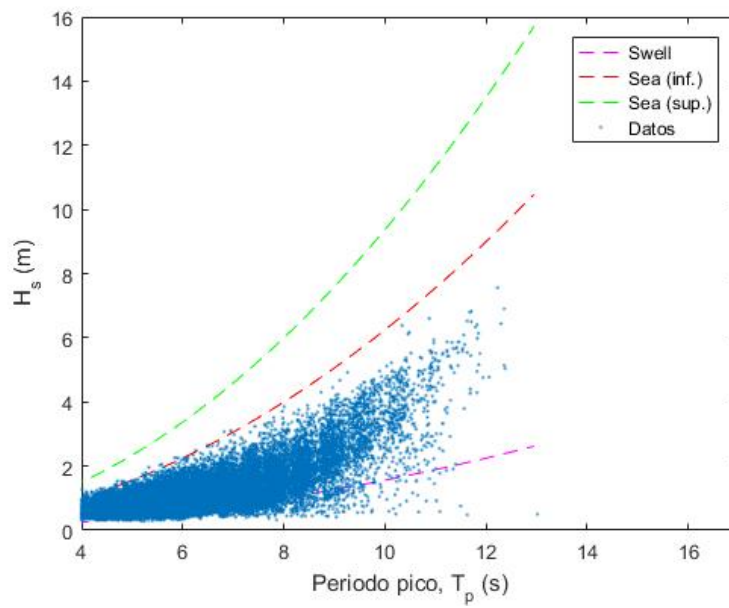


Figura D.27: Tipo de oleaje según pendiente

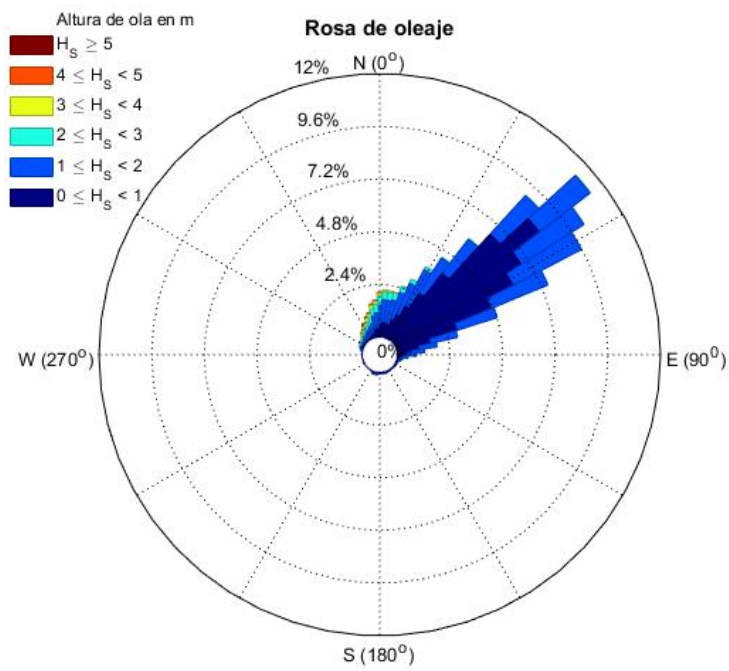


Figura D.28: Rosa de oleaje

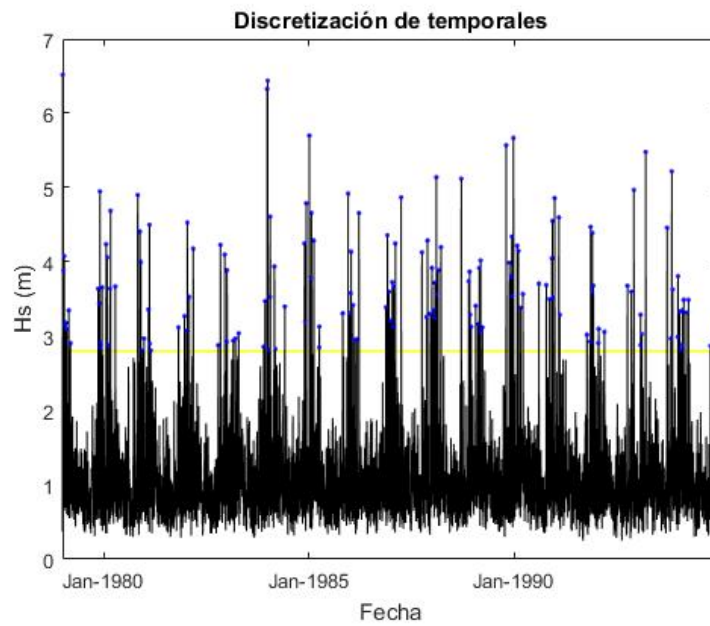
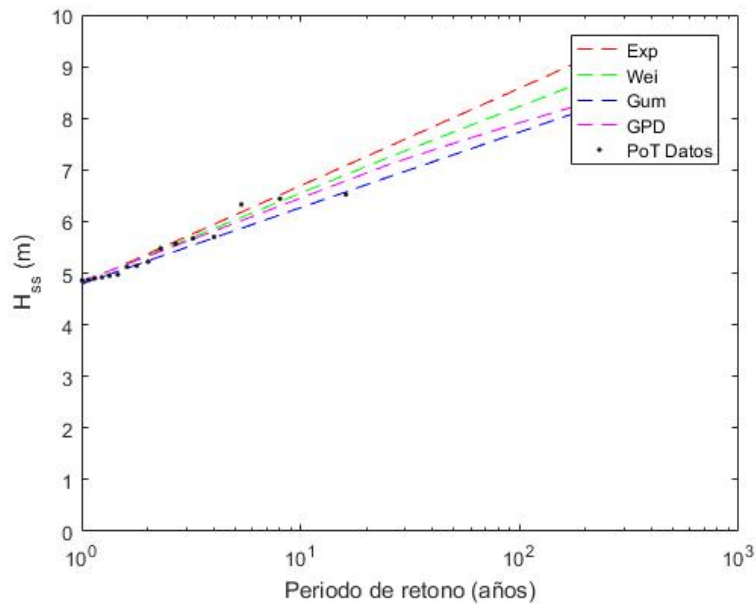


Figura D.29: Análisis PoT, umbral=2,80 m



**Figura D.30:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.7:** Parámetros de distribuciones, *Punto 3*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	2,846	0,837	-	0,103
Gumbel	3,305	0,650	-	0,089
Weibull	2,765	0,949	1,10	0,073
Pareto Generalizada	2,793	0,895	-0,075	0,073

Se escoge la función Weibull por los motivos ya mencionados anteriormente, en el apartado D.2.1.

#### D.3.4. Comparación de los tres puntos

**Tabla D.8:** Altura de ola en aguas profundas y propagada de los puntos de estudio en fase 1979-1994

Punto	$H_0$ (m)	Coficiente $a$	Coficiente $b$	$H_d$ (m)
Punto 1	8,25	4,14	1,40	8,11
Punto 2	9,06	3,50	2,69	8,91
Punto 3	8,95	3,30	3,28	7,96

## D.4. Fase de estudio: 1995-2010

### D.4.1. Punto de estudio 1

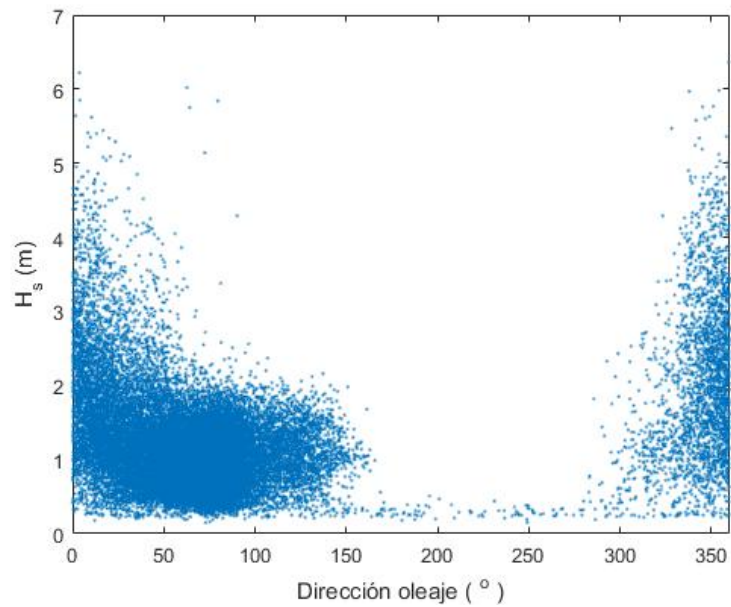


Figura D.31:  $H_s$  frente a dirección

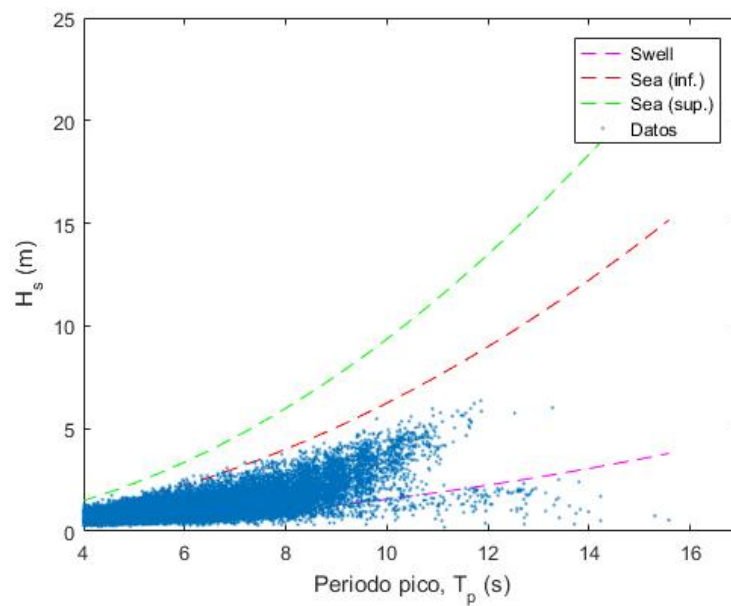


Figura D.32: Tipo de oleaje según pendiente

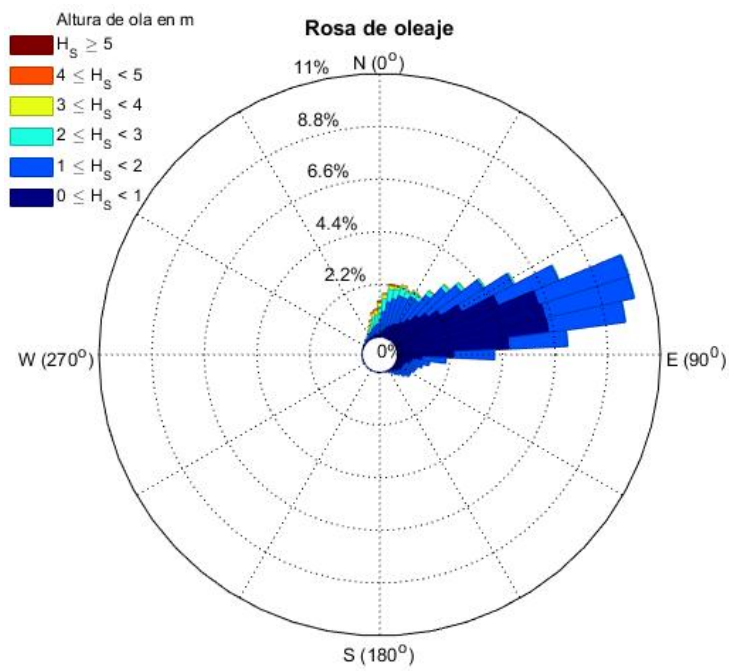


Figura D.33: Rosa de oleaje

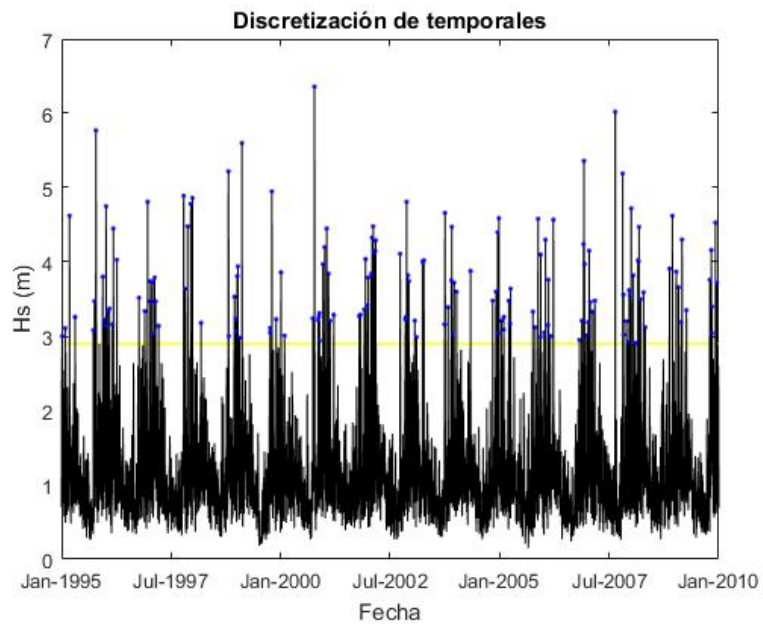
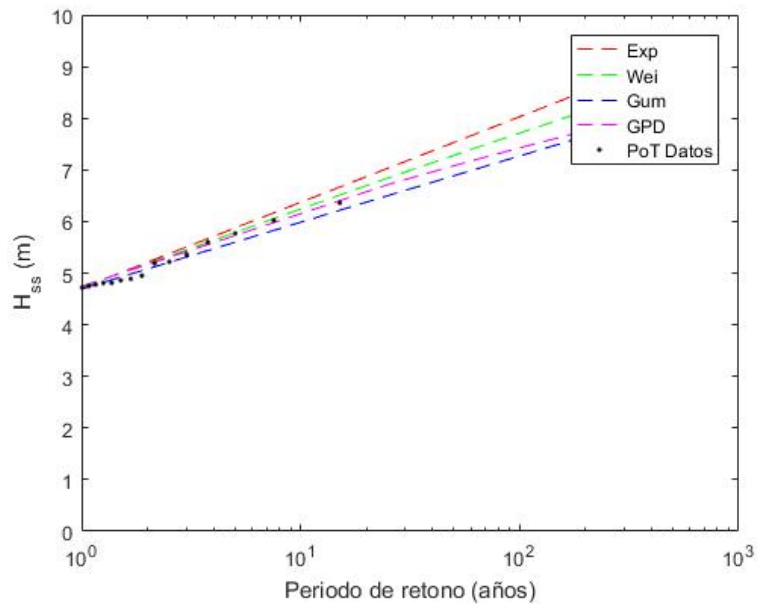


Figura D.34: Análisis PoT, umbral=2,90 m



**Figura D.35:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.9:** Parámetros de distribuciones, *Punto 1*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	3,035	0,720	-	0,085
Gumbel	3,431	0,554	-	0,086
Weibull	2,966	0,816	1,10	0,061
Pareto Generalizada	2,989	0,816	-0,075	0,060

Se escoge la función Weibull por los motivos ya mencionados anteriormente, en el apartado D.2.1.

#### D.4.2. Punto de estudio 2

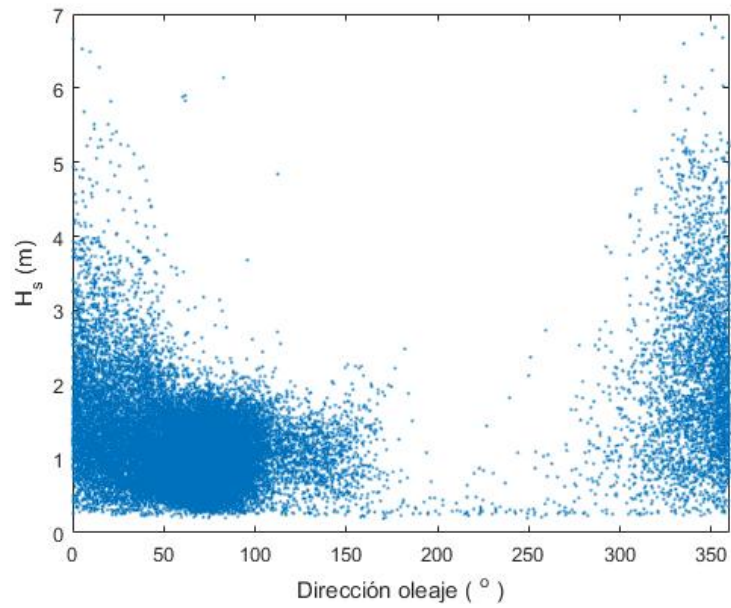


Figura D.36:  $H_s$  frente a dirección

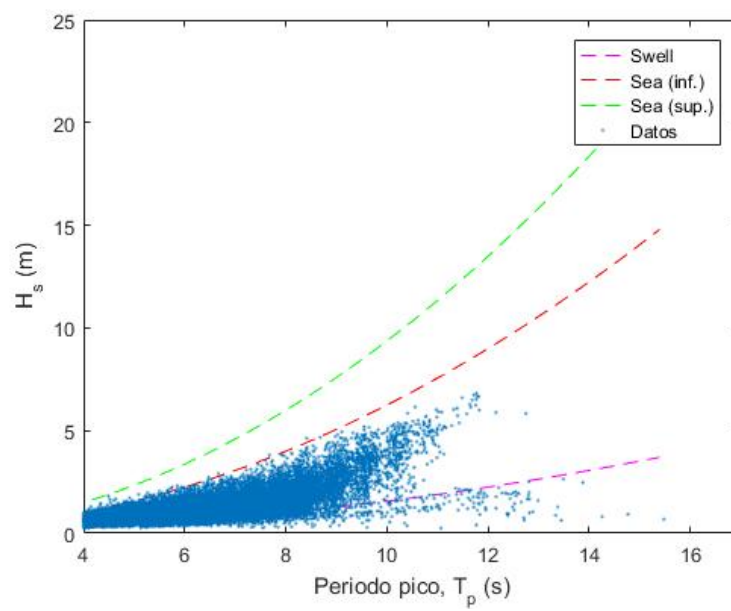


Figura D.37: Tipo de oleaje según pendiente

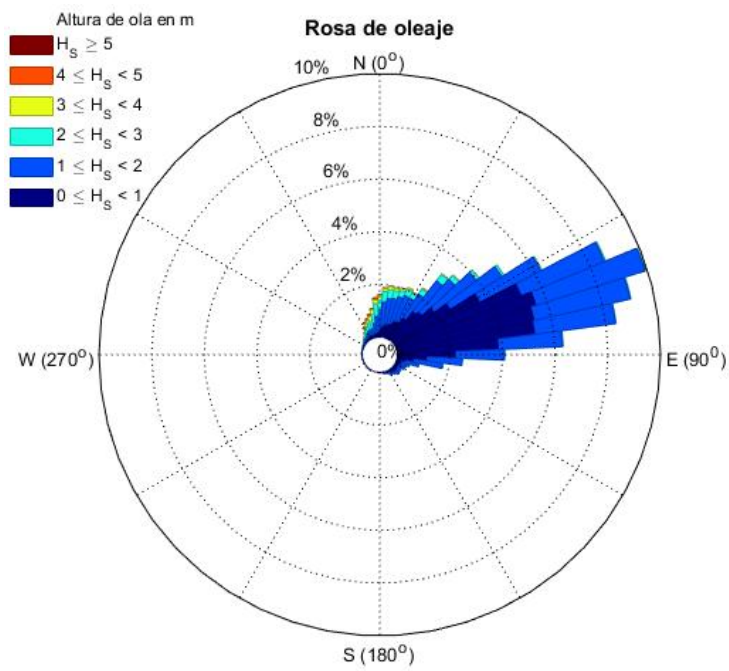


Figura D.38: Rosa de oleaje

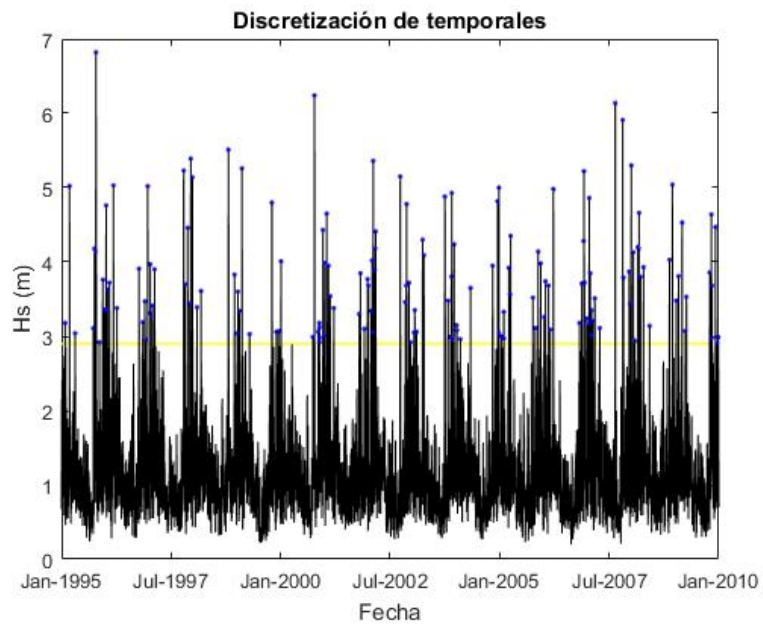
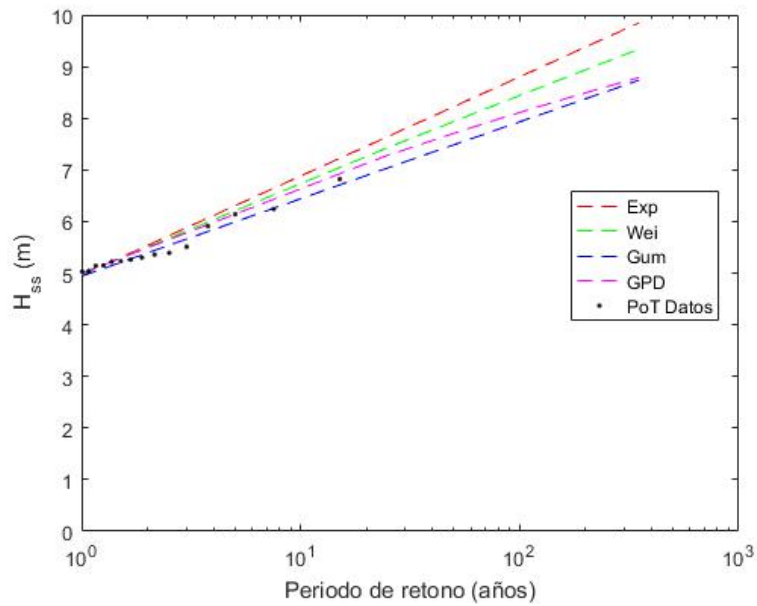


Figura D.39: Análisis PoT, umbral=2,90 m





**Figura D.40:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.10:** Parámetros de distribuciones, *Punto 2*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	3,021	0,834	-	0,119
Gumbel	3,479	0,643	-	0,109
Weibull	2,941	0,947	1,10	0,091
Pareto Generalizada	2,968	0,952	-0,075	0,088

Se escoge la función Weibull por los motivos ya mencionados anteriormente, en el apartado D.2.1.

### D.4.3. Punto de estudio 3

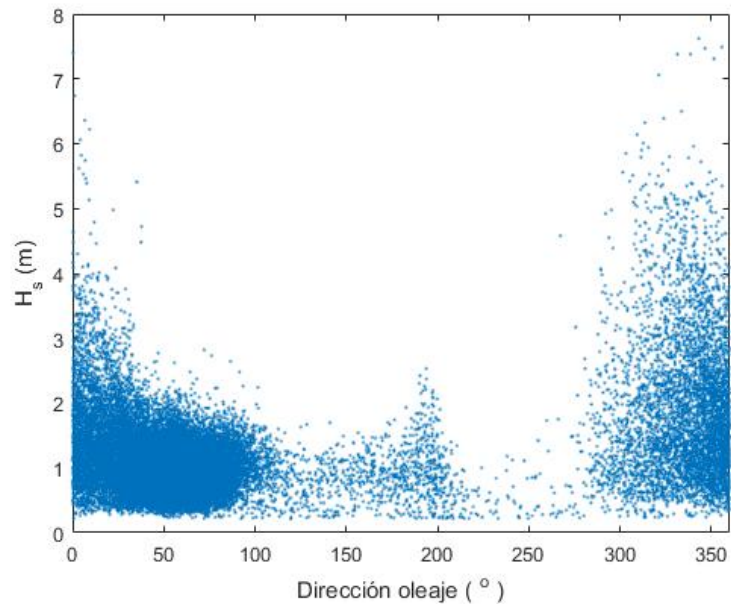


Figura D.41:  $H_s$  frente a dirección

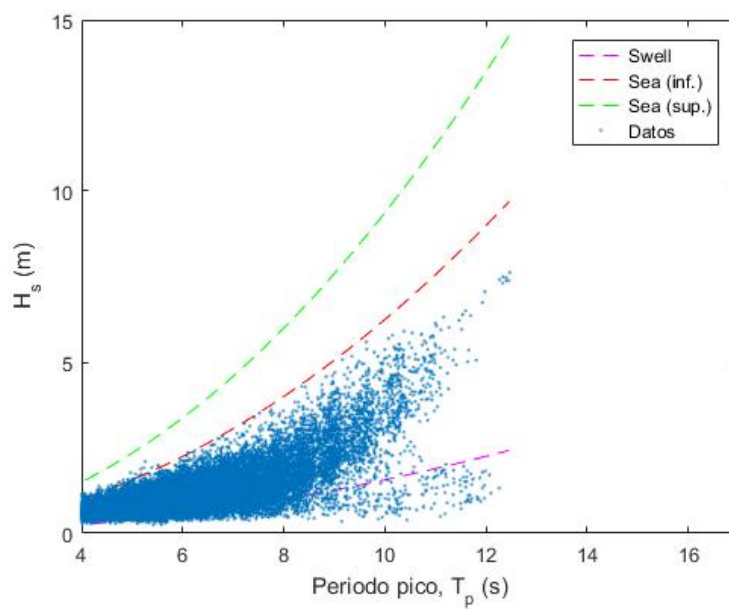


Figura D.42: Tipo de oleaje según pendiente

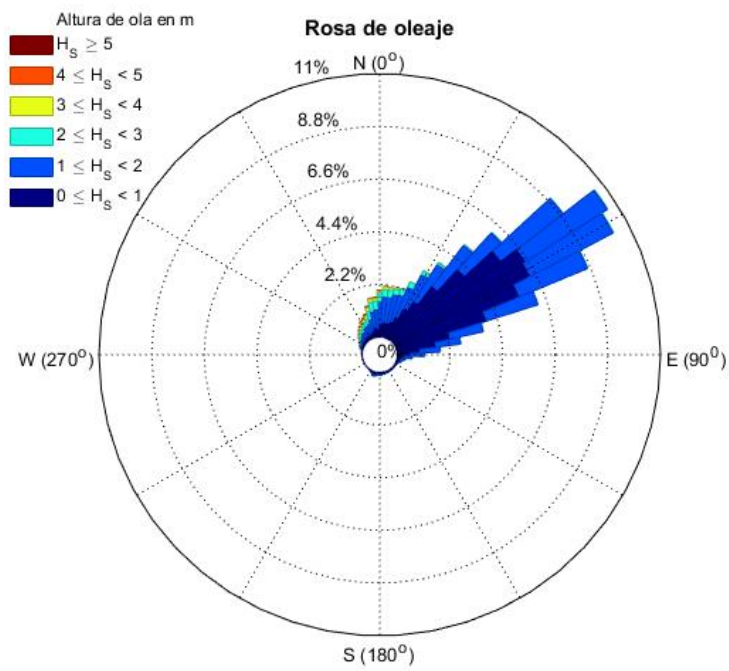


Figura D.43: Rosa de oleaje

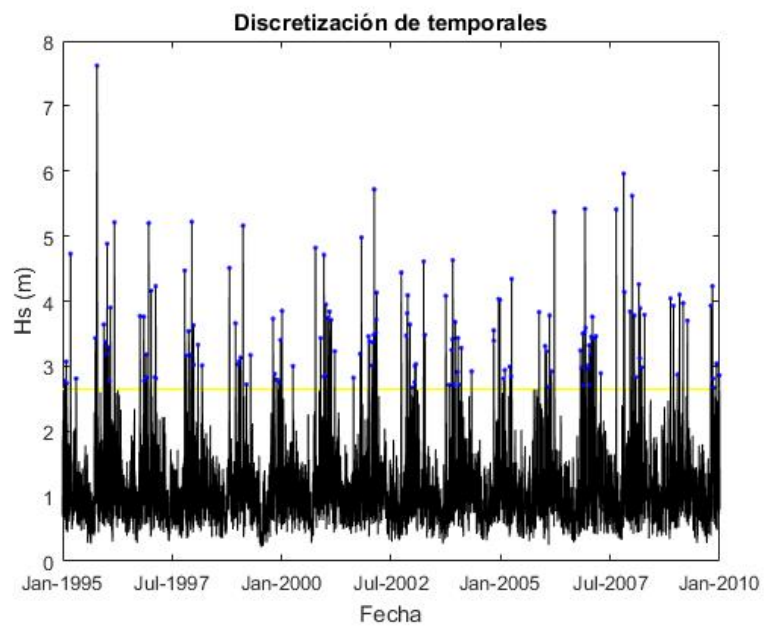
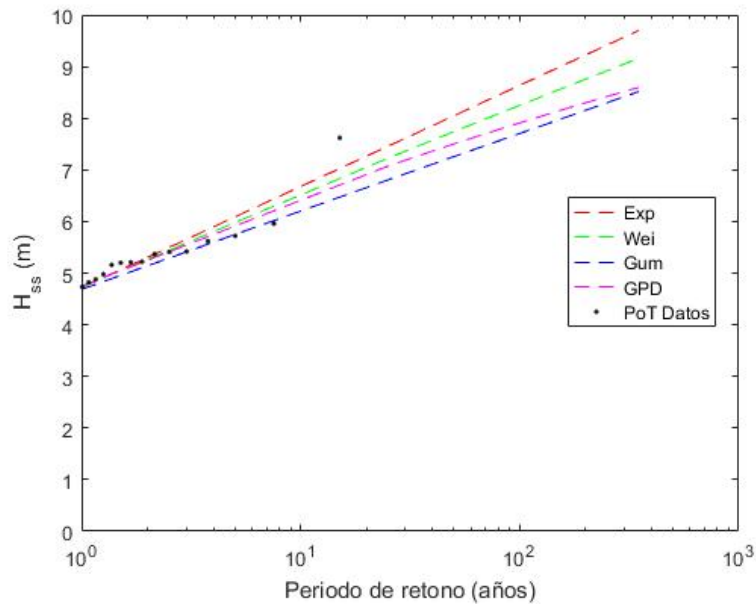


Figura D.44: Análisis PoT, umbral=2,65 m



**Figura D.45:** Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados

**Tabla D.11:** Parámetros de distribuciones, *Punto 3*

Distribución	A	B	$\alpha$	Error cuadrático medio
Exponencial	2,751	0,851	-	0,095
Gumbel	3,222	0,648	-	0,143
Weibull	2,673	0,962	1,10	0,090
Pareto Generalizada	2,702	0,965	-0,075	0,097

Se escoge la función Weibull por los motivos ya mencionados anteriormente, en el apartado D.2.1.

#### D.4.4. Comparación de los tres puntos

**Tabla D.12:** Altura de ola en aguas profundas y propagada de los puntos de estudio en fase 1995-2010

Punto	$H_0$ (m)	Coficiente $a$	Coficiente $b$	$H_d$ (m)
Punto 1	8,28	4,09	1,44	8,14
Punto 2	9,10	3,79	1,97	8,99
Punto 3	8,92	3,66	2,49	7,98

---

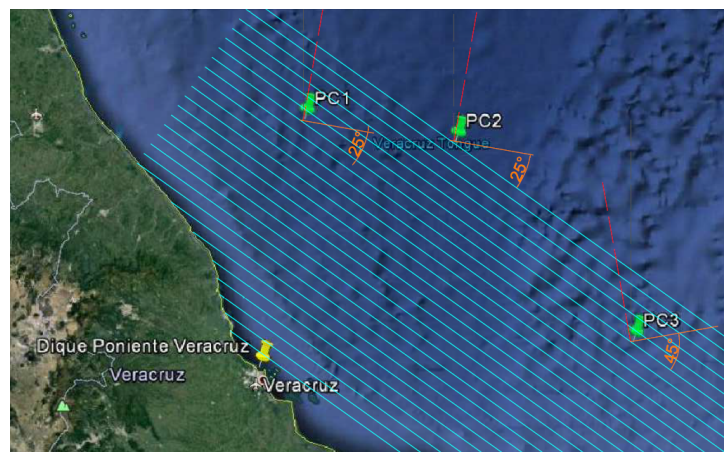
## Anejo E

# Propagación del Oleaje

### E.1. Introducción

Para resolver el proceso de propagación del oleaje desde aguas profundas a aguas someras se emplea la metodología propuesta por el *Shore Protection Manual*. El *Shore Protection Manual* propone el ábaco presentado a continuación. La nomenclatura empleada para poder emplearlo correctamente es la siguiente:

- $d$ : profundidad de aguas restringidas del punto del que se quiere calcular su  $K_{rs}$ , a efectos de estudio se tomará el calado a pie de dique en temporal (cota de la lámina de agua +3,00 m)
- $T$ : periodo de oleaje, invariable desde aguas profundas hasta la zona de proyecto
- $\alpha_0$ : ángulo entre las líneas batimétricas existentes entre profundidades indefinidas y la zona de proyecto, y los frentes de onda del oleaje incidente en aguas profundas. La resolución gráfica de este parámetro puede observarse en la figura E.1.



**Figura E.1:** Dirección oleaje según punto analizado

Mediante lectura del ábaco se obtiene el valor buscado  $K_{rs} = K_r \cdot K_s$ , además del ángulo de variación en la orientación de los frentes de ola por efecto de refracción. Este par de resultados viene recogidos en las tablas E.1, E.2 y E.3 para cada punto y fase de estudio. Hay que reseñar que este ábaco considera únicamente los efectos de refracción y shoaling. El ábaco es válido únicamente para batimetrías rectas y paralelas entre aguas profundas y la zona de proyecto según la dirección de propagación del oleaje.

## E.2. Fase 1979-2010

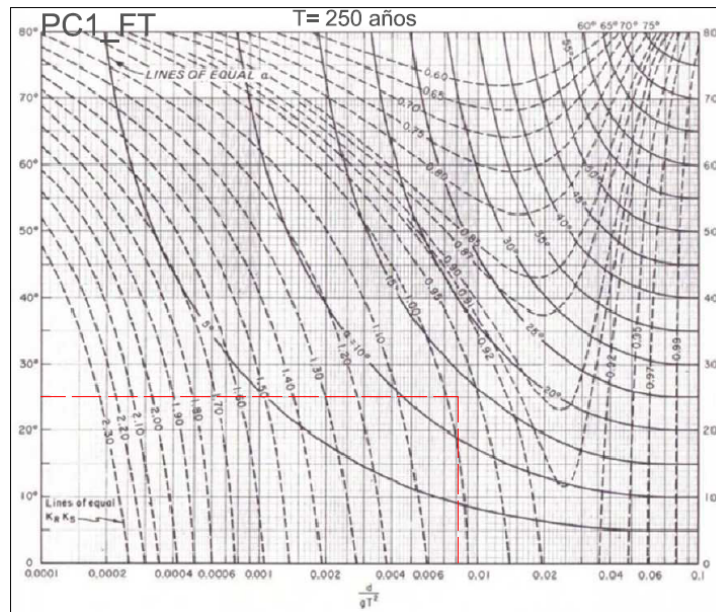


Figura E.2: Propagación *Punto 1*, fase 1979-2010

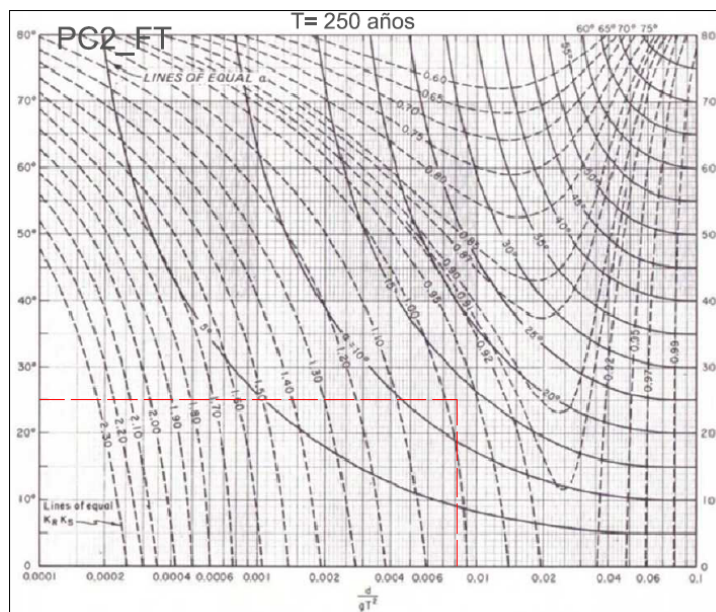


Figura E.3: Propagación *Punto 2*, fase 1979-2010

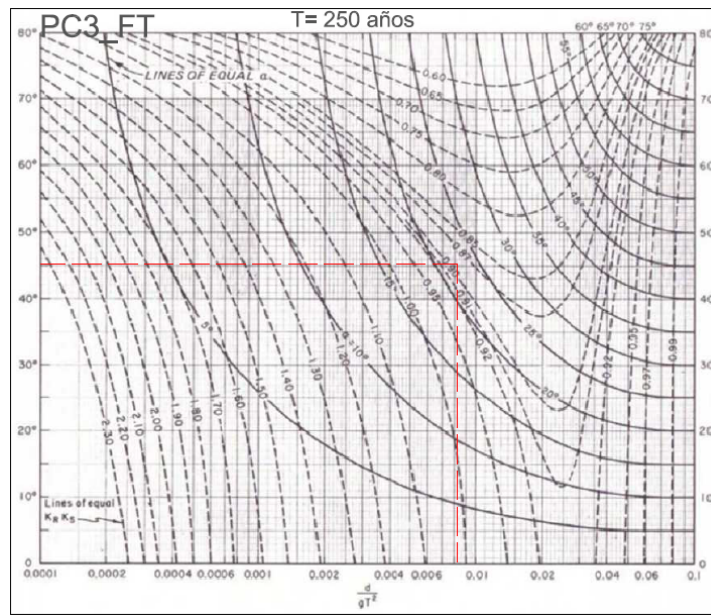


Figura E.4: Propagación *Punto 3*, fase 1979-2010

Tabla E.1: Parámetros obtenidos para propagación del oleaje en fase 1979-2010

Punto	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	$K_r \cdot K_s$
Punto 1	12,50	0,983
Punto 2	12,50	0,988
Punto 3	22,50	0,89

### E.3. Fase 1979-1994

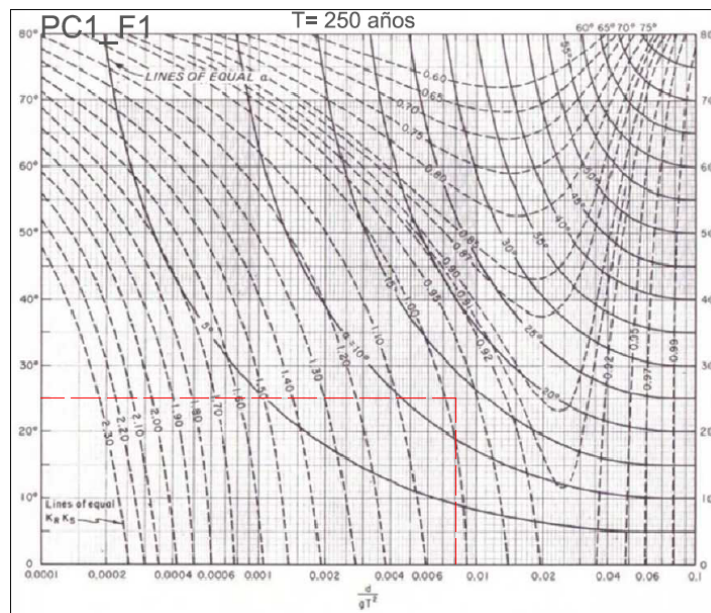


Figura E.5: Propagación *Punto 1*, fase 1979-1994

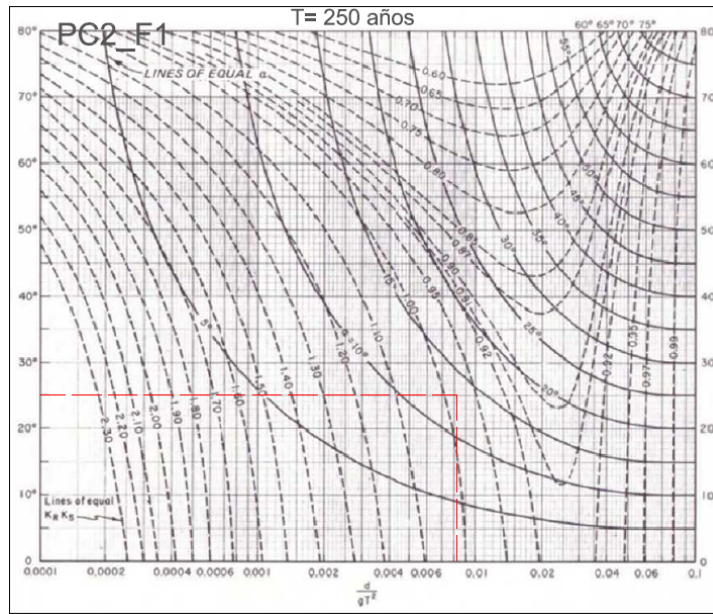


Figura E.6: Propagación *Punto 2*, fase 1979-1994

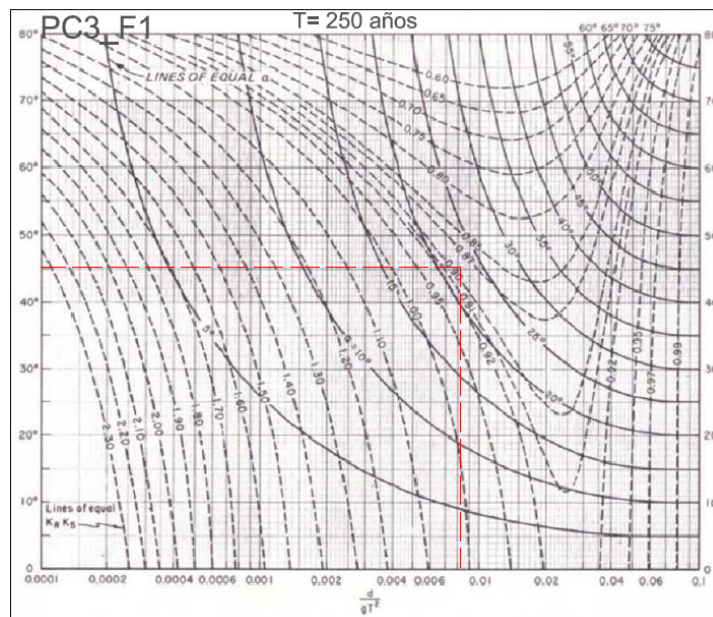


Figura E.7: Propagación *Punto 3*, fase 1979-1994

Tabla E.2: Parámetros obtenidos para propagación del oleaje en fase 1979-1994

Punto	$\alpha$ (°)	$K_r \cdot K_s$
Punto 1	12,50	0,983
Punto 2	12,50	0,983
Punto 3	22,50	0,89



## E.4. Fase 1995-2010

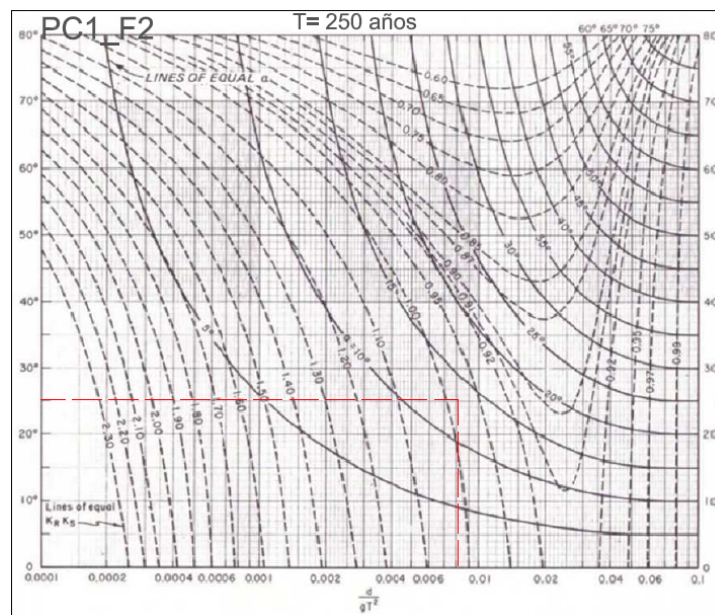


Figura E.8: Propagación *Punto 1*, fase 1995-2010

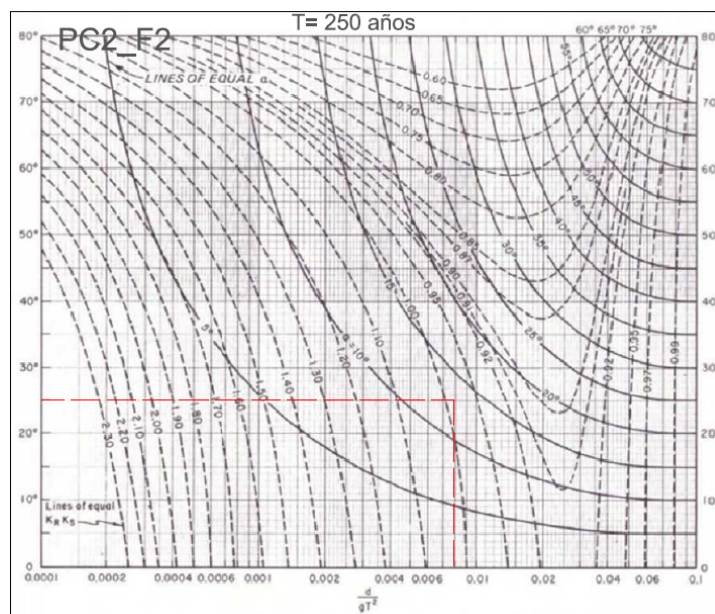


Figura E.9: Propagación *Punto 2*, fase 1995-2010

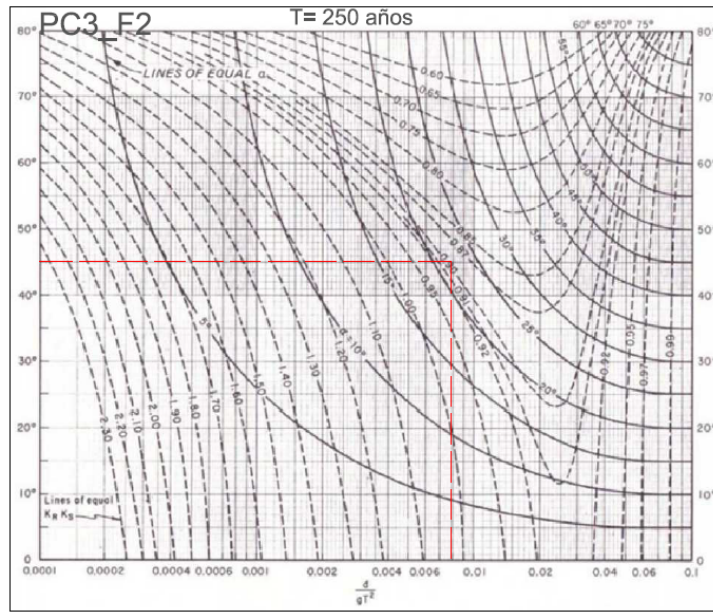


Figura E.10: Propagación *Punto 3*, fase 1995-2010

Tabla E.3: Parámetros obtenidos para propagación del oleaje en fase 1995-2010

Punto	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )	$K_r \cdot K_s$
Punto 1	12,50	0,983
Punto 2	12,50	0,988
Punto 3	22,50	0,895

## Anejo F

# Rebase

El cálculo del rebase se realiza mediante el software desarrollado por *Deltares* descrito en el apartado 4.6. El programa requiere la introducción de una serie de parámetros (input), obteniendo como resultado una distribución de valores posibles de descarga  $q$  debida al rebase. A efectos de este estudio, se considerará el valor medio de dicha distribución para los tres escenarios contemplados. Las figuras siguientes muestran los valores necesarios para poder emplear el modelo.

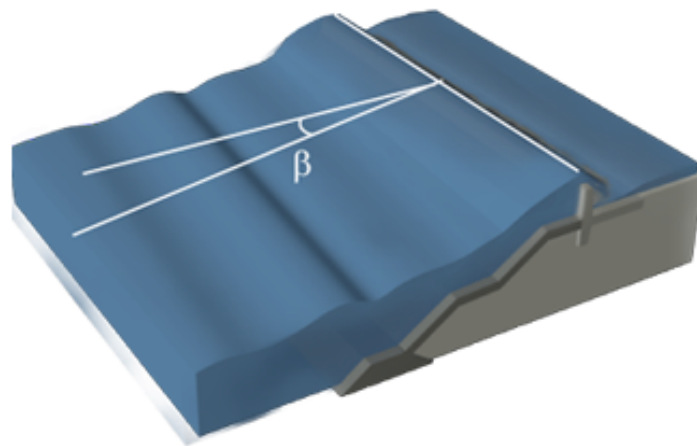


Figura F.1: Parámetros de cálculo del rebase<sup>[35]</sup>

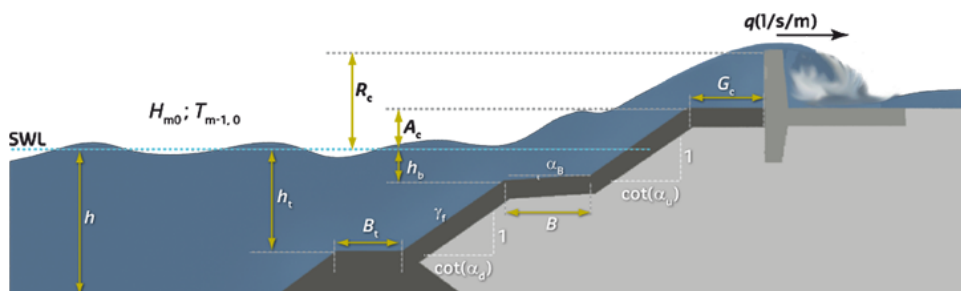


Figura F.2: Parámetros de cálculo del rebase<sup>[35]</sup>

---

A efectos del software propuesto, la nomenclatura empleada es la siguiente:

- $\beta$ : ángulo de ataque de la ola ( $^\circ$ )
- $h$ : calado en frente del de dique (m)
- $H_{m0}$ : altura de ola significativa a pie de dique (m)
- $T_{m-1,0}$ : periodo espectral a pie de dique (s)
- $h_t$ : calado a pie de dique (m)
- $B_t$  ancho del pie de dique (m)
- $\gamma_f$  coeficiente de rugosidad
- $\cot(\alpha_d)$ : ángulo del talud inferior
- $\cot(\alpha_u)$ : ángulo del talud superior
- $R_c$ : francobordo de coronación con respecto al Nivel del mar (m)
- $B$ : anchura de berma (m)
- $h_b$ : calado a la altura de la berma (m)
- $\tan(\alpha_B)$ : pendiente de la berma
- $A_c$ : francobordo del manto relativo al Nivel del mar (m)
- $G_c$ : anchura del manto (m)
- $q$ : Volumen descargado a causa del rebase (l/s/m)

La descarga debida al rebase en los tres escenarios propuestos para el año 2100, es comparada a la descarga actual. Dada la inexistencia de datos relativos al diseño del dique ante rebase, el interés de este estudio reside en comparar cuantitativamente en qué medida puede variar la descarga debida al rebase, como consecuencia de las variaciones climatológicas descritas.

El periodo espectral a pie de dique  $T_{m-1,0}$  se ha obtenido mediante los estudios propuestos por *B. Hofland et al. 2017*<sup>[44]</sup>. En ellos citan como obtener este valor a partir del periodo pico en aguas profundas. Los resultados obtenidos se recogen en tabla F.1

**Tabla F.1:** Valor del periodo espectral de ola a pie de dique  $T_{m-1,0}$  según el escenario

Escenario	$T_{m-1,0}$ (s)
1-A	15,10
2-B	14,97
3-C	14,90

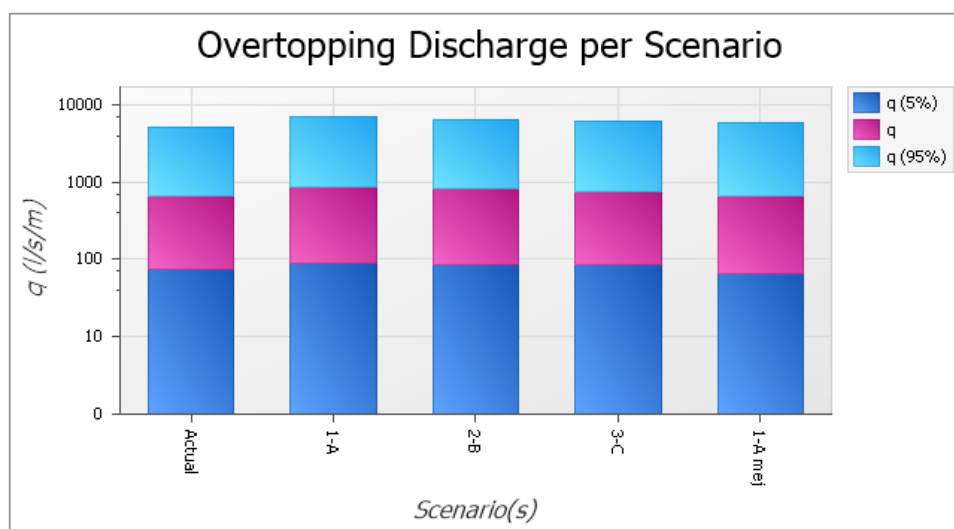
El diseño del dique estudiado no contempla la utilización de una berma intermedia, por lo que los valores de los parámetros  $B$ ,  $h_b$  y  $\tan(\alpha_B)$  será cero<sup>[45]</sup>. Además la rugosidad del elemento atiende a la tipología de la pieza. En este caso, se emplea un Core-Loc. Siguiendo los estudios propuestos por *J. Molines y J. R. Medina, 2015*<sup>[46]</sup>, el coeficiente de rugosidad del Core-Loc supuesto es  $\gamma_f=0,45$ . Finalmente, al existir una berma en la parte inferior de la estructura, como puede observarse en el anejo G, se considera que forma parte del pie de dique siguiendo las indicaciones del Manual<sup>[45]</sup>.

Con todo ello, la tabla F.2 recoge los valores introducidos en el modelo.

**Tabla F.2:** Variables introducidas en el modelo de rebase según el escenario

Variable	Escenario Actual	Escenario 1-A	Escenario 2-B	Escenario 3-C	Escenario 1-A mejora
$\beta$ (°)	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
$h$ (m)	14,15	14,58	14,52	14,46	14,58
$H_{m0}$ (m)	8,87	9,13	9,03	8,95	9,13
$T_{m-1,0}$ (s)	14,80	15,10	15,04	14,97	15,10
$h_t$ (m)	8,00	8,43	8,37	8,31	8,43
$B_t$ (m)	5	5	5	5	5
$\gamma_f$	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
$\cot(\alpha_d)$	2	2	2	2	2
$\cot(\alpha_d)$	2	2	2	2	2
$R_c$ (m)	7,5	7,07	7,13	7,19	7,90
$B$ (m)	0	0	0	0	0
$h_b$ (m)	0	0	0	0	0
$\tan(\alpha_B)$	0	0	0	0	0
$A_c$ (m)	1,50	1,07	1,13	1,19	1,07
$G_c$ (m)	5	5	5	5	5

Los resultados obtenidos pueden consultarse gráficamente en la figura F.3, pudiendo ver la distribución de valores de descarga (se omite el estudio de valores característicos en este estudio, centrandó la comparación en el valor medio) y a modo de resumen comparativo en la tabla F.3.



**Figura F.3:** Distribución de la descarga debida al rebase,  $q$  (l/s/m)<sup>[35]</sup>

**Tabla F.3:** Variables proporcionadas por el modelo de rebase según el escenario

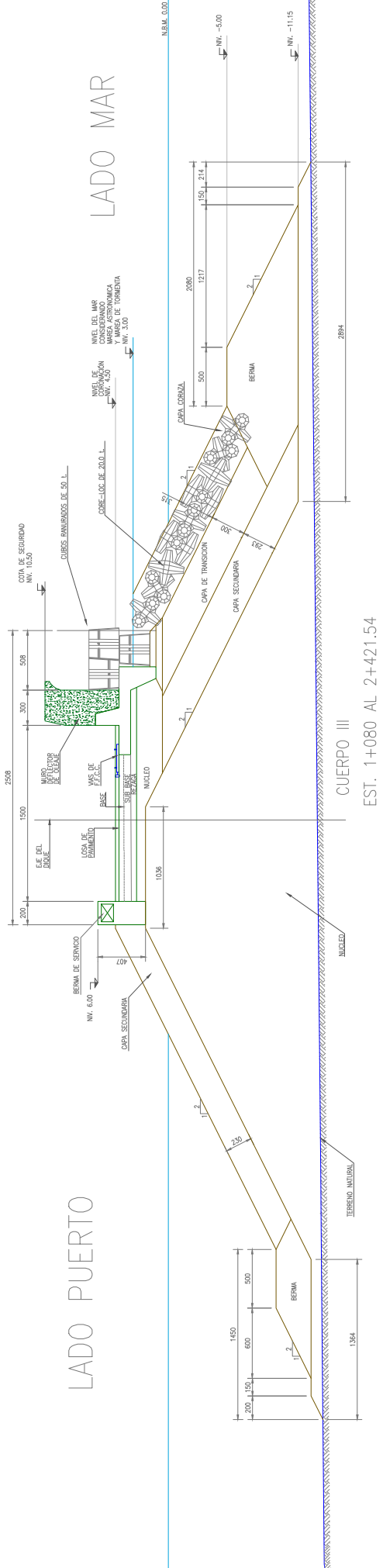
Variable	Escenario Actual	Escenario 1-A	Escenario 2-B	Escenario 3-C	Escenario 1-A mejora
$q$ (l/s/m)	674,00	858,30	812,70	761,20	673,00
$\Delta q$ (%)	-	27,34	20,58	12,94	<1

---

## Anejo G

# Descripción Geométrica de la Sección de estudio

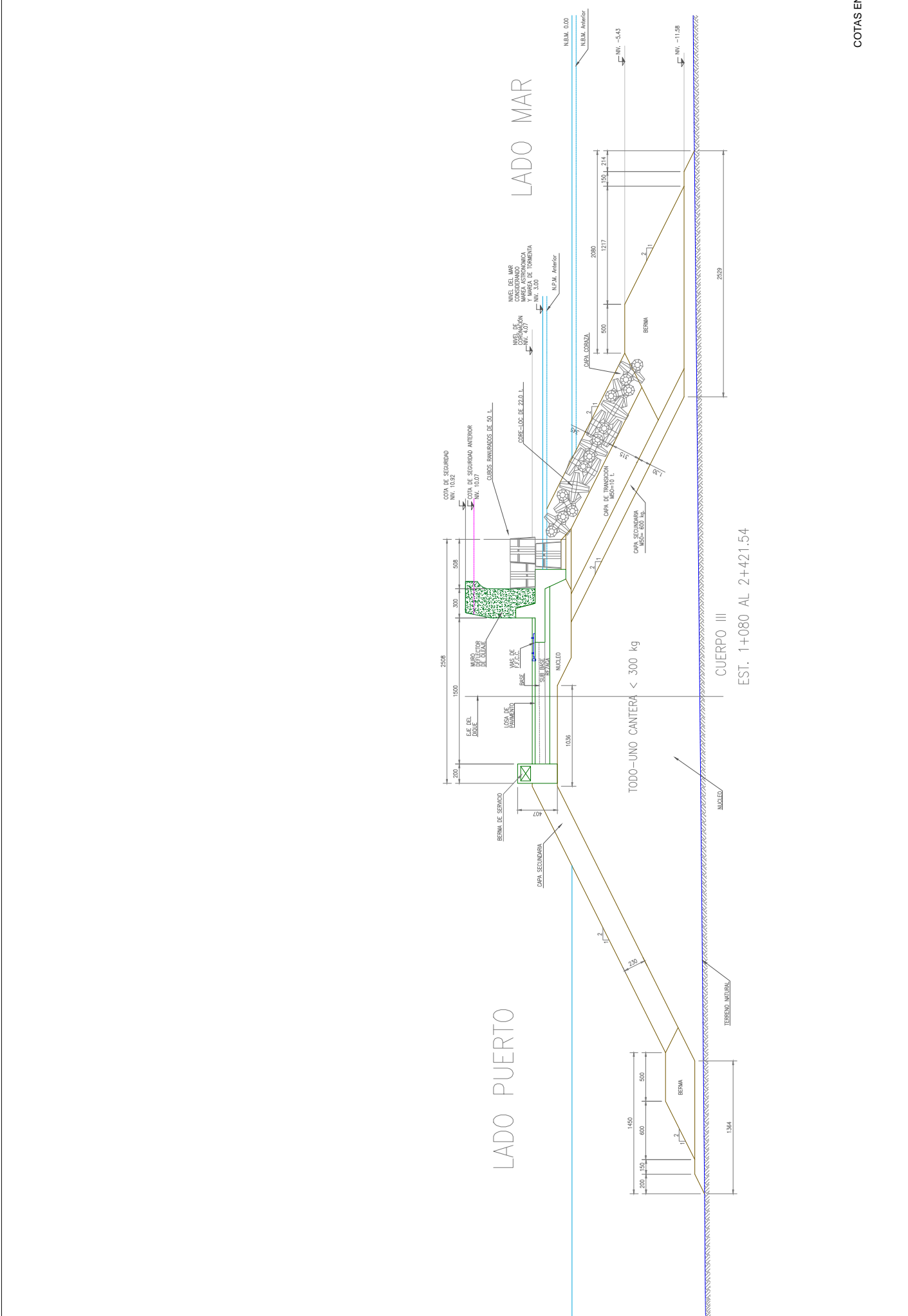
Este Anejo expone la descripción geométrica de la sección base analizada en el Trabajo Final de Máster, así como la propuesta de modificación geométrica de la sección ante las posibles condiciones marítimas que afectarán al dique en el año 2100.



EST. 1+080 AL 2+421.54

CUERPO III

COTAS EN CM



COTAS EN cm



---

# Acrónimos

- $H_{ss}$  - Altura de ola asociada al temporal de diseño
- $H_s$  - Altura de ola significativa
- $H_{m0}$  - Altura de ola significativa
- $H_0$  - Altura de ola en aguas profundas
- $H_d$  - Altura de ola en la zona de proyecto
- *IPCC* - International Panel on Climate Change
- *NOAA* - National Oceanic and Atmospheric Administration
- *NMM* - Nivel Medio del Mar
- $N_s$  - Número de temporales por año
- $P$  - Probabilidad de no excedencia
- *PIANC* - Permanent International Association of Navigation
- *PoT* - Peak over Threshold
- $Q$  - Probabilidad de excedencia
- $R$  - Periodo de retorno
- *ROM* - Recomendaciones de Obras Marítimas
- *SPM* - Shore Protection Manual
- *TFM* - Trabajo Final de Máster
- $T_L$  - Vida útil
- *WW – III* - WaveWatch III

# Listado de Figuras

2.1. Impacto del Cambio Climático en áreas costeras <i>Isobe, 2013</i> <sup>[7]</sup> . . . . .	7
2.2. Secuencia del crecimiento del remonte a causa del incremento del nivel del mar <i>Isobe, 2013</i> <sup>[7]</sup> . . . . .	8
2.3. Secuencia del incremento del rebase por crecida del NMM <i>Isobe, 2013</i> <sup>[7]</sup> . . . . .	9
2.4. Impacto del aumento del NMM y magnitud del oleaje en un dique <i>Isobe, 2013</i> <sup>[7]</sup> .	10
3.1. Área geográfica cubierta por WW-III (NOAA) <sup>[15]</sup> . . . . .	12
3.2. Área geográfica cubierta por Puertos del Estado <sup>[16]</sup> . . . . .	13
3.3. Área geográfica cubierta por Ifremer en Europa <sup>[17]</sup> . . . . .	14
3.4. Área geográfica cubierta por Ifremer en el mundo <sup>[17]</sup> . . . . .	14
3.5. Área geográfica cubierta por Simorc en el mundo . . . . .	15
3.6. Área geográfica cubierta por BMT Argoss <sup>[18]</sup> . . . . .	16
3.7. Nomenclatura de las celdas del modelo (separación 30 minutos), rango y resolución <sup>[23]</sup> . . . . .	21
3.8. Nomenclatura de las celdas del modelo (separación 10 minutos), rango y resolución <sup>[23]</sup>	21
3.9. Nomenclatura de las celdas del modelo (separación 4 minutos), rango y resolución <sup>[23]</sup>	21
3.10. Dominio Global. Resolución de las celdas del modelo expresada en minutos <sup>[23]</sup> . .	22
4.1. Vista aérea Puerto de Veracruz actual <sup>[25]</sup> . . . . .	25
4.2. Terminales contempladas en la Ampliación . . . . .	26
4.3. Ubicación de los dique . . . . .	26
4.4. Sección de estudio, PK 1+080 al 2+421 . . . . .	27
4.5. Principio de extrapolación de los datos . . . . .	29
4.6. Distribución de temporales en PoT . . . . .	34
4.7. Zonas vulnerables al aumento del NMM, <i>IHE-UNESCO</i> <sup>[30]</sup> . . . . .	36
4.8. Escenarios de predicción de fluctuación de la temperatura global <i>IPCC, 2007</i> <sup>[6]</sup> .	37
4.9. Escenarios de predicción de fluctuación del NMM <i>IPCC, 2007</i> <sup>[6]</sup> . . . . .	37
4.10. Ubicación puntos de estudio ( <i>PC</i> ) <i>Google Earth, (Mayo 2017)</i> . . . . .	41
4.11. $H_s$ frente a dirección <i>Punto 2</i> . . . . .	42
4.12. Rosa de oleaje <i>Punto 2</i> . . . . .	43
4.13. Tipo de oleaje según pendiente <i>Punto 2</i> . . . . .	43
4.14. Análisis PoT, umbral=2,97 m . . . . .	44
4.15. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados en el <i>Punto 2</i> . . . . .	45
4.16. Variación del peso de la pieza del manto prevista para 2040 . . . . .	50
4.17. Variación del rebase prevista para 2040 . . . . .	50
4.18. Diseño propuesto de la Sección de estudio, PK 1+080 al 2+421 . . . . .	52
A.1. Leyenda base de datos Ifremer . . . . .	I
A.2. Pantalla de datos red Candhis . . . . .	II
A.3. Pantalla de datos red Candhis . . . . .	II
A.4. Pantalla particular punto escogido . . . . .	III

A.5. Ajuste de funciones $H_s$ - $R$ presentes en los informes Candhis . . . . .	III
A.6. Pantalla de datos red Shom Ronim . . . . .	IV
A.7. Acceso pantalla interactiva de datos <i>Simorc</i> . . . . .	IV
A.8. Pantalla de petición de datos . . . . .	V
A.9. Pantalla inicial de introducción de datos <sup>[18]</sup> . . . . .	VI
A.10. Acceso a la serie de datos <sup>[18]</sup> . . . . .	VI
A.11. Directorio Datos Hindcasting NOAA . . . . .	VII
A.12. Subcarpeta Datos fecha 01/1979 NOAA . . . . .	VIII
A.13. Subcarpeta Grib fecha 01/1979 NOAA . . . . .	VIII
D.1. $H_s$ frente a dirección . . . . .	XXVII
D.2. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	XXVII
D.3. Rosa de oleaje . . . . .	XXVIII
D.4. Análisis PoT, umbral=3,05 m . . . . .	XXVIII
D.5. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	XXIX
D.6. $H_s$ frente a dirección . . . . .	XXX
D.7. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	XXX
D.8. Rosa de oleaje . . . . .	XXXI
D.9. Análisis PoT, umbral=2,97 m . . . . .	XXXI
D.10. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	XXXII
D.11. $H_s$ frente a dirección . . . . .	XXXIII
D.12. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	XXXIII
D.13. Rosa de oleaje . . . . .	XXXIV
D.14. Análisis PoT, umbral=2,70 m . . . . .	XXXIV
D.15. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	XXXV
D.16. $H_s$ frente a dirección . . . . .	XXXVI
D.17. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	XXXVI
D.18. Rosa de oleaje . . . . .	XXXVII
D.19. Análisis PoT, umbral=3,00 m . . . . .	XXXVII
D.20. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	XXXVIII
D.21. $H_s$ frente a dirección . . . . .	XXXIX
D.22. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	XXXIX
D.23. Rosa de oleaje . . . . .	XL
D.24. Análisis PoT, umbral=3,00 m . . . . .	XL
D.25. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	XLI
D.26. $H_s$ frente a dirección . . . . .	XLII
D.27. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	XLII
D.28. Rosa de oleaje . . . . .	XLIII
D.29. Análisis PoT, umbral=2,80 m . . . . .	XLIII
D.30. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	XLIV
D.31. $H_s$ frente a dirección . . . . .	XLV
D.32. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	XLV
D.33. Rosa de oleaje . . . . .	XLVI
D.34. Análisis PoT, umbral=2,90 m . . . . .	XLVI
D.35. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	XLVII
D.36. $H_s$ frente a dirección . . . . .	XLVIII
D.37. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	XLVIII
D.38. Rosa de oleaje . . . . .	XLIX
D.39. Análisis PoT, umbral=2,90 m . . . . .	XLIX
D.40. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	L
D.41. $H_s$ frente a dirección . . . . .	LI
D.42. Tipo de oleaje según pendiente . . . . .	LI

---

D.43. Rosa de oleaje . . . . .	LII
D.44. Análisis PoT, umbral=2,65 m . . . . .	LII
D.45. Funciones de extremos ajustadas a los datos analizados . . . . .	LIII
E.1. Dirección oleaje según punto analizado . . . . .	LIV
E.2. Propagación <i>Punto 1</i> , fase 1979-2010 . . . . .	LV
E.3. Propagación <i>Punto 2</i> , fase 1979-2010 . . . . .	LV
E.4. Propagación <i>Punto 3</i> , fase 1979-2010 . . . . .	LVI
E.5. Propagación <i>Punto 1</i> , fase 1979-1994 . . . . .	LVI
E.6. Propagación <i>Punto 2</i> , fase 1979-1994 . . . . .	LVII
E.7. Propagación <i>Punto 3</i> , fase 1979-1994 . . . . .	LVII
E.8. Propagación <i>Punto 1</i> , fase 1995-2010 . . . . .	LVIII
E.9. Propagación <i>Punto 2</i> , fase 1995-2010 . . . . .	LVIII
E.10. Propagación <i>Punto 3</i> , fase 1995-2010 . . . . .	LIX
F.1. Parámetros de cálculo del rebase <sup>[35]</sup> . . . . .	LX
F.2. Parámetros de cálculo del rebase <sup>[35]</sup> . . . . .	LX
F.3. Distribución de la descarga debida al rebase, $q$ (1/s/m) <sup>[35]</sup> . . . . .	LXII

---

# Listado de Tablas

2.1. Caracterización de los tipos de oleaje . . . . .	5
3.1. Resumen características WW-III . . . . .	12
3.2. Resumen características Puertos del Estado . . . . .	13
3.3. Resumen de características de Ifremer . . . . .	15
3.4. Resumen de características de Simorc . . . . .	15
3.5. Resumen de características de Magic Sea Weed . . . . .	16
3.6. Resumen de características de BMT Argoss . . . . .	17
3.7. Bases de datos instrumentales en Europa ( <i>Último acceso Mayo 2017</i> ) . . . . .	18
3.8. Bases de datos instrumentales en Norte América ( <i>Último acceso Mayo 2017</i> ) . . . . .	18
3.9. Bases de datos instrumentales en Asia ( <i>Último acceso Mayo 2017</i> ) . . . . .	19
3.10. Bases de datos instrumentales en Oceanía ( <i>Último acceso Mayo 2017</i> ) . . . . .	19
3.11. Comparación de datos entre las series 1992-2009 de la NOAA y BMT Argoss, tras analizar 52812 datos de altura de ola $H_s$ . . . . .	23
4.1. Escenarios IPCC . . . . .	38
4.2. Ubicación puntos de estudio . . . . .	41
4.3. Criterios análisis PoT . . . . .	44
4.4. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 2</i> . . . . .	45
4.5. Error cuadrático medio según distribución, <i>Punto 2</i> . . . . .	46
4.6. Altura de ola en aguas profundas y propagada de los puntos de estudio en fase 1979-2010, <i>Punto 2</i> . . . . .	47
4.7. Comparación altura de ola de diseño con $R=250$ años, en los periodos de estudio . . . . .	47
4.8. Comparación altura de ola de diseño con $R=250$ años, en los periodos de estudio . . . . .	48
4.9. Escenarios Altura de ola Periodo de retorno $R=250$ años, para 2100 . . . . .	48
4.10. Escenarios Nivel del Mar . . . . .	48
4.11. Altura de ola Periodo a pie de dique $H_d$ (m) con periodo de retorno $R=250$ años combinando escenarios en año 2100 . . . . .	49
4.12. Diferencia de peso del elemento 2010-2100 . . . . .	49
4.13. Diferencia de rebase 2010-2100 . . . . .	49
5.1. Efectos asociados al incremento de $H_s$ y $NMM$ en el año 2100 con respecto al año 2010 y comparación con resultados del <i>IH Cantabria</i> . . . . .	55
A.1. Variables base de datos NOAA . . . . .	IX
D.1. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 1</i> . . . . .	XXIX
D.2. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 2</i> . . . . .	XXXII
D.3. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 3</i> . . . . .	XXXV
D.4. Altura de ola en aguas profundas y propagada de los puntos de estudio en fase 1979-2010 . . . . .	XXXV
D.5. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 1</i> . . . . .	XXXVIII

---

D.6. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 2</i> . . . . .	XLI
D.7. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 3</i> . . . . .	XLIV
D.8. Altura de ola en aguas profundas y propagada de los puntos de estudio en fase 1979-1994 . . . . .	XLIV
D.9. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 1</i> . . . . .	XLVII
D.10. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 2</i> . . . . .	L
D.11. Parámetros de distribuciones, <i>Punto 3</i> . . . . .	LIII
D.12. Altura de ola en aguas profundas y propagada de los puntos de estudio en fase 1995-2010 . . . . .	LIII
E.1. Parámetros obtenidos para propagación del oleaje en fase 1979-2010 . . . . .	LVI
E.2. Parámetros obtenidos para propagación del oleaje en fase 1979-1994 . . . . .	LVII
E.3. Parámetros obtenidos para propagación del oleaje en fase 1995-2010 . . . . .	LIX
F.1. Valor del periodo espectral de ola a pie de dique $T_{m-1,0}$ según el escenario . . . . .	LXI
F.2. Variables introducidas en el modelo de rebase según el escenario . . . . .	LXII
F.3. Variables proporcionadas por el modelo de rebase según el escenario . . . . .	LXII

---

# Referencias

- [1] M. de Fomento de España, *Real Decreto Legislativo 2/2011, Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante*. Ministerio de Fomento, 2011.
- [2] P. del Estado, *Recomendaciones para obras marítimas: ROM 0.0: procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias: parte I*. Puertos del Estado, 2001.
- [3] M. I. Losada, J. Grau, and A. Baquerizo, “The recommendations for maritime and harbor works in Spain: Application of methods of level i, ii and iii,” *Coastal Engineering Proc*, 2, 2412-2422, 2002.
- [4] W. G. 12, *Analysis of rubble mound breakwaters*. PIANC, Belgium, 1992.
- [5] M. Vermeer and S. Rahmstorf, “Global sea level linked to global temperature.,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(51), 21527-21532., 2009.
- [6] I. Working Group I, “Projections of future changes in climate.” [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/spmsspmp-projections-of.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/spmsspmp-projections-of.html), 2007. Acceso 20 Mayo 2017.
- [7] M. Isobe, “Impact of global warming and adaptation strategy in the coastal zone,” *Coastal Structures 2011*, 2013.
- [8] H. F. Burcharth, T. L. Andersen, and J. L. Lara, “Upgrade of coastal defence structures against increased loadings caused by climate change: A first methodological approach,” *Elsevier*, 2014.
- [9] K. Theoharris, P. Panayotis, G. Panayota, and K. Theofanis, “An integrated methodological approach for the upgrading of coastal structures due to climate change effects,” 2015.
- [10] N. Spyridoula and L. Eva, “Design of breakwaters under the effect of climate change,” 2016.
- [11] M. Esteban, H. Takagi, and T. Shibayama, “Sea level rise and the increase in rubble mound breakwater damage,” 2013.
- [12] N. Chini and P. Stansby, “Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and sea level rise,” *Elsevier*, 2012.
- [13] J. W. V. der Meer, N. W. H. Allsop, T. Bruce, J. D. Rouck, A. Kortenhuis, T. Pullen, H. Shüttrumpf, P. Troch, and B. Zanuttigh, *EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. 2016.
- [14] H. L. Tolman, *User manual and system documentation of WAVEWATCH IIITM version 3.14*. NOAA, USA, 2009.

- 
- [15] NOAA, “Mmab operational wave models.” <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>, 2017. Acceso 25 Marzo 2017.
- [16] P. del Estado, “Prediccion de oleaje, nivel del mar ; boyas y mareografos.” <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>, 2017. Acceso 25 Marzo 2017.
- [17] Ifremer, “All eulerian networks.” <http://www.ifremer.fr/co-en/>, 2017. Acceso 25 Marzo 2017.
- [18] BMT, Argoss, M. consultancy, and weather forecasting, “Base de datos bmt argoss.” <http://www.waveclimate.com/>. Acceso 25 Mayo 2017.
- [19] Navionics, “Navionics webapp visor.” <https://webapp.navionics.com/#boating@3&key=yrmxHgvmf%40>. Acceso 25 Mayo 2017.
- [20] USACE, *Shore protection manual*. 1984.
- [21] TU and DELFT, “Software swan and swanone.” <http://www.kennisbank-waterbouw.nl/Software/>. Acceso 25 Mayo 2017.
- [22] NOAA, “Etopo 1 description.” <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>. Acceso 25 Mayo 2017.
- [23] A. Chawla, D. Spindler, and H. Tolman, “Wavewatch iii- hindcasts with re-analysis winds. initial report on model setup,” 2011.
- [24] B. A. Niclasen, “Nww3 as part of sar-weather: Initial investigation and thoughts on how to proceed.,” 2010:2013.
- [25] H. Veracruz, “Vista aérea de veracruz.” <http://elheraldodeveracruz.com.mx/images/Articulos/Rogelio/Diciembre/15/puerto.jpg>. Acceso 25 Mayo 2017.
- [26] A. P. I. de Veracruz, “Declaración de impacto ambiental del proyecto de ampliación del puerto de veracruz en la zona norte,” 2010.
- [27] J. Hardisty and A. J. Laver, “Breaking waves on a macrotidal barred beach: A test of mccowan’s criteria,” *Journal of Coastal Research*, 1989.
- [28] P. del Estado, *Programa de Recomendaciones para obras maritima*. Puertos del Estado.
- [29] PIANC, *Criteria for the selection of breakwater types and their related optimum safety levels, Capítulo 8*. PIANC, 2016.
- [30] H. J. Verhagen, “Lecture: Climate change and sea level rise,” *Integrated Coastal Zone Management Course*, 2017.
- [31] USACE, *Coastal Engineering Manual*. USACE, 2002.
- [32] CIRIA, *The Rock Manual*. 2007.
- [33] H. J. Verhagen and J. P. van den Bos, *Breakwater design Lecture notes CIE5308*. T.U. Delft, 2017.
- [34] Melby and Turk, *CORE-LOC concrete armor units*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1997.
- [35] Deltares, “Overtopping neural network.” <https://www.deltares.nl/en/software/overtopping-neural-network/>, 2017. Acceso 25 Mayo 2017.



- 
- [36] IHCantabria, “Visor c3a.” <http://www.c3a.ihcantabria.com/>, 2017. Acceso 25 Mayo 2017.
- [37] M. R. A. van Gent, G. M. Smith, and I. M. V. der Werf, “Stability of rubble mound breakwaters with a berm,” 2012.
- [38] CETMEF, “Red candhis.” <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>. Acceso 25 Abril 2017.
- [39] IAOGP, “Base de datos simorc.” <http://www.simorc.org/>. Acceso 25 Marzo 2017.
- [40] PEIOMDM, “Seadatanet.” <https://www.seadatanet.org/>. Acceso 25 Mayo 2017.
- [41] NOAA, “Programa degrib.” [https://www.weather.gov/mdl/degrib\\_download](https://www.weather.gov/mdl/degrib_download). Acceso 25 Mayo 2017.
- [42] NOAA, “Datos oleaje: Fase 1.” <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/nopp-phase1>. Acceso 25 Mayo 2017.
- [43] NOAA, “Datos oleaje: Fase 2.” <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/nopp-phase2>. Acceso 25 Mayo 2017.
- [44] B. Hoffland, X. Chen, C. Altomare, and P. Oosterlo, “Prediction formula for the spectral wave period  $t_{m-1,0}$  on mildly sloping shallow foreshores,” 2017.
- [45] Deltares, *Manual: Overtopping prediction by Neural Network*. Deltares, 2016.
- [46] J. Molines and J. R. Medina, “Calibration of overtopping roughness factors for concrete armour units in non-breaking conditions using the clash database,” 2015.