



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ESPECTRAL DE OLEAJE EN LA  
PATAGONIA NORTE DE CHILE**

POR

**Rocío Pérez Foix**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para  
optar al título de Ingeniero Civil

Profesora Guía  
Maricarmen Guerra París

Profesional Revisor  
Alejandra Stehr Gesche

Profesional Supervisor  
Raúl Flores Audibert

Diciembre, 2023  
Concepción (Chile)

© 2023 Rocío Pérez Foix

© 2023 Rocío Pérez Foix

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## RESUMEN

El oleaje es uno de los procesos físicos más importantes de transferencia de energía entre la atmósfera y el océano. Conocer su comportamiento dinámico es relevante en la ingeniería, ya que es el principal forzante sobre la infraestructura costera o de alta mar, como muelles, muros de protección y rompeolas. Chile posee más de 4300 kilómetros de línea de costa en el Océano Pacífico Sur y la falta de mediciones de oleaje es común en la mayoría de sus regiones. La Armada de Chile cuenta con solo cuatro boyas de oleaje ubicadas actualmente frente a Antofagasta, Valparaíso, Talcahuano, y en el Mar Interno de Chiloé, por lo que la información de terreno existente en muchas zonas del país es nula. Por ello se suele recurrir al uso de modelos numéricos para simular los estados de mar en las costas y así obtener la información del oleaje relevante para el diseño y otros fines de investigación. Los modelos numéricos del tipo espectral permiten conocer la evolución de la energía de las olas en el tiempo y el espacio, siendo útiles para extensas zonas de estudio desde aguas profundas hasta las cercanías de la costa a un bajo costo computacional.

En este trabajo se ha implementado el modelo numérico Wavewatch III para simular el oleaje desde aguas profundas hacia las costas del mar externo de la Patagonia norte de Chile. El objetivo es obtener información estadística del mar de fondo en ciertos lugares de interés dentro del dominio de cálculo, como la entrada del Canal de Chacao y la Boca del Guafo. La modelación se realiza con espectros de oleaje retrospectivos como condiciones de borde, los cuales son propagados en la zona de estudio, resultando en una buena aproximación de los parámetros resumen del oleaje altura significativa y el periodo peak al comparar con información estadística en un punto del Atlas del Oleaje de Chile y datos medidos. Del análisis del clima de mar se infiere que existe poca variación espacial de los parámetros resumen del oleaje, a excepción de cuando se produce disipación por islas y asomeramiento por la batimetría, al acercarse a la Isla Guafo, Isla de Chiloé y la costa del continente. Este trabajo contribuye a aumentar la información estadística del oleaje a lo largo de la costa del Pacífico en la Patagonia norte de Chile desde el año 2010 hasta el año 2021 cada 1 hora.

## **ABSTRACT**

Wind waves are one of the most important physical processes of energy transfer between the atmosphere and the ocean. Knowing its dynamic behavior is relevant for engineering, since it is the main forcing on coastal or offshore infrastructure, such as docks, walls, and breakwaters. Chile has more than 4.300 kilometers of coastline in the South Pacific Ocean and the lack of wave measurements is common in most of its regions. The Chilean Navy has only four wave buoys currently located off Antofagasta, Valparaíso, Talcahuano, and in the Internal Sea of Chiloé, so there is not much publicly available wave data. Hence, numerical models are often used to simulate sea states and to obtain relevant wave information for design and other research purposes. Numerical spectral wave models study the evolution of wave energy in time and space, being useful for extensive study areas from deep waters to the shallow coast at a low computational cost.

In this work, the Wavewatch III numerical model has been implemented to simulate waves along the northern Patagonia of Chile from deep waters towards the coast. The objective is to obtain statistical information on the prevailing waves in certain places of interest within the calculation domain, such as the entrance to the Chacao Channel and Boca del Guafo. The modeling is carried out using retrospective wave spectra as boundary conditions, which are propagated in the study area, resulting in a good approximation of the wave summary parameters, significant height and peak period when compared with statistical information at a point in the Wave Atlas of Chile and measured data. From the sea state analysis, it is inferred that there is little spatial variation in the main wave parameters waves, except when dissipation and refraction occur around islands and shallowing by bathymetry, when approaching Guafo Island, Chiloé Island and the coast of the continent. This provides hourly statistical information of waves along the Pacific coast of northern Patagonia from 2010 until 2021.

## **DEDICATORIA**

*A todas las personas que aportaron de alguna forma en todo este proceso, especialmente a mis padres, Yolanda y Alfredo, por apoyarme incondicionalmente todos estos años.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia, la autora agradece y estima a la Dra. Maricarmen Guerra Paris por el apoyo, confianza, recomendaciones y críticas constructivas entregadas estos últimos meses, su guía fue fundamental para poder desarrollar de manera adecuada este trabajo.

Se agradece el financiamiento de la investigación entregado por el proyecto FONDECYT de iniciación 11220663.

Finalmente, la autora agradece a la comisión de esta memoria de título, la profesora Dra. Alejandra Stehr y el profesor Dr. Raúl Flores, a todos los profesores, auxiliares y compañeros de la Facultad de Ingeniería civil de la Universidad de Concepción que se cruzaron en su camino universitario y que han permitido la formación personal, académica y profesional de quien escribe este documento.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivo General.....	2
1.3. Objetivos Específicos.....	2
1.4. Metodología.....	2
1.5. Principales resultados y conclusiones.....	3
1.6. Organización del documento.....	3
2. OLEAJE Y SU PROPAGACIÓN.....	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Generación y propagación de oleaje irregular.....	5
2.3. Descripción estadística de oleaje irregular.....	7
2.4. Modelos numéricos de generación de oleaje.....	10
2.5. Modelo espectral Wavewatch III.....	10
2.6. Oleaje en Chile.....	12
2.7. Conclusiones.....	14
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1. Introducción.....	15
3.2. Zona de estudio.....	15
3.3. Modelo Wavewatch III.....	16
3.4. Configuración del modelo.....	17
3.4.1. Batimetría.....	17
3.4.2. Grilla Computacional.....	18
3.4.3. Condición inicial.....	18
3.4.4. Condición de borde.....	18

---

3.4.5. Pasos de tiempo .....	20
3.5. Validación del modelo .....	20
3.6. Clima de oleaje en nuevos nodos de interés .....	21
3.7. Conclusión .....	23
4. RESULTADOS .....	24
4.1. Introducción .....	24
4.2. Resultados modelo .....	24
4.3. Validación del modelo .....	24
4.4. Clima medio del oleaje .....	34
4.5. Propagación del oleaje en la Patagonia Norte.....	38
4.6. Clima extremo de oleaje .....	41
4.7. Conclusión .....	44
5. CONCLUSIONES.....	45
REFERENCIAS .....	47



**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1: Parámetros resumen del oleaje irregular.....	9
Tabla 3.1: Coordenadas de los vértices del área de estudio.....	15
Tabla 3.2: Descripción de los nodos de comparación.....	21
Tabla 3.3: Descripción de los nodos de estudio.....	21
Tabla 4.1: Tabla comparativa de la media de los parámetros del oleaje en el Nodo 13 y Punta Guabún. ....	34
Tabla 4.2: Tabla resumen Media de los parámetros del oleaje .....	35
Tabla 4.3: Tabla resumen Máximos de los parámetros del oleaje .....	35
Tabla 4.4: Altura significativa con periodo de retorno 5, 10, 20, 50 y 100 años .....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquemática del proceso de generación de oleaje por viento .....	5
Figura 2.2: Representación esquemática de los tipos de olas en la superficie del océano y la energía que transportan. ....	6
Figura 2.3: Diagrama con características y términos que intervienen en una ola.....	7
Figura 2.4: Ejemplo de registro de onda.....	8
Figura 2.5: (Izq.) Malla con datos del modelo y satelitales y (Der). Ubicación de boyas y nodos usados en la calibración del modelo Wavewatch III .....	13
Figura 3.1: Zona de Estudio. Ubicación de Chile y Mar exterior de Chiloé .....	16
Figura 3.2: Información batimétrica GEBCO (2014) de la zona de estudio. El color plomo representa elevaciones sobre el nivel medio del mar.....	17
Figura 3.3: Mapa de ubicación de los espectros obtenidos del modelo global utilizados como condición de borde.....	19
Figura 3.4: Mapa de ubicación de los nodos de interés .....	22
Figura 4.1: Comparación serie de tiempo de los parámetros del oleaje en el Nodo 13 del Atlas de Oleaje.....	25
Figura 4.2: Comparación serie de altura significativa del del Atlas de Oleaje .....	26
Figura 4.3: Comparación serie de periodo peak del Atlas de Oleaje .....	26
Figura 4.4: Comparación serie de dirección peak del Atlas de Oleaje .....	27
Figura 4.5: Histograma de alturas significativas espectrales ( $H_m0$ ) .....	28
Figura 4.6: Histograma de periodos peak ( $T_p$ ).....	30
Figura 4.7: Histograma de direcciones peak ( $D_p$ ) .....	30
Figura 4.8: Histograma de $D_m$ .....	31
Figura 4.9: Dispersión de $H_s/H_m0$ .....	31
Figura 4.10: Comparación serie de tiempo $H_s$ en Punta Guabún.....	32
Figura 4.11: Histograma de $H_s$ .....	33
Figura 4.12: Serie de 11 años de los parámetros del oleaje en el Nodo 13.....	35
Figura 4.13: Histograma mosaico bivariado de la altura y periodo del Nodo 13. ....	36
Figura 4.14: Histograma mosaico bivariado de la altura y periodo de Chacao. ....	37
Figura 4.15: Histograma mosaico bivariado de la altura y periodo de la Boca del Guafo. ....	37
Figura 4.16: Progresión de tormenta de invierno. ....	39

---

Figura 4.17: Progresión de tormenta de invierno. ....	40
Figura 4.18: Análisis de máximos sobre el umbral Nodo 13.....	41
Figura 4.19: Análisis de máximos sobre el umbral Chacao.....	42
Figura 4.20: Análisis de máximos sobre el umbral Guafo.....	42

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación

El oleaje es uno de los procesos globales más importantes de transferencia de energía entre la atmósfera y el océano. Conocer su comportamiento dinámico es relevante en la ingeniería, ya que es el principal forzante sobre la infraestructura costera o de alta mar, donde los eventos extremos como marejadas afectan el diseño de estructuras tales como muelles, muros de protección y rompeolas. Además, el oleaje domina procesos costeros como el transporte de sedimentos y la mezcla de agua dulce en desembocaduras de ríos. Chile posee más de 4300 kilómetros de línea de costa en el Océano Pacífico Sur y la falta de datos de oleaje es común en la mayoría de sus regiones. Frente a sus costas, la Armada de Chile cuenta con solo cuatro boyas de oleaje ubicadas actualmente frente a Antofagasta, Valparaíso, Talcahuano, y en el Mar Interno de Chile (Armada de Chile, 2022), por lo que la información existente en muchas zonas del país es nula. Por ello se suele recurrir al uso de modelos numéricos para simular los estados de mar en las costas. Los modelos numéricos que promedian la fase del oleaje, también conocidos como modelos espectrales, calculan la evolución de la energía de las olas en el tiempo y el espacio, siendo útiles para zonas de estudio grandes, ya que permiten abarcar grandes extensiones desde aguas profundas hasta las cercanías de la costa a un bajo costo computacional (Winckler, 2020).

El proyecto de investigación en el que se enmarca esta memoria tiene como objetivo analizar la hidrodinámica oleaje-corriente del mar interno de la Isla de Chiloé. Dicha investigación requiere de series de tiempo de información estadística del oleaje en las entradas del océano al mar interno, específicamente en la boca occidental del canal de Chacao y en la Boca del Guafo. El Atlas de oleaje de Chile entrega información de los parámetros del oleaje reinante cada 111 kilómetros aproximadamente a lo largo de la costa de Chile, siendo de interés el nodo 13, una celda de simulación de espectro direccional ubicada en aguas profundas frente a la isla de Chiloé, en la coordenada  $43^{\circ}\text{S}$   $76^{\circ}\text{O}$ . Como no hay boyas o modelos de alta resolución de uso público con las series de oleaje en ambas entradas, se implementa en este trabajo una simulación utilizando Wavewatch III, un modelo espectral de oleaje de tercera generación que resuelve la ecuación de

balance de densidad espectral. Para la modelación se utiliza como datos de entrada espectros de oleaje producidos por un modelo retrospectivo o tipo *hindcast*. Finalmente, se realiza un análisis estadístico de los datos de salida del modelo para poder caracterizar el clima de oleaje en la costa del Océano Pacífico en la Patagonia norte de Chile.

## 1.2. Objetivo General

Estimar parámetros resumen de oleaje en la costa de la Patagonia Norte de Chile utilizando el modelo espectral de oleaje Wavewatch III.

## 1.3. Objetivos Específicos

1. Identificar información existente de parámetros resumen del oleaje en la Patagonia Norte chilena.
2. Implementar un modelo Wavewatch III de alta resolución (~2 km).
3. Generar estadística del clima de oleaje frente a la costa de Chiloé.

## 1.4. Metodología

Se realiza una recopilación de información cuantitativa y cualitativa de clima de oleaje en Chile, con énfasis en las costas de la Patagonia Norte. Utilizando un *hindcast* de oleaje entre 2009 y 2021 como condición de borde y la información batimétrica del dominio de estudio, se procede a implementar el modelo Wavewatch III, el cual genera y propaga espectros de oleaje direccional desde aguas profundas hacia la costa. Como resultado se obtienen series de tiempo cada una hora de los parámetros resumen del oleaje en todo el dominio de estudio con una resolución de 0,025°. Se extraen las series de tiempo de los puntos de interés, del nodo 13 del Atlas de Oleaje, Punta Guabún y las entradas del Canal de Chacao y Boca del Guafo, para analizar y comparar los

resultados con información existente. Por último, se estiman los parámetros resumen del oleaje reinante y extremo en la zona de estudio.

### **1.5. Principales resultados y conclusiones**

Los parámetros resumen del oleaje del nodo 13 del Atlas de Oleaje y los resultados obtenidos con el nuevo modelo indican que la calidad del modelo es buena en términos de la altura significativa, periodo peak y dirección peak. Por otro lado, en Punta Guabún se observa que las series de tiempo de altura de ola se encuentra desfasada, infiriendo que la resolución espacial del modelo induce a errores en la propagación de los espectros al acercarse a la costa o que el espectro de entrada tenga variaciones considerables a la realidad. Pese a eso, la comparación estadística entre los datos del ADCP de la estación Punta Guabún y los modelados en Wavewatch III indican una buena aproximación de los parámetros resumen del oleaje.

En el análisis espacial, al comparar gráficamente las series de tiempo entre nodos se concluye que la presencia de islas altera la dirección y la altura de olas, no así el periodo, y cerca de la costa la altura de ola disminuye producto de las condiciones de disipación de energía integrado en el modelo, como whitecapping. Del análisis temporal entre los nodos se deduce que el clima de oleaje no varía significativamente, por lo que los datos que provee el nodo 13 pueden ser útiles en algunos casos. Pese a esto, se concluye que realizar la simulación del espectro por la extensión de la zona de estudio es conveniente para investigaciones que requieran mayor precisión de los datos, debido a que la batimetría y la presencia de la isla Guafo, disipan la energía de maneras abruptas en ciertas zonas del dominio.

### **1.6. Organización del documento**

Este documento tiene cinco capítulos, el primer capítulo introduce el problema que motiva a la memoria y se plantea la solución. El segundo capítulo presenta la descripción y caracterización

del oleaje irregular, y el modelo adecuado que se debe aplicar para obtener las series de oleaje. En el tercer capítulo se describe la zona de estudio, el software para implementar el modelo espectral de oleaje, junto a esto, se ahonda en la metodología que utiliza el programa para resolver el balance de energía y posteriormente, se detallan las consideraciones de la modelación. En el capítulo 4 se presentan los resultados de la modelación, y se realiza un análisis de oleaje reinante y extremo. Por último, en el quinto capítulo se entregan conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada.

## 2. OLEAJE Y SU PROPAGACIÓN

### 2.1. Introducción

El objetivo del capítulo es exponer los antecedentes teóricos de la generación y propagación del oleaje, incluyendo los parámetros que describen oleaje irregular, el estado del arte y el modelo numérico a implementar. Por último, se describe el modelo Wavewatch III utilizado para modelar el oleaje en la zona de estudio.

### 2.2. Generación y propagación de oleaje irregular

El oleaje corresponde a movimientos ondulatorios en la superficie de un cuerpo de agua producidos por una fuerza perturbadora, como la interacción energética aire-agua, terremotos, mareas, desprendimientos de glaciares, explosiones y derrumbes, entre otros. El oleaje generado por viento en el océano es producido por las diferencias de presión atmosférica que ocurren durante grandes tormentas, se crea una perturbación entre en la interfaz aire-agua, como se representa en la Figura 2.1. Luego de este proceso de agitación de la superficie libre del agua, las olas se propagan alejándose de la zona de generación de forma irregular y no uniforme.

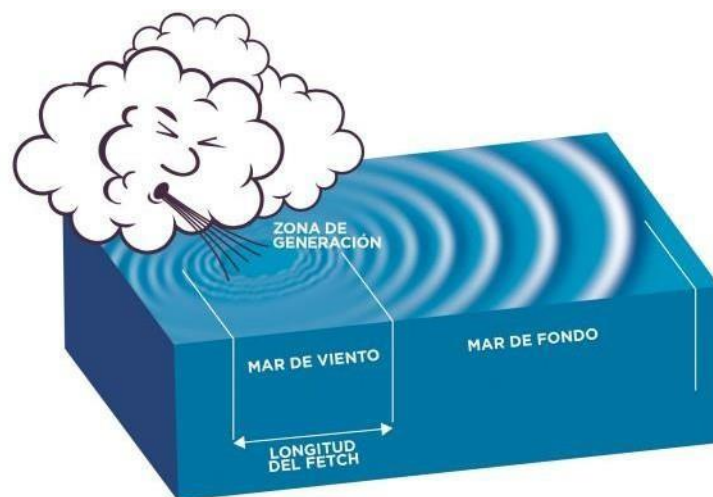


Figura 2.1: Esquemática del proceso de generación de oleaje por viento (Beyá et al., 2016)



El conjunto de olas marinas o trenes de olas no regulares se denomina oleaje irregular, y se distinguen dos tipos: el mar de viento y mar de fondo. El mar de viento corresponde a oleaje local producto de la meteorología de la zona con periodos entre 1 a 10 segundos, y el mar de fondo o de generación lejana con periodos sobre los 10 segundos hasta los 30 segundos. La Figura 2.2 muestra la distribución de la energía de las olas superficiales en el océano. El oleaje ordinario generado por viento es restaurado por la gravedad y se encuentra entre los 1 a 30 segundos de periodo. Se observa que las olas de mayor energía corresponden a oleaje de entre los 10 segundos y 5 minutos de periodo.

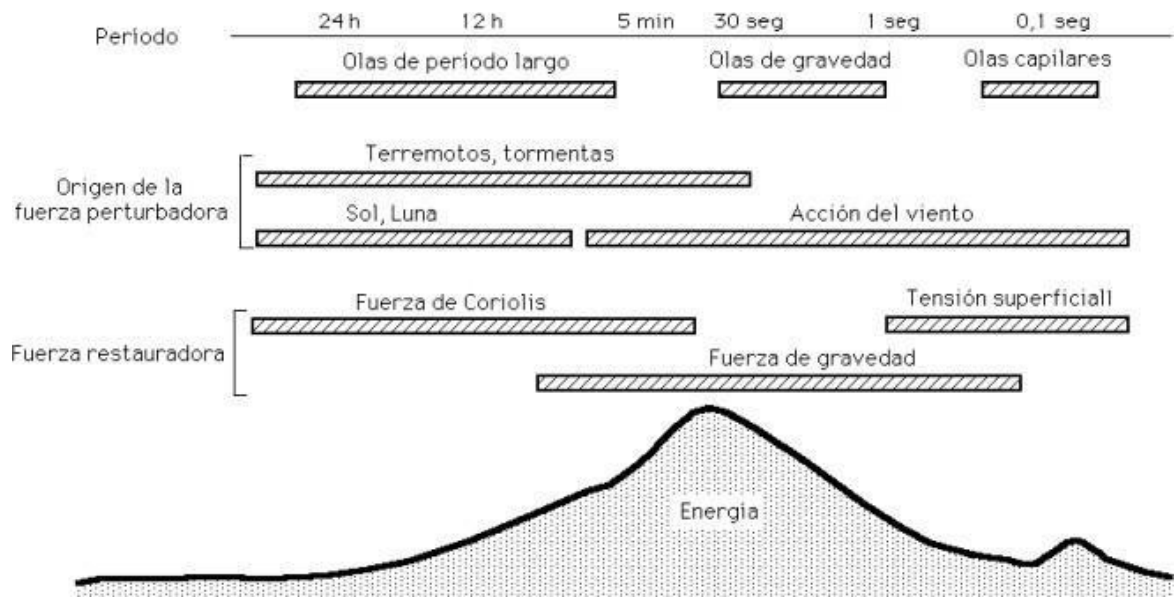


Figura 2.2: Representación esquemática de los tipos de olas en la superficie del océano y la energía que transportan (Winckler, 2020)

La propagación del oleaje es dependiente de la profundidad del agua, de la batimetría y de los obstáculos naturales como islas, de las corrientes marinas, de la interacción con olas de otras direcciones, el clima de viento local y obstáculos antrópicos como infraestructuras costeras, náuticas y oceánicas. Todos estos factores contribuyen a los procesos de disipación de energía, refracción, difracción y asomeramiento de las olas.

### 2.3. Descripción estadística de oleaje irregular

Por convención, las ondas regulares se describen matemáticamente en una dirección (1D), tal como se aprecia en la Figura 2.3. Las olas se presentan como una senoide que modela la superficie libre en función del espacio y el tiempo. La superficie libre  $\eta(x, t)$  es una representación de una ola regular, la cual tiene amplitud  $a$ , altura  $H$ , longitud  $L$ , periodo  $T$ , velocidad de propagación o celeridad  $C$ , frecuencia  $f$ , y número de onda  $k$ , y se propaga sobre una profundidad  $d$ .

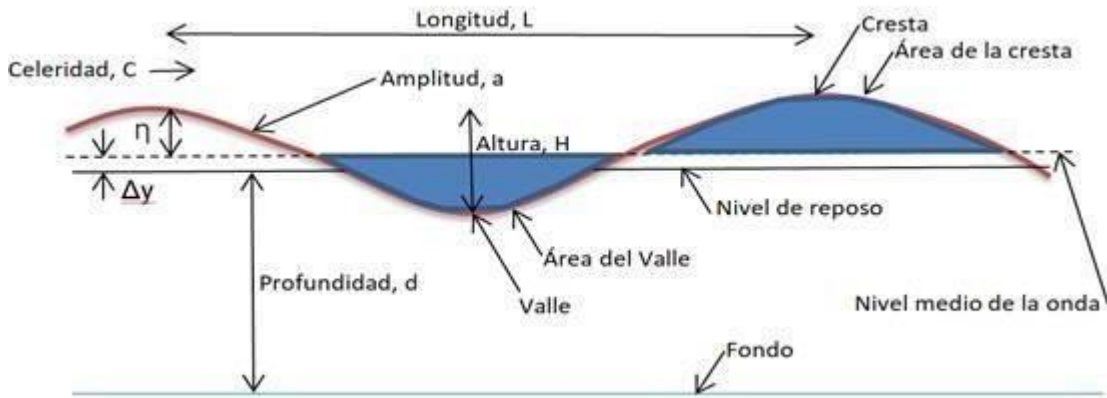


Figura 2.3: Diagrama con características y términos que intervienen en una ola.

La teoría lineal del oleaje define el movimiento oscilatorio de la superficie libre como:

$$\eta(x, t) = \text{acos}(kx - \omega t) \tag{1}$$

Donde  $\omega$  representa a la frecuencia angular ( $\omega = 2\pi/T$ ). A partir de la teoría lineal se desprende la relación de dispersión:

$$\omega^2 = kg \tanh(kH) \tag{2}$$

La cual relaciona el periodo (o frecuencia angular) con la longitud de la onda (o número de onda  $k$ ). Donde ( $k = 2\pi/L$ ),  $H$  la profundidad del medio y  $g$  la aceleración de gravedad.

En el océano, el oleaje se comporta como la suma de ondas sinusoidales de distinta altura, longitud, periodo y dirección de propagación. Esta suma de olas individuales se denomina oleaje irregular. Por esta razón, se recurre a métodos estadísticos para el cálculo de los parámetros resumen del oleaje con los cuales se describe un estado de mar. Un estado de mar se entiende como un intervalo de tiempo en el que existe un equilibrio entre las fuerzas generadoras y restauradoras, produciéndose un comportamiento estacionario del oleaje. Comúnmente es un periodo de tiempo entre 1 y 3 horas tal que los parámetros estadísticos del oleaje sean constantes.

La Figura 2.4 muestra el registro gráfico del movimiento oscilatorio de la superficie del mar (u oleaje) medido por una boya. Se aprecia que visualmente es complejo identificar las olas individuales debido a que son irregulares, pese a eso, utilizando el método *zero-upcrossing* se concluye que en 150 segundos hay 21 olas individuales.

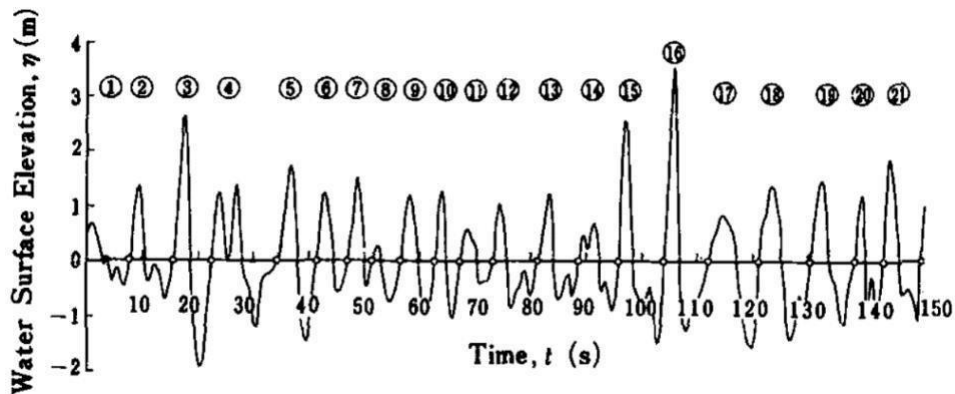


Figura 2.4: Ejemplo de registro de onda (Goda, 1982)

Los parámetros estadísticos resumen que describen un registro estacionario de oleaje irregular o un estado de mar son la altura significativa  $H_s$ , el periodo peak  $T_p$ , la dirección peak  $D_p$ , la dirección media  $D_m$ , frecuencia peak  $f_p$  y el espectro de energía  $E$ , siendo este último una representación completa del estado de mar. El espectro de energía oleaje se obtiene al descomponer el campo de oleaje en las diferentes frecuencias y direcciones usando comúnmente la transformada de Fourier, de esta forma el espectro representa la energía de las olas y su distribución en función de su frecuencia (o periodo) y dirección o en ambas. La energía de las olas está relacionada con el cuadrado de su altura. La Tabla 2.1 muestra los estadísticos que caracterizan un estado mar y su descripción.

Tabla 2.1: Parámetros resumen del oleaje irregular

Nombre	Símbolo	Unidad	Descripción
Altura significativa	$H_s$	m	Promedio del tercio superior de las alturas de olas de la serie.
Periodo peak	$T_p$	s	Periodo de oleaje con la energía más alta registrada.
Dirección peak	$D_p$	°	Ángulo que indica la dirección de la energía más alta.
Dirección media	$D_m$	°	Ángulo que indica la dirección de energía promedio.
Frecuencia peak	$f_p$	Hz	Frecuencia en la que se encuentra la energía más alta en el espectro de energía de olas.
Espectro de energía	$E(f, \theta)$	m <sup>2</sup> /Hz	Distribución de energía del oleaje por longitud de la onda en función de distintas frecuencias y direcciones.

## 2.4. Modelos numéricos de generación de oleaje

La hidrodinámica del oleaje es compleja de caracterizar y comúnmente se estudia mediante modelado físico o modelos matemático-numéricos. Los modelos numéricos son herramientas computacionales que resuelven ecuaciones gobernantes de la física de un fenómeno. Existen tres tipos de modelos numéricos de oleaje: los modelos espectrales de oleaje, que resuelven la ecuación de conservación de energía del oleaje, los modelos que resuelven la fase de la ola, basados en las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento en dos dimensiones, y los modelos tridimensionales tipo CFD que resuelven el comportamiento 3D del oleaje.

Para dominios de estudio de gran extensión espacial es común utilizar un modelo que promedie la fase o modelo espectral. Estos modelos permiten calcular la evolución en el tiempo y espacio de la energía del oleaje, en la medida que su evolución sea suave en el espacio (Winckler, 2020). En cada paso de tiempo se obtiene el espectro de energía del oleaje en cada punto del dominio de estudio utilizado para describir el estado de mar. Además, los modelos que promedian la fase permiten representar los fenómenos de asomeramiento, disipación y refracción del oleaje, pero no así la reflexión o el cálculo de la superficie libre, ya que no resuelven la fase de las olas.

A continuación, se muestran tres métodos empíricos, hidrológicamente independientes, que destacan por su fácil aplicación y que pueden predecir correctamente caudales con pocos datos.

## 2.5. Modelo espectral Wavewatch III

Es un modelo espectral de oleaje de tercera generación de código abierto que sirve para simular fenómenos de generación, propagación y disipación del oleaje. El modelo de oleaje fue desarrollado por el National Center for Environmental Prediction NCEP de Estados Unidos (Tolman, 2016). El modelo resuelve numéricamente la ecuación de balance de energía o el balance

de densidad espectral (Ecuación 3), calculando la evolución del espectro del oleaje en todo el espacio y el tiempo por medio de esquemas de diferencias finitas.

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta, x, y, t)}{\sigma} \quad (3)$$

$$N = E / \sigma \quad (4)$$

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{db} + S_{ln} + S_{bot} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{user} \quad (5)$$

Donde:

- $N(\sigma, \theta, x, y, t)$  es la acción de densidad espectral,  $c_{g,x}$  y  $c_{g,y}$  son las velocidades de grupo en el eje x y t, respectivamente. Y  $c_{\theta}$  y  $c_{\sigma}$  son las velocidades de propagación en el dominio de la frecuencia y la dirección ante la presencia de corrientes (en este caso no se incluyen corrientes).
- $E$  es el espectro de energía y  $\sigma$  es la frecuencia.
- $S$  es la forzante de la ecuación de balance energético, está compuesta la interacción atmósfera-ola  $S_{in}$ , interacciones de olas no lineales  $S_{nl}$ , interacción ola- océano controlada por el rompimiento del oleaje  $S_{ds}$ , termino extra de rompimiento para aguas someras  $S_{db}$ , crecimiento realista del oleaje como término no lineal  $S_{ln}$ , interacción fondo-ola  $S_{bot}$ , término fuente que representan la dispersión del oleaje producto de la batimetría  $S_{sc}$ , interacción hielo-ola  $S_{ice}$ , reflexión fuera de la costa o la inclusión de objetos que pudiesen representar fuentes de energía de ondas de infragravedad  $S_{ref}$ , y los términos definidos por el usuario  $S_{user}$ .

El modelo considera una propagación de ondas lineal y, además, que las propiedades del medio como del campo de olas, varían en escalas de espacio y tiempo mayores a las escalas de variación

de una sola ola (National Weather Service & National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009).

## **2.6. Oleaje en Chile**

La zona centro-sur de Chile es reconocida mundialmente como un sector de gran potencial de energía oleaje. El trabajo de Lucero et al. (2017) indica que la potencia de las olas aumenta de norte a sur en la costa del Océano Pacífico de Chile, afirmando la importancia de la variación espacial cuando se trabaja con zona de gran superficie.

En Chile, los registros medidos de olas son escasos e incluso nulos en muchas zonas del país. Debido a esto, se creó el Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016), el cual provee información sobre el clima de oleaje en distintos puntos de la costa de Chile llamados también nodos. En cada uno de esos nodos el Atlas entrega información de los parámetros resumen del oleaje para los climas extremo, promedio y operacional.

Los datos de oleaje utilizados en el Atlas de Oleaje se generaron con el modelo Wavewatch III v.4.18. Como datos de entrada se utilizó batimetría, máscara de obstrucciones, porcentaje de cobertura de hielo, y los campos de viento superficial a 10 m de altura obtenidos de la base de datos de re-análisis ERA-Interim. La malla de simulación del atlas de oleaje tiene una grilla de regular de resolución  $1^\circ \times 1^\circ$ , con un paso de tiempo computacional de 1 hora y datos salida a 3 horas, asegurando un estado de mar estacionario (Beyá et al., 2016). En la Figura 2.5 se muestra la malla y ubicación de los datos de entrada de la calibración del modelo.

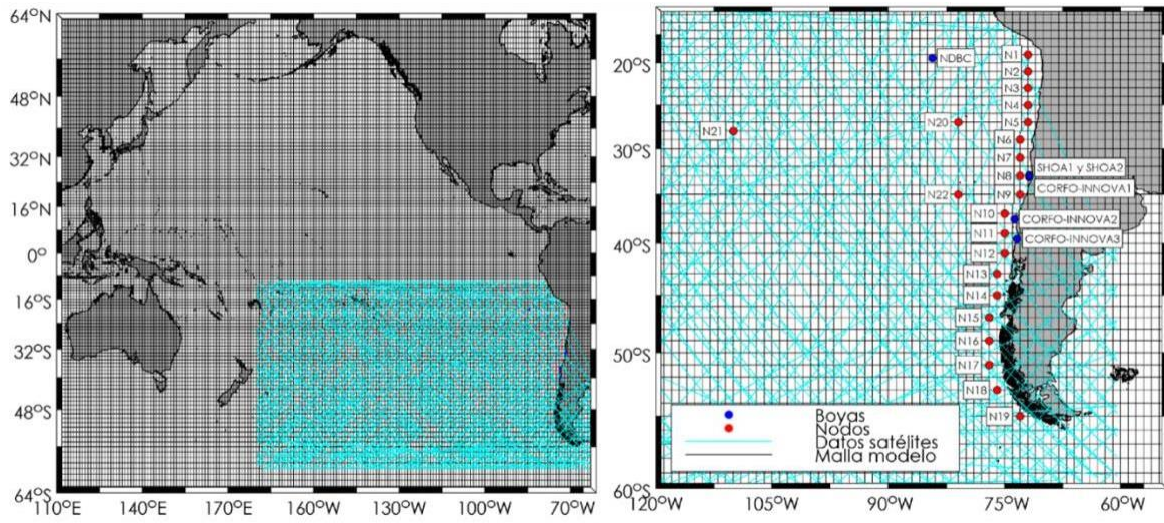


Figura 2.5: (Izq.) Malla con datos del modelo y satelitales y (Der). Ubicación de boyas y nodos usados en la calibración del modelo Wavewatch III. (Beyá et al., 2016)

El nodo 13 del Atlas de Oleaje es el punto en aguas profundas que representa a la zona de Chiloé, tiene coordenadas  $43^{\circ}\text{S}$ ,  $76^{\circ}\text{O}$ . El oleaje promedio en este punto se caracteriza por tener altura significativa de 3 m, periodo peak de 12.7 s, dirección peak de  $239^{\circ}$  y dirección media de  $247^{\circ}$  con respecto al norte verdadero.

Mediciones de oleaje en los fiordos de la Patagonia Norte obtenidas en 2009 develan que para el sector de Punta Guabún, ubicado en  $41^{\circ}\text{S}$   $72^{\circ}\text{O}$  cercano a la entrada del Canal de Chacao, el oleaje típico es de periodos largos entre 12-17 s, proviene del oeste y tiene alturas entre 1 y 2,5 m, que en algunos casos sobrepasa los 3 m (Letelier et al., 2011).

En la actualidad, se obtienen datos con modelos numéricos al simular los espectros de energía en todo el espacio y el tiempo que se requiera. Es común utilizar base de datos retrospectivas globales de los estados de mar, las cuales son generadas por modelos numéricos y forzadas por vientos obtenidos de modelos atmosféricos, como el modelo espectral de oleaje Wavewatch III. Un estudio reciente sobre la mejora de los datos retrospectivos del modelo global de oleaje Wavewatch III utilizando machine learning (Lucero et al., 2023), indica que los espectros de energía disponibles



pueden contener errores en la dirección media de las olas para las costas de Chile, que podrían inducir a errores en los modelos numéricos locales de oleaje.

## **2.7. Conclusiones**

En este capítulo se presentaron los datos fundamentales para comprender el fenómeno del oleaje irregular en el océano y que la forma de describir los registros de olas es por medio de parámetros estadísticos como la altura significativa, la dirección peak y el periodo peak. Se concluye del estado del arte que en Chile es común utilizar modelos espectrales de oleaje para obtener datos de oleaje, investigaciones como las de Lucero et al. (2017) y Beyá et al. (2016) confirman que Wavewatch III es un modelo apropiado para simular la generación y propagación del oleaje desde aguas profundas hacia la costa, no obstante, los datos espectrales retrospectivos generados por el modelo global tienen variaciones direccionales significativas ( $20^\circ$ ) que han sido corregidas con machine learning.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Introducción

En el presente capítulo se describe brevemente la zona de estudio y el funcionamiento matemático del modelo Wavewatch III. Se detalla la configuración para la modelación, incluyendo los datos requeridos como condiciones de borde, batimetría, características del mallado y pasos de tiempo. Se muestra el procedimiento para validar el modelo frente a las costas de la Patagonia Norte y finalmente, se estiman los parámetros del clima de oleaje en los nodos de interés para describir la superficie estudiada, tanto para clima medio como extremo.

#### 3.2. Zona de estudio

La Patagonia chilena es una zona que no tiene límites oficialmente definidos, pero se reconoce que se extiende latitudinalmente desde Puerto Montt hasta Cabo de Hornos y longitudinalmente desde la cordillera de los Andes hasta el océano Pacífico. Se considera, para motivos de esta investigación, que la Patagonia Norte está entre Puerto Montt y el Golfo de Corcovado.

El área de estudio abarca 3° de latitud y 3° de longitud, lo que equivale una superficie de 333.4 km de largo por 333.4 km de ancho. En la Tabla 3.1 se presentan las coordenadas de la zona de estudio.

Tabla 3.1: Coordenadas de los vértices del área de estudio

<b>Descripción</b>	<b>Límite izquierdo</b>	<b>Límite derecho</b>
Límite superior	40.9°S 76.75°O	40.9°S 73.75°O
Límite inferior	43.9°S 76.75°O	43.9°S 73.75°O

En la Figura 3.1 se puede observar que la zona de estudio está expuesta hacia el océano Pacífico. Esta zona la plataforma continental bien amplia, desarrollada y con pendientes abruptas que forman cuencas sedimentarias y cañones submarinos que acaban en la fosa.

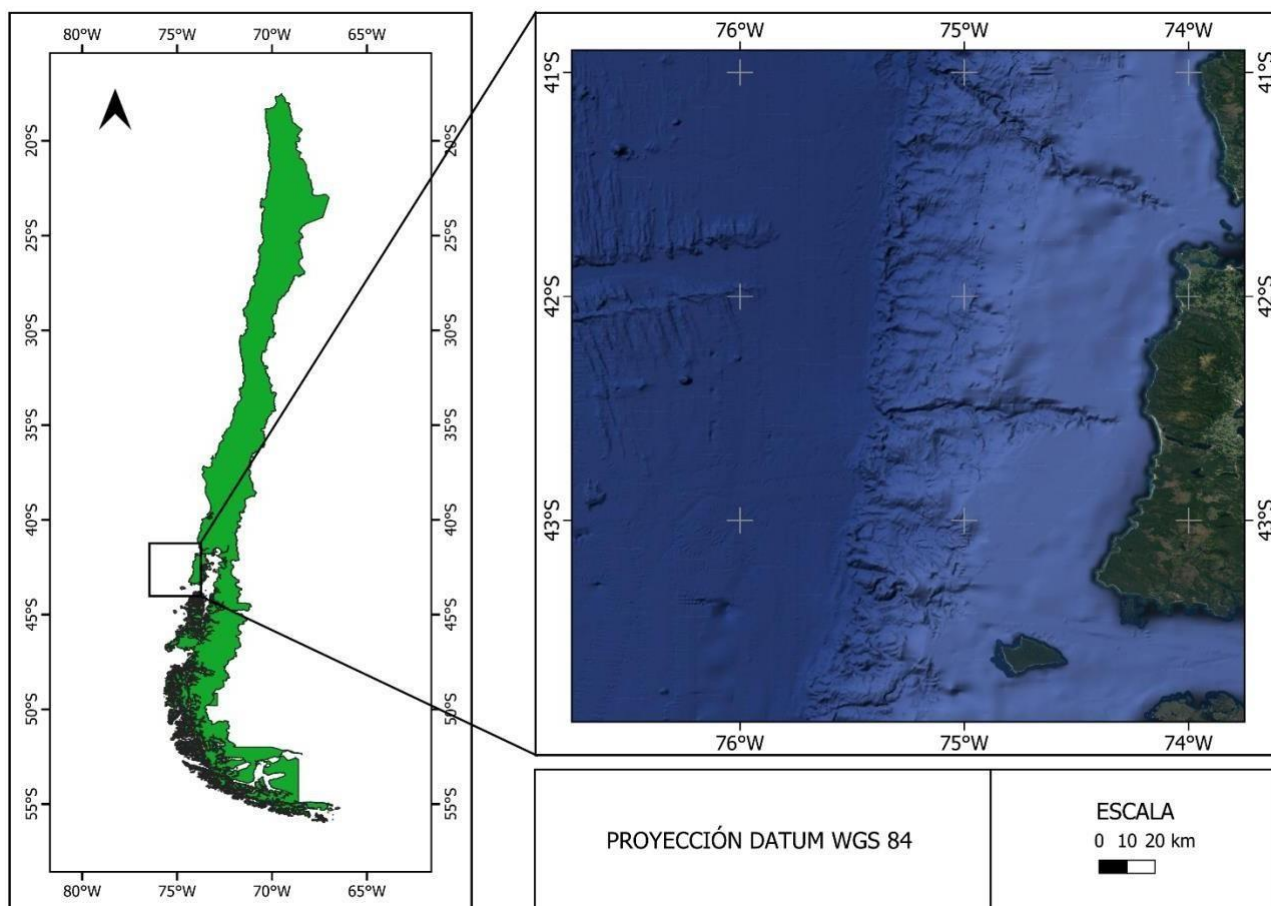


Figura 3.1: Zona de Estudio. Ubicación de Chile y Mar exterior de Chiloé.

### 3.3. Modelo Wavewatch III

El modelo numérico apropiado para este proyecto, por la extensión de la zona de estudio y los datos de entrada disponible es el modelo global de oleaje Wavewatch III. El modelo el que aplica por defecto el esquema de propagación Ultimate Quickest para resolver la ecuación de balance de densidad espectral en todo el espacio y el tiempo mostrada en la ecuación (3).

### 3.4. Configuración del modelo

A continuación, se presentan los archivos y pasos requeridos para implementar el modelo espectral de oleaje Wavewatch III. Se configuraron las especificaciones del mallado computacional y se utilizaron datos batimétricos y espectrales de oleaje del Pacífico Sur.

#### 3.4.1. Batimetría

The General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) proporciona datos procesados de batimetría para los océanos de manera gratuita (Beyá et al., 2016). Para la modelación se utiliza la grilla batimétrica Gebco (2014), un modelo global de terreno con intervalos de 30 segundos de arco, aproximadamente 900 metros. En la Figura 3.2 se observa la batimetría utilizada en el modelo, donde se observa que la grilla batimétrica tiene profundidades que van desde los 0 a 4000 metros.

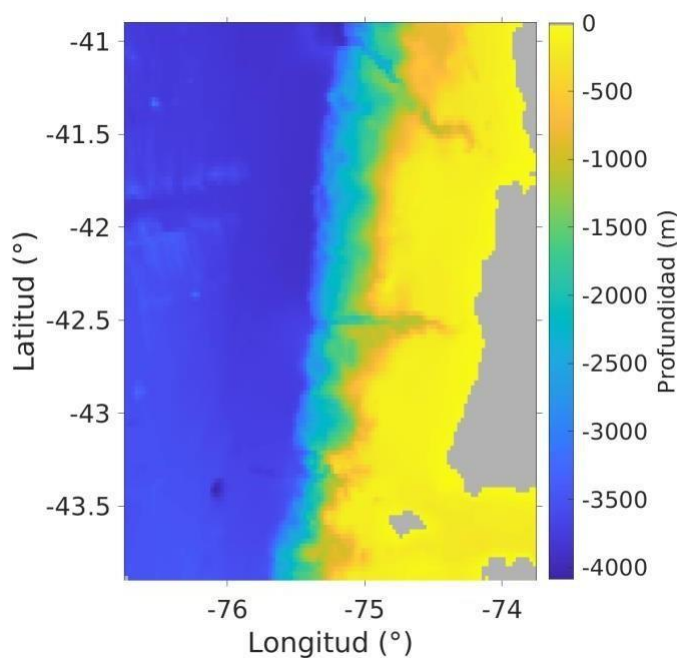


Figura 3.2: Información batimétrica GEBCO (2014) de la zona de estudio. El color plomo representa elevaciones sobre el nivel medio del mar.

### 3.4.2. Grilla Computacional

Al igual que la zona de estudio, la grilla computacional comprende las mismas dimensiones presentadas en la Tabla 3.1. El modelo ofrece diversas opciones de mallado, y se considera que una grilla estructurada y rectangular es suficiente para este trabajo. Se define una grilla computacional de resolución espacial  $0.025^\circ \times 0.025^\circ$  lo cual equivale aproximadamente a  $2.8 \times 2.8 \text{ km}^2$ . Las dimensiones de la grilla son  $121 \times 121$  celdas, equivalente a un total 14641 celdas. Se utiliza el sistema de coordenadas esféricas y los límites del mallado son  $76.65^\circ\text{O}$ ,  $73.65^\circ\text{O}$ ,  $43.9^\circ\text{S}$  y  $40.9^\circ\text{S}$ . En el subcapítulo 3.4.5 se especifica el paso de tiempo CFL.

### 3.4.3. Condición inicial

La condición inicial del modelo es el reposo. El modelo se reinicia mes a mes, utilizando como condición inicial el último paso de tiempo del mes anterior. Luego, las series de tiempo obtenidas son continuas.

### 3.4.4. Condición de borde

Se utiliza en este trabajo datos de oleaje retrospectivos (o *hindcast*) generados por un modelo global de oleaje previamente disponible. Este modelo entrega espectros de oleaje que pueden ser propagados hacia la zona de estudio. El modelo global de oleaje Wavewatch III fue definido utilizando parametrizaciones de los términos fuente propuestas por Alday et al., (2021), el cual incluye forzantes de los vientos ERA5, la máscara de hielo SSMI, las corrientes CMEMS-GLOBCURRENT y máscara de icebergs ALTIBERG (Hanson et al., 2009).

El *hindcast* de oleaje es obtenido del Laboratory of Ocean Physics and Satellite remote sensing (LOPS) de IFREMER y la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA). Los resultados globales tienen una cobertura temporal desde 1993 hasta 2021 y entregan

parámetros resumen de oleaje y espectros direccionales cada 1 hora. La cuadrícula espectral global tiene una resolución de 0.5 grados.

Para su uso se genera una lista con nodos del modelo global más cercanos al borde de la grilla computacional local. En este caso de estudio se utilizaron un total de 24 nodos del modelo global. Para ello se obtuvieron series de tiempo de los espectros direccionales en esos puntos desde la base de datos retrospectivos globales. Luego, en cada paso de tiempo el modelo Wavewatch III interpola la información espectral de oleaje en el borde de la malla para ser propagados hacia dentro del dominio. En la Figura 3.3 se aprecian las ubicaciones de los nodos del modelo global utilizados para generar las condiciones de borde del modelo.

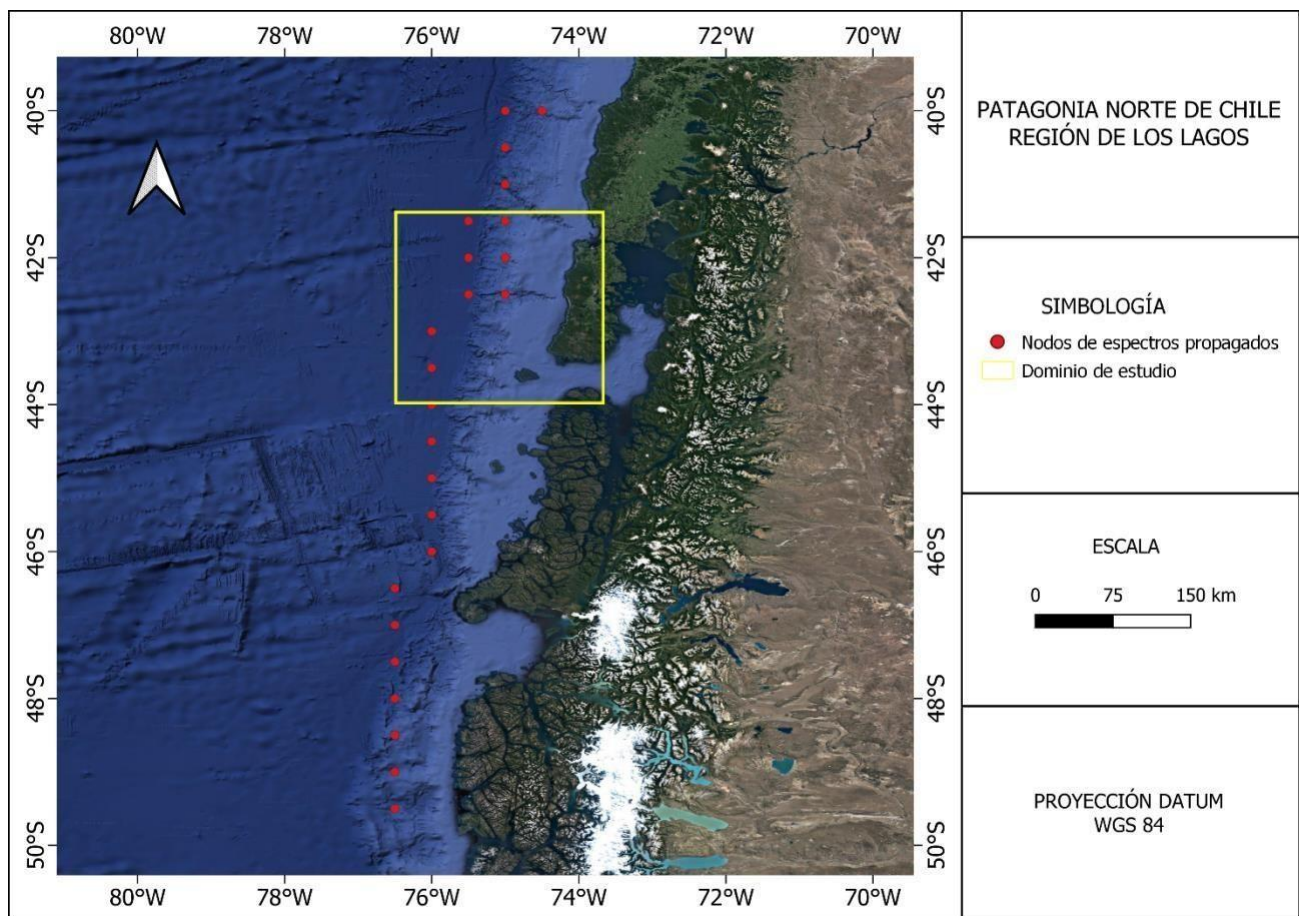


Figura 3.3: Mapa de ubicación de los espectros obtenidos del modelo global utilizados como condición de borde.

### 3.4.5. Pasos de tiempo

Dentro del modelo se definen tres pasos de tiempo: a) el de resolución global del modelo, b) el paso de tiempo para los procesos advectivos en espacio y frecuencia, y c) el paso de tiempo para resolver los términos fuente, los cuales se definieron iguales a 600 s, 25 s y 1 s respectivamente. La condición de estabilidad del modelo se evalúa utilizando la condición Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) está dada por:

$$(Cg + u) \cdot \Delta t < \Delta x \quad (2)$$

Donde  $Cg$  es la velocidad de grupo,  $u$  la velocidad de la corriente,  $\Delta t$  el paso de tiempo para los procesos advectivos (de 25 s), y  $\Delta x$  el tamaño de celda.

Finalmente, los resultados del modelo se escriben cada 3600 s.

## 3.5. Validación del modelo

El modelo global Wavewatch III ha sido previamente validado con datos de oleaje y con resultados de otros modelos globales, mostrando un mejor rendimiento en la reconstrucción del oleaje (Hanson et al., 2009).

Para validar el modelo local de oleaje se compararán los resultados con la información disponible para el Nodo 13 (Chiloé) del Atlas de Oleaje y con datos medidos de oleaje en Punta Guabún en 2009 disponibles en Letelier et al (2011).

Se grafican las series de tiempo de los parámetros resumen y se comparan con los parámetros del oleaje que ya existen en la literatura. Se calcula la magnitud de la variación entre los datos, los histogramas de cada parámetro y se genera graficas de dispersión para la altura significativa. En la Tabla 3.2 se presenta descripción de los nodos de comparación.

Tabla 3.2: Descripción de los nodos de comparación

<b>Lugar</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Fecha</b>	<b>Fuente</b>
Nodo 13, Chiloé	43°S 76°O	3722.5	01/01/2010 31/12/2015	Atlas de Oleaje de Chile.
Punta Guabún	41.8°S 74.1°O	26.5	06/09/2009 04/10/2009	Variabilidad del viento, oleaje y corrientes en la región norte de los fiordos Patagónicos de Chile (Letelier et al., 2011)

### 3.6. Clima de oleaje en nuevos nodos de interés

A partir de la grilla computacional se seleccionan dos nodos de estudio para conocer el clima de oleaje. En la Tabla 3.3 se describen los nodos de estudio y la Figura 3.4 muestra la ubicación y la información de los nodos de interés, los cuales incluyen los nodos de estudio.

Tabla 3.3: Descripción de los nodos de estudio

<b>Lugar</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Celda dominio</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Fecha</b>
Entrada Canal de Chacao	41.6°S 74.3°O	(94,99)	429.5	01/01/2010 31/12/2021
Boca del Guafo	43.6°S 74.3°O	(13,99)	199.5	01/01/2010 31/12/2021



En cada uno de estos nodos se analizan los parámetros resumen del oleaje, se estima el oleaje reinante y se realiza el análisis de oleaje extremo utilizando la metodología POT (Peak Over Threshold) descrita en Goda (1982) y se calcula la altura significativa para periodos de retorno 2, 10, 20, 50 y 100 años realizando un ajuste de Distribución Weibull ( $k=2$ ) a los eventos extremos detectados sobre el POT.

Luego, para los nodos de estudio se crean mapas de altura y dirección del oleaje de fondo e histogramas bivariados de altura significativa, periodo peak, dirección peak y dirección media.

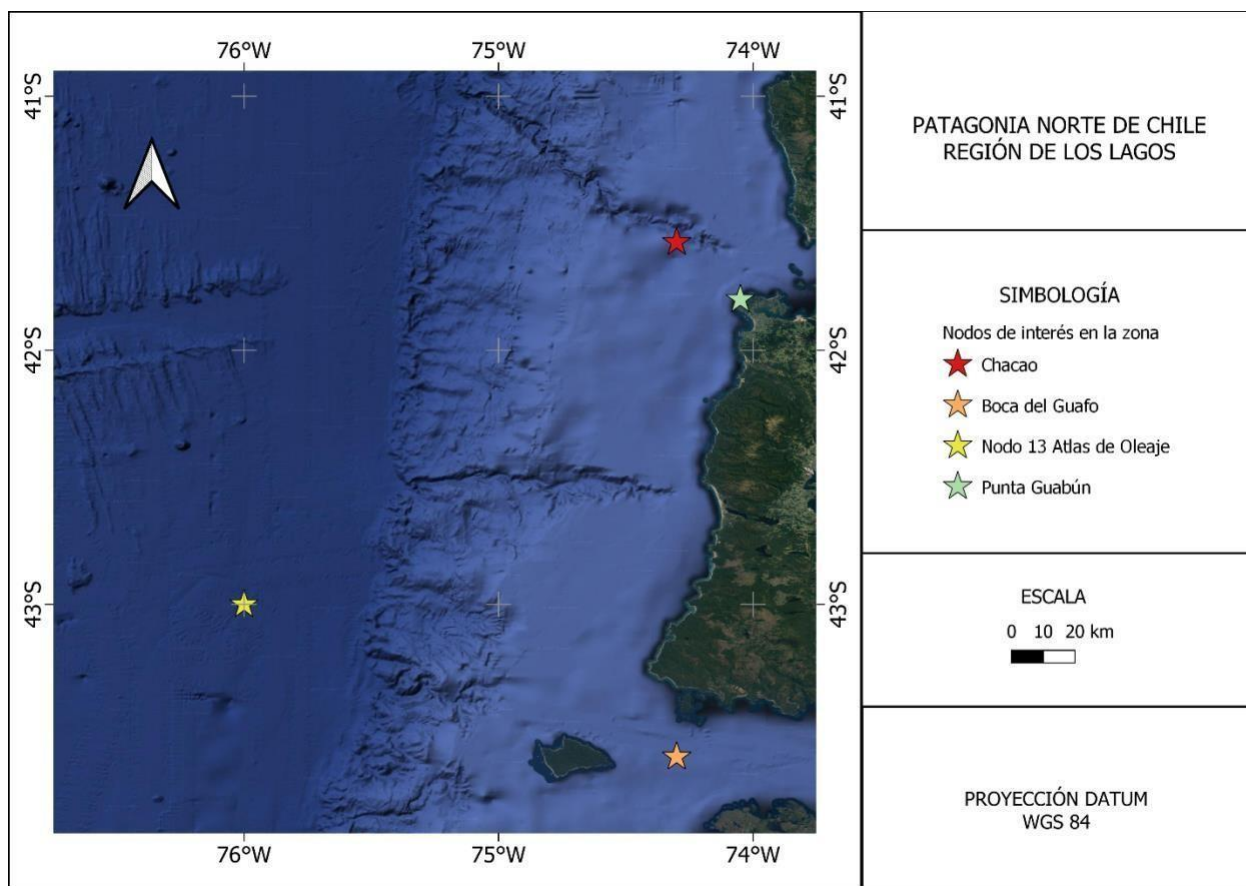


Figura 3.4: Mapa de ubicación de los nodos de interés

### **3.7. Conclusión**

En este capítulo se describió la zona de estudio, el modelo Wavewach III implementado y se explica la metodología para utilizar adecuadamente dicho modelo. Se presentan los datos de batimetría y espectros de oleaje utilizados como condición de borde, los pasos de tiempo y la configuración de la grilla. Se menciona también la información utilizada para validar el modelo y la ubicación de los nodos de interés sobre los cuales se analizará el clima medio y extremo en los nodos de estudio.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Introducción**

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos luego de realizar una modelación del tipo *hindcast* de 11 años en la costa del Océano Pacífico de la Patagonia Norte con el modelo espectral de oleaje Wavewatch III. Posteriormente se presenta el análisis de los parámetros estadísticos del oleaje obtenidos y se presenta el clima de oleaje medio y extremo de oleaje obtenido en la zona de estudio.

### **4.2. Resultados modelo**

Se realizaron simulaciones mensuales tipo *hindcast* entre el 1 de enero del 2010 al 31 de diciembre del 2021. Adicionalmente, se simuló septiembre y octubre de 2009 para validar el modelo con los datos de Punta Guabún. El resultado de cada modelación mensual es un archivo tipo NetCDF que contiene la evolución del espectro direccional de oleaje en todo el espacio de la malla y tiempo de simulación dado. Hay 13230 celdas que contienen datos de oleaje del mar de la Patagonia Norte de Chile.

### **4.3. Validación del modelo**

En las Figura 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan las series de tiempo obtenidas entre el 1 de enero del 2010 hasta 31 de diciembre del 2015 de la altura significativa, periodo peak y dirección peak en el Nodo 13, y se comparan con los mismos parámetros proporcionados por el Atlas de Oleaje.

De forma gráfica, se aprecia en la Figura 4.1 que los datos simulados siguen un patrón semejante a los datos del atlas, no obstante, en la Figura 4.2 se muestra claramente que existe subestimación para algunas tormentas a mediados de abril del 2014 y 2015, y en julio de 2015. Por otro lado, la

Figura 4.3 muestra que por lo general los periodos peak siguen un patrón similar y que sus valores van entre 11 y 15 segundos, sin embargo, es claro que existe sobrestimación en los mínimos y máximos. En cuanto a la dirección peak, se observa en la Figura 4.4 que en los meses de invierno y primavera los máximos son considerablemente subestimados mientras que las direcciones peak mínimas son sobrestimadas.

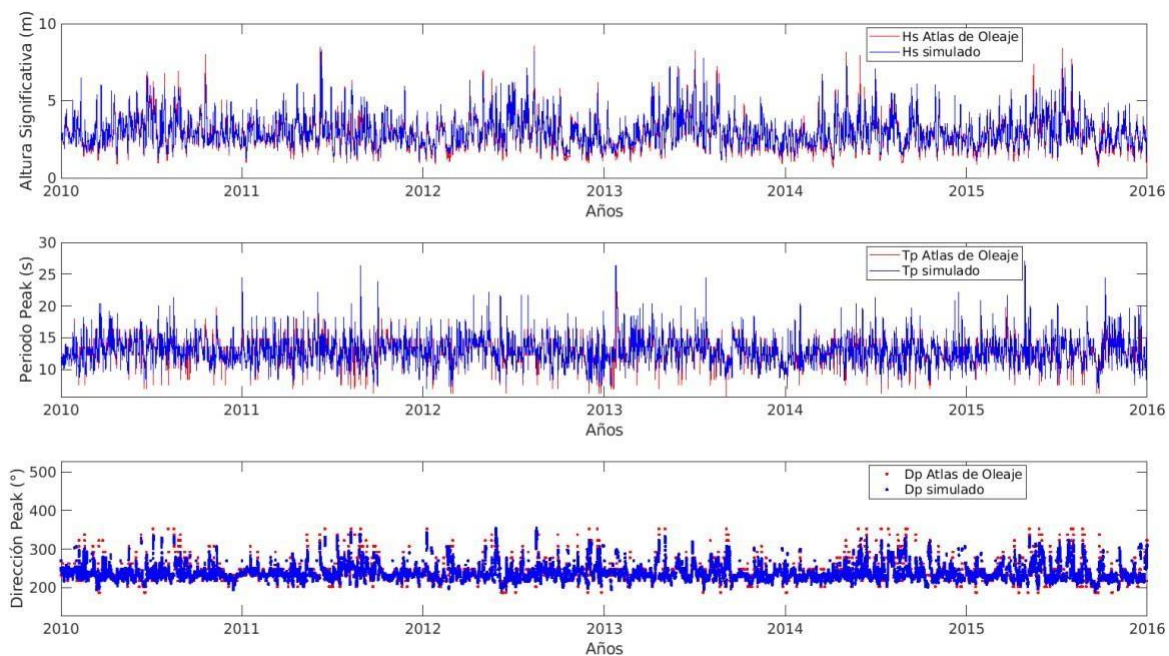


Figura 4.1: Comparación serie de tiempo de los parámetros del oleaje en el Nodo 13 del Atlas de Oleaje.

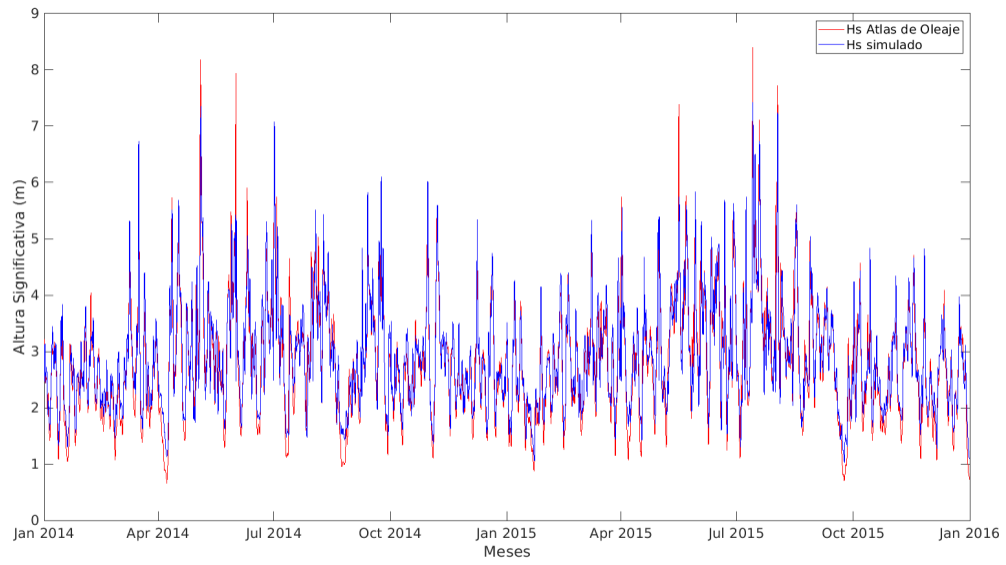


Figura 4.2: Comparación serie de altura significativa del del Atlas de Oleaje.

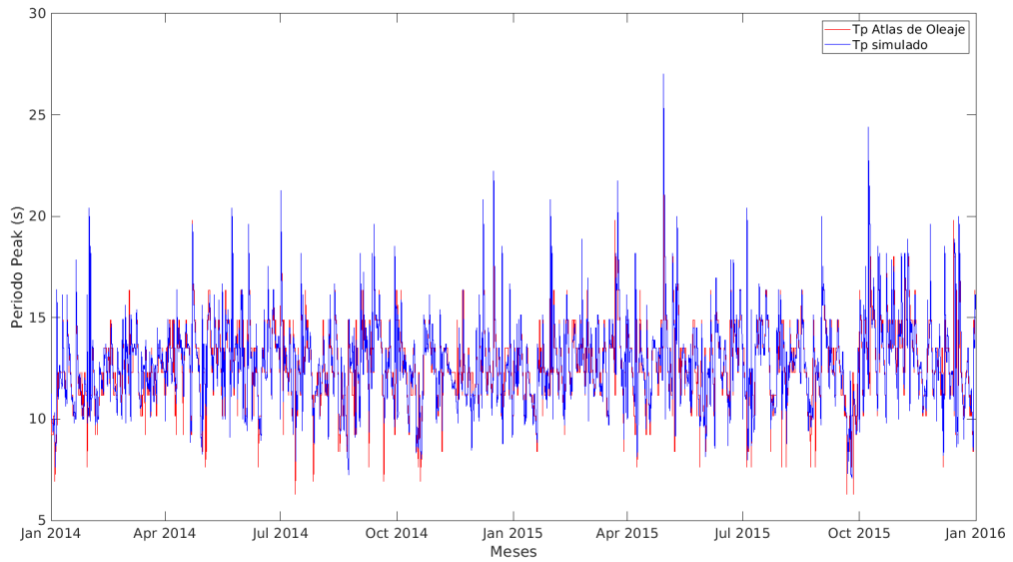


Figura 4.3: Comparación serie de periodo peak del Atlas de Oleaje

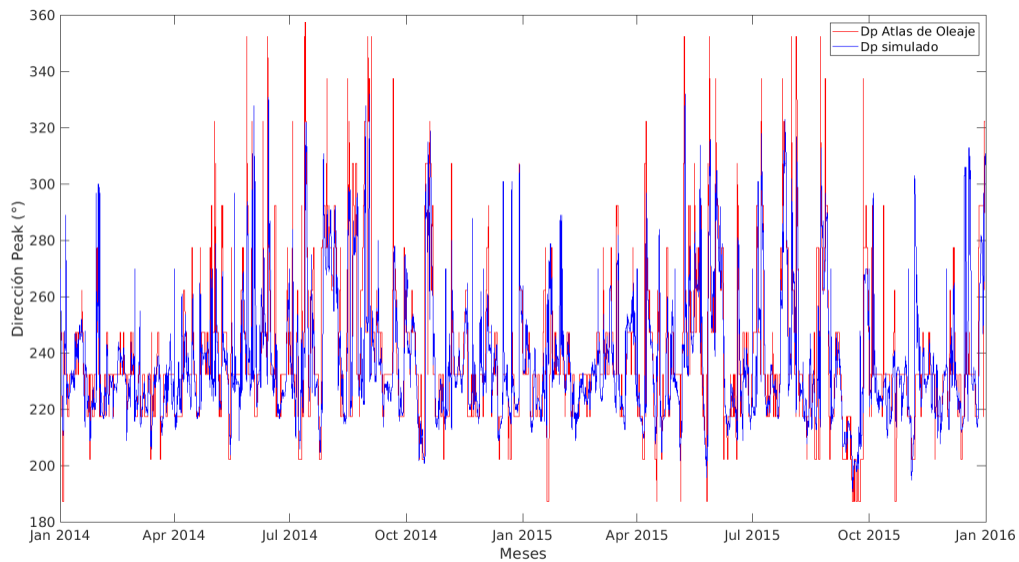


Figura 4.4: Comparación serie de dirección peak del Atlas de Oleaje

Las siguientes figuras muestran la comparación de los histogramas de distribución de frecuencias de la altura significativa, periodo peak, dirección peak y dirección media obtenidas en el punto Nodo 13.

Al generar los histogramas se notó que los espectros del del Atlas de oleaje están discretizados en 24 direcciones y 29 frecuencias, mientras que los en este trabajo se simularon espectros discretizados con 24 direcciones y 32 frecuencias. Se opta por agrupar los datos del atlas, en periodos de 1 segundo y direcciones peak en rangos de 20 grados para conseguir datos agregados.

En la Figura 4.5, tanto el histograma altura significativa simulada como el histograma de los datos del atlas de oleaje tiene la forma de campana. Se observa que entre los rangos 0.5 y 1.7 m hay subestimación de los datos simulados, de 1.8 a 3 metros sobrestimación de un 30% de los datos, de 3 a 3.5 metros una subestimación de 10% aproximadamente, después de los 4 metros se observa que siguen la misma distribución con una leve sobrestimación de los datos simulados. Además, cabe destacar que la moda de está entre 2.2 y 2.4 metros.

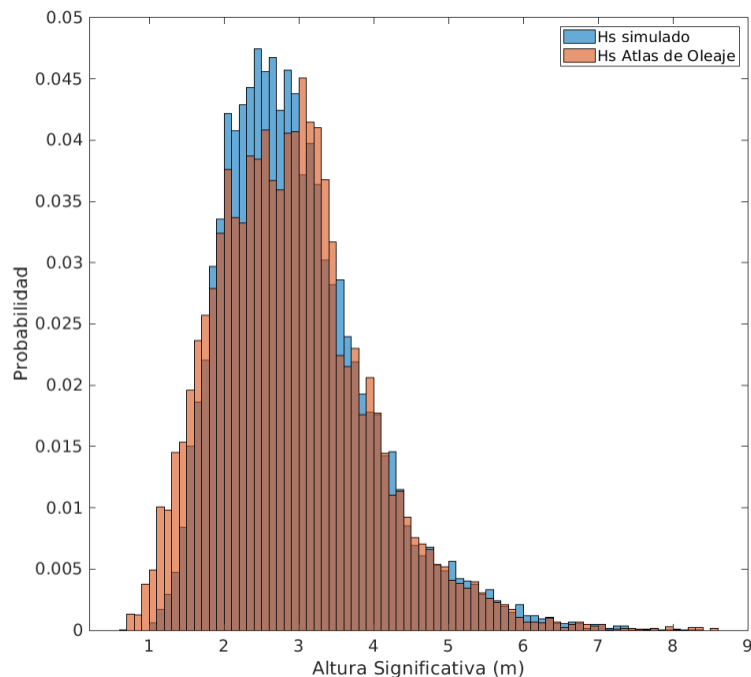


Figura 4.5: Histograma de alturas significativas espectrales (Hm0)

En relación con los histogramas de periodo peak y dirección peak, mostrados en las Figuras 4.6 y 4.7 respectivamente, se observa que las distribuciones son similares entre ambos modelos. Como se advierte previamente, los datos espectrales del atlas de oleaje están discretizados con una frecuencia distinta a los simulados en este trabajo, lo que explica las diferencias observadas por ejemplo en la banda de periodo entre 15 y 16 segundos.

Se observa que el 44% de los datos simulados de periodo peak están entre los rangos de 12-14 segundos, mientras que los del atlas lo supera levemente con 46%, además se tiene que, para periodos bajos existe una sobrestimación del 10%.

Para la dirección peak, ambos modelos indican que el oleaje de fondo proviene desde el suroeste. Las mayores diferencias se observan en el oleaje proveniente desde el suroeste-oeste y desde el sur-suroeste. El modelo local tiende a mostrar una mayor ocurrencia del oleaje desde suroeste-oeste y lo contrario para el sur-suroeste.

La moda de la dirección peak es  $232^\circ$ , mientras que la media observable pertenece al rango del suroeste entre  $220^\circ$  y  $240^\circ$  equivalente a un 40% de las direcciones peak. Se aprecia en la Figura 4.7 que las direcciones entre  $200-220^\circ$  están subestimadas 12% con respecto a los datos del nodo 13 del Atlas, y que entre  $220-240^\circ$  están subestimadas aproximadamente un 3%, entre  $240-260^\circ$  sobrestimadas 16%, y para direcciones superiores a  $260^\circ$  (que representan alrededor del 20% de los datos simulados) son levemente subestimados en menos del 10%, esto infiere que existe una gran variación en los datos de las direcciones peak que no están en el rango de la media.

La Figura 4.8 muestra la sobrestimación de la dirección media simulada en el rango de  $200^\circ$  a  $250^\circ$  y una sutil tendencia al aumento de datos de dirección entre los  $220^\circ$  y  $240^\circ$  mientras que en los datos del Nodo 13 una tendencia al aumento de datos entre  $245^\circ$  y  $280^\circ$ . Se calcula que la moda de los datos de dirección media simulada es  $241^\circ$ .

La Figura 4.9 muestra la dispersión de los datos de altura significativa, se observa que la distribución de los puntos está concentrada entre 1 y 4.5 metros, mientras que para alturas superiores a 5 metros hay mayor dispersión de los datos en relación con la línea de tendencia. Por lo general se tiene una buena correlación de los datos, corroborado por el coeficiente de determinación  $R^2$  con un valor de 0.89, indicando que los datos de altura significativa del Nodo 13 son semejantes a los simulados.



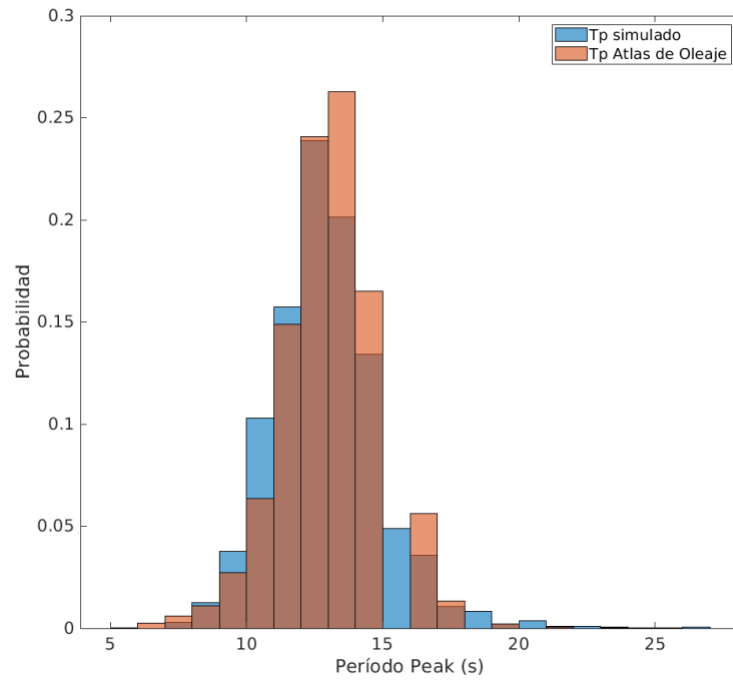


Figura 4.6: Histograma de periodos peak (Tp)

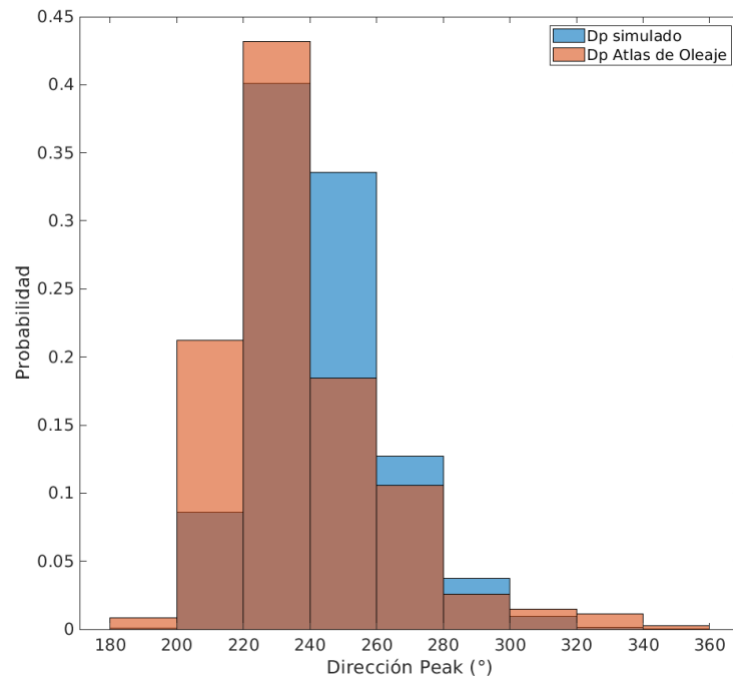


Figura 4.7: Histograma de direcciones peak (Dp)

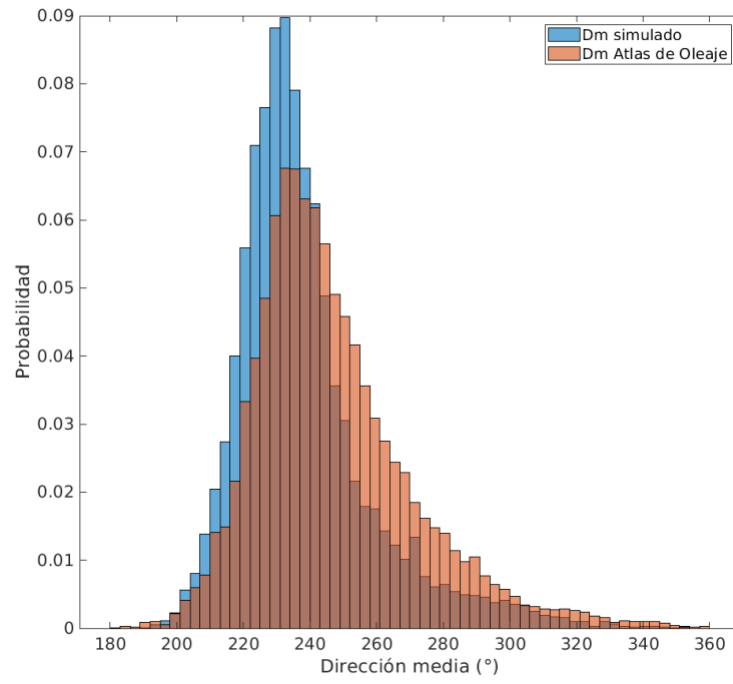


Figura 4.8: Histograma de Dm

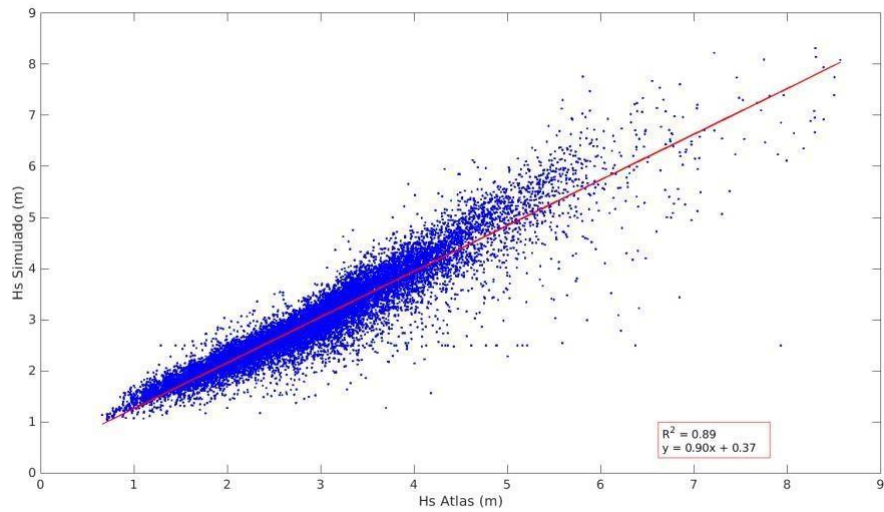


Figura 4.9: Dispersión de Hs/Hm0

La Figura 4.10 muestra la comparación de los datos de altura significativa de Punta Guabún entre el 6 de septiembre hasta el 4 de octubre del 2009. Se aprecia que los datos simulados siguen un patrón variable suave mientras que los datos medidos presentan picos más pronunciados, que se infieren como tormentas locales no representadas en el modelo espectral de oleaje por no incluir viento local. Además, cabe destacar que las series de tiempo están desfasadas, lo cual podría deberse a la alta resolución del modelo implementado y a la ubicación cercana a la costa del punto de medición, que podría no estar bien representada en el modelo.

Por otro lado, el histograma de la Figura 4.11 muestra que el 84% de los datos presentan un 29% de sobrestimación de los datos simulados en el rango de la media perteneciente a 1 y 2.5 metros, a su vez, en el mismo rango se concentra el 78% de los datos medidos en el 2009, se destaca que el 97% de las alturas calculadas se concentra entre 1 y 3.25 metros.

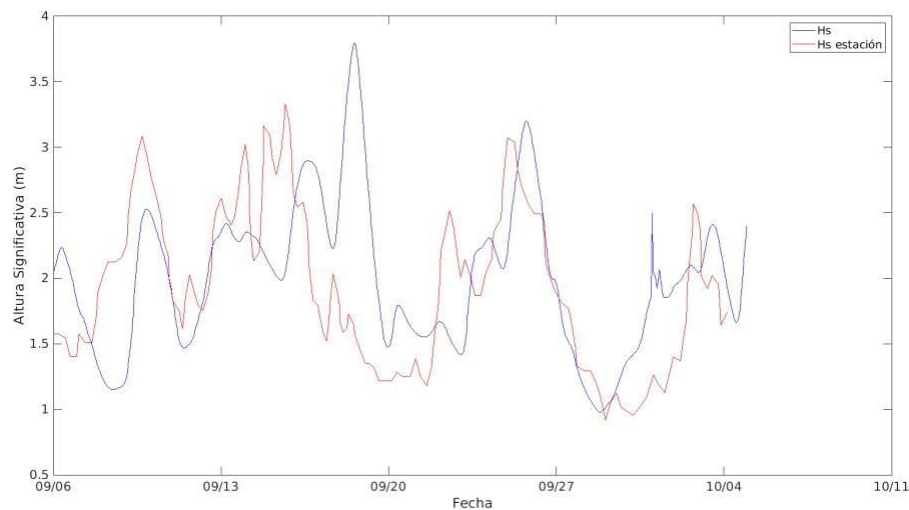


Figura 4.10: Comparación serie de tiempo Hs en Punta Guabún

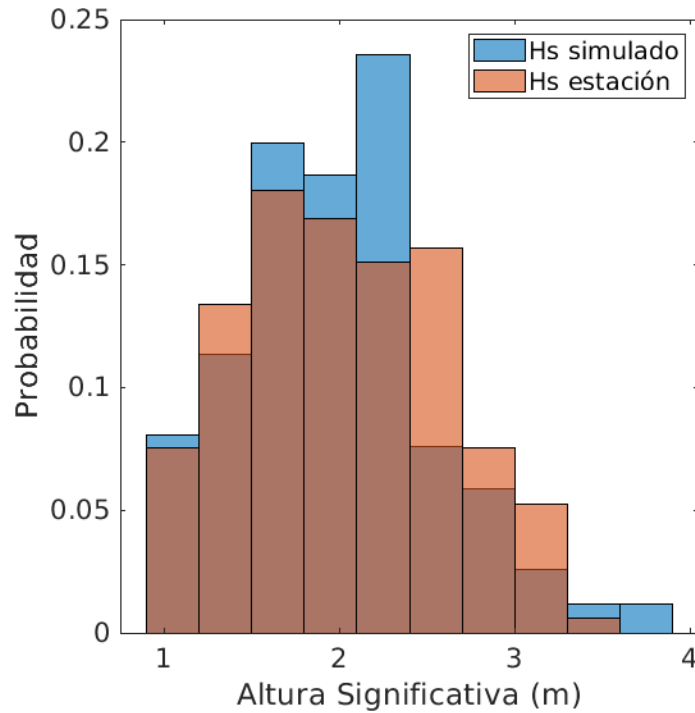


Figura 4.11: Histograma de Hs.

Por lo general, se ve claramente que no siguen una distribución en común y que la sobrestimación de las alturas se no extiende en rangos por sobre los 2.5 metros, ya que la subestimación de los datos de la estación Punta Guabún se concentra en los rangos 0.8-1.5 metros, 1.7-2.4 metros y 3.2-3.85 metros, indicando nuevamente que en los extremos el modelo no presenta resultados tan precisos.

En resumen, la Tabla 4.1 muestra que la media de los parámetros del Nodo 13 son lo suficientemente similares como para asumir una buena aproximación de los parámetros resumen, la media de la altura significativa rodea los 3 metros, el periodo peak es de 12.9 segundos, la dirección peak alrededor de los 243° y la dirección media 238°.

A su vez, para la zona de Guabún se tiene que los parámetros medios simulados entran en el rango descrito con altura significativa de 1.99 metros, periodo peak de 13.4 segundos y dirección peak

de 254°. Se aprecia que por lo general los parámetros simulados son similares a los encontrados en la literatura.

Tabla 4.1: Tabla comparativa de la media de los parámetros del oleaje en el Nodo 13 y Punta Guabún.

<b>Parámetro/Lugar</b>	<b>Nodo 13 (Simulado)</b>	<b>Nodo 13 (Atlas de Oleaje)</b>	<b>Guabún (Simulado)</b>	<b>Guabún (Estación Punta Guabún)</b>
Altura significativa (m)	2.97	2.91	1.99	1-2.5
Periodo peak (s)	12.90	12.89	13.45	12-17
Dirección peak (°)	243.21	243.19	254.61	~260
Dirección media (°)	238.48	237.69	252.40	-

#### 4.4. Clima medio del oleaje

La Figura 4.12 muestra la serie de tiempo de altura significativa, periodo peak y dirección peak de los 11 años simulados con el modelo Wavewatch III para el Nodo 13 entre el 1 de enero de 2010 y el 31 de diciembre de 2021, es decir, 6 años más que lo disponible en el Atlas de Oleaje.

Además, en las Tablas 4.2 y 4.3 que resumen de los parámetros promedio y máximos del oleaje en los nodos de interés. Se observa que por lo general el Nodo 13 presenta las mayores magnitudes de los parámetros, debido a que está en aguas profundas y no hay obstáculos que interfieran en la propagación del oleaje. Por otro lado, como Chacao y Guafo están en la misma longitud, al realizar la comparación es claro que la topo batimetría y la isla de Guafo son actores importantes en la disipación de la energía.

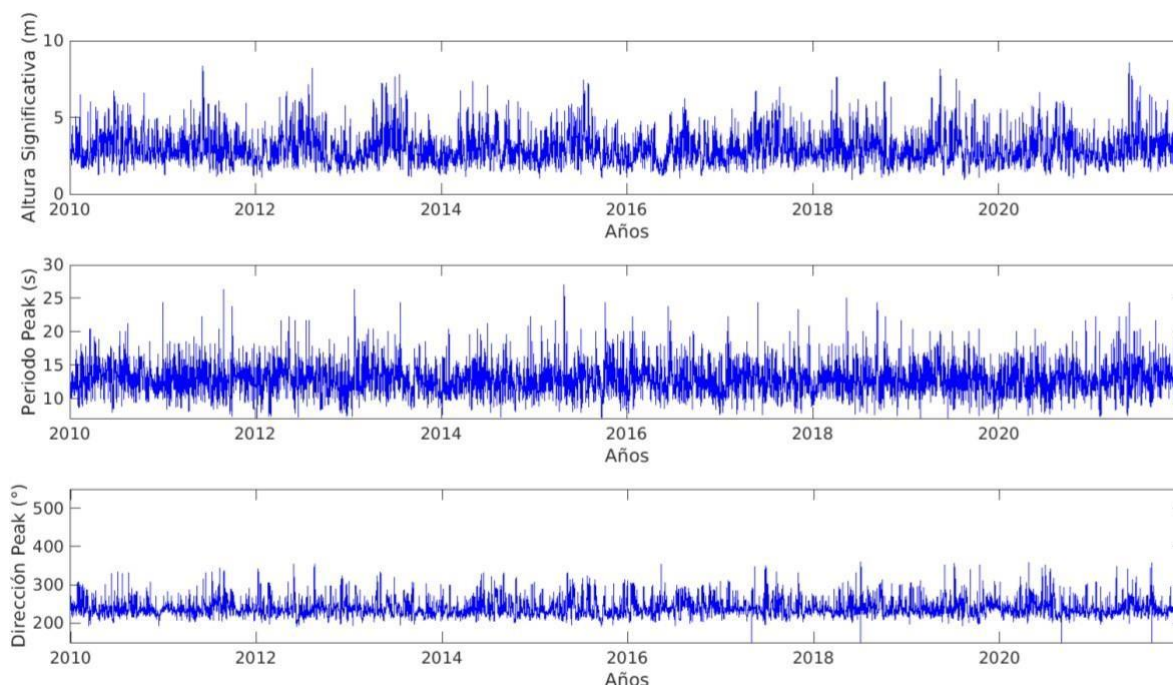


Figura 4.12: Serie de 11 años de los parámetros del oleaje en el Nodo 13.

Tabla 4.2: Tabla resumen Media de los parámetros del oleaje.

<b>Parámetro/Lugar</b>	<b>Atlas de Oleaje</b>	<b>Canal de Chacao</b>	<b>Boca del Guafo</b>
Altura significativa (m)	2.95	2.64	2.51
Periodo peak (s)	12.90	13.01	12.94
Dirección peak (°)	243.89	243.76	234.51
Dirección media (°)	238.49	237.89	231.72
Flujo de energía (kW/m)	12.85	10.22	9.41

Tabla 4.3: Tabla resumen Máximos de los parámetros del oleaje.

<b>Parámetro/Lugar</b>	<b>Atlas de Oleaje</b>	<b>Chacao</b>	<b>Boca del Guafo</b>
Altura significativa (m)	8.53	7.04	7.89
Periodo peak (s)	27.03	26.32	26.32
Dirección peak (°)	358.1	352.2	358.7
Dirección media (°)	360	358	329
Flujo de energía (kW/m)	117.59	84.92	111.29

Es notorio que en la Boca del Guafo, al estar protegido por la isla y estar a menor profundidad, tiene valores medios bajos en comparación con el Nodo 13 y Chacao, no obstante, llama la atención en la Tabla 4.3 que al aumentar la latitud (hacia el sur) la magnitud de los parámetros máximos aumenta, alcanzando niveles energéticos por sobre los 110 kW/m, indicando que el oleaje que provenga del suroeste producirá niveles energéticos, por lo general, mayores que el oleaje del oeste o noroeste.

En relación con los histogramas bivariados, se tiene que la moda de la frecuencia de observaciones de altura es entre 2.5 a 3.5 metros y de periodo 10 a 13 segundos.

En la Figura 4.13 se observa que la mayor concentración de observaciones para el Nodo 13 es 2.9 metros y 12 segundos, en la Figura 4.14 para Chacao se concentra en 3 metros y 11 segundos, y para Guafo en la Figura 4.15 la moda es aproximadamente 3.3 metros y 11.5 segundos.

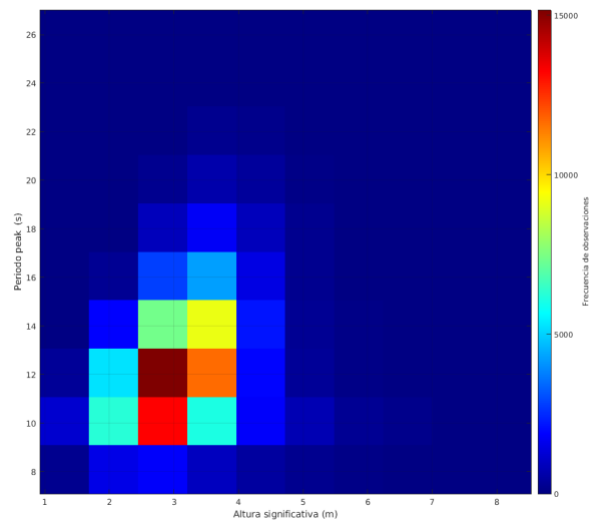


Figura 4.13: Histograma mosaico bivariado de la altura y periodo del Nodo 13.

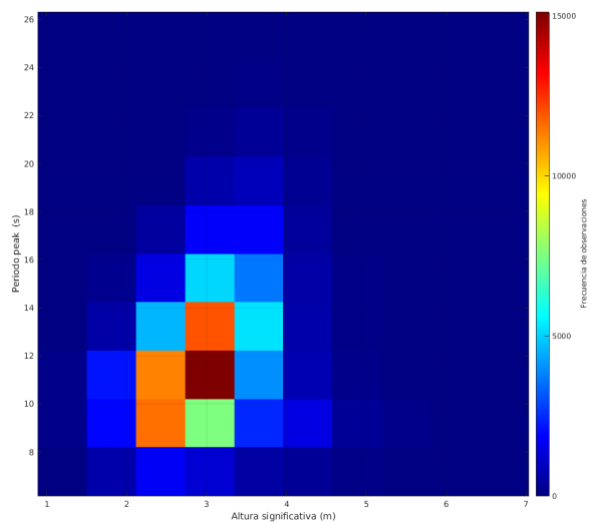


Figura 4.14: Histograma mosaico bivariado de la altura y periodo de Chacao.

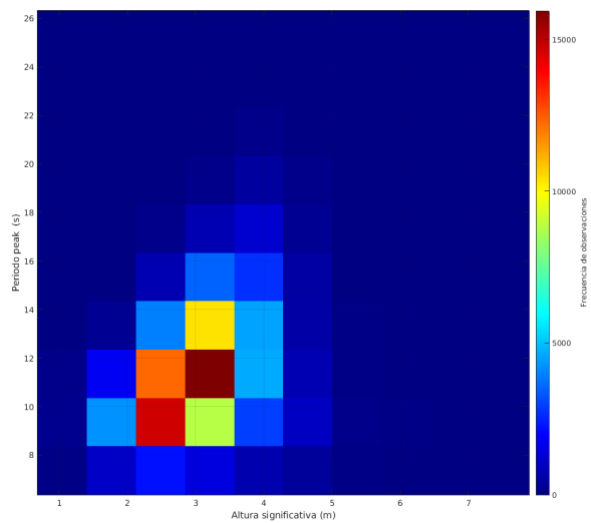


Figura 4.15: Histograma mosaico bivariado de la altura y periodo de la Boca del Guafo.

En los tres histogramas, los rangos de frecuencias observables se extienden en el periodo de 7 a 20 segundos y las alturas de ola entre 1 y 6 metros. Mientras más lejos se está de la tendencia, tiene menor probabilidad de ocurrencia.



#### **4.5. Propagación del oleaje en la Patagonia Norte**

En las Figuras 4.16 y 4.17 se muestran mapas de altura significativa y dirección de dos eventos de oleaje en el año 2021, el primero en otoño entre el 21 y 26 de mayo, y el segundo en invierno desde el 7 al 10 de julio. Se observa que para ambos eventos el oleaje de fondo proviene desde el suroeste y las mayores alturas de olas se producen desde el suroeste, sur y oeste.

En Chacao las olas normalmente se disipan antes de poder entrar al mar interior, no obstante, en el caso de la Boca del Guafo las olas si entran, pero con menor altura debido a las islas del sector, lo que dependerá también de la dirección en la que venga el tren de olas, ya que, si vienen del noroeste y sur, es probable que la energía no sea disipada tan abruptamente por la isla Guafo. De esta manera, queda en evidencia que la Isla Guafo, Punta Guabún y los islotes sur (Repollai) disminuyen la altura de la ola, modifican la dirección de propagación y por tanto la energía que trae la onda.

En las tormentas de otoño e invierno mostradas en los mapas, es clara la diferencia de altura de oleaje propagado. En otoño el evento alcanza alturas de 5.5 metros mientras que en invierno alrededor de 8 metros. Se observa la difracción del oleaje al rodear la isla Guafo y la disminución de la altura a medida que se acerca a la costa por la disipación de energía producto de las fuerzas restauradoras.

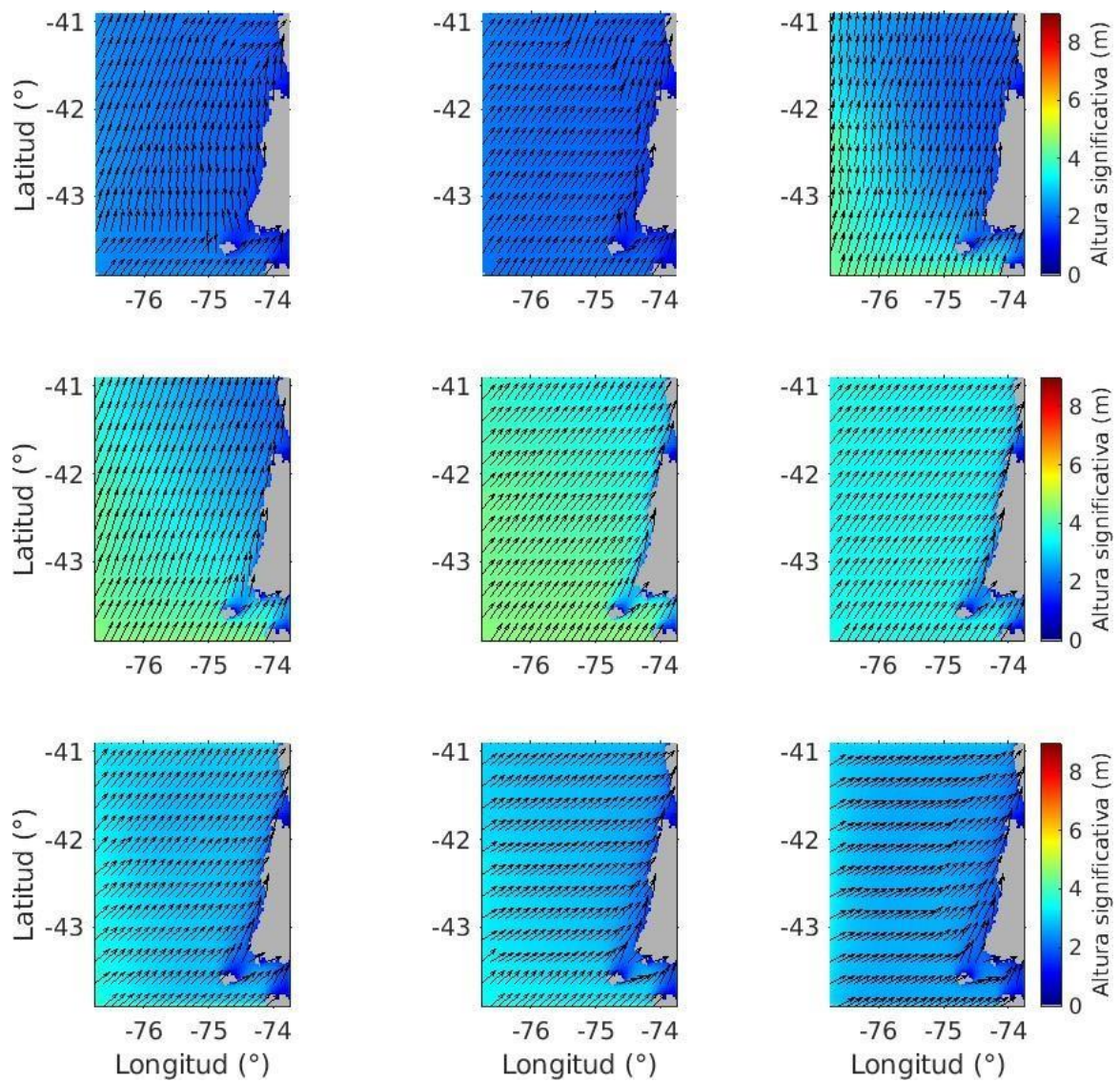


Figura 4.16: Progresión de tormenta de invierno.

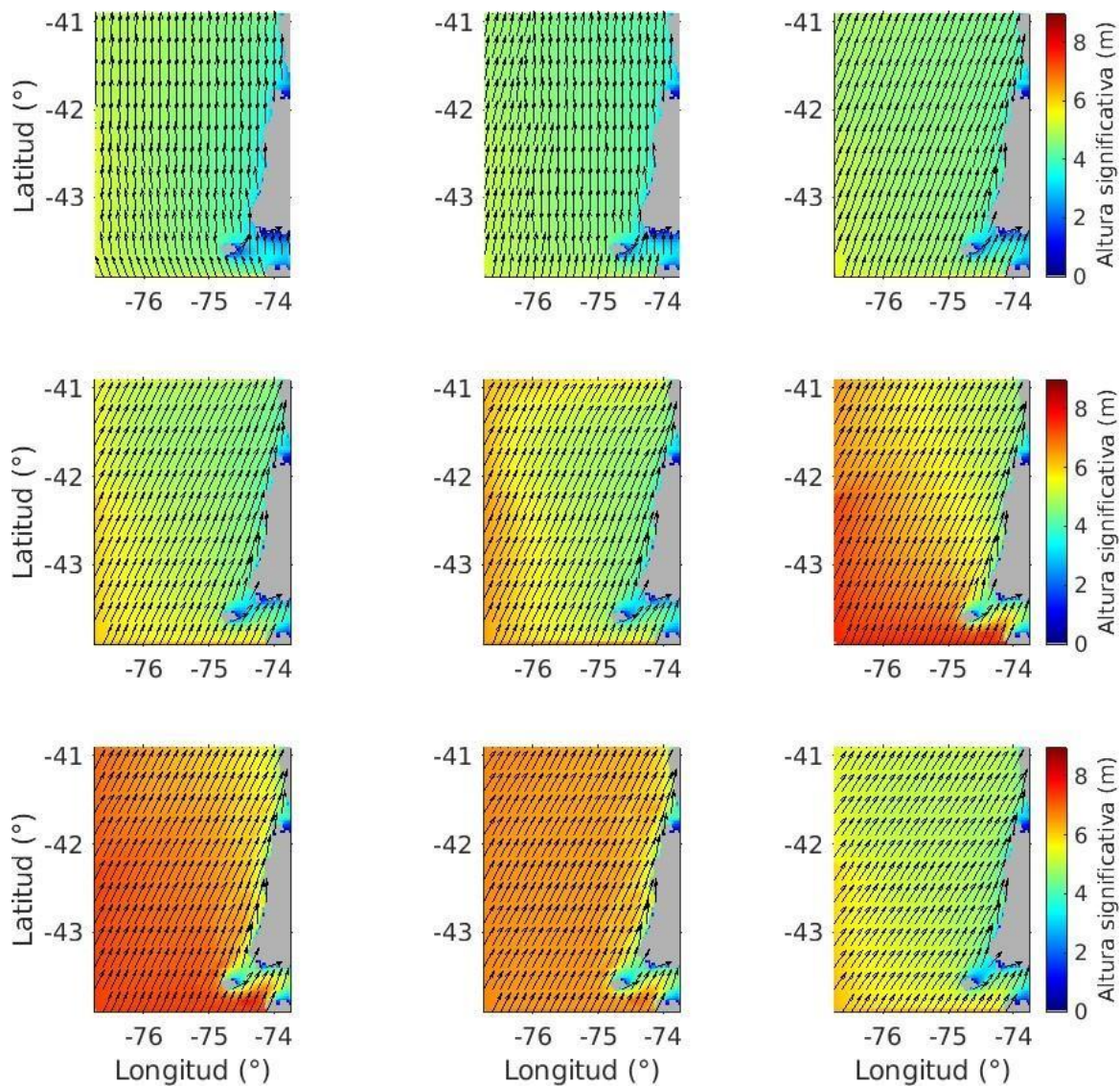


Figura 4.17: Progresión de tormenta de invierno.

#### 4.6. Clima extremo de oleaje

Por otro lado, se realiza un análisis extremo mediante el método de máximos sobre un umbral (POT), el cual se definió con en criterio 2-3 eventos extremos por año, con un total de más o menos 32 eventos en un periodo de 11 años, lo que fue complejo de cumplir debido a que no todos los años existen eventos energéticos que permitan cumplir el criterio.

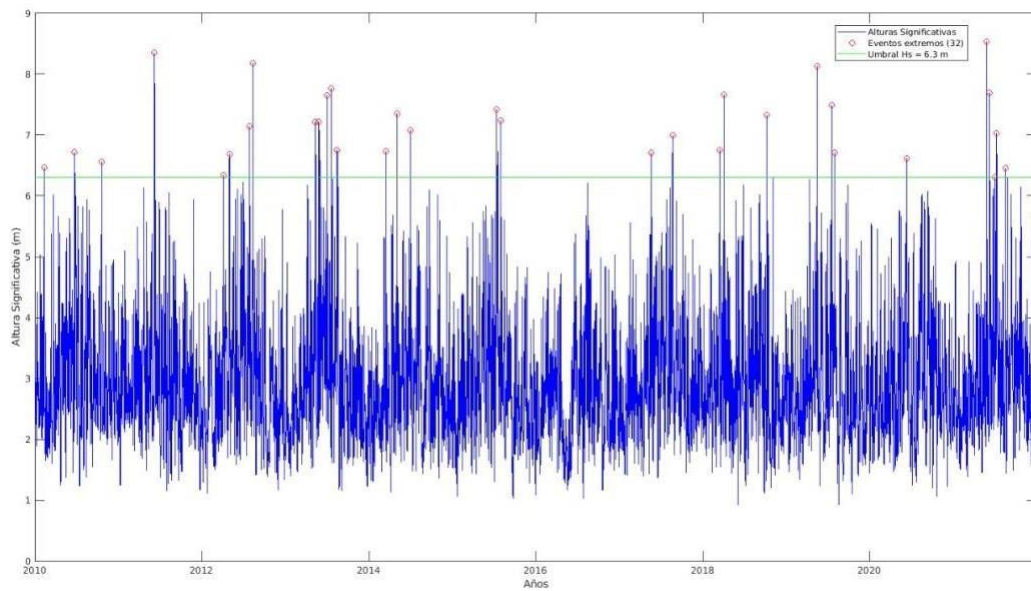


Figura 4.18: Análisis de máximos sobre el umbral Nodo 13.



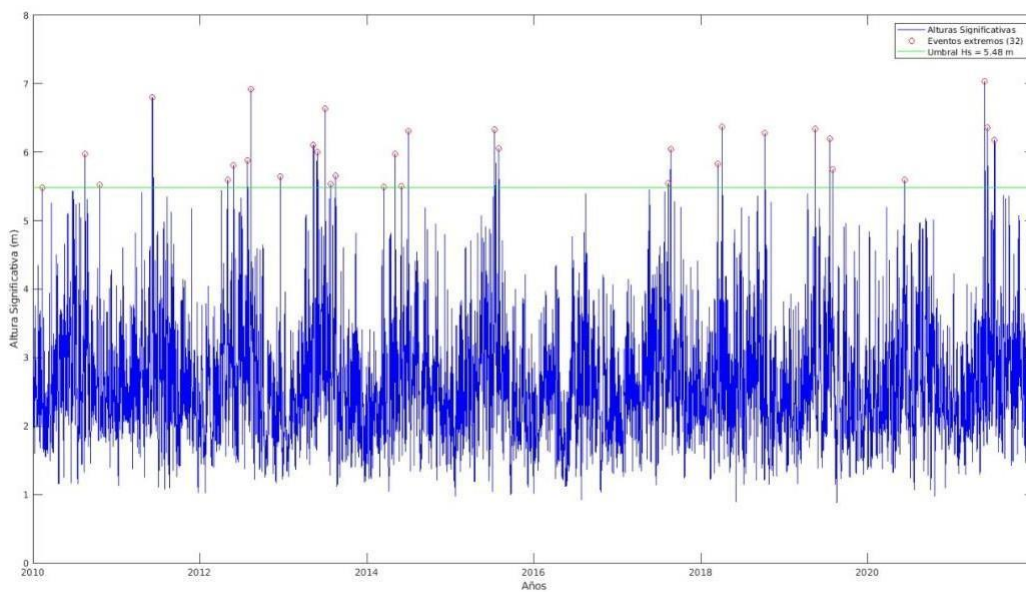


Figura 4.19: Análisis de máximos sobre el umbral Chacao.

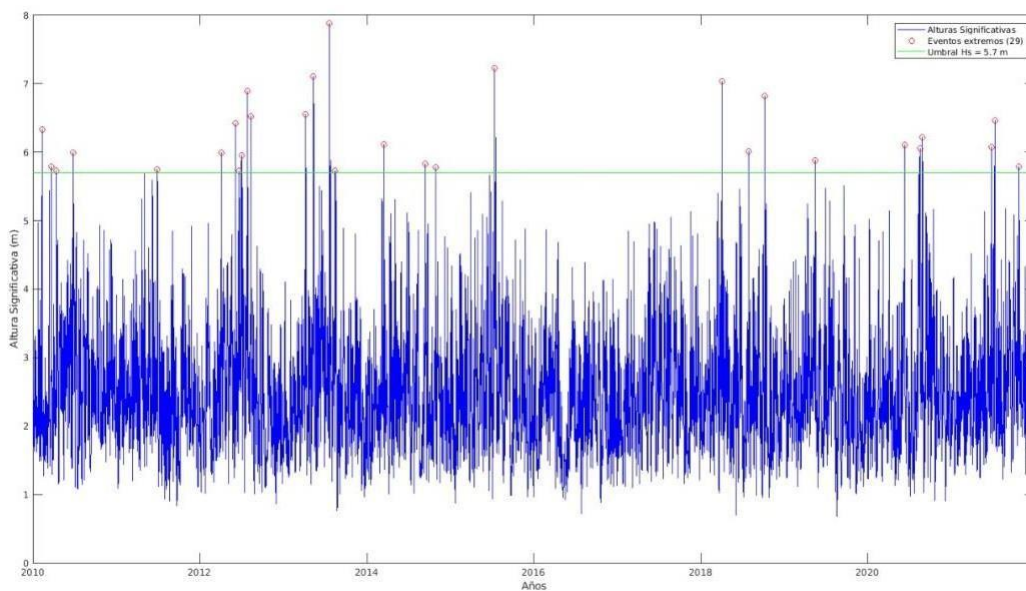


Figura 4.20: Análisis de máximos sobre el umbral Guafo.

En las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se observa que el año 2016 no existieron eventos lo suficientemente grandes como para tener olas sobre el POT. En el Nodo 13, el umbral alcanza los 6.3 metros con

un total de 32 eventos, en Chacao el umbral es de 5.48 metros con 32 tormentas extremas y en Guafo 29 eventos con umbral de 5.7 metros.

Se destaca que en Guafo existe menor cantidad de eventos que en Chacao y el Nudo 13, y olas más grandes que en Chacao, nodo que está dos latitudes abajo, reconfirmando que mientras más al sur el oleaje del mar tiene máximas más energéticas.

La Tabla 4.4 muestra las alturas significativas asociados a los periodos de retorno 5, 10, 20, 50 y 100 años en el Nudo 13, en la entrada del Canal de Chacao y en la Boca del Guafo. Se observa que la Hsr 5 años del Nudo 13 supera los 7.8 metros, la Hrs 10 años en Guafo alcanza los 7.15 metros, y para Chacao la Hrs 50 años supera los 7 metros. A su vez, para periodo de retorno 100 años, la Hrs del Nudo 13, Chacao y Guafo son 8.93 metros, 7.30 metros y 7.86 metros.

Tabla 4.4: Altura significativa con periodo de retorno 5, 10, 20, 50 y 100 años.

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Hsr Nudo 13 (m)</b>	<b>Hsr Chacao (m)</b>	<b>Hrs Guafo (m)</b>
5	7.88	6.54	6.88
10	8.17	6.75	7.15
20	8.42	6.94	7.39
50	8.72	7.16	7.67
100	8.93	7.30	7.86

#### **4.7. Conclusión**

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos en la modelación de propagación de oleaje, así como los parámetros estadísticos de altura significativa, dirección peak y periodo peak los cuales describen el clima del mar.

Se compararon los resultados de la simulación con los datos de septiembre y octubre del 2009 en Punta Guabún y con los datos del 2010 a 2015 en el Nodo 13 del Atlas de Oleaje. En ambos casos se obtuvo que el parámetro con mejor aproximación es la altura significativa, mientras que la dirección también presenta diferencias significativas, las cuales pueden ser producidas por la no inclusión de la forzante de viento en el modelo.

El análisis de clima de oleaje medio en los nodos de interés, muestran que mientras más al sur mayor será la altura del oleaje, que la presencia de islas difractan y que, pese a que el asomeramiento produce que la altura de la ola aumente, el modelo muestra que hacia la costa las alturas disminuyen, debido a que en esta dirección la densidad de energía espectral comienza a ser disipada por las fuerzas restauradoras que incluye Wavewatch III. Por otro lado, del análisis POT se observa que en Guafo y el Nodo 13 existen mayores alturas de ola que en Chacao y que las alturas significativas con periodo de retorno 100 años no superan los 9 metros.

## 5. CONCLUSIONES

En esta memoria se implementó de manera exitosa el modelo Wavewatch III para la Patagonia Norte de Chile. El modelo espectral fue validado con datos del Nodo 13 del Atlas de oleaje y los datos de ADCP de la estación Punta Guabún, obteniendo un buen ajuste particularmente con la serie de alturas significativas. Las mayores diferencias se vieron en las series del periodo peak y dirección peak, donde se observaron en los histogramas subestimaciones en los datos extremos y sobrestimaciones en las modas. Se infiere que la resolución espacial del modelo induce a errores en la propagación de los espectros al acercarse a la costa, o que los espectros de oleaje interpolados utilizados en el borde tengan variaciones considerables con respecto a la realidad. Los parámetros promedio del oleaje comparados indican que el clima de oleaje reinante es bien caracterizado. En total se modeló 11 años de estados de mar, entre el 1 de enero del 2010 y el 31 de diciembre del 2021, añadiendo 6 años de información de oleaje respecto de lo disponible en el Atlas de Oleaje para el Nodo 13.

En relación con la variabilidad espacial, al analizar los nodos se observa que existe una leve diferencia de magnitud de los parámetros medios los que se deben a la topo batimetría, la dirección del oleaje y la presencia de islas, que difractan, disminuyen y disipan la energía de las olas. El Nodo 13 y Chacao tienen magnitudes mayores que Guafo, ya que están a mayor profundidad y están totalmente expuestos a mar abierto. No obstante, debido a que hacia el sur el oleaje es más energético, al comparar los climas extremos se obtiene mayor similitud de parámetros entre el Nodo 13 y la boca del Guafo, alcanzando alturas de ola sobre los 7 metros y flujos de energía sobre 110 kW/m en esta última década.

Aun cuando los nodos de estudio están aproximadamente a 220 km y 160 km de distancia del Nodo 13, la variación de la altura significativa promedio en relación con el mismo nodo del Atlas es de 0.31 m para Chacao y 0.44 m para Guafo, por lo que para estudios que involucren modelos con mallas gruesas, sería de utilidad los datos del nodo entregado en el atlas de oleaje, sin embargo, para estudios que requieren más precisión y no se cuenta con datos medidos, es



recomendable el uso de modelos numéricos como Wavewatch III para conocer con mayor detalle los estados de mar y el clima de oleaje.

Finalmente se concluye que el fenómeno de propagación de oleaje es representado adecuadamente, ya que los parámetros estadísticos están dentro de los rangos encontrados en la literatura para la Patagonia Norte, mostrando que las simulaciones numéricas de series de oleaje son de gran utilidad ante la problemática de la falta de información medida por boyas in situ.

Como recomendaciones para trabajos posteriores:

- Actualizar la topografía. Debido a que la topo-batimetría se utilizó en la modelación corresponde a una versión del 2014, 9 años hasta la fecha actual.
- Incluir forzante de viento. El modelo es básico debido a que solo incluye la propagación del oleaje de fondo, no obstante, es aconsejable incluir el viento local para generar y propagar el oleaje local, el cual es un factor importante en la zona sur.
- Anidar mallas de distintas resoluciones. Para un trabajo más prolijo, se recomienda propagar el oleaje desde aguas más profundas, de este modo, la interpolación de los espectros será más sutil y precisa.
- Comparar con datos satelitales. Debido a que no hay boyas en la zona y los espectros propagados poseen variaciones considerables, utilizar datos satélites para evaluar el modelo es otra vía para estimar si el modelo genera y propaga de manera adecuada los espectros del oleaje.
- Realizar una modelación con los nuevos espectros con el fin de comparar las variaciones de la propagación con datos de entrada original (LOOPS) y con datos de entrada modificados con *machine learning* de Lucero et al.(2023)

**REFERENCIAS**

1. Alday, M., Accensi, M., Arduin, F., Dodet, G. (2021). A global waveparameter database for geophysical applications. Part 3: Improved forcing and spectral resolution. *Ocean Modelling*, 166, 101848 (19p.).
2. Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera Edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
3. Biblioteca del Congreso Nacional. (s.f). Chile nuestro país.
4. Bosboom, J., & Stive, M. J. F. (2021). Coastal Dynamics. Delf University of the Technology, Delft, The Netherlands. Revision no. 1269 logged at 2021-01-21 09:13.
5. Contreras, M., Alday, M., Ceballos, J., Erazo, T. (2015). Variación espacial y temporal en el oleaje del mar de Bellinghausen. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2015000100012>
6. Díaz, M., & Ulloa, M. (2020). Implementación del modelo espectral de oleaje. *Boletín del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras* 47(1)-45-57
7. Goda, Y. (1982). *Random Seas and Design of Maritime Structures*, (Vol 15). World Scientific Publishing Company.
8. Hanson, J. L., Tracy, B. A., Tolman, H. L. & Scott, R. D. (2009). Pacific Hindcast Performance of Three Numerical Wave Models. *Journal Atmospheric Oceanic Technology*.

9. Hidalgo, H. (2017). Calibración y validación del modelo Wave Watch III v. 4.18, para su aplicación en la generación de un reanálisis de oleaje en las costas de Chile. Memoria de título para ingeniero Civil Oceanográfico, Universidad de Valparaíso, Chile.
10. Letelier, J. (2011). Variability of wind, waves and currents in the northern region of the Chilean Patagonian fiords. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* Vol. 46, N°3: 363-377
11. Lucero, F. (2017). Wave energy assessment in the central south coast of Chile. *Renewable Energy*, 63, 732-739. Doi: 10.1016/j.renene2017.03.076
12. Lucero, F., Stringari, C.E., & Filipot, J.F. (2023). Improving Wavewatch III hindcasts with machine learning. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104381>
13. Museo de la Historia Nacional de Concepción. (2018). Chile, más que tierra.
14. Tolman, H. L., & Chalikov, D. (2016). User manual and system documentation of WAVEWATCH III Version 5.16. NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA.
15. Winckler, P. (2020). Introducción al modelado de procesos costeros. Primera Edición. Valparaíso, Chile: Universidad de Valparaíso

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO**

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil  
**Carrera** : Ingeniería Civil  
**Nombre del memorista** : Rocío Belén Pérez Foix  
**Título de la memoria** : Implementación de un modelo espectral de oleaje para la Patagonia Norte de Chile  
**Fecha de la presentación oral** :  
  
**Profesor(es) Guía** : Maricarmen Guerra Paris  
**Profesor(es) Revisor(es)** : Alejandra Stehr  
**Concepto** :  
**Calificación** :

Resumen