



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



CONDICIONES HISTÓRICAS DE OLEAJE EN EL GOLFO DE ARAUCO

POR

Ghislaine Catalina Vargas Zurita

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

Profesor Guía
Maricarmen Guerra Paris

Profesional Supervisor
Alejandra Stehr Gesche

Marzo 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Ghislaine Catalina Vargas Zurita

© 2025 Ghislaine Catalina Vargas Zurita

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

DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado a mi madre y a mi padre, Ghislaine y Pedro,
no hay palabras que describan lo eternamente agradecida que estoy
por todo el esfuerzo que han hecho por mí.*

*Además, dedicar unas palabras a mi pololo Samuel,
que me ha brindado su apoyo y su ayuda cada vez que la he necesitado.*

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Servicio Hidrológico Oceanográfico de la Armada por facilitarme datos oleaje de la boya Watchkeeper ubicada costa afuera de Talcahuano para realizar la validación del modelo de oleaje de esta memoria. Al Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental, COPAS Coastal (ANID FB210021) por proporcionar su infraestructura computacional para realizar las simulaciones necesarias para este trabajo y al Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento Powered@NLHPC: Esta memoria fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (CCSS210001)".

Agradecer a mi profesora guía Maricarmen Guerra, por todo el apoyo y la consideración, siempre dándose el tiempo de explicar de la mejor manera mis dudas y aportando con valiosas ideas durante todo el proceso, además de su preocupación para conseguir las herramientas que permitieron realizar este trabajo, infinitamente agradecida por todo.

Igualmente quiero agradecer a la profesora Alejandra Stehr por su disponibilidad para ser partícipe de este proceso, entregando su punto de vista con excelentes acotaciones y por su buena disposición para permitirme finalizar este proceso de la mejor manera.

RESUMEN

El aumento en la ocurrencia de las marejadas en los últimos años junto con el incremento en la demanda de infraestructura costera y el eventual aumento del nivel del mar debido al cambio climático aumentan el riesgo en la zona costera también afectada por terremotos y tsunamis. En el Golfo de Arauco, Biobío, Chile, la información pública sobre oleaje y sobre las marejadas es prácticamente nula. Para generar un sistema de alerta frente a marejadas es necesario determinar el clima de oleaje medio y extremo, para así identificar el oleaje que pueda afectar la actividad marítima y dañar la infraestructura de la costa. En este trabajo se evaluaron las condiciones históricas de oleaje en el Golfo de Arauco utilizando un modelo de oleaje retrospectivo debido a que las mediciones del oleaje existentes en el Golfo son insuficientes para realizar un análisis de largo plazo.

Se implementó el modelo espectral Wavewatch III para modelar el oleaje desde aguas profundas hasta las cercanías de la costa en la zona centro-sur de Chile. Se simularon 30 años de oleaje, desde enero del año 1994 hasta diciembre del año 2023, con el fin de generar información de largo plazo de la altura significativa, periodo peak, dirección media y peak del oleaje en el Golfo de Arauco. Los resultados del modelo son validados con series de tiempo de parámetros resumen del oleaje obtenidas costa afuera de Caleta Tumbes, Talcahuano, por la boya Watchkeeper perteneciente al SHOA. Luego se crearon mapas de parámetros resumen del oleaje promedio para la zona de estudio y se obtuvo el clima medio y extremo para diferentes puntos de interés dentro del Golfo de Arauco.

Se obtuvo un buen ajuste de la altura significativa con respecto a los datos observados. Se obtuvo un ajuste aceptable para el periodo peak y la dirección, pudiendo mejorarse si se agrega a la modelación información del viento local. Los mayores valores de altura significativa se observaron en Punta Lavapie y en la Isla Santa María. La altura del oleaje mínima se observa en Arauco (promedio 0.49 m). Para el clima extremo se destaca que las máximas alturas de oleaje se observaron en el nodo de Punta Lavapie, con valores superiores a los 5 m, el periodo de retorno a los 10 años varía entre 1.6 metros en Arauco y 4.7 metros en Punta Lavapie, para 100 años el mínimo está igualmente en Arauco con 1.8 m y el máximo en Punta Lavapie con 5.1 m.

ABSTRACT

The increase in the occurrence of storm surges in recent years together with the increase in demand for coastal infrastructure and the eventual rise in sea level due to climate change increase the risk in the coastal zone also affected by earthquakes and tsunamis. In the Gulf of Arauco, Biobío, Chile, public information on waves and swells is practically non-existent. In order to generate a large wave warning system, it is necessary to determine the average and extreme wave climate in order to identify the waves that can affect maritime activity and damage coastal infrastructure. In this work, the historical wave conditions in the Gulf de Arauco were evaluated using a retrospective swell model because the existing swell measurements in the Gulf are insufficient to perform a long-term analysis.

The Wavewatch III spectral model was implemented to model the waves from deep water to near shore in south-central Chile. Thirty years of waves were simulated, from January 1994 to December 2023, in order to generate long-term information of the significant height, peak period, mean direction and peak of the waves in the Gulf of Arauco. The model results are validated with time series of wave summary parameters obtained offshore of Caleta Tumbes, Talcahuano, by the Watchkeeper buoy belonging to SHOA. Then, maps of average wave summary parameters were created for the study area and the mean and extreme climate were obtained for different points of interest within the Gulf of Arauco.

A good fit of the significant height to the observed data was obtained. An acceptable fit was obtained for peak period and direction, which could be improved by adding local wind information to the modeling. The highest significant height values were observed at Punta Lavapie and Santa Maria Island. The minimum wave height was observed in Arauco (average 0.49 m). For the extreme climate, the maximum wave heights were observed at the Punta Lavapie node, with values greater than 5 m, the 10-year return period varies between 1.6 m at Arauco and 4.7 m at Punta Lavapie, and for 100 years the minimum is also at Arauco with 1.8 m and the maximum at Punta Lavapie with 5.1 m.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Metodología de trabajo	2
1.5 Principales resultados y conclusiones	2
1.6 Organización de la memoria	3
CAPITULO 2: CLIMA DE OLAJE.....	4
2.1 Introducción	4
2.2 Oleaje	4
2.2.1 Teoría lineal	5
2.2.2 Oleaje irregular.....	6
2.2.3 Espectro de oleaje.....	7
2.3 Clima de oleaje.....	8
2.4 Mediciones de oleaje en Chile	9
2.5 Modelos numéricos para la generación de oleaje	10
2.6 Modelo espectral WAVEWATCH III	11
2.7 Atlas de oleaje	12
2.8 Conclusión	14
CAPITULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1 Introducción	15
3.2 Zona de estudio	15
3.2.1 Puntos de interés en el Golfo.....	16
3.3 Configuración del modelo.....	16
3.3.1 Batimetría	16
3.3.2 Malla computacional	17
3.3.3 Condición inicial	18
3.3.4 Condición de borde	18
3.4 Simulación y series de tiempo	18
3.5 Validación del modelo.....	18
3.5.1 Indicadores de calidad	19

3.6 Clima del oleaje en puntos de interés.....	20
3.7 Conclusión	21
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	22
4.1 Introducción	22
4.2 Validación del modelo.....	22
4.3 Clima de oleaje en el Golfo de Arauco	27
4.3.1 Costa de San Pedro de la Paz	28
4.3.2 Coronel/Lota.....	30
4.3.3 Laraquete	32
4.3.4 Arauco	35
4.3.5 Llico.....	37
4.3.6 Punta Lavapie	39
4.3.7 Isla Santa María Interior Noroeste	42
4.4 Conclusión	44
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	45
REFERENCIAS	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Descripción de los parámetros estadísticos del oleaje obtenidos del espectro.....	8
Tabla 3.1. Características de la malla computacional.....	17
Tabla 4.1. Indicadores de calidad del ajuste de la altura significativa (H_s).....	23
Tabla 4.2. Indicadores de calidad del ajuste del periodo peak (T_p).....	25
Tabla 4.3. Indicadores de calidad del ajuste de la dirección peak (D_p).....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de estados de mar: (a) Sea; (b) Swell.....	4
Figura 2.2. Nomenclatura onda sinusoidal.....	5
Figura 2.3. Registro de oleaje medido con una boya.....	6
Figura 2.4. Gráfico bidimensional del espectro de oleaje.....	7
Figura 2.5. Distribución de las boyas SHOA.....	9
Figura 2.6. Ubicación de boyas, nodos, datos satelitales utilizados y malla del modelo para el Atlas de Oleaje.....	12
Figura 2.7. Ubicación de la información del clima de oleaje cerca del Golfo de Arauco.....	13
Figura 3.1. Área zona de estudio y ubicación ciudades referenciales.....	15
Figura 3.2. Ubicación puntos de interés para el estudio.....	16
Figura 3.3. Batimetría GEBCO para la zona de estudio.....	17
Figura 3.4. Serie de tiempo altura significativa de la boya SHOA en Talcahuano.....	19
Figura 4.1. Gráfico comparativo series de tiempo simulada y observada de Altura Significativa entre junio 2020 y diciembre 2023.....	22
Figura 4.2. Gráfico de dispersión de Altura Significativa entre junio 2020 y diciembre 2023.....	23
Figura 4.3. Figura 4.3. Gráfico comparativo series de tiempo simulada y observada de Periodo Peak entre junio 2020 y diciembre 2023 donde (a) corresponde al registro completo y (b) a los valores de periodo mayor que 8.....	24
Figura 4.4. Gráfico de dispersión de Periodo Peak entre junio 2020 y diciembre 2023.....	25
Figura 4.5. Gráfico comparativo series de tiempo simulada y observada de Dirección Peak entre junio 2020 y diciembre 2023.....	26
Figura 4.6. Gráfico de dispersión de Dirección Peak entre junio 2020 y diciembre 2023.....	26
Figura 4.7. Mapas de valores promedio de (a) Altura Significativa y Dirección Media y (b) Periodo Peak y Dirección Media.....	27
Figura 4.8. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para el nodo de la costa de San Pedro de la Paz.....	28
Figura 4.9. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de la costa de San Pedro de la Paz.....	30
Figura 4.10. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Coronel/Lota.....	31

Figura 4.11. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Coronel /Lota.....	32
Figura 4.12. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Laraquete.....	33
Figura 4.13. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Laraquete.....	34
Figura 4.14. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Arauco.....	35
Figura 4.15. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Arauco.....	37
Figura 4.16. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Llico.....	38
Figura 4.17. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Llico.....	39
Figura 4.18. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Punta Lavapie.....	40
Figura 4.19. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Punta Lavapie.....	41
Figura 4.20. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Isla Santa María.....	42
Figura 4.21. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Isla Santa María.....	44

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El aumento en la ocurrencia de marejadas en los últimos años junto con el incremento en la demanda de infraestructura costera y el eventual aumento del nivel del mar debido al cambio climático, aumentan el riesgo en la zona costera también afectada por terremotos y tsunamis (Winckler, 2020).

En Chile, la alerta de marejadas oficial está a cargo de DIRECTEMAR, un organismo perteneciente a la Armada de Chile, que entrega información cualitativa del oleaje, zonificada (3 zonas para todo Chile), con un horizonte de previsión de 12 horas. El pronóstico de oleaje para la región del Biobío es escaso. El sitio web MarejadasUV (<https://marejadas.uv.cl/>) entrega pronóstico a siete días solo para Talcahuano y San Vicente, dejando de lado el Golfo de Arauco.

Antes de poder generar una alerta de marejada para un sector es necesario conocer el clima de oleaje, ya que la definición de marejada consiste en eventos anormales de oleaje que afectan las actividades marítimas, que pueden ingresar a bahías y puertos generando severos daños en la estructura, inundaciones por sobrepaso, reducción de playa, cortes de tránsito y suspensión de otras actividades (DIRECTEMAR, 2020).

El Atlas de Oleaje de Chile (Beyá *et al.*, 2016) entrega información estadística del clima de oleaje en diferentes puntos de Chile. Para la región del Biobío entrega información en un nodo de aguas profundas frente a Talcahuano y en un nodo en el puerto San Vicente, dejando fuera el Golfo de Arauco. Además, no se cuenta con mediciones de oleaje de largo suficientes que permitan realizar el análisis histórico del oleaje de la zona. Debido a lo anterior en este trabajo se implementa una la simulación retrospectiva de oleaje utilizando el modelo espectral *Wavewatch* III. Se realizaron 30 años de simulaciones de oleaje utilizando como condición de borde espectros de oleaje generados por un modelo retrospectivo global. Luego, se realizó un análisis estadístico de las series de tiempo de oleaje generadas para poder caracterizar el clima de oleaje medio y extremo en el Golfo de Arauco.

1.2 Objetivo general

Evaluar condiciones históricas de oleaje en el Golfo de Arauco utilizando un modelo de oleaje retrospectivo

1.3 Objetivos específicos

- a) Implementar el modelo de oleaje en WAVEWATCH III para el Golfo de Arauco
- b) Obtener series de tiempo de 30 años de Altura significativa, Periodo peak, Dirección media y peak para el Golfo de Arauco
- c) Analizar el clima de oleaje medio y extremo en el Golfo de Arauco

1.4 Metodología de trabajo

En primera instancia se realizó una recopilación de la información existente del oleaje en Chile y de manera específica del Golfo de Arauco. Luego, utilizando como condición de borde espectros de oleaje retrospectivos proporcionados por el modelo global *Wavewatch* III de IFREMER (Accensi, 2022), y la batimetría correspondiente a la zona de estudio, se implementa el modelo *Wavewatch* III en mayor resolución zona del Golfo de Arauco para propagar oleaje desde aguas profundas hasta la costa entre los años 1994 y 2023.

Se obtienen los parámetros resumen del oleaje cada una hora en cada punto de la malla computacional de resolución de 0.025° (2.8 km). El modelo se valida con datos de oleaje proporcionados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) recolectados costa afuera de Caleta Tumbes. Utilizando los resultados de la simulación se generan mapas de los parámetros resumen del oleaje para el Golfo de Arauco. Se generan series de tiempo en los puntos de interés dentro del Golfo de Arauco, como Costa de San Pedro de la Paz, aproximación Coronel y Lota, Arauco, Laraquete, Llico, Punta Lavapie e Isla Santa María, y se realiza un análisis estadístico de clima medio y clima extremo de oleaje en cada punto.

1.5 Principales resultados y conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación se concluye que se logró implementar el modelo *Wavewatch* III de manera exitosa, con los gráficos comparativos de las series de tiempo, gráficos

de dispersión e indicadores de calidad se aprecia que el mejor ajuste lo tiene la altura significativa, para el periodo *peak* y la dirección *peak* se logró un ajuste aceptable. Se espera que agregando información del viento local a la simulación el ajuste para los tres parámetros mejore significativamente.

Se generaron mapas de valores promedio de altura significativa y periodo *peak*, y para los puntos de interés se analizó el clima medio y extremo del oleaje. Con esta información se describió el oleaje dentro del Golfo destacando que la altura del oleaje es máxima en Punta Lavapie, y en la costa de San Pedro de la Paz. Las alturas mínimas de oleaje se observan en Arauco.

Del clima extremo se destaca que el mayor porcentaje de tormentas ocurre durante invierno, siguiendo otoño, luego primavera y por último verano, con un pequeño porcentaje de ocurrencia solo presente en los puntos del Golfo que se encuentran más expuestos al Océano Pacífico estos son Punta Lavapie, isla Santa María y la Costa de San Pedro de la Paz.

1.6 Organización de la memoria

Este documento se divide en 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, los modelos numéricos típicamente utilizados para propagar oleaje, y se presenta la información existente en Chile sobre el oleaje donde se ha utilizado el mismo modelo espectral de oleaje. En el tercer capítulo se detalla la metodología con la que se llevó a cabo el trabajo, incluyendo la definición de la zona de estudio y los puntos de interés, la configuración del modelo *Wavewatch* III, las mediciones utilizadas para validar el modelo y los indicadores de calidad utilizados, y el procedimiento para obtener el clima de oleaje medio y extremo para los puntos de interés. En el capítulo 4 se presentan los resultados de la modelación, y se realiza un análisis de oleaje medio y extremo para cada punto de interés. Por último, en el quinto capítulo se entregan conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada.

CAPITULO 2: CLIMA DE OLAJE

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan las bases teóricas del oleaje, de su análisis y de las alternativas existentes para la modelación de oleaje y para la obtención del clima de oleaje. Además, se expone la información existente en Chile sobre mediciones de oleaje y clima de oleaje.

2.2 Oleaje

El oleaje corresponde a las ondas que se propagan sobre la superficie del mar. El principal generador de oleaje es el viento. El oleaje se produce por las diferencias de presión atmosférica que ocurren durante las tormentas generando perturbaciones de la interfaz aire-agua, luego de la agitación producida localmente, el oleaje se propaga alejándose de la zona de generación.

En la Figura 2.1 (a) se muestra un ejemplo de oleaje generado localmente por viento típicamente denominado *Wind Sea*, que tiene periodos que entre los 1 y 10 segundos. El oleaje luego se propaga y se aleja de la zona de generación, este tipo de oleaje se denomina *Swell* y se muestra en la Figura 2.1 (b), el cual tiene periodos que abarcan desde los 10 hasta los 30 segundos.



(a)



(b)

Figura 2.1. Tipos de estados de mar: (a) Wind Sea; (b) Swell

Fuente: Shutterstock.com (2025)

2.2.1 Teoría lineal

Para la caracterización del oleaje se recurre principalmente a la teoría lineal del oleaje. Esta teoría se basa en una serie de supuestos que, aunque no se replican exactamente en la realidad, permiten caracterizar el campo cinemático y dinámico de ondas de pequeña amplitud mediante expresiones analíticas que simplifican su uso (Winckler, 2020). La base para la teoría lineal es la onda sinusoidal que tiene las características presentadas en la Figura 2.2

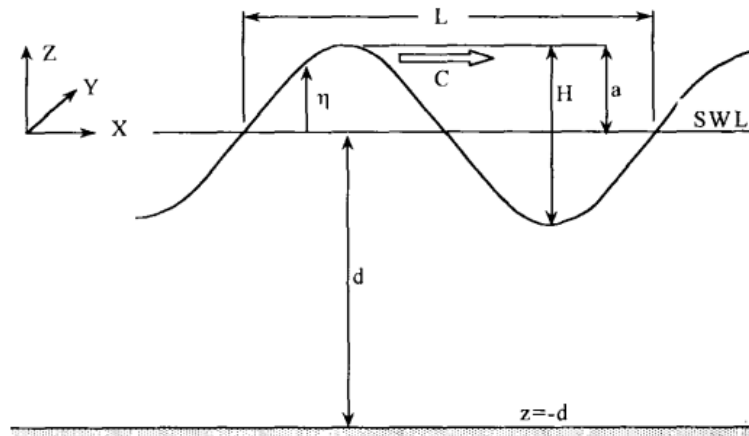


Figura 2.2. Nomenclatura onda sinusoidal

Fuente: Kamphuis (2000)

Una onda sinusoidal, η , se describe de la siguiente manera,

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

Donde a corresponde a la amplitud, x es la distancia en la dirección de propagación, t es el tiempo, $k = 2\pi/L$, es el número de onda, $\omega = 2\pi/T$ es la frecuencia angular, L es el largo, T es el periodo y la distancia vertical máxima entre cresta y valle de la onda es la altura $H = 2a$

Una importante relación derivada de la teoría lineal es la ecuación de dispersión, que expresa la relación entre el largo de la onda con su periodo,

$$\omega^2 = kg \tanh(kH) \quad (2.2)$$

Además, las olas se diferencian entre si se encuentran en aguas profundas cuando $h/L > 0.5$ y en aguas someras cuando $h/L < 0.05$, esto permite realizar aproximaciones que modifican las ecuaciones anteriores para cada situación. Entre estas condiciones se considera que la onda se encuentra propagándose en aguas intermedias para realizar cálculos en esta situación se deben utilizar las ecuaciones generales presentadas anteriormente. (Masselink, 2011)

2.2.2 Oleaje irregular

En el océano el oleaje es complejo, y se comporta como una superposición de ondas sinusoidales de distinta altura, longitud, dirección y periodo. El oleaje es típicamente analizado estadísticamente. A pesar de ser altamente irregular, se observa que los estadísticos del oleaje suelen ser constantes durante cortos periodos de tiempo. El periodo de tiempo en el que el oleaje se considera estadísticamente estacionario se denomina Estado de Mar y convencionalmente se acepta que tiene una duración de 1 a 3 horas. (Beyá, 2016)

En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de variaciones de la elevación del mar asociadas al oleaje medidas por una boya. En esta se aprecia la irregularidad de las olas del mar y lo complejo que es identificar cada ola. Los parámetros estadísticos que se utilizan para describir un estado de mar son la altura significativa H_s y el espectro de energía E , del cual se desprenden el periodo *peak* T_p , la dirección media D_m , y la dirección *peak* D_p entre otros.

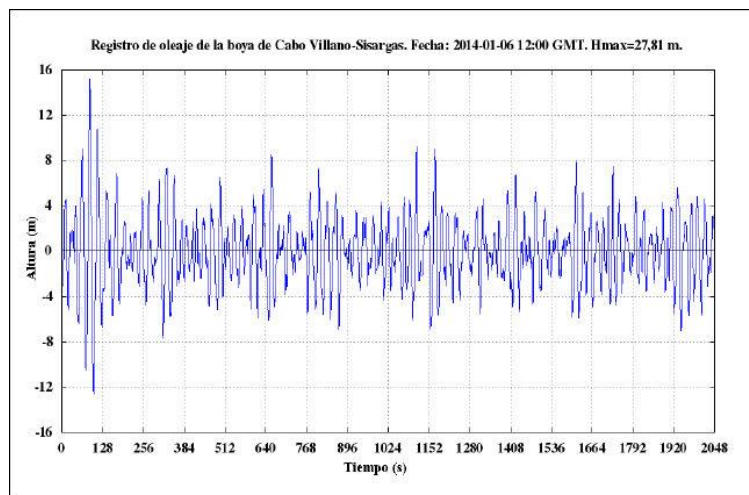


Figura 2.3. Registro de oleaje medido con una boya

Fuente: cazatormentas.com (2016)

2.2.3 Espectro de oleaje

El espectro de oleaje o espectro de energía del oleaje es uno de los estadísticos más utilizados para representar el estado de mar. Este espectro representa una descomposición de la energía del oleaje en las diferentes frecuencias y direcciones que lo componen, y se calcula comúnmente usando la transformada de Fourier.

Matemáticamente el espectro de oleaje se representa por la función bidimensional:

$$E(f, \theta) \quad (2.3)$$

Donde E corresponde a la energía espectral, f la frecuencia espectral y θ la dirección del oleaje. De esta manera, la función E indica la distribución de la energía en el dominio de la frecuencia y dirección. A partir del espectro E se pueden obtener todos los estadísticos mencionados en la sección anterior para describir un estado de mar.

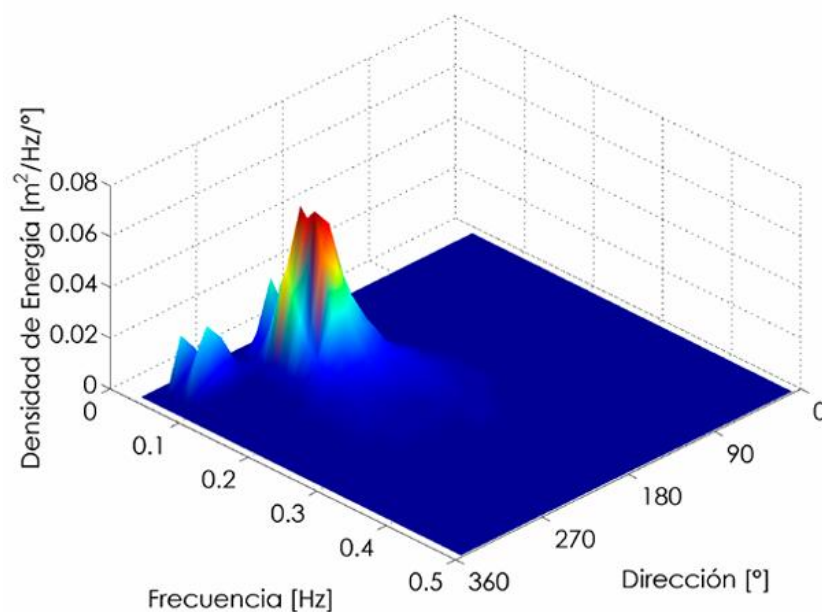


Figura 2.4. Gráfico del espectro de oleaje

Fuente: Atlas de Oleaje (2016)

En la Figura 2.4 se muestra gráficamente un espectro bidimensional, donde se aprecia la distribución de energía de las distintas frecuencias y direcciones de un estado de mar. La Tabla 2.1 describe los

estadísticos que se obtienen del espectro de oleaje, cabe destacar que la altura significativa que se obtiene del espectro es equivalente a cuatro veces la raíz del área bajo la curva del espectro de energía del oleaje.

Tabla 2.1. Descripción de los parámetros estadísticos del oleaje obtenidos del espectro

Parámetro	Unidad	Descripción
Altura significativa (H_s)	m	Es la altura de ola promedio que se calcula con el tercio de olas más grandes en un estado de mar.
Frecuencia peak (f_p)	Hz	Es la frecuencia asociada a la mayor cantidad de energía del espectro de frecuencias de un estado de mar.
Periodo peak (T_p)	s	Es el periodo correspondiente a la frecuencia peak, está asociado a la mayor cantidad de energía del espectro de frecuencias de un estado de mar.
Dirección media (D_m)	°	Es la media aritmética entre las direcciones de las olas que componen el espectro de direcciones representante de un estado de mar.
Dirección peak (D_p)	°	Es la dirección en la que se dirige la mayor parte de la energía del espectro de direcciones correspondiente al oleaje de un estado de mar.
Densidad de energía ($E(f, \theta)$)	$m^2/Hz/^\circ$	Cantidad de energía espectral por cada componente de frecuencias y direcciones.

2.3 Clima de oleaje

Con el clima de oleaje se analiza el comportamiento del oleaje a largo plazo utilizando los parámetros estadísticos que describen un estado de mar. Existen distintos tipos de clima de oleaje, para este estudio corresponden al clima medio y al clima extremo, de esta manera se realiza una descripción más detallada del comportamiento del oleaje.

El clima medio es el comportamiento estadístico de largo plazo promedio de los parámetros resumen que describen un estado de mar y el clima extremo corresponde al comportamiento estadístico a largo plazo de los valores extremos de las alturas de oleaje. Para obtener el clima extremo se utiliza típicamente el método de máximos sobre un umbral (POT), que consiste en definir un valor umbral de la altura significativa del oleaje y seleccionar las alturas que lo superan durante el año y que correspondan a tormentas individuales. Para realizar este análisis del clima del oleaje es necesario contar con al menos 30 años de datos. (Beyá, 2016)

2.4 Mediciones de oleaje en Chile

En Chile, el Servicio Hidrológico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) es el organismo público encargado de realizar mediciones y mantener el registro del oleaje a lo largo de la costa chilena.

Actualmente el SHOA cuenta con siete boyas distribuidas a lo largo de la costa de Chile, de las cuales 5 se encuentran en funcionamiento. En la Figura 2.5 se muestra la ubicación de las boyas del SHOA, las que están señaladas con los marcadores azules son las que se encuentran operativas. La mayoría de estas boyas han recolectado datos desde junio del año 2020 hasta la actualidad entregando información de parámetros resumen del oleaje cada una hora. En total se cuenta con aproximadamente cuatro años de datos, siendo estos insuficientes para realizar un análisis de valores extremos de largo plazo. Además, la boya más cercana al Golfo de Arauco es la boya *Watchkeeper* que se encuentra costa afuera de Caleta Tumbes, por lo que, aunque se contaran con 30 años de datos estos no serían representativos de lo que ocurre dentro del Golfo.

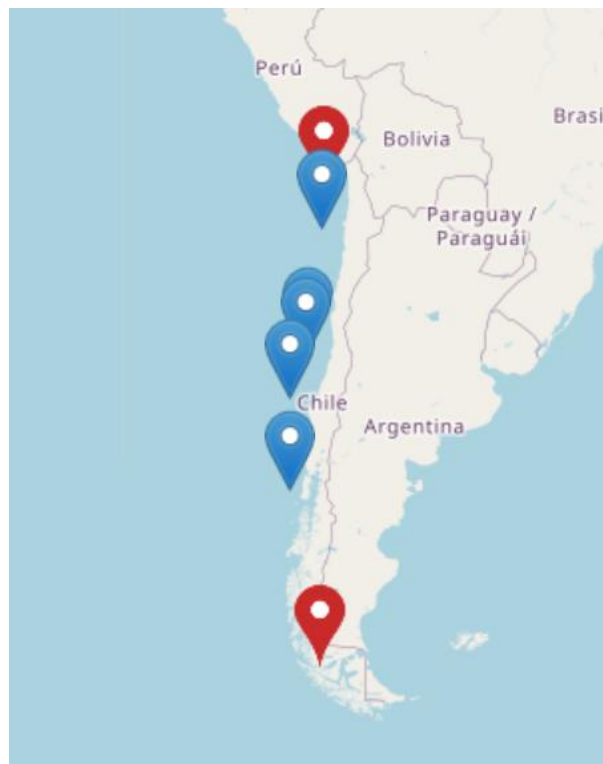


Figura 2.5. Distribución de las boyas SHOA

Fuente: SHOA (2025)

2.5 Modelos numéricos para la generación de oleaje

Existen diferentes formas de modelar la hidrodinámica del oleaje y la utilización de cada uno de los modelos depende las necesidades de cada estudio en cuanto a resolución espacial y temporal. A continuación, se presenta una descripción de los principales tipos de modelos que se utilizan para el estudio de la propagación del oleaje.

Los modelos que promedian la fase se basan en la ecuación de balance espectral y permiten calcular en el tiempo y en espacio la evolución de la energía del oleaje (espectro de oleaje). Estos modelos permiten caracterizar los fenómenos de asomeramiento, refracción, y disipación de la energía del oleaje, entre otras. Por el contrario, no resuelven de manera adecuada la difracción y omiten la reflexión. Los modelos basados en teorías que promedian la fase no permiten identificar las variaciones de la superficie libre individuales, es por esto que se utilizan con una resolución espacial (100 m) y temporal alta (horas). Con ello, abarcan extensiones mucho mayores desde aguas profundas a las cercanías de la costa. Los principales ejemplos de softwares que utilizan este tipo de modelos espectrales son SWAN y WAVEWATCH III.

Los modelos que resuelven la fase se basan en ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento que permiten caracterizar la evolución en el tiempo y en el espacio de las olas individuales. Mediante estas ecuaciones se resuelve el desnivel instantáneo y la velocidad en dos direcciones. Estos modelos tienen la ventaja que permiten caracterizar fenómenos de asomeramiento, refracción, difracción, reflexión y disipación. Sin embargo, debido a la alta resolución espacial y temporal requerida, están limitados a áreas de estudio pequeñas ya que los costos computacionales son elevados. (Winckler, 2020)

Los modelos CFD se basan en las ecuaciones 3D de Navier-Stokes, sin efectuar supuestos respecto de la estructura vertical del flujo. Estos modelos permiten calcular la velocidad y la presión en tres dimensiones. Entre estos modelos destacan las ecuaciones de RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*) y las técnicas LES (*Large Eddy Simulation*) y DNS (*Direct Numerical Simulation*). Ya que requieren de una capacidad computacional alta, no se implementan a grandes escalas, estos se usan

comúnmente en investigación y permiten evaluar los fenómenos de rotura, interacción fluido estructura y fluido sedimentos. (Winckler, 2020)

De acuerdo con lo descrito anteriormente se desprende que el uso de un modelo de oleaje espectral o que promedia la fase es lo ideal para la obtención de los parámetros resumen del oleaje en un umbral temporal de 30 años necesarios para esta memoria.

2.6 Modelo espectral WAVEWATCH III

El modelo Wavewatch III es un modelo espectral de oleaje de tercera generación de código abierto inicialmente desarrollado por Hendrick Tolman a principios de la década de 1990. Este modelo resuelve la ecuación de balance de energía espectral mostrada en la Ec. 2.4

$$\begin{aligned} \frac{\partial N(f, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(f, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(f, \theta, x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta} N(f, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} \\ + \frac{\partial c_f N(f, \theta, x, y, t)}{\partial f} = \frac{S_t(f, \theta, x, y, t)}{f} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Donde $N(f, \theta, x, y, t)$ 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_{θ} y c_f son las velocidades de propagación en el dominio de la dirección y la frecuencia ante la presencia de corrientes (en este caso no se incluyen corrientes).

$$S = S_{ln} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{xx} \quad (2.5)$$

En la ecuación 2.5 se muestran los términos fuente presentes en Wavewatch III. En aguas profundas, generalmente se considera que el término de fuente de energía neta S que consiste en tres partes, un término de interacción atmósfera-onda S_{in} , que suele ser una entrada de energía positiva, un término de interacciones onda-onda no lineal S_{nl} y un término de interacción onda-océano que generalmente contiene la disipación de energía S_{ds} . El término de entrada S_{in} está dominado por el término del crecimiento exponencial de las olas de viento, y este término de origen generalmente describe solo este

proceso dominante. Para la inicialización del modelo y para proporcionar un crecimiento de onda inicial más realista, también se puede agregar un término de entrada lineal S_{ln} .

En aguas poco profundas, hay que tener en cuenta otros procesos, sobre todo S_{bot} que corresponde a la interacción fondo-ola. En aguas extremadamente poco profundas, la ruptura inducida por profundidad S_{db} e interacciones onda-onda de tríada S_{tr} también se vuelven importantes. También están disponibles en *Wavewatch* III los términos fuente para la dispersión de las ondas por las características del fondo S_{sc} , las interacciones onda-hielo, reflejos en las costas u objetos flotantes como icebergs S_{ref} , que puede incluir fuentes de energía de ondas infragrave y términos adicionales definidos por el usuario S_{xx} .

2.7 Atlas de oleaje

Beyá y otros (2016) calibró y validó un modelo de espectral oleaje para toda la costa de Chile utilizando el modelo *Wavewatch* III con el cual se generó el Atlas de oleaje de Chile (Beyá *et al*, 2016). El propósito del Atlas de Oleaje es resumir de manera cualitativa y cuantitativa el clima de oleaje en el país de manera no operacional, presenta análisis convencionales de clima medio y clima extremo, y análisis avanzados y novedosos de otros parámetros. Se incluyen tablas de parámetros promedio, tablas de frecuencia bivariadas, histogramas, rosas de oleaje, gráficos de dispersión altura-período, espectros promedio, análisis estacional, análisis de clima extremo, análisis multimodal e incertidumbre. Esta información se obtuvo para 22 nodos de aguas profundas los cuales se muestran en la Figura 2.6.

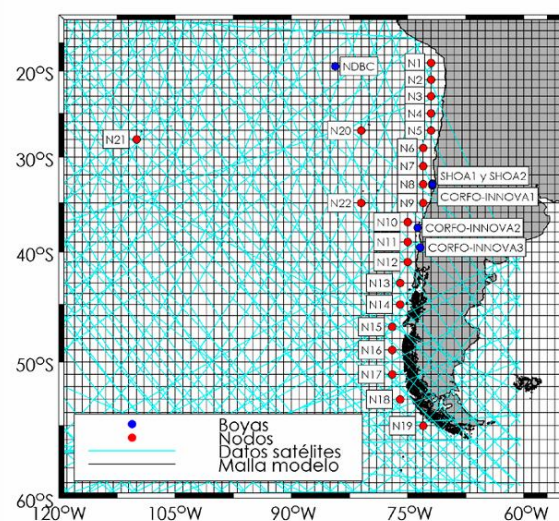


Figura 2.6. Ubicación de boyas, nodos, datos satelitales utilizados y malla del modelo para el Atlas de Oleaje

Fuente: Atlas de Oleaje

La información de oleaje utilizada para la elaboración de las tablas y gráficos de este Atlas fue generada con el modelo *Wavewatch* III v.4.18. Para la simulación se utilizó una malla computacional regular de resolución $1^\circ \times 1^\circ$ que abarca el océano Pacífico desde 64°S , 110°E hasta 64°N , 60°O . El paso de tiempo de cómputo de los datos de oleaje fue de 1 h y el de salida de 3 h que se extiende por 35 años desde enero del año 1980 a diciembre del año 2015. (Beyá, 2016)

También se obtuvo estadística del oleaje en la entrada de los puertos principales de Chile la cual fue generada con el modelo SWAN v.40.85 a partir del oleaje espectral de aguas profundas generado para las fichas de nodos de aguas profundas del modelo *Wavewatch* III. Para estos efectos se utilizó la batimetría de las cartas náuticas SHOA disponibles en los sectores portuarios de Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente, para el Golfo de Arauco no hay nodos de aproximación por lo que no existe información de sus puertos.

En la Figura 2.7 se muestra la ubicación de los nodos de Talcahuano (aguas profundas) y del puerto San Vicente del Atlas de Oleaje con relación al Golfo de Arauco, lo que deja en evidencia que esta información no es representativa, ya que el oleaje en aguas profundas al acercarse a la costa se ve afectado por fenómenos de asomeramiento, disipación, refracción, entre otros, y la información de un puerto en específico no se puede interpolar a otros lugares. El nodo de aguas profundas de Talcahuano tiene valores promedio de altura significativa igual a 2.42 m, dirección peak de 229° y periodo peak de 13 s, además de una altura umbral de tormentas de 6.36 m.

De acuerdo con las secciones anteriores queda en evidencia la falta de información del clima de oleaje en la costa de la región del Biobío. Además, la información existente en el Atlas de Oleaje se encuentra generada considerando datos hasta el año 2015, lo que no incluye los posibles cambios observados en los últimos 10 años que podría haber debido al cambio climático.

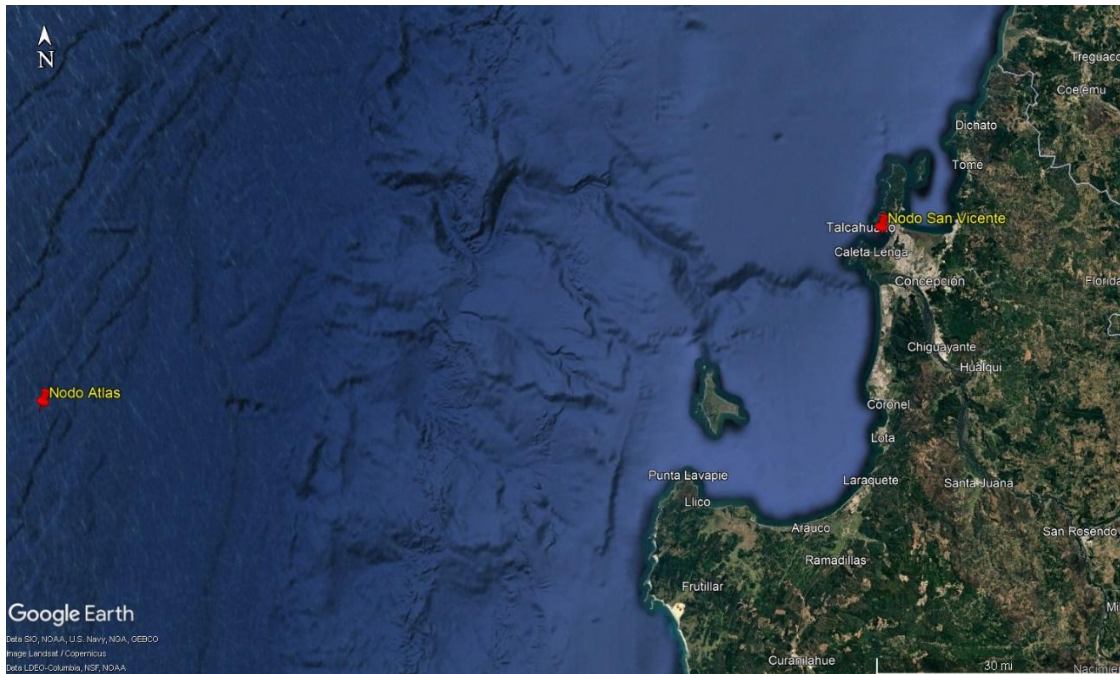


Figura 2.7. Ubicación de la información del clima de oleaje cerca del Golfo de Arauco

2.8 Conclusión

En este capítulo se presentó información sobre el origen del oleaje, y los parámetros con los que se describe para poder realizar un análisis. Además, se explicó la manera en la cual se obtiene el clima de oleaje, sobre la escasa información de las mediciones del oleaje disponibles en Chile y el método idóneo para modelar las condiciones pasadas del oleaje. Finalmente, se mostraron antecedentes de estudios que se realizaron en Chile que también utilizaron el modelo *Wavewatch* III para obtener el clima de oleaje, y a su vez la falta de información existente para el Golfo de Arauco.

CAPITULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

En este capítulo se describen la zona de estudio y los puntos de interés para su estudio, también se detalla la configuración del modelo con su batimetría, condiciones de borde e iniciales, y las características de la malla computacional. Además, se explica el proceso de validación del modelo, y los datos e indicadores que se utilizarán para determinar la calidad del modelo. Finalmente, se explica cómo se obtienen el clima de oleaje medio y extremo para los puntos de interés. Este trabajo se basa en lo realizado por Ferrer (2023).

3.2 Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a costa centro-sur de Chile, y abarca desde la latitud 34°S hasta 39°S y longitudinalmente desde 76°W hasta 72°W . Se utilizaron estas dimensiones para abarcar completamente la zona centro-sur del país y en específico el Golfo de Arauco, además permitir el uso de los espectros de oleaje obtenidos de un modelo global de oleaje como condiciones de borde para el modelo.

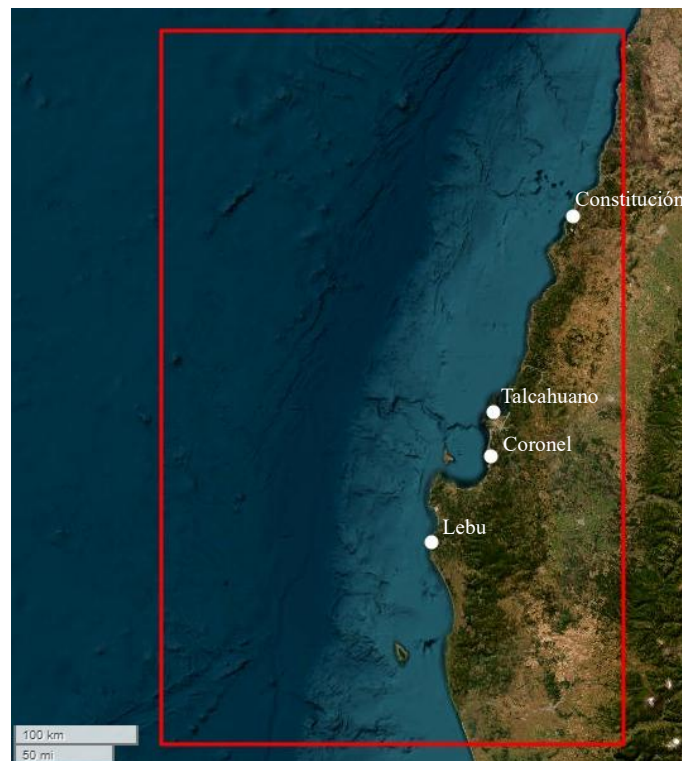


Figura 3.1. Área zona de estudio y ubicación ciudades referenciales

3.2.1 Puntos de interés en el Golfo

Para el análisis del clima de oleaje se seleccionaron 7 puntos de interés frente a localidades dentro del Golfo de Arauco que presentan las mayores concentraciones de población, incluyendo también un punto frente a la Isla Santa María. En la Figura 3.2 se muestra la distribución de los puntos seleccionados los cuales están nombrados de acuerdo con la localidad frente a la que se encuentran.

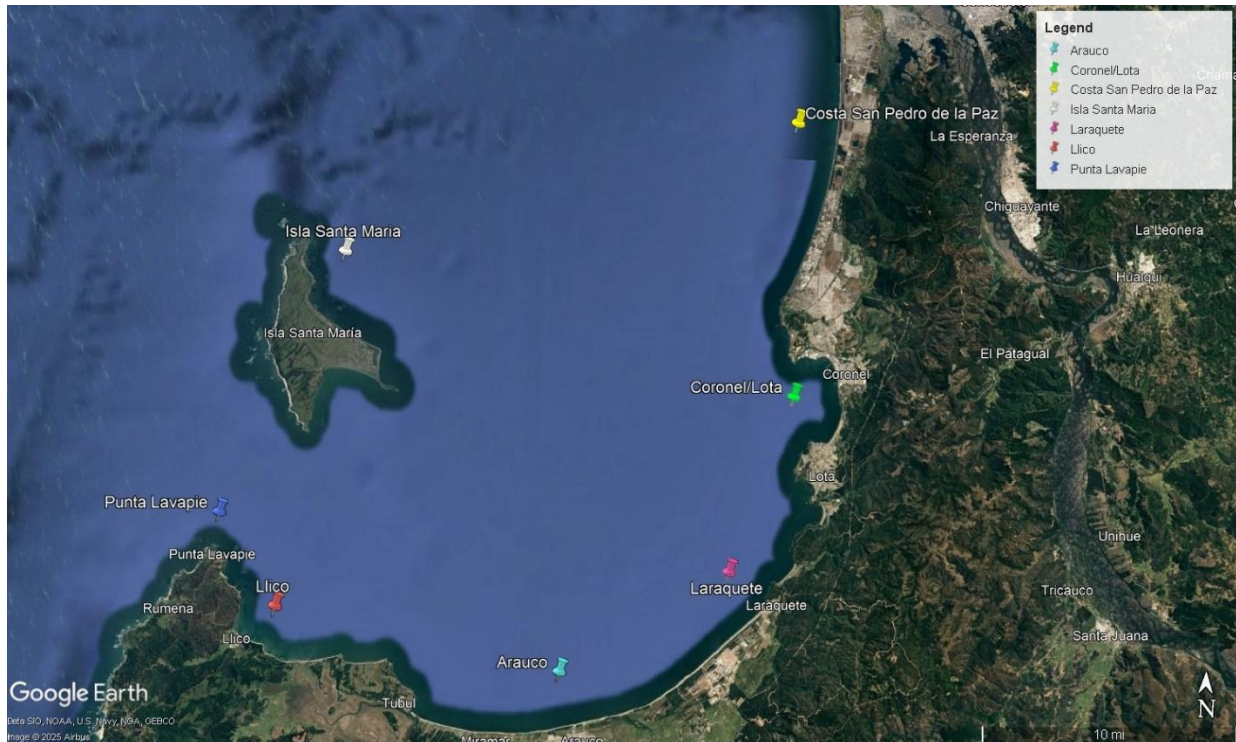


Figura 3.2. Ubicación puntos de interés para el estudio

3.3 Configuración del modelo

A continuación, se presentan la información utilizada para configurar el modelo de *Wavewatch* III y generar la información del oleaje para toda la zona de estudio

3.3.1 Batimetría

La batimetría utilizada en la modelación corresponde a la *General Bathymetric Chart of the Ocean* (GEBCO) en su versión del año 2014, la cual es de carácter global y entrega información sobre la elevación del fondo marino y tierra en metros en una grilla con intervalos de 30 segundos de arco,

aproximadamente 900 m. Y se utilizó en las mismas dimensiones de la zona de estudio. La Figura 3.3 muestra la batimetría utilizada en la simulación.

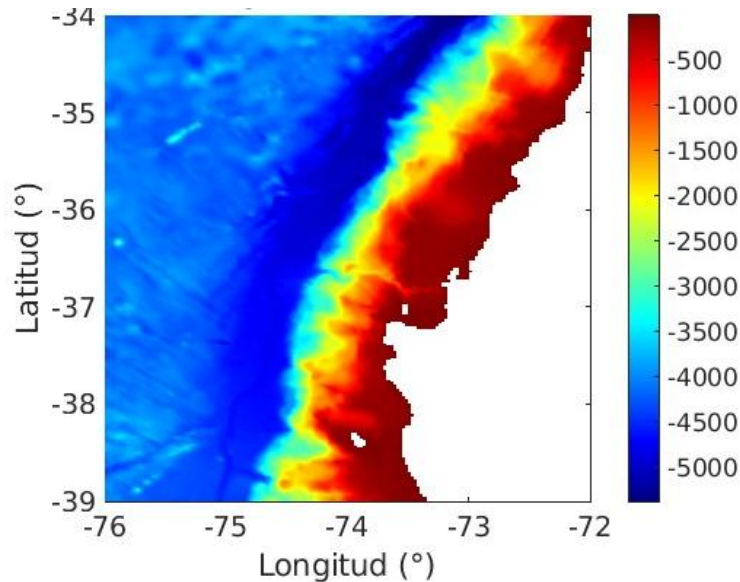


Figura 3.3. Batimetría GEBCO para la zona de estudio

3.3.2 Malla computacional

La malla fue generada a través, del código de MATLAB `ww3_gridgen`, que es parte de *Wavewatch III*. Cabe destacar que se trabajará con una malla estructurada que tiene las mismas dimensiones que la zona de estudio presentada anteriormente, la resolución de la malla es de $0.025^\circ \times 0.025^\circ$, que equivale aproximadamente a $2.8 \times 2.8 \text{ km}^2$, el resto de las características de la malla se detallan a continuación en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de la malla computacional

Característica malla computacional	Valor
Nodos eje X	161
Nodos eje Y	201
Número de puntos en grilla	32361
Número de puntos de mar	24991
Número de puntos de tierra	7161
$dx(^\circ)$	0.025
$dy(^\circ)$	0.025

3.3.3 Condición inicial

La simulación comienza con una condición inicial de reposo. Luego el modelo se reinicia cada mes utilizando como condición inicial el último paso de tiempo del mes anterior.

3.3.4 Condición de borde

En este caso se utilizan datos espectrales de oleaje retrospectivos generados por un modelo global de oleaje ya disponibles, estos espectros son propagados desde los bordes oeste, sur y norte de la zona de estudio. Los espectros fueron obtenidos desde el *Laboratory for Ocean Physics and Satellite remote sensing* (LOPS), de IFREMER, Francia.

El modelo global de oleaje se generó con WAVEWATCH III, el cual se encuentra forzado por las corrientes CMEMS-GLUBCURRENT, la máscara de icebergs ALTIBERG, la máscara de hielo SSMI y los vientos ERA5 (Hanson *et al.*, 2009), cuyos resultados se entregan en una malla global de resolución 0.5° en un espacio temporal de 31 años desde 1993 a 2023 con datos cada 1 hora. Cabe destacar que las condiciones de borde incorporan oleaje tipo *Swell*.

3.4 Simulación y series de tiempo

Se simuló la propagación del oleaje en el Golfo de Arauco en un rango temporal de 30 años, desde enero de 1994 hasta diciembre del año 2023. La simulación del oleaje en WAVEWATCH III se realizó en el *cluster Leviatán* perteneciente al Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental (Copas Coastal). Finalmente, la extracción de las series de tiempo fue realizada a través de código en MATLAB

3.5 Validación del modelo

El modelo global mencionado anteriormente se encuentra 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 generado en esta memoria se compararon los resultados obtenidos con la información de las mediciones de oleaje de la boya SHOA ubicada frente a Caleta Tumbes, ubicada en las coordenadas 36.567°S 73.338°W a 125 m de profundidad, que cuenta con datos desde

junio del año 2020 hasta noviembre del año 2024 cada 1 hora. El registro de altura significativa se muestra en la Figura 3.4.

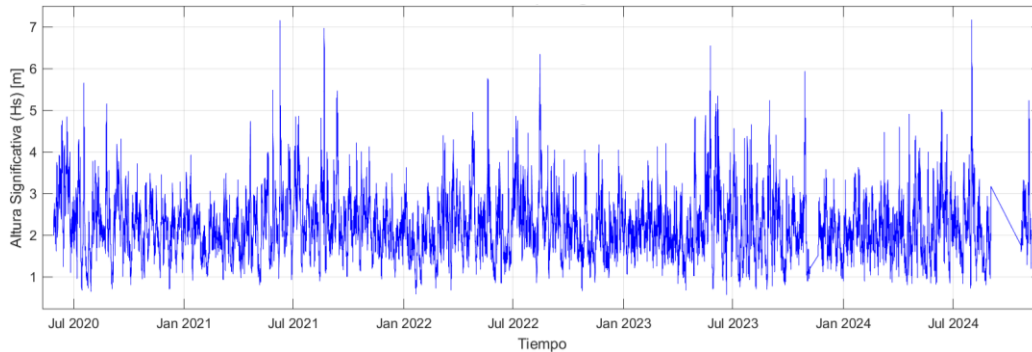


Figura 3.4. Serie de tiempo altura significativa de la boya SHOA en Talcahuano

3.5.1 Indicadores de calidad

Para la validación se utilizaron diferentes indicadores de calidad con los que se evaluaron los resultados obtenidos. Los datos de la boya tienen vacíos por lo que difiere de los datos simulados, de esta manera se realizó la comparación en los instantes de tiempo en los cuales coinciden los datos simulados y los observados.

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es un indicador de la calidad de un modelo principalmente utilizado en la hidrología. Determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos (Nash y Sutcliffe, 1970), este se obtiene de la siguiente manera:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{n=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{n=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (3.1)$$

Donde O_i corresponde a los datos observados, S_i a los datos simulados, \bar{O} al promedio de los datos observados. El valor de este indicador puede variar entre menos infinito y 1. Un valor entre 0 y 1 indica un rendimiento del modelo aceptable, mientras que valores menores a 0 indican que el promedio de los datos observados es mejor indicador que los datos simulados, lo que indica un resultado inaceptable.

El sesgo porcentual (PBIAS) es un indicador que mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados (Gupta et al., 1999), Se calcula como se muestra a continuación:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{n=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{n=1}^n O_i} \right] \cdot 100 \quad (3.2)$$

Mientras los valores sean más cercanos a 0 indican un mejor ajuste de los datos simulados con respecto a los simulados. Finalmente, la raíz del error cuadrático medio es un indicador que representa el error promedio absoluto entre los datos simulados y los observados. Se obtienen de la siguiente forma:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (3.3)$$

Un resultado cercano a 0 indica un buen ajuste y los resultados deben ser analizados tomando en cuenta la magnitud de los datos utilizados, es decir que para magnitudes grandes de datos un resultado de RMSE pequeño indica un buen ajuste, en cambio, si la magnitud de los datos es pequeña un resultado pequeño puede indicar un mal ajuste.

3.6 Clima del oleaje en puntos de interés

A partir de los puntos de interés se seleccionaron los puntos en la malla computacional más cercanos para realizar el análisis de clima de oleaje medio y extremo.

En cada uno de estos puntos se analizan los parámetros resumen del oleaje para obtener el clima medio, y extremo utilizando la metodología POT (*Peak Over Threshold*) descrita en Goda (1982). El análisis de valores extremos se realiza para la altura significativa 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.

Además, se generaron mapas de altura significativa y periodo *peak* promedio para el Golfo de Arauco.

3.7 Conclusión

En este capítulo se mostraron la zona de estudio y los puntos de interés dentro de esta para un análisis más profundo del oleaje, luego se explicó la configuración del modelo mostrando la batimetría a utilizar, las características del mallado, las condiciones iniciales y de borde para el modelo, además de las herramientas utilizadas para realizar la simulación del oleaje con *Wavewatch* III. Luego se explica que la validación del modelo se realiza considerando los datos de la boya del SHOA y los resultados se evalúan considerando tres indicadores de calidad. Finalmente, se explica cómo se obtiene el clima de oleaje en los puntos de interés determinados anteriormente.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la validación del modelo con respecto a los datos medidos por la boya perteneciente al SHOA frente a Caleta Tumbes con gráficos comparativos con las series de tiempo, gráficos de dispersión e indicadores de calidad para el modelo. Se presentan los mapas de valores promedio de los parámetros resumen del oleaje para el Golfo de Arauco y la estadística del clima medio y extremo para los puntos de interés seleccionados dentro del Golfo de Arauco.

4.2 Validación del modelo

En la Figura 4.1 se muestra gráficamente la comparación de los datos observados por la boya y los datos simulados de altura significativa. Los datos simulados se ajustan bien a los datos observados en general, existiendo excepciones donde claramente se tiende a subestimar la altura significativa de las tormentas con mayores alturas de ola.

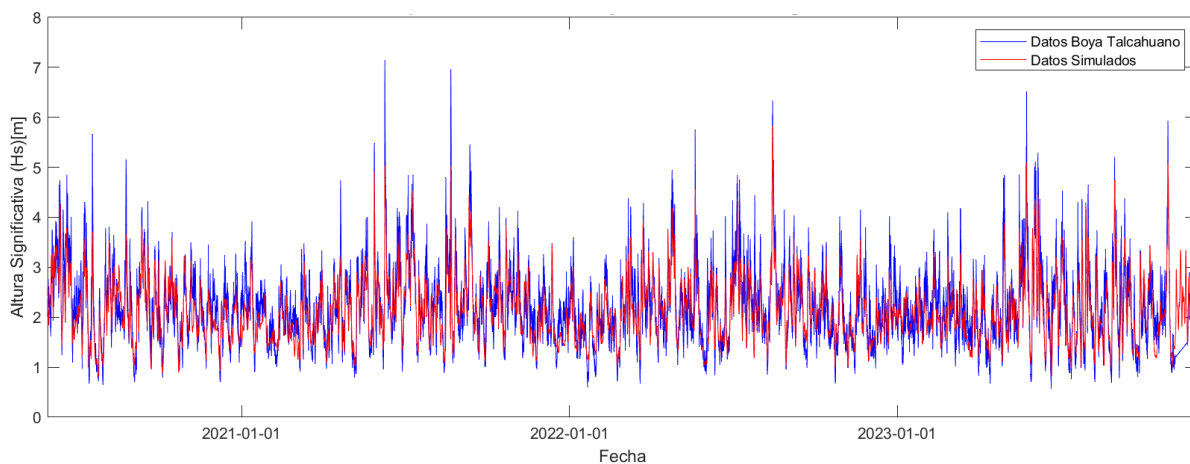


Figura 4.1. Gráfico comparativo series de tiempo simulada y observada de Altura Significativa entre junio 2020 y diciembre 2023

En la Figura 4.2 se muestra el gráfico de dispersión de los datos presentados en la Figura 4.1 donde se aprecia con mayor claridad la correlación existente entre los datos y la subestimación de los datos de la boya donde existen mayores alturas significativas.

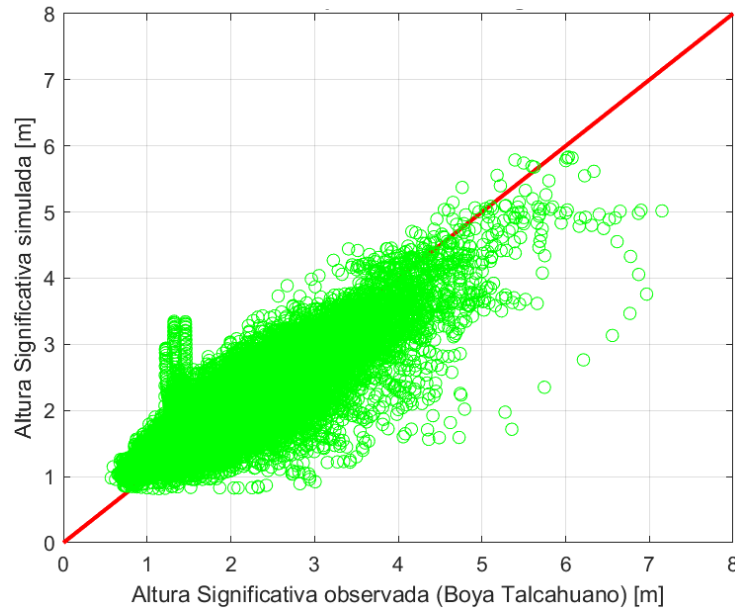


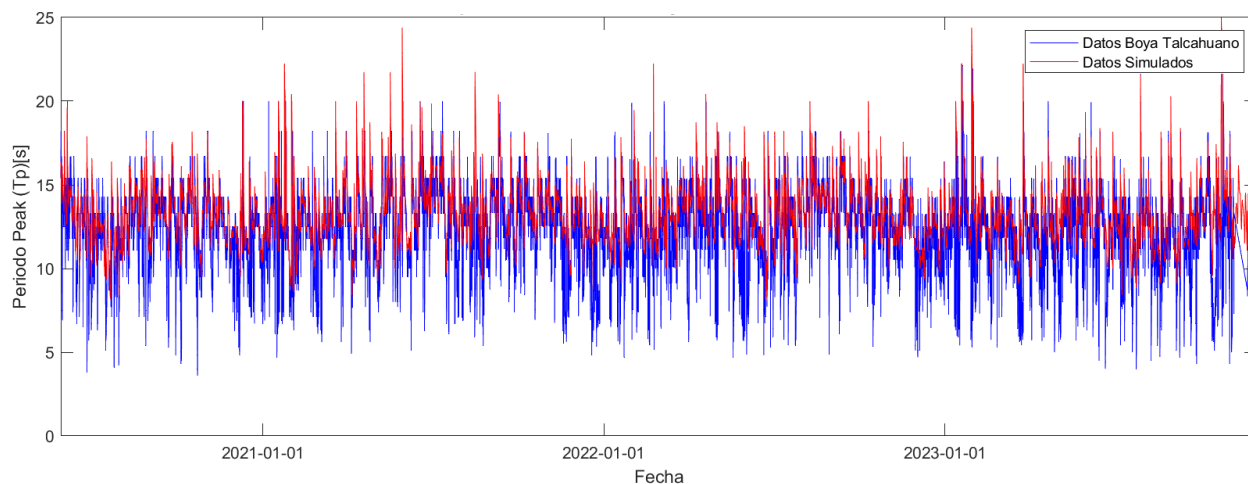
Figura 4.2. Gráfico de dispersión de Altura Significativa entre junio 2020 y diciembre 2023

Para evaluar el desempeño del modelo se presentan los indicadores de calidad para la serie de tiempo de altura significativa en la Tabla 4.1. De acuerdo con los valores que se obtuvieron se puede concluir que el ajuste para la altura significativa es aceptable, con la subestimación de los datos simulados.

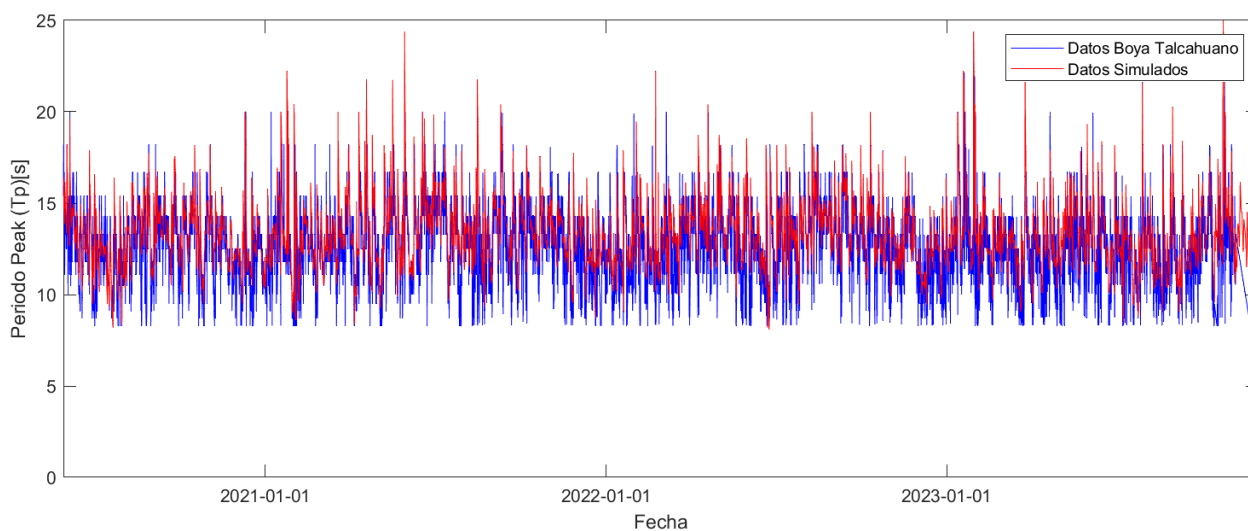
Tabla 4.1. Indicadores de calidad del ajuste de la altura significativa (Hs)

Indicador	Valor
NSE	0.7
PBIAS	3.2 %
RMSE	0.4 m

En la Figura 4.3 (a) que corresponde a la comparación gráfica del periodo *peak* simulado y el observado, en este se aprecia el buen ajuste en el rango entre 10 y 15 segundos, y entre los 5 y 10 segundos el modelo no fue capaz de generar información ya que este rango de periodo corresponde al oleaje tipo *Wind Sea* y la simulación se realizó sin información del viento local, debido a esto se generó la comparación de los datos simulados y observados con valores mayores a 8 segundos de periodo para evaluar el ajuste teniendo en cuenta que no se simuló con viento local, esto se muestra en la Figura 4.3 (b).



(a)



(b)

Figura 4.3. Gráfico comparativo series de tiempo simulada y observada de Periodo peak entre junio 2020 y diciembre 2023 donde (a) corresponde al registro completo y (b) a los valores de periodo mayor que 8

Para ver esto de manera más clara, en la Figura 4.4 se muestra la dispersión de los datos simulados y observados donde se muestra la tendencia a sobrestimar los datos observados del registro completo.

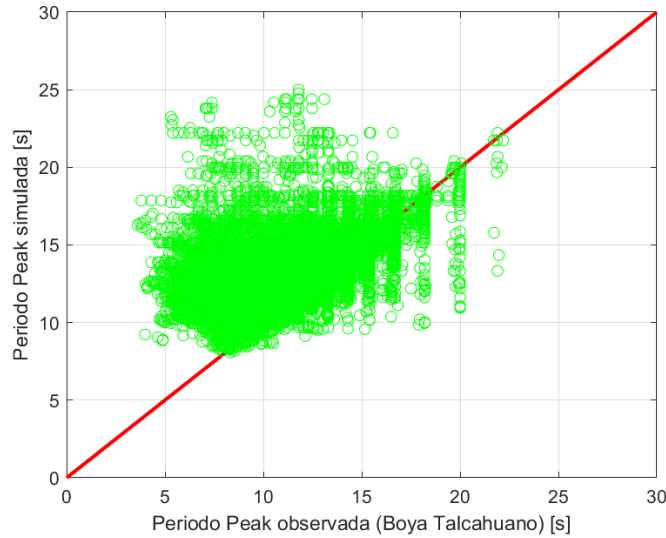


Figura 4.4. Gráfico de dispersión de Periodo peak entre junio 2020 y diciembre 2023

Finalmente, para evaluar el rendimiento del modelo en estimar el periodo *peak* se muestran los indicadores de calidad en la Tabla 4.2 con los que se puede determinar un ajuste aceptable del modelo en simular los datos en los dos casos presentados en la Figura 4.3, pero se aprecia una mejora significativa del ajuste al considerar solamente los instantes de tiempo cuando el periodo *peak* es superior a 8 segundos.

Tabla 4.2. Indicadores de calidad del ajuste del periodo peak (Tp)

Indicador	Valor	Sin $T_p \leq 8$
NSE	0.01	0.2
PBIAS	-7.8 %	-5.1%
RMSE	2.4 s	1.9 s

La comparación gráfica de las series de dirección *peak* simulada y observada se muestran en la Figura 4.5, en ésta los datos simulados presentan una clara discrepancia de los observados por la boya durante los meses de invierno, no así durante el resto del periodo simulado en el cual se aprecia que tiende a representar de buena manera los datos observados.

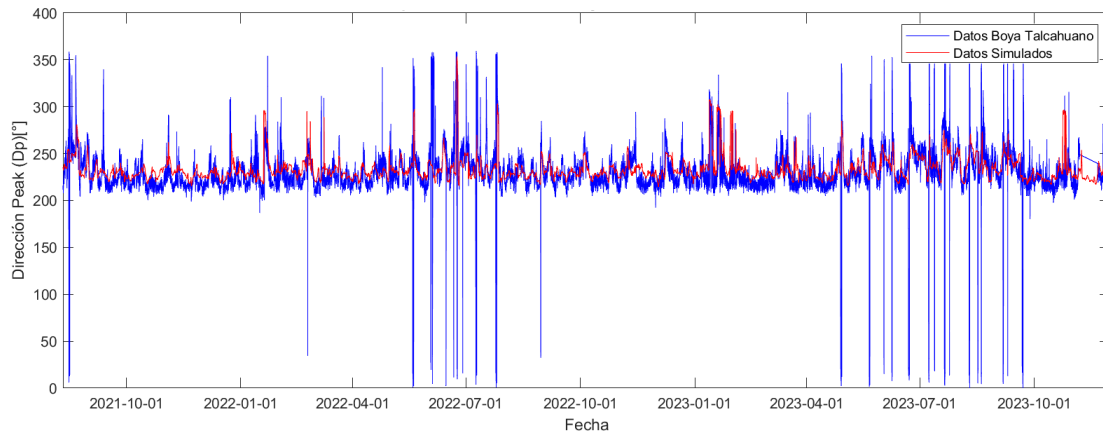


Figura 4.5. Gráfico comparativo series de tiempo simulada y observada de Dirección Peak entre junio 2020 y diciembre 2023

En la Figura 4.6 que muestra el gráfico de dispersión de los datos, muestra con mayor claridad la sobrestimación de los datos simulados sobre los valores mínimos de los datos observados y la subestimación de los datos simulados sobre los valores máximos de los datos observados en los periodos de invierno. Además, se aprecia la existencia de la linealidad entre los datos simulados y observados en el rango de los 210 a 280 grados.

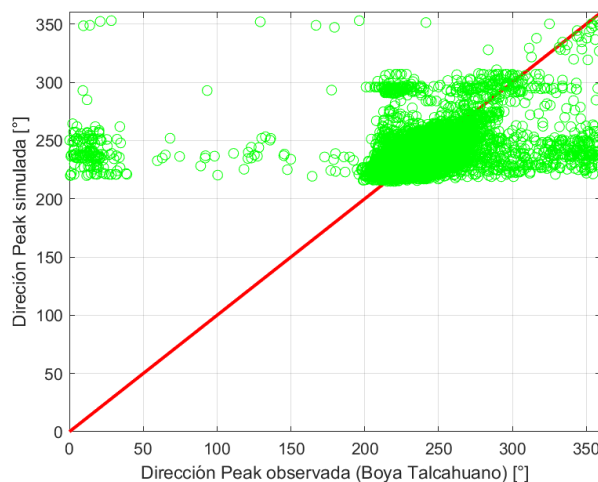


Figura 4.6. Gráfico de dispersión de Dirección Peak entre junio 2020 y diciembre 2023

Para la simulación de los datos de dirección *peak* se obtuvieron los siguientes indicadores de calidad del modelo que se muestran en la Tabla 4.3, como se menciona anteriormente no existe una buena estimación de los valores mínimos y máximos durante los meses de invierno, a pesar de esto el modelo logra un

ajuste aceptable, el RMSE es alto debido a las diferencias de los datos simulados y observados durante los meses de invierno.

Tabla 4.3. Indicadores de calidad del ajuste de la dirección peak (Dp)

Indicador	Valor
NSE	0.1
PBIAS	1.4%
RMSE	27.3°

4.3 Clima de oleaje en el Golfo de Arauco

Se obtuvieron mapas de valores promedio de la altura significativa y periodo *peak* y la correspondiente dirección media promedio utilizando las series de tiempo de 30 años de duración. Los mapas se muestran en la Figura 4.7, donde las flechas representan la dirección media promedio del oleaje. En estas figuras se aprecia cómo el oleaje se refracta y disipa dentro del Golfo de Arauco. Se destaca el rol que cumple la Isla Santa María refractando el oleaje y dando mayor protección al Golfo al disminuir significativamente la altura del oleaje que llega desde aguas profundas, si no existiera la Isla el oleaje llegaría a la costa apenas modificando sus características.

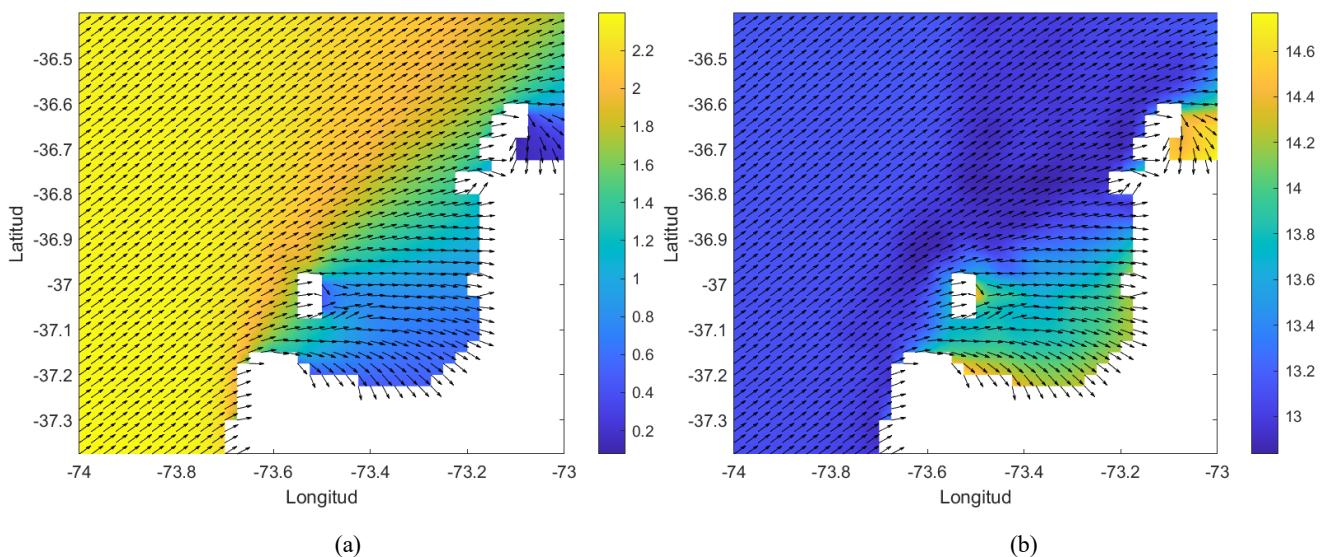


Figura 4.7. Mapas de valores promedio de (a) Altura Significativa y Dirección Media y (b) Periodo Peak y Dirección Media

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada punto de interés dentro del Golfo de Arauco, en cada uno de ellos se entrega la estadística del clima de oleaje medio y extremo.

4.3.1 Costa de San Pedro de la Paz

Para el nodo de la costa de San Pedro de la Paz se obtuvo la estadística de clima medio de oleaje que se muestra en la Figura 4.8. En la Figura se destaca que la moda de las alturas significativas está entre 0.6 m y 1 metro, y el valor promedio de las alturas significativas es de 1.1 metros. El histograma del periodo *peak* tiene la moda entre los 13 y los 14 segundos y su valor promedio es de 13.9 segundos, y los valores promedio de la dirección media y *peak* son 270° y 272° respectivamente, con la moda entre 264 y 269 grados, indicando un oleaje que proviene principalmente desde el Oeste.

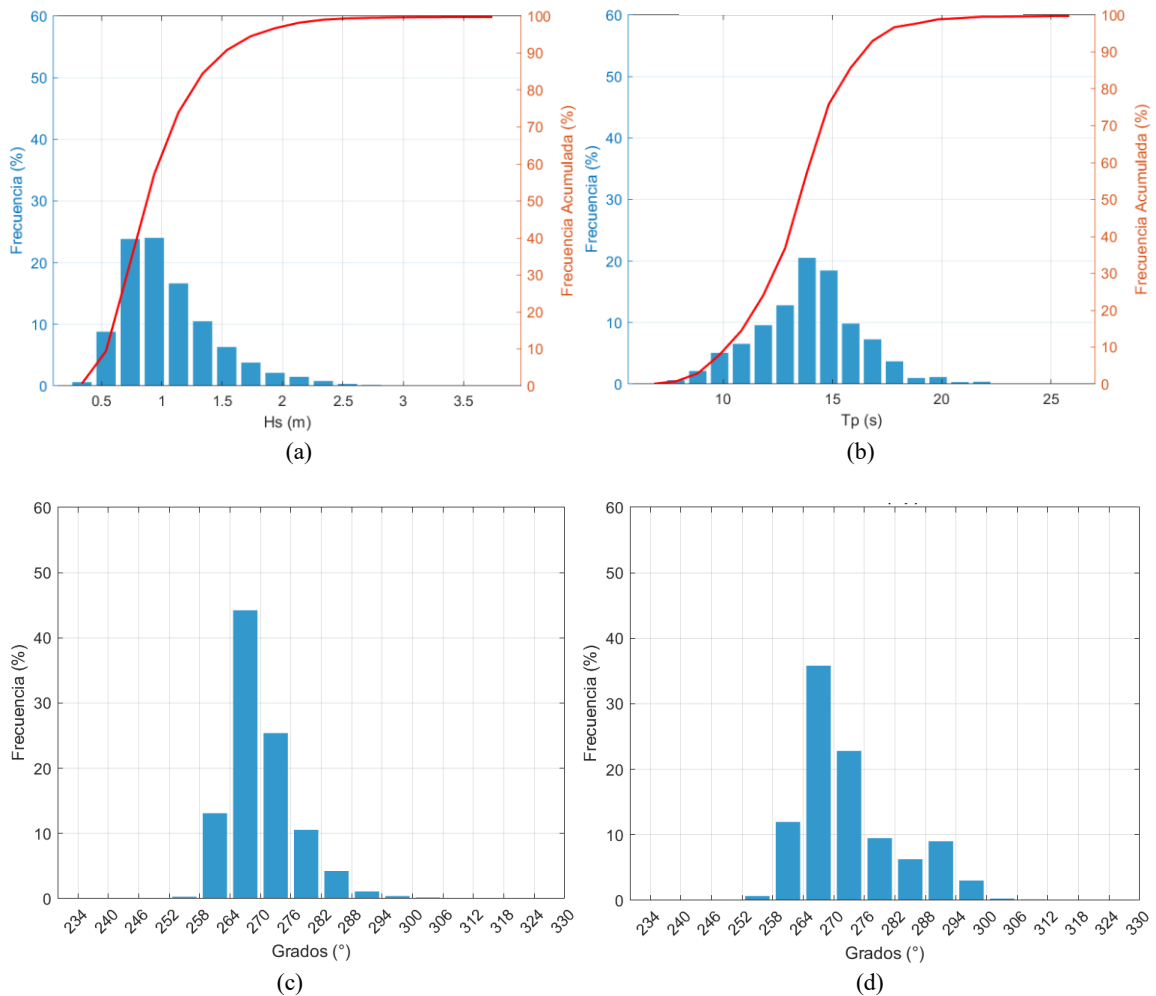
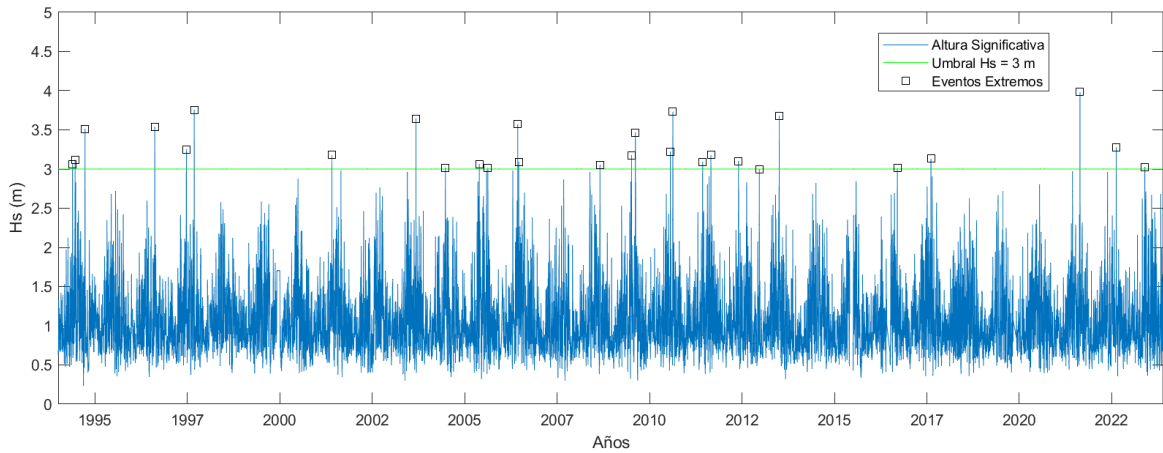
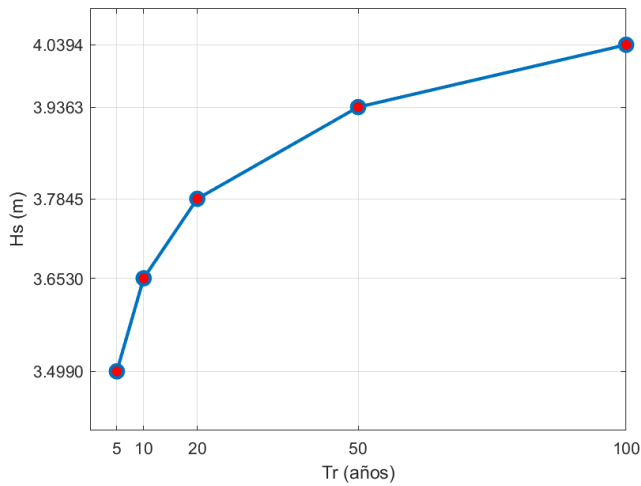


Figura 4.8. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para el nodo de la costa de San Pedro de la Paz.

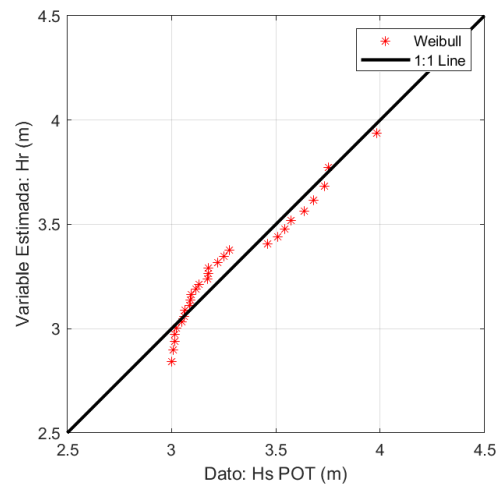
En la Figura 4.9 se muestra la estadística del clima extremo para el nodo de la costa de San Pedro de la Paz. Fijando un umbral de 3 m, con una separación temporal de 4 días se encontraron 29 eventos extremos en los 30 años de los cuales el 64% ocurre en invierno, le sigue los meses de otoño con un 18%, un 14% en primavera, y un 4% en verano. La altura significativa de 100 años de periodo de retorno llega a los 4 m.



(a)



(b)



(c)

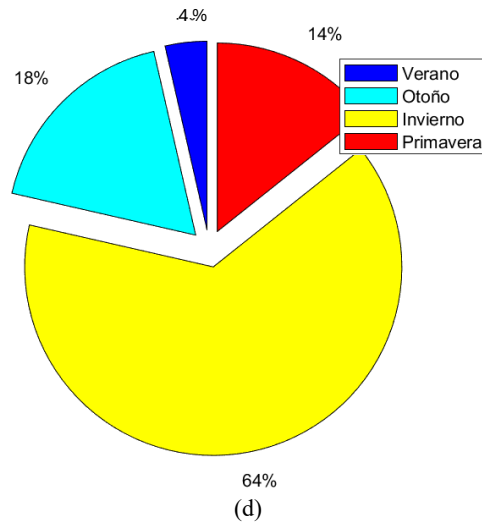
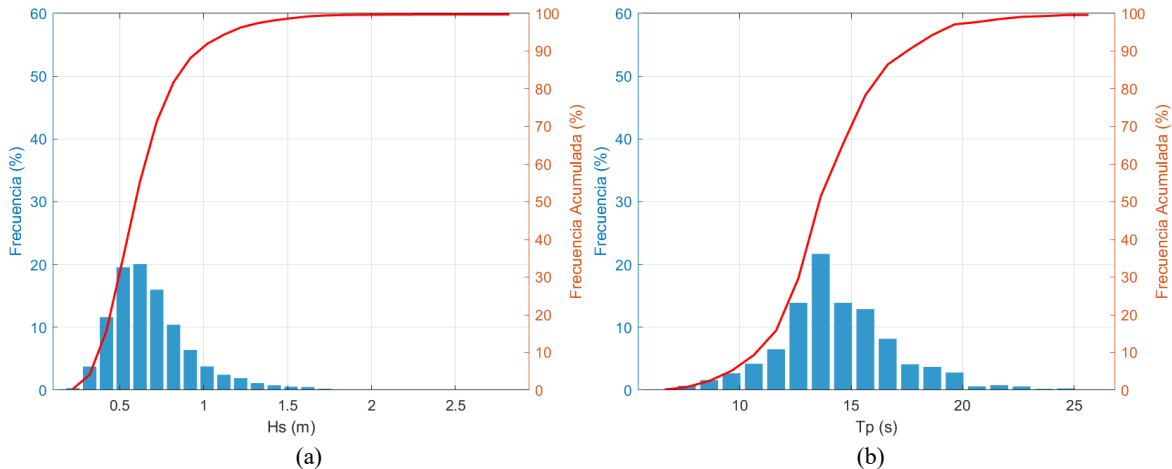


Figura 4.9. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de la costa de San Pedro de la Paz

4.3.2 Coronel/Lota

Para el nodo de Coronel/Lota se obtuvo la estadística de clima medio de oleaje que se muestra en la Figura 4.10. En la Figura se destaca que la moda de las alturas significativas está entre 0.5 m y 0.7 metros, y el valor promedio de las alturas significativas es de 0.7 metros. El histograma del periodo *peak* tiene la moda entre los 13 y los 15 segundos y su valor promedio es de 14.4 segundos, y los valores promedio de la dirección media y *peak* son 276° y 278° respectivamente, con la moda entre 270° y 275° grados, indicando un oleaje que proviene principalmente desde el Este



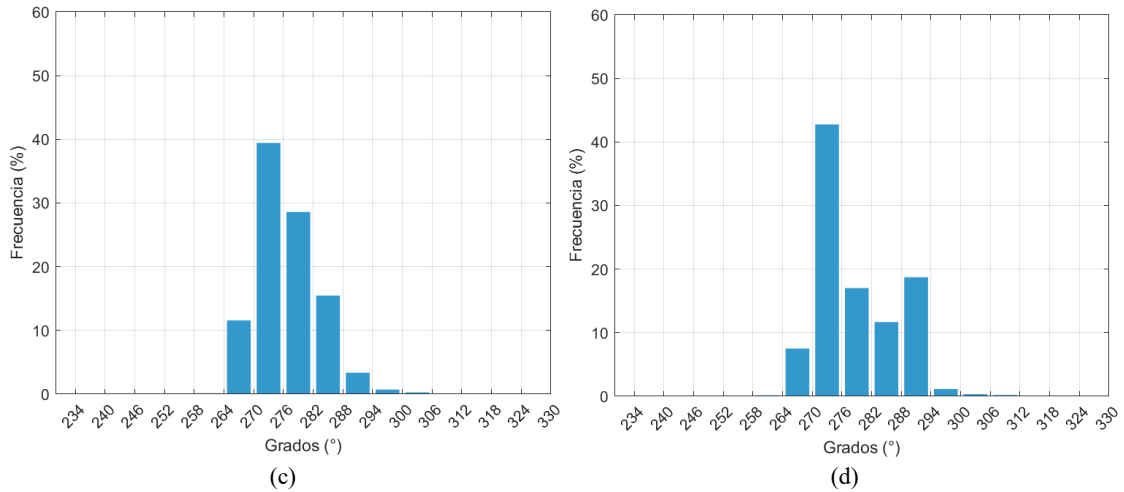
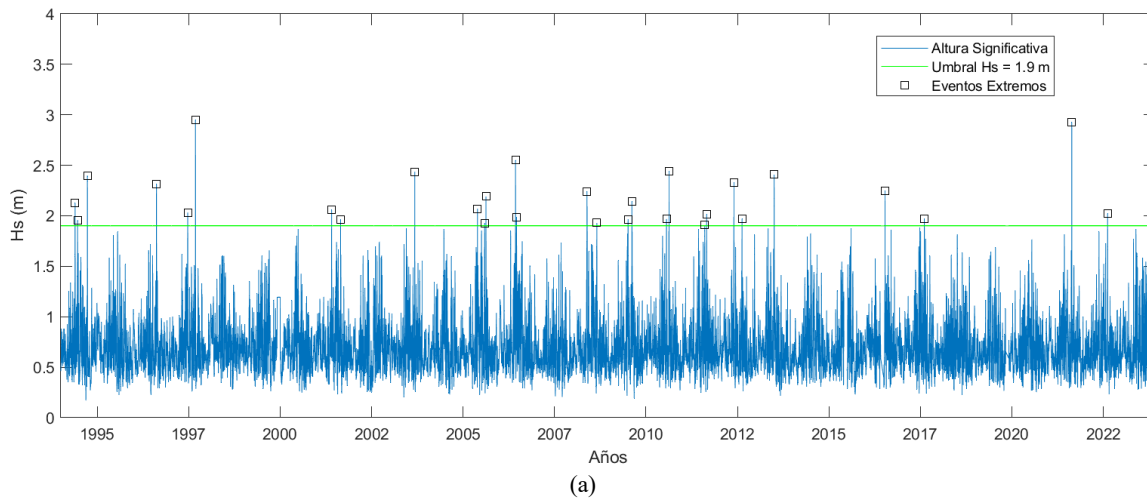


Figura 4.10. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Coronel/Lota

En la Figura 4.11 se muestra la estadística del clima extremo para el nodo de Coronel/Lota. Fijando un umbral de 1.9 m, con una separación temporal de 4 días se encontraron 29 eventos extremos en los 30 años de los cuales el 72% ocurre en invierno, le sigue los meses de otoño con un 17%, un 10% en primavera, y sin eventos en verano. La altura significativa de 100 años de periodo de retorno llega a los 3 m.



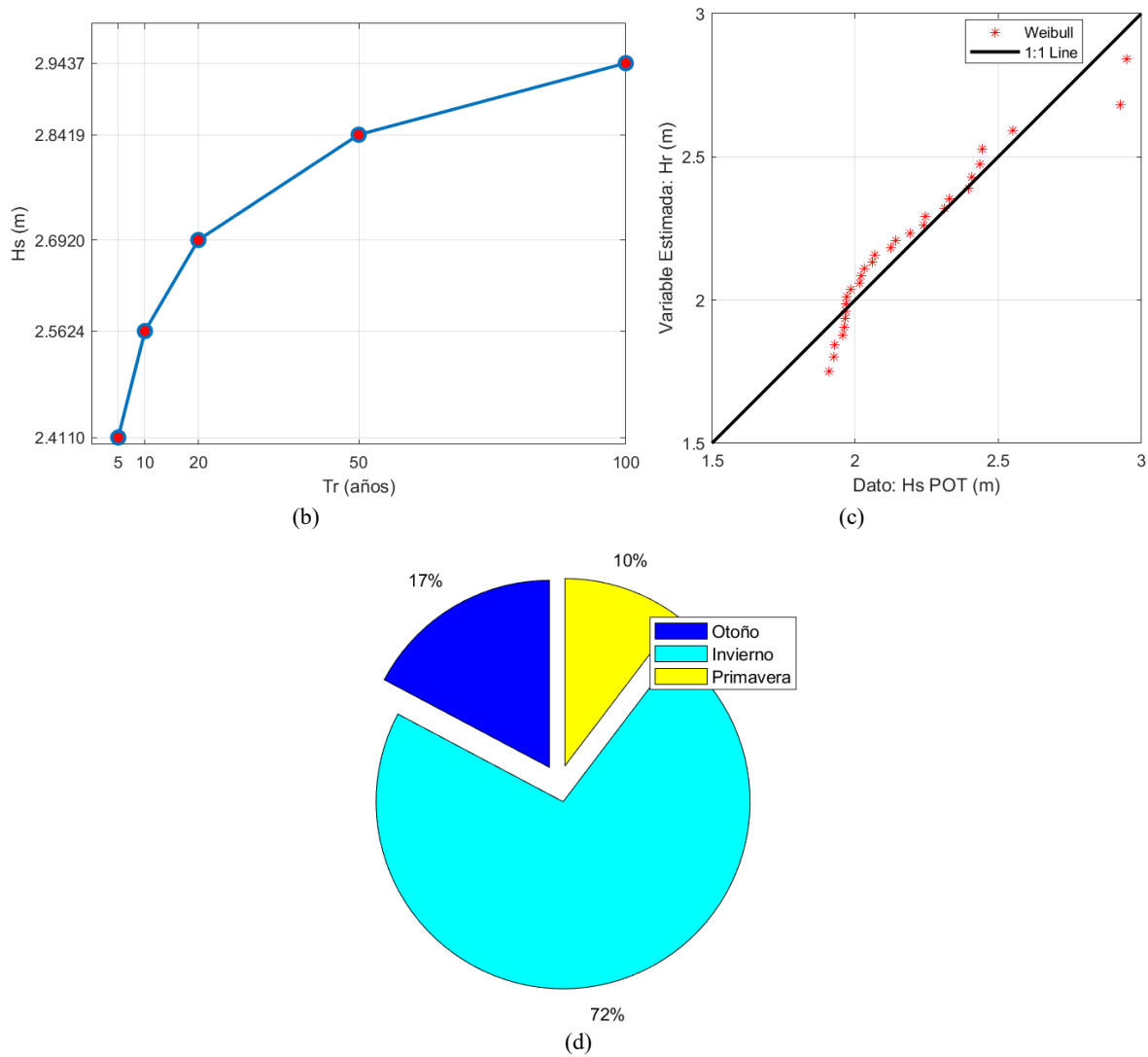


Figura 4.11. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para el nodo de Coronel /Lota

4.3.3 Laraquete

Para el nodo de Laraquete se obtuvo la estadística de clima medio de oleaje que se muestra en la Figura 4.12. En la Figura se destaca que la moda de las alturas significativas está entre 0.4 m y 0.5 metros, y el valor promedio de las alturas significativas es de 0.6 metros. El histograma del periodo *peak* tiene la moda entre los 12 y los 14 segundos y su valor promedio es de 14.3 segundos, y los valores promedio

de la dirección media y *peak* son 303° y 305° respectivamente, con la moda entre 300 y 305 grados, indicando un oleaje que proviene principalmente desde el Noreste.

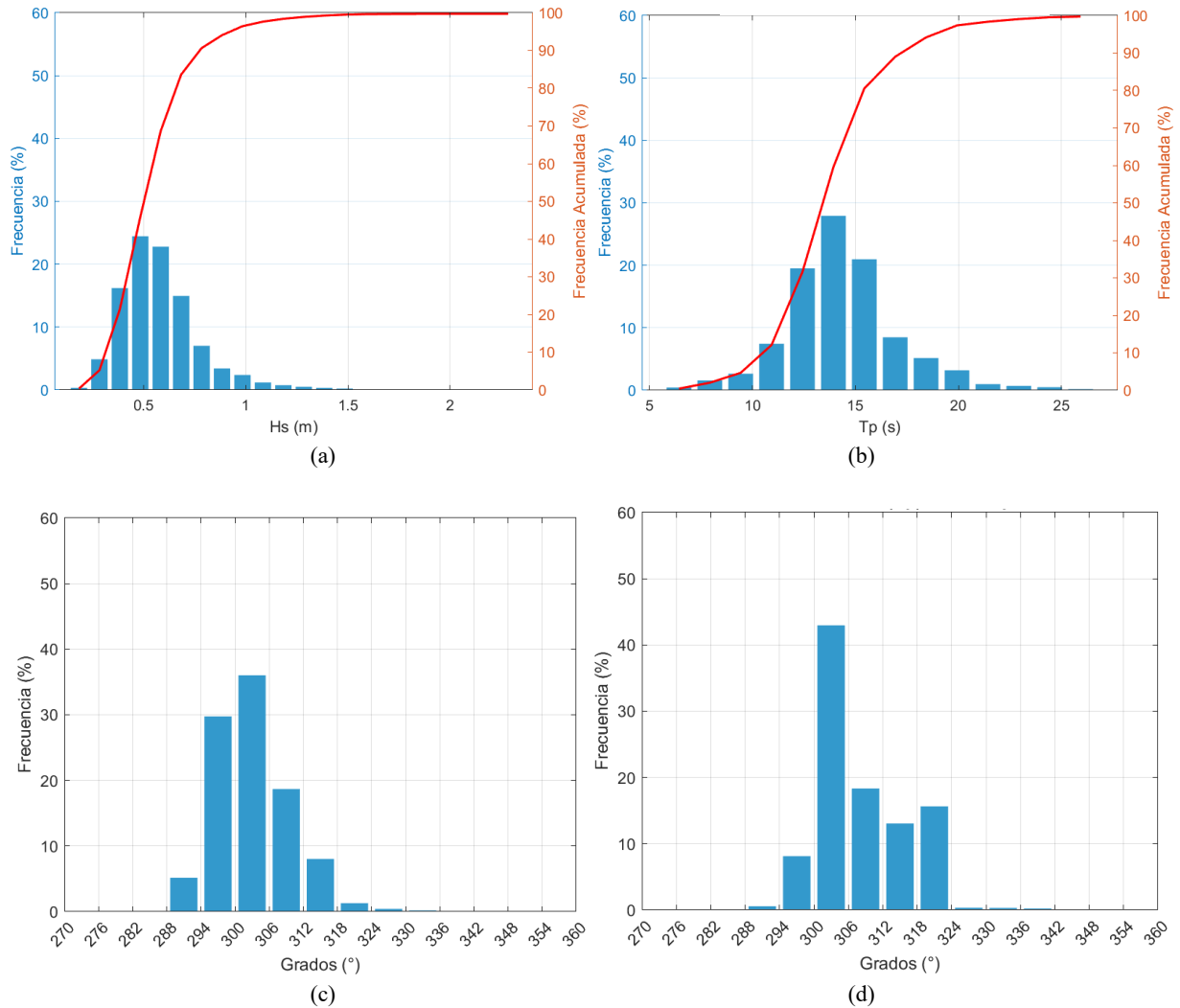


Figura 4.12. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Laraquete

En la Figura 4.13 se muestra la estadística del clima extremo para el nodo de Laraquete. Fijando un umbral de 1.55 m, con una separación temporal de 4 días se encontraron 34 eventos extremos en los 30 años de los cuales el 69% ocurre en invierno, le sigue los meses de otoño con un 22%, un 8% en primavera, y sin eventos en verano. La altura significativa de 100 años de periodo de retorno llega a los 2.4 m.

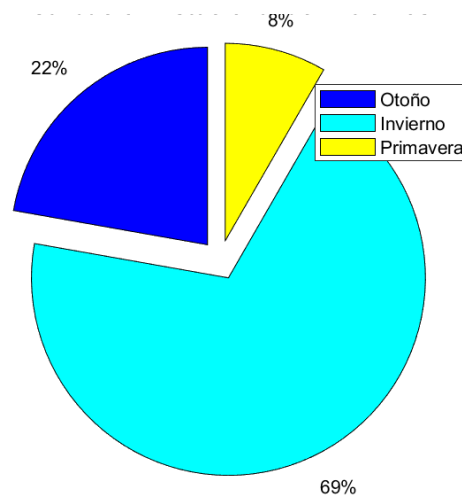
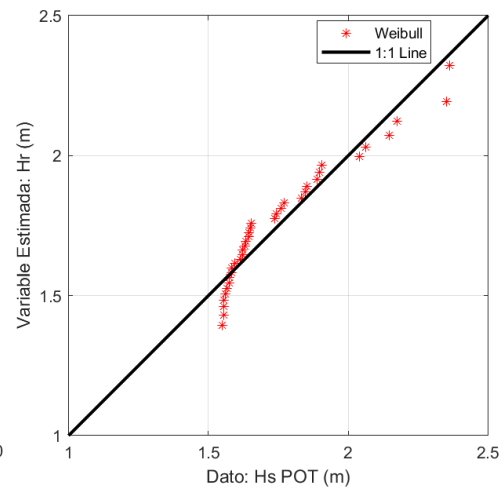
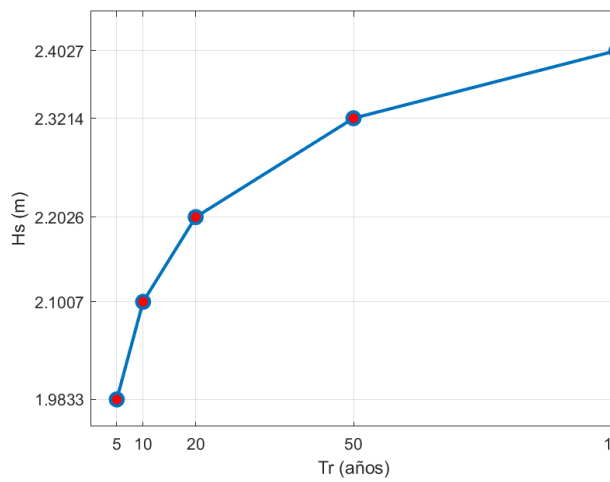
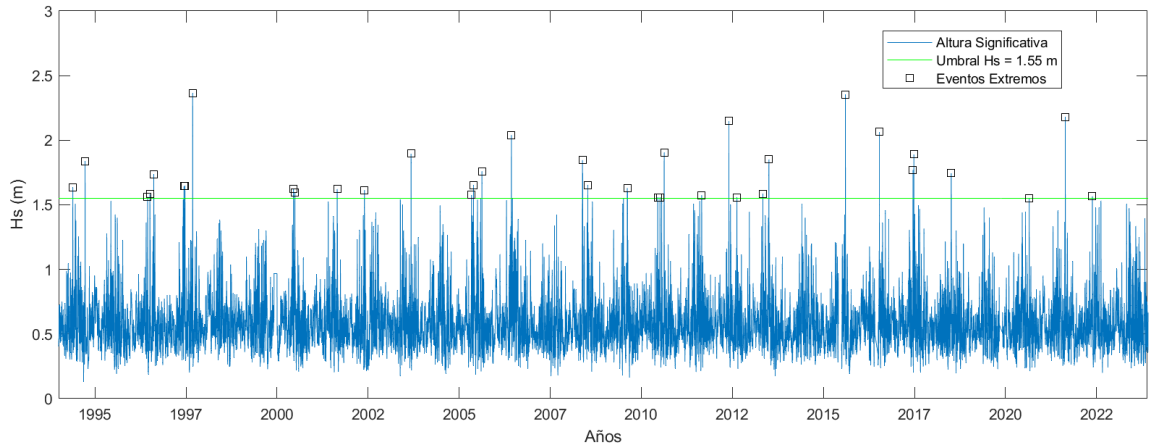


Figura 4.13. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Laraquete

4.3.4 Arauco

Para el nodo de Arauco se obtuvo la estadística de clima medio de oleaje que se muestra en la Figura 4.14. En la Figura se destaca que la moda de las alturas significativas está entre 0.4 m y 0.5 metros, y el valor promedio de las alturas significativas es de 0.49 metros. El histograma del periodo *peak* tiene la moda entre los 12 y los 14 segundos y su valor promedio es de 14.4 segundos, y los valores promedio de la dirección media y *peak* son 322 ° y 325 ° respectivamente, con la moda entre 320 y 325 grados, indicando un oleaje que proviene principalmente desde el Noreste.

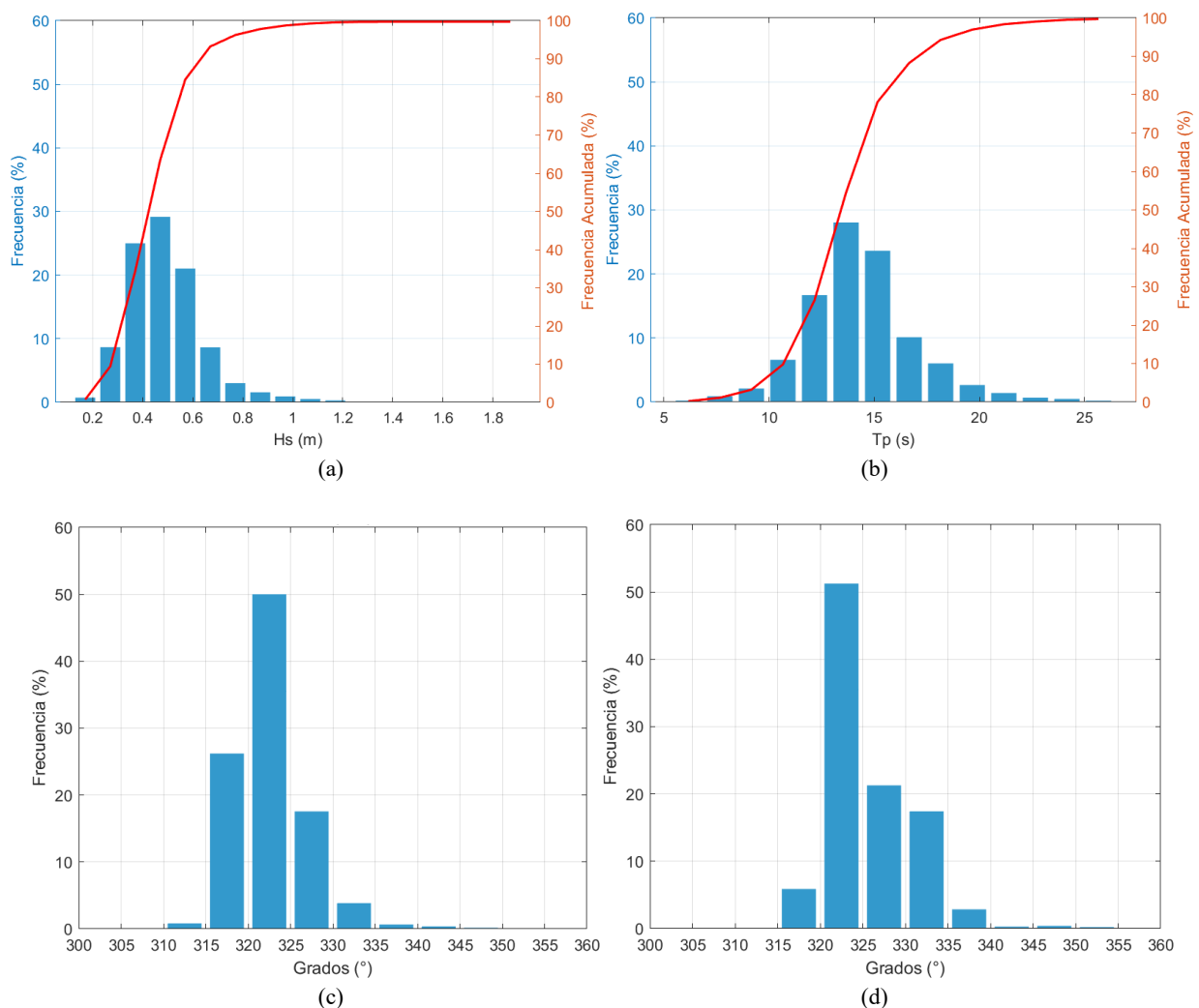
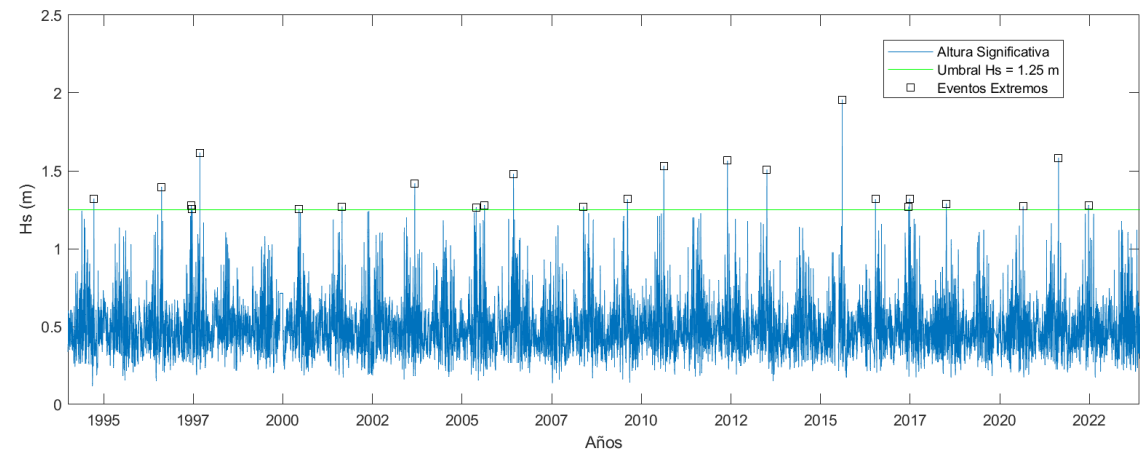
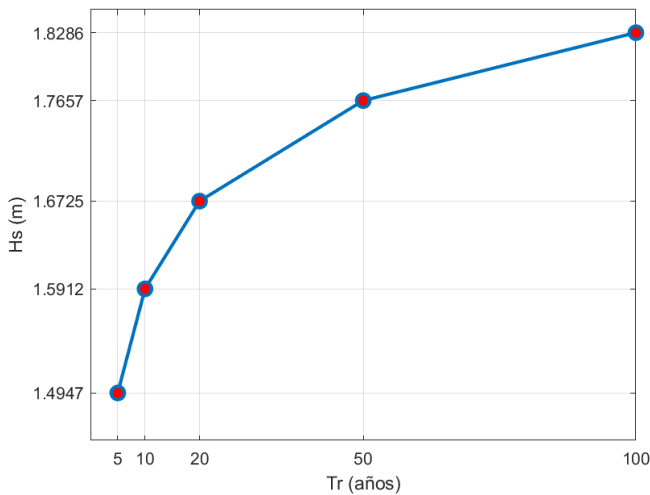


Figura 4.14. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Arauco

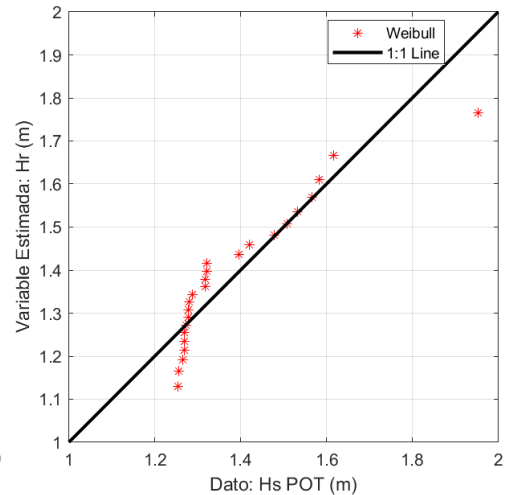
En la Figura 4.15 se muestra la estadística del clima extremo para el nodo de Arauco. Fijando un umbral de 1.25 m, con una separación temporal de 4 días se encontraron 24 eventos extremos en los 30 años de los cuales el 75% ocurre en invierno, le sigue los meses de otoño con un 12%, un 12% en primavera, y sin eventos en verano. La altura significativa de 100 años de periodo de retorno llega a los 1.8 m.



(a)



(b)



(c)

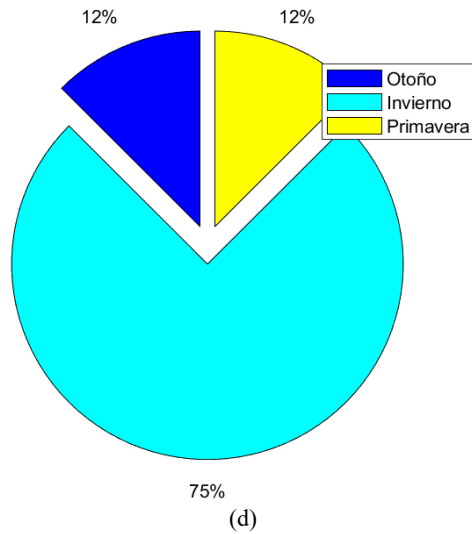
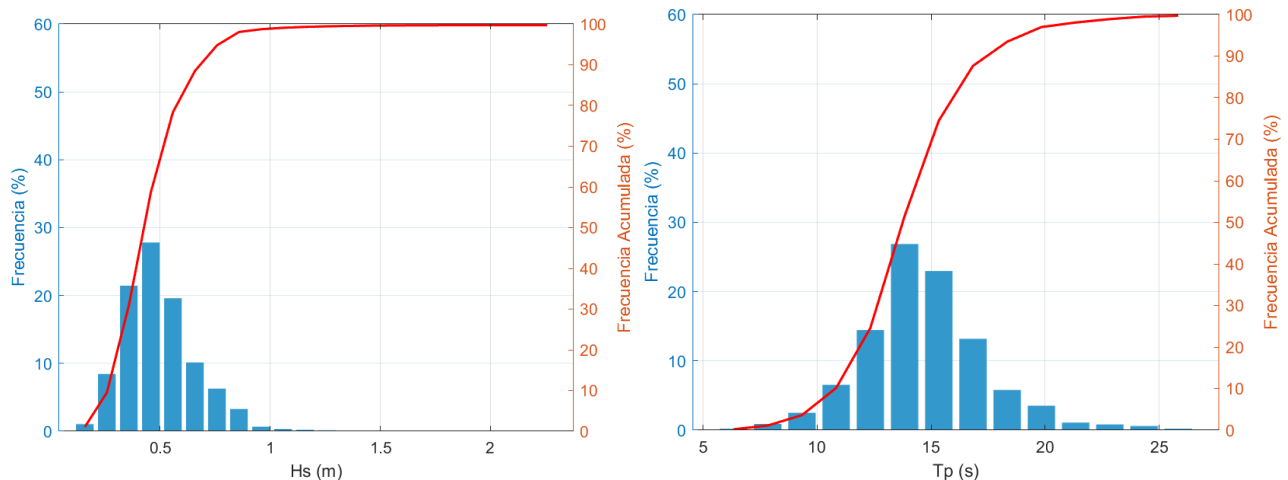


Figura 4.15. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Arauco

4.3.5 Llico

Para el nodo de Llico se obtuvo la estadística de clima medio de oleaje que se muestra en la Figura 4.16. En la Figura se destaca que la moda de las alturas significativas está entre 0.3 m y 0.5 metros, y el valor promedio de las alturas significativas es de 0.5 metros. El histograma del periodo *peak* tiene la moda entre los 12 y los 14 segundos y su valor promedio es de 14.6 segundos, y los valores promedio de la dirección media y *peak* son 320° y 323° respectivamente, con la moda entre 315 y 322 grados, indicando un oleaje que proviene principalmente desde el Noreste.



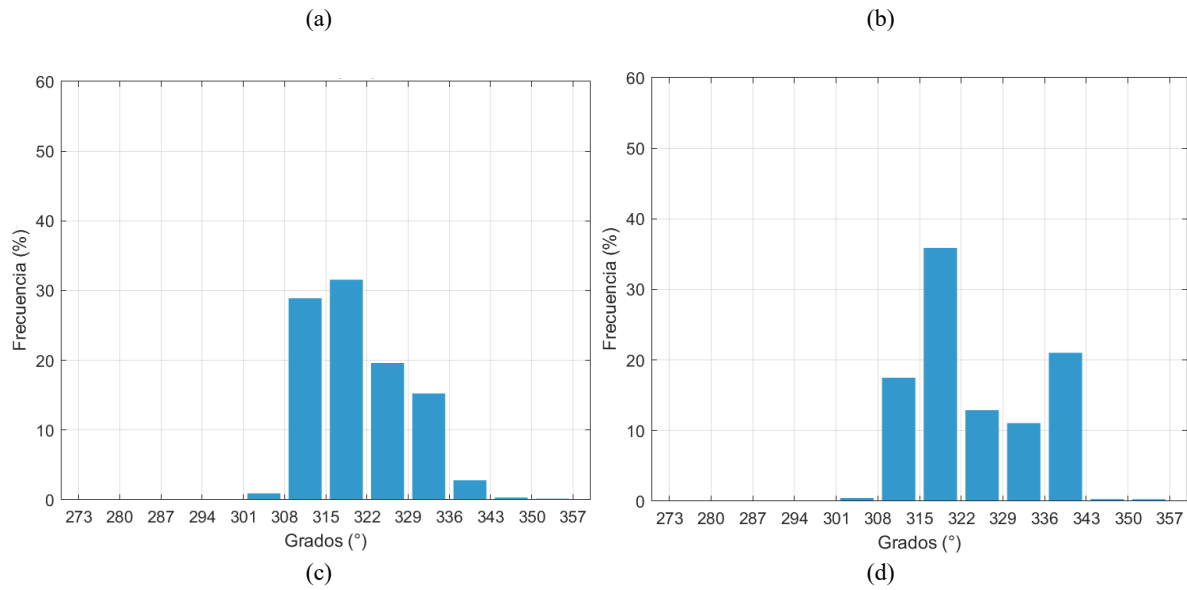
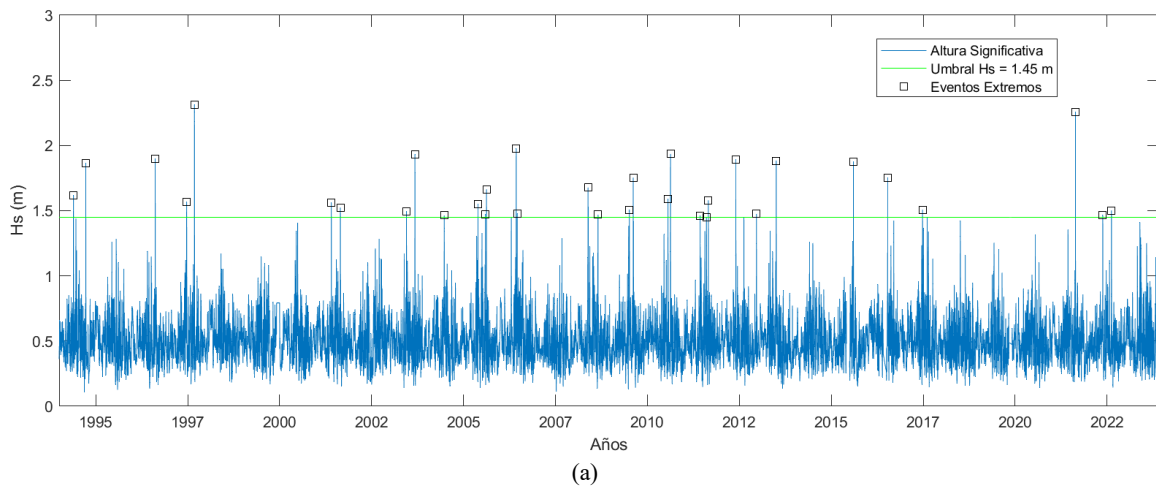


Figura 4.16. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Lico

En la Figura 4.17 se muestra la estadística del clima extremo para el nodo de Lico. Fijando un umbral de 1.45 m, con una separación temporal de 4 días se encontraron 33 eventos extremos en los 30 años de los cuales el 70% ocurre en invierno, le sigue los meses de otoño con un 18%, un 9% en primavera, y un 4% en verano. La altura significativa de 100 años de periodo de retorno llega a los 2.3 m.



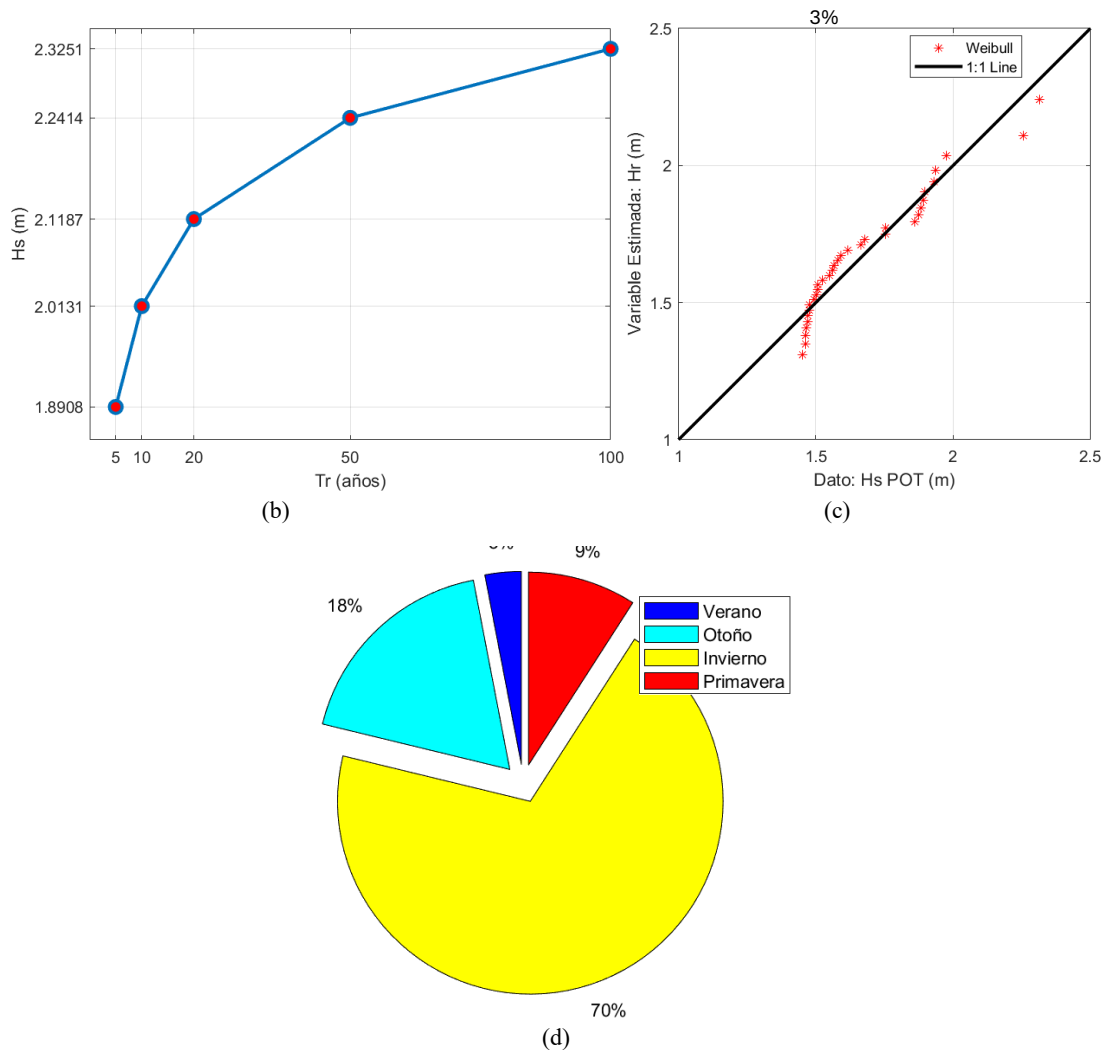


Figura 4.17. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Llico

4.3.6 Punta Lavapie

Para el nodo de Punta Lavapie se obtuvo la estadística de clima medio de oleaje que se muestra en la Figura 4.18. En la Figura se destaca que la moda de las alturas significativas está entre 1.2 m y 1.5 metros, y el valor promedio de las alturas significativas es de 1.5 metros. El histograma del periodo *peak* tiene la moda entre los 13 y los 14 segundos y su valor promedio es de 13.8 segundos, y los valores promedio de la dirección media y *peak* son 267° y 270° respectivamente, con la moda entre 260 y 265 grados, indicando un oleaje que proviene principalmente desde el Noreste.

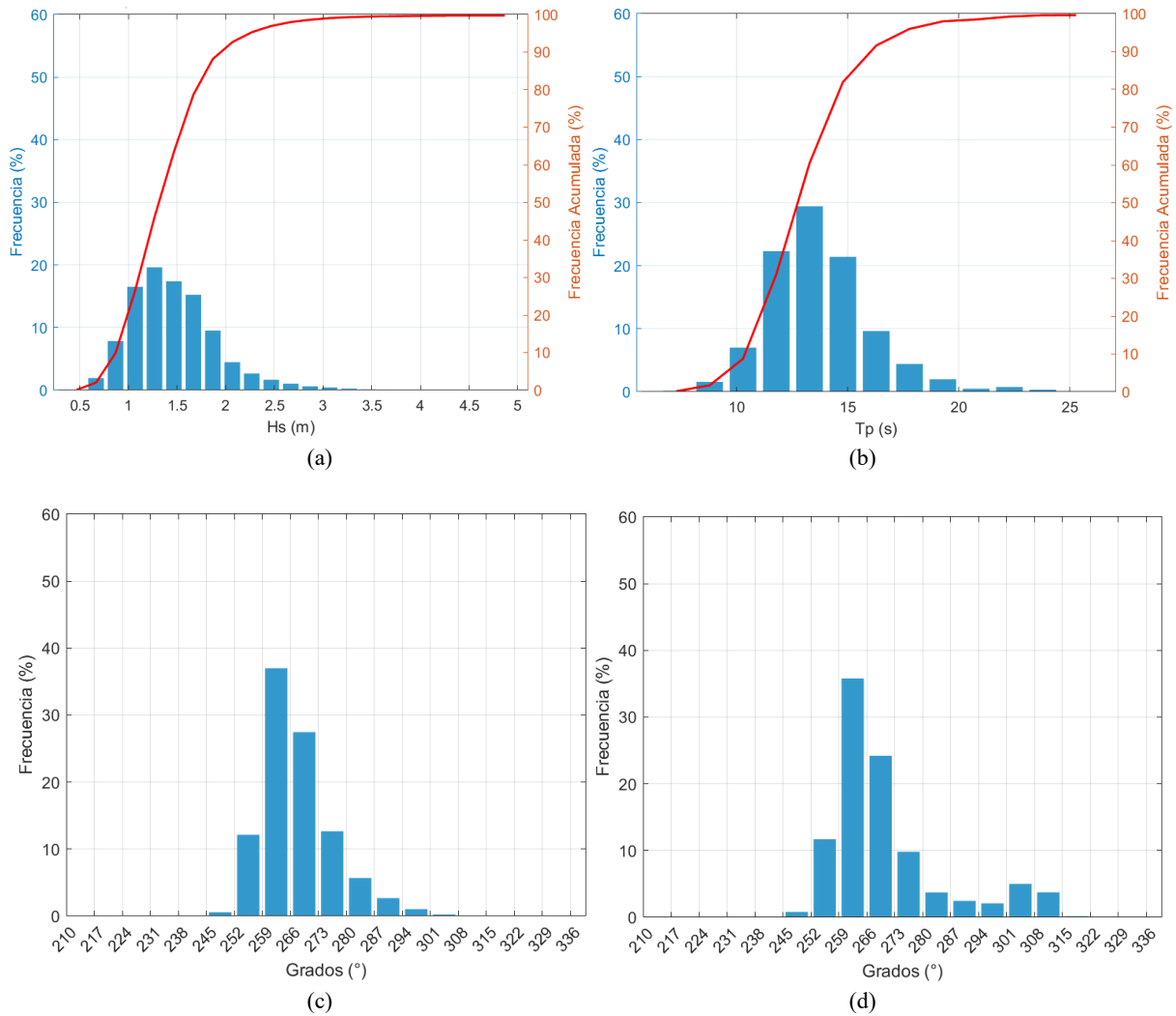
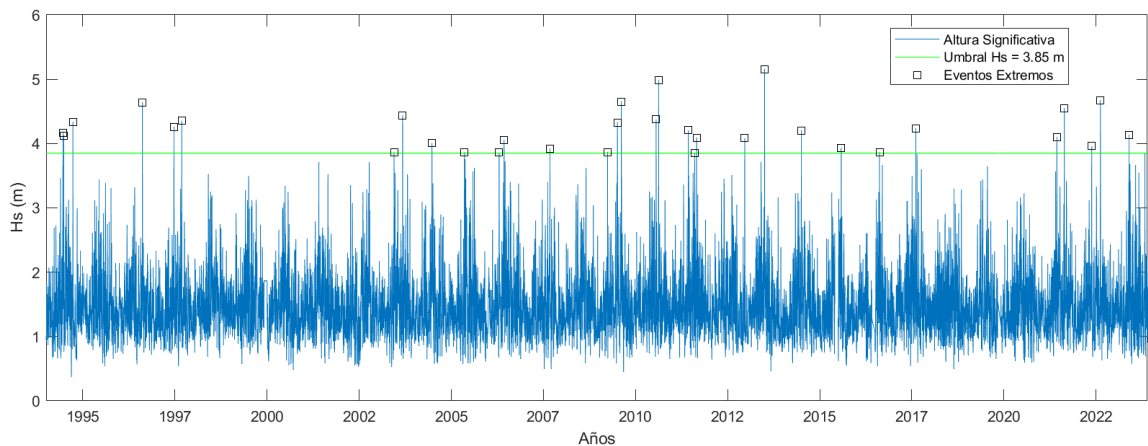
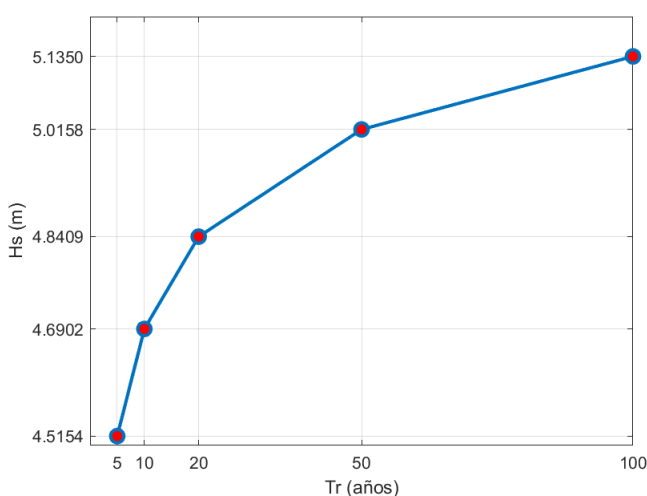


Figura 4.18. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Punta Lavapie

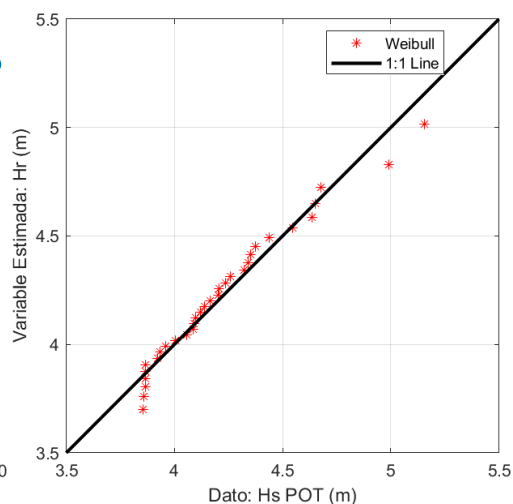
En la Figura 4.19 se muestra la estadística del clima extremo para el nodo de Punta Lavapie. Fijando un umbral de 3.85 m, con una separación temporal de 4 días se encontraron 32 eventos extremos en los 30 años de los cuales el 69% ocurre en invierno, le sigue los meses de otoño con un 16%, un 12% en primavera, y un 3% en verano. La altura significativa de 100 años de periodo de retorno llega a los 5.1 m.



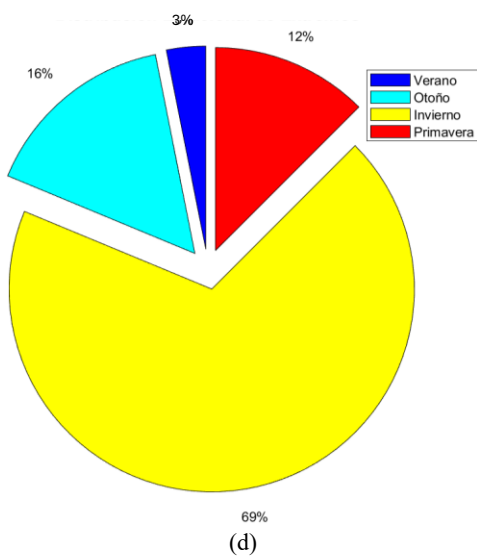
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.19. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Punta Lavapie

4.3.7 Isla Santa María Interior Noroeste

Para el nodo de Isla Santa María se obtuvo la estadística de clima medio de oleaje que se muestra en la Figura 4.20. En la Figura se destaca que la moda de las alturas significativas está entre 1 m y 1.4 metros, y el valor promedio de las alturas significativas es de 1.4 metros. El histograma del periodo *peak* tiene la moda entre los 12 y los 13 segundos y su valor promedio es de 13.7 segundos, y los valores promedio de la dirección media y *peak* son 270° y 272° respectivamente, con la moda entre 262 y 269 grados, indicando un oleaje que proviene principalmente desde el Noreste.

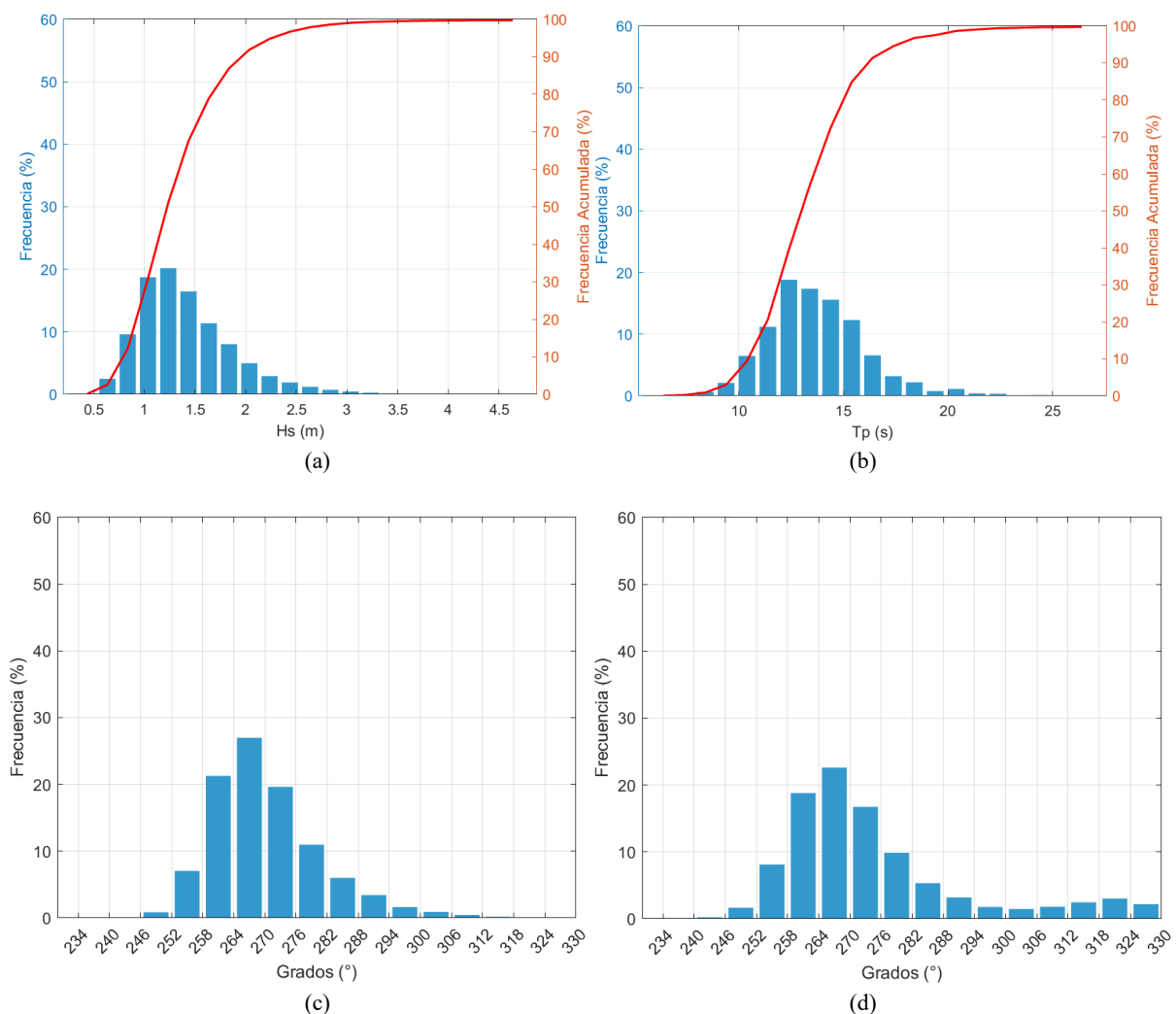
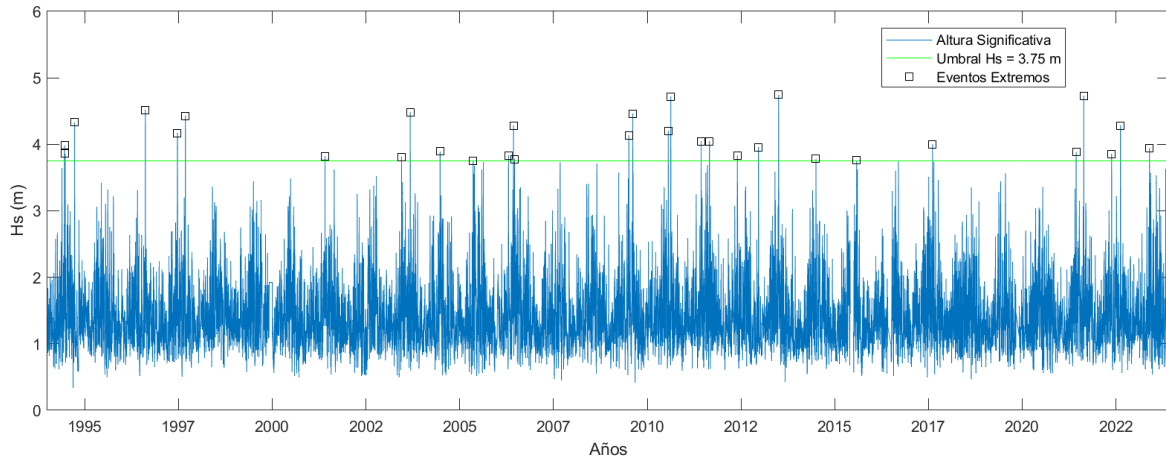
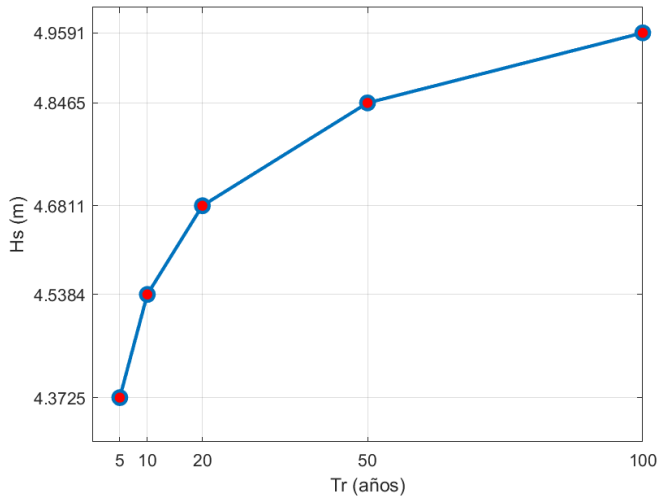


Figura 4.20. Estadística clima medio con histogramas de (a) Altura Significativa; (b) Periodo Peak; (c) Dirección Media; (d) Dirección Peak para nodo de Isla Santa María

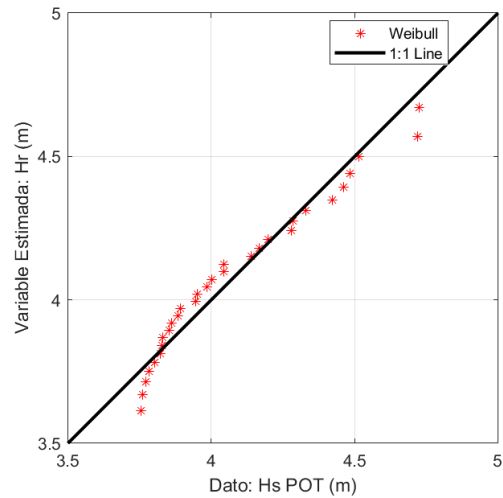
En la Figura 4.21 se muestra la estadística del clima extremo para el nodo de la Isla Santa María. Fijando un umbral de 3.75 m, con una separación temporal de 4 días se encontraron 31 eventos extremos en los 30 años de los cuales el 68% ocurre en invierno, le sigue los meses de otoño con un 19%, un 10% en primavera, y un 3% en verano. La altura significativa de 100 años de periodo de retorno llega a los 4.95 metros.



(a)



(b)



(c)

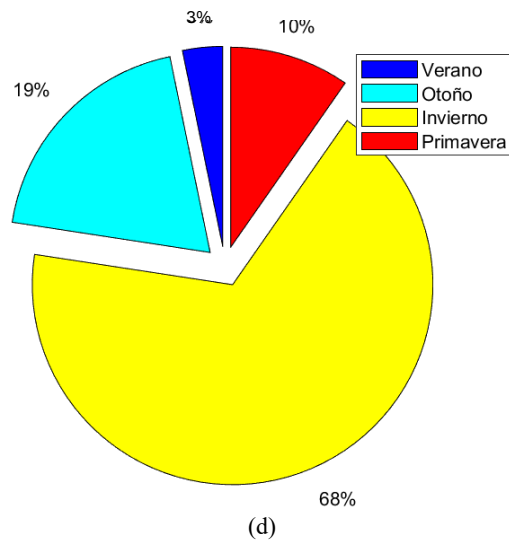


Figura 4.21. Estadística clima extremo con (a) Serie de tiempo identificando tormentas individuales; (b) Gráfico de periodos de retorno; (c) Ajuste de los extremos con la distribución Weibull $k=2$; (d) Gráfico de torta de la distribución estacional de los extremos para nodo de Isla Santa María

4.4 Conclusión

En este capítulo se presentó la validación de los datos obtenidos con la simulación con *Wavewatch III* y los datos de la boya *Watchkeeper* ubicada en Talcahuano, con gráficos comparativos de los datos simulados y observados, gráficos de dispersión e indicadores de calidad para las series de altura significativa, periodo *peak* y dirección *peak*. Se obtuvieron mapas de valores promedio, y el clima de oleaje medio y extremo para los puntos de interés dentro del Golfo de Arauco.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó de manera exitosa el modelo *Wavewatch* III para el Golfo de Arauco y se lograron simular 30 años de oleaje para la región del Biobío. Los resultados obtenidos del modelo se validaron con datos de la boya ubicada costa afuera de Caleta Tumbes perteneciente al SHOA. Se generaron gráficos comparativos de los datos simulados y los observados que muestran un buen ajuste para la altura significativa y el periodo *peak*, la dirección *peak* muestra discrepancias significativas en los meses de invierno que podrían ser mejoradas si se agrega información del viento local a la simulación.

De acuerdo con los gráficos de dispersión obtenidos se aprecia la correlación lineal positiva de los datos en el caso de la altura significativa y el periodo *peak*, estas series presentan una pequeña subestimación de los datos en el caso de la altura significativa, y una sobrestimación para los datos de periodo *peak* debido a la falta de información del viento local, no siendo capaz de representar los periodos menores a 10 segundos, por lo mismo la dispersión de los datos de la dirección *peak* solo presentan linealidad en un rango pequeño.

De los indicadores de calidad se desprende que los datos simulados de altura significativa tienen el mejor ajuste, con un NSE de 0.7 el modelo capta la variabilidad de los datos observados en un 70%, el PBIAS es de 3.2% lo que quiere decir que su tendencia es a subestimar los datos observados en un 3.2% y su RMSE es de 0.4 m lo que representa que el error promedio absoluto entre los datos observados y medidos es de 0.4 m., los indicadores de calidad para la dirección *peak* son un NSE de 0.1, PBIAS 1.4% y RMSE de 27,3° que serían mejorables si se incluye información del viento local. Para el periodo *peak* se obtuvo un ajuste aceptable con un NSE de 0.01, PBIAS de -7.8% y RMSE de 2.4 s considerando el registro completo, de igual manera al agregar información del viento local al modelo, la mejora sería significativa.

Posteriormente, se obtuvieron mapas de altura significativa, periodo *peak* y de dirección media para el Golfo de Arauco, representando el comportamiento general del oleaje en la zona de estudio, caracterizada por valores medios de altura significativa que varían entre 0.5 m y 1.5 metros, periodos *peak* en el rango de 12 a 15 segundos y dirección proveniente predominante del oleaje del Noreste.

Para describir el comportamiento del oleaje de manera específica dentro del Golfo de Arauco se extrajeron las series de tiempo en los puntos de interés ubicados frente a las zonas pobladas a lo largo de la costa para luego obtener el clima medio y extremo de cada punto. De los resultados obtenidos se muestra que la altura significativa tiene máximos en Punta Lavapie y San Pedro de la Paz, las que van disminuyendo hasta alcanzar un mínimo en Arauco, ubicado al centro del Golfo de Arauco y protegido por la Isla Santa María. El periodo *peak* dentro del golfo tiende a aumentar a medida que el oleaje se adentra a éste. La dirección media y *peak* son similares, siendo predominante el oleaje proveniente desde el Este para San Pedro de la Paz, Coronel/Lota y Punta Lavapie, para Laraquete, Arauco, Llico y la Isla Santa María la dirección proveniente predominante del oleaje es desde el Noreste.

Del análisis del clima extremo los mayores umbrales de altura significativa son para Punta Lavapie, luego en la Isla Santa María, llegan a un mínimo en Arauco y vuelven a aumentar hacia San Pedro de la Paz. La mayor cantidad de tormentas ocurren en invierno, le sigue otoño, luego primavera, y dependiendo de que tan expuesto está el punto de interés al océano pacífico existe un pequeño porcentaje de tormentas durante los meses de verano, estos son Punta Lavapie, Isla Santa María y San Pedro de la Paz. Las máximas alturas de oleaje se observaron en el nodo de Punta Lavapie, con valores superiores a los 5 m. El periodo de retorno a los 10 años varía entre 1.6 metros en Arauco y 4.7 metros en Punta Lavapie, para 100 años el mínimo está igualmente en Arauco con 1.8 m y el máximo en Punta Lavapie con 5.1 m.

Finalmente, como recomendaciones para trabajos futuros se sugiere actualizar la batimetría a la versión más reciente de GEBCO e incluir datos de viento local para mejorar la precisión de los resultados de la simulación.

REFERENCIAS

Accensi, M. (2022). GLOBMULTI_ERA5_GLOBCUR_01. IFREMER

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.

Bosboom, J. & Stive, M. (2022). Coastal Dynamics Open Textbook, TU Delft Open Science.
Masselink, G., Hughes, M. & Knight, J. (2011). Introduction to coastal processes & geomorphology. Second Edition

Ferrer, C. (2023). Implementación de un modelo espectral de oleaje para la región del Biobío. Universidad de Concepción.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., P. O. Yapo. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. J. Hydrologic Eng. 4(2): 135-143

Goda Y. (1982). Random Seas and Design of Maritime Structures, (Vol 15). World Scientific Publishing Company

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.

Kamphuis, J.W. (2000). Introduction to coastal engineering and management. (Vol. 16) World Scientific.

Nash, J., E.; Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology. 10 (3): 282–290.

The WAVEWATCH III R Development Group (WW3DG), (2016). User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA.

Winckler, P. (2020). Introducción al modelado de procesos costeros. Apuntes de clases. Valparaíso, Chile: Universidad de Valparaíso.

ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
<p>El análisis del clima de oleaje en el Golfo de Arauco presentado en este trabajo contribuye a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), en particular, a ODS-9, ODS-11 y ODS-13</p> <p>ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura – Este estudio aporta a la seguridad y eficiencia de la navegación, pesca, turismo y otras actividades económicas dependientes del mar</p> <p>ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles – El conocimiento del clima de oleaje puede mejorar la resiliencia de comunidades costeras, ayudando en la planificación urbana y la infraestructura portuaria.</p> <p>ODS 13: Acción por el Clima – Al estudiar el clima de oleaje, se contribuye a la comprensión y adaptación al cambio climático, ayudando a la planificación costera y la mitigación de desastres naturales.</p>

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

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Ghislaine Catalina Vargas Zurita
Título de la memoria : Condiciones históricas de oleaje en el Golfo de Arauco
Fecha de la presentación oral : 03 / 04 / 2025

Profesor(es) Guía : Maricarmen Gerra Paris
Profesor(es) Revisor(es) : Alejandra Stehr Gesche
Concepto :
Calificación :

Resumen
<p>El aumento de las marejadas, la demanda de infraestructura costera y el cambio climático incrementan el riesgo en la zona costera del Golfo de Arauco, Biobío, Chile. Actualmente, la información pública sobre oleaje es casi inexistente, dificultando la implementación de un sistema de alerta para marejadas. Para abordar esta necesidad, se evaluó el clima de oleaje medio y extremo mediante el modelo espectral Wavewatch III, simulando 30 años de oleaje (1994-2023).</p> <p>Los resultados fueron validados con datos de la boya Watchkeeper del SHOA, obteniendo un buen ajuste en la altura significativa del oleaje y aceptable para el periodo peak y la dirección. Se generaron mapas de oleaje promedio y se identificaron zonas críticas: Punta Lavapie y la Isla Santa María presentan las mayores alturas de oleaje, mientras que Arauco muestra las menores.</p> <p>En condiciones extremas, Punta Lavapie registró alturas superiores a 5 m, con periodos de retorno de hasta 5.1 m en 100 años. Se sugiere mejorar la modelación incorporando información del viento local para una mayor precisión. Este estudio proporciona datos clave para la gestión costera y la prevención de impactos por marejadas en la zona.</p>