

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



**CARACTERIZACIÓN MENSUAL DEL CLIMA DE OLEAJE DOMINANTE EN LAS
PLAYAS DEL GOLFO DE ARAUCO.**

NICOLÁS ANDRES MALDONADO ZAPATA.

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL.

Profesor Guía

M.Eng. Mauricio Villagrán.

Profesor Informante

Dr. Rafael Aránguiz.

Concepción, Noviembre 2016

Resumen:

Actualmente la mayor parte de la población del planeta se concentra en el área costera, donde se desarrollan actividades de morada, pesca, industrias, terminales de comercio, puertos, actividades agropecuarias y turismo. Debido a esto, el estudio del oleaje en la costa resulta ser un problema global y de gran importancia.

En nuestro país, pese a contar con una extensa costa, los fenómenos relacionados al clima de oleaje son poco conocidos y carecen de estudios científicos. Solo en el momento en que ocurren destrozos ocasionados por oleajes extrémales o tsunamis es cuando se presta importancia a los distintos parámetros de oleajes, como lo son la altura de ola cercana a la costa, rompimiento de ola, periodos y direcciones de estas.

El presente trabajo desarrollo una caracterización del clima de oleaje dominante en distintas playas del Golfo de Arauco, zona en la cual se desarrollaron importantes actividades económicas, principalmente asociadas a la industria pesquera y donde se encuentra uno de los principales terminales portuarios del país, ubicado en Coronel.

SWAN es un modelo de propagación de oleaje espectral validado mundialmente el cual es implementado en el software DELFT3D modulo WAVE, software donde se realizó la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras y se obtuvieron los parámetros de oleaje en las costas del Golfo de Arauco.

Los resultados muestran los escenarios y zonas más críticas, que se presentan en las condiciones de oleajes provenientes de la dirección noroeste y afectan principalmente las playas Escuadrón, Coronel y Chivilingo, situadas al norte del Golfo de Arauco que alcanzan alturas de olas cercanas a los 3 metros. Por otra parte, es importante destacar los fenómenos de difracción y refracción que se presentan debido a la Isla Santa Maria, ubicada frente a las playas en estudio y que brinda una protección natural a las costas del Golfo de Arauco.

La condición noroeste, tiene baja incidencia anual, pero hay que considerarla y tener atención a estas tormentas de invierno provenientes del noroeste al momento del diseño de alguna estructura en la costa. Respecto a los resultados obtenidos de las modelaciones respecto a las direcciones oeste y suroeste, estas presentan poco impacto en las costas del Golfo de Arauco, y alcanzando parámetros peak en la playa Escuadrón.

Abstract

Nowadays the majority of world population is concentrated around coastal areas where activities such as dwelling, fishing, industry and tourism are developed. Because of this, wave studies are highly relevant to tackle some global issues.

In our country, despite the fact of having an extensive coast line, the phenomenon related to wave weather are very little known and lack of scientific studies. Only when the coast is affected by tidal waves or tsunamis is when different wave parameters are taken into account, parameters such as wave height, wave period, wave direction, etc.

The present project concerns a characterization of the dominant wave climate in different beaches of the gulf of Arauco, the area in which important economic activities were developed, mainly associated with the fishing industry and where one of the main port terminals of the country is located in Coronel.

Using the SWAN model implemented in the DELFT3D software WAVE module, a propagation model of spectral waves validated worldwide, a wave propagation analysis was conducted to obtain wave parameters from deep waters to shallow waters.

The results show the most critical zones and scenarios that are presented in the conditions of waves three meters high coming from the northwest and that affect beaches from Escuadrón, Coronel and Chivilingo located in the north of the gulf of Arauco.

On the other hand is important to highlight the phenomenon of diffraction and refraction cause by the Santa Maria Island, located in front of the beaches in study and that is a natural protection to the beaches of the gulf of Arauco. The northwest condition has a low annual impact but it has to be considered and pay attention to this winter storms coming from the northeast in order to design coastal structures. Regarding the results obtained from the models related to the west and southwest directions, this present very little impact on the coast of the gulf of Arauco and reaching peak parameters in the beach of Escuadrón.

A mi familia

IV

Agradecimientos:

Agradezco en primera instancia a Dios, quien me permite realizar este trabajo, en segundo lugar, mis padres, sé que también ellos anhelaban este momento tanto como yo, por su infinito amor y apoyo incondicional, me siento profundamente honrado de ser su hijo y les amo mucho.

Mi Padre que me ha apoyado a lo largo de toda mi vida y esta travesía y años de estudios, porque sin su sacrificio y esfuerzo, nada sería posible, así también por cada consejo y palabra de aliento y enseñanza que me ha dado hasta el día de hoy. Mi Madre que de igual forma me ha sostenido desde que la memoria me permite recordarlo, por su inmenso amor, dedicación y confianza que siempre tuvo hacia mí, porque lo que soy hoy se lo debo a Ella y mi Padre.

A mi hermano, que nunca olvidaré sus consejos, enseñanzas y vivencias que hemos tenido durante toda nuestra vida, porque él junto a nuestros padres han sido lo más importante que he tenido y tendré, gracias por todo.

A mis amigos de universidad, que sin ellos esta travesía no hubiese sido tan gratificante, ni satisfactoria. Gracias por soportarme, y ser un apoyo permanente durante esta larga carrera y hasta el día de hoy, les quiero mucho y espero que nuestra amistad perdure por muchos años más.

A mis profesores, que me formaron como futuro Ingeniero Civil, porque gracias a ellos obtuve los conocimientos de las distintas áreas de esta hermosa carrera, y si el día de hoy me siento preparado y entusiasmado en aportar y mejorar este mundo o parte de él, es gracias a ustedes, creo que es misión de cada uno de nosotros el mejorar y concientizar un desarrollo más armónico y sustentable, tanto en lo social como ambiental y es ahí donde nosotros debemos tomar parte. En especial me gustaría agradecer a mi profesor Mauricio Villagrán por todo su tiempo, dedicación y apoyo entregado, le recordaré con mucho afecto por todos sus consejos y conversaciones que me guiaron y apoyaron tanto en mi formación académica como también personal. Gracias por su confianza puesta en mí.

Índice de contenidos

1. Introducción.....	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Metodología propuesta	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Procesos Costeros.....	5
2.1.1. Conceptos generales	5
2.1.2. Pronóstico y generación del oleaje	5
2.1.3. Oleaje desde aguas profundas a aguas someras	8
2.1.3.1 Refracción.....	10
2.1.3.2 Difracción.	11
2.1.3.3 Reflexión.....	12
2.1.3.4 Asomeramiento o Shoaling.....	12
2.1.3.5 Rompimiento de la ola (Breaking).....	13
2.2. Modelación numérica	14
2.2.1. Propagación de oleaje con SWAN	14
2.2.1.1 Introducción.....	14
2.2.1.2 Limitaciones y zonas de aplicación	14
2.2.2. Bases físicas del modelo SWAN.....	15
2.2.2.1 Esquema General del Funcionamiento de SWAN.....	18
2.2.3. Grilla Computacional y Condiciones de borde	19
3. Métodos	20
3.1. Área de estudio.....	20
3.2. Reanálisis de series de oleaje en aguas profundas	22
3.2.1. Datos de oleaje de tercera generación.....	22
3.2.2. Modelo WAVEWATCH III	23
3.3. Clima de oleaje	24
3.3.1. Caracterización anual del oleaje	24
3.3.2. Caracterización mensual del oleaje.....	29
3.4. Modelo Numérico.....	43
3.4.1. Generación de batimetría y mallas computacionales.....	43
3.4.2. Simulación utilizando el modulo WAVE	47
3.5. Post proceso con QUICKPLOT.....	49
3.6. Clima dominante mensual en las playas del Golfo de Arauco.....	50
4 Resultados	51
4.1. Post proceso de resultados con quickplot.	53

4.2. Resultados modelos SWAN.....	57
4.3. Resultados clima dominante mensual en las playas del Golfo de Arauco	60
4.4. Resultados condiciones de oleaje proveniente del noroeste	67
5. Discusiones y Conclusiones	71
5.1. Discusiones.....	71
5.2. Conclusiones	72
6. Referencias	74
7. Anexos	76
7.1. Tablas de incidencia de Altura significativa (m).....	76
7.2. Tablas de incidencia de Periodo peak(seg)	80
7.3. Rosa de oleaje. Altura significativa (m).	85
7.4. Rosa de oleaje. Periodo Peak (s).	87
7.5. Escenarios de modelación para cada mes.....	89
7.6. Discusiones.....	101

Índice de figuras

Figura N°1.1: Esquema de funcionamiento del modelo SWAN.....	4
Figura N°2.1: Refracción de ondas sobre una batimetría irregular.....	10
Figura N°2.2: Difracción del oleaje en una zona protegida por un dique.....	11
Figura N°2.3: Gráfico de la variación de la altura de onda en función de la profundidad. Para valores pequeños de h , la altura de la onda aumenta súbitamente.	12
Figura N°2.4: Esquema de la transformación de una onda debido al asomeramiento.	13
Figura N°2.5: Propagación de energía sobre una celda de la grilla en las posiciones horizontales x e y	16
Figura N°2.6: Ejemplo Mallas anidadas en funcionamiento de modelo SWAN.....	19
Figura N°3.1: Ubicación de las zonas y playas de estudio.	21
Figura N°3.2: Regiones del Modelo global (NOAA Wavewatch III).	23
Figura N°3.3: Rosa de los vientos.....	24
Figura N°3.4: Rosa de los vientos para la data total de Altura Significativa (H_s) en relación a su dirección de procedencia ($^\circ$) e incidencia (%).	26
Figura N°3.5: Rosa de los vientos para la data total de Periodo Peak (T_p) en relación a su dirección de procedencia ($^\circ$) e incidencia (%).	26
Figura N°3.6: Rosa de los vientos del mes de enero. Altura Significativa (m) en relación a su dirección de procedencia ($^\circ$) e incidencia (%)	30
Figura N°3.7: Rosa de los vientos del mes de enero. Periodo Peak (s) en relación a su dirección de procedencia ($^\circ$) e incidencia (%).	30
Figura N°3.8: Altura significativa (m) vs periodo peak (s), del mes de enero asociado a la dirección suroeste ($168.75^\circ - 236.25^\circ$).....	33
Figura N°3.9: Altura significativa (m) vs periodo peak (s), del mes de enero asociado a la dirección oeste ($236.25^\circ - 303.75^\circ$).....	33

Figura N°3.10: Rosa de oleaje de altura significativa (m) para los meses de enero a junio.	35
Figura N°3.11: Rosa de oleaje de altura significativa (m) para los meses de julio a diciembre.	36
Figura N°3.12: Rosa de oleaje de periodo peak (s) para los meses de enero a junio.....	37
Figura N°3.12: Rosa de oleaje de periodo peak (s) para los meses de julio a diciembre. ..	38
Figura N°3.10: Batimetría simplificada de la zona de estudio.....	44
Figura N°3.11: Batimetría y mallas en el módulo Delft3D-RGFGRID.....	45
Figura N°3.12: Resoluciones espaciales entre mallas anidadas.....	46
Figura N°3.13: Interpolación triangular lineal entre mallas y batimetrías.....	47
Figura N°3.14: Condiciones de borde, grilla grande.....	48
Figura N°4.1: Superposición de grillas y ubicación de boyas virtuales.....	51
Figura N°4.2: Detalle mallas pequeñas y boyas virtuales creadas.....	52
Figura N°4.3: Altura significativa en relación a la dirección de propagación, para condición de oleaje tipo swell (izquierda) y seas (derecha) proveniente del suroeste en el mes de enero.	53
Figura N°4.4: Altura significativa en relación a la dirección de propagación, para condición de oleaje tipo swell (izquierda) y seas (derecha) proveniente del oeste en el mes de enero.....	54
Figura N°4.5: Altura significativa en relación a la dirección de propagación, para condición de oleaje tipo swell proveniente del noroeste en el mes de enero.	55
Figura N°4.6: Altura significativa en relación a la dirección de propagación, para condición de oleaje tipo seas proveniente del noroeste en el mes de enero.	55
Figura N°4.7: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Punta Lavapíe por meses del año..	62
Figura N°4.8: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Llico por meses del año.	62

Figura N°4.9: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Tubúl por meses del año.	63
Figura N°4.10: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Arauco por meses del año.	63
Figura N°4.11: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Chivilingo por meses del año.....	63
Figura N°4.12: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Coronel por meses del año.....	64
Figura N°4.13: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Escuadrón por meses del año.....	64
Figura N°4.14: Comparativa de altura significativa (m) entre playas en estudio, durante el año.	65
Figura N°4.15: Comparativa de periodo peak (s) entre playas en estudio, durante el año.	65
Figura N°4.16: Hs (m) para la condición noroeste tipo swell y seas en las distintas playas del Golfo de Arauco.	68
Figura N°4.17: Resultado de direcciones promedio en las playas en estudio.....	70

Índice de Tablas

Tabla N°3.1: Intervalos en grados, asociados a cada dirección.	25
Tabla N°3.2: Distribución de intervalos de direcciones y porcentajes de incidencia, según su ángulo de incidencia.....	25
Tabla N°3.3: Tabla de porcentaje de incidencia (%) asociado a la dirección del oleaje (°) en aguas profundas.	27
Tabla N°3.4: Tabla de incidencia de altura de oleaje (m), según su ángulo de incidencia (°) para los 9 años de datos. Siendo A (%) porcentaje de ocurrencia por cada clase.	28
Tabla N°3.5: Tabla de periodo peak (s) según su ángulo de incidencia (°) para los 9 años de datos. Siendo A (%) porcentaje de ocurrencia por cada clase.	29
Tabla N°3.6. Tabla de incidencia de altura significativa del oleaje (m) en aguas profundas para el mes de enero. A(%) Porcentaje de ocurrencia por cada clase.	31
Tabla N°3.7. Tabla de incidencia del periodo peak (s) en aguas profundas para el mes de enero. A(%) Porcentaje de ocurrencia por cada clase.	31
Tabla N°3.8: Parámetros de oleaje de la data completa del mes de enero.	32
Tabla N°3.9: Parámetros de oleaje del mes de enero, según su dirección de procedencia y tipo de oleaje.....	39
Tabla N°3.10: Porcentaje de incidencia mensual, según su dirección de procedencia.	39
Tabla N°3.11: Altura significativa mensual, según su dirección de procedencia.	40
Tabla N°3.12: Periodo Peak mensual, según su dirección de procedencia.	40
Tabla N°3.13: Dirección promedio mensual, según su intervalo de dirección asociados...	40
Tabla N°3.14: Resumen de parámetros de oleaje, según sus direcciones y tipos de oleajes para cada mes.....	42
Tabla N°4.1: Boyas asociadas a sus respectivas playas y profundidades.	52

Tabla N°4.2: Resultados modelo numérico de altura significativa (m), para las distintas playas del Golfo de Arauco.	57
Tabla N°4.3: Resultados modelo numérico de Periodo Peak (seg), para las distintas playas del Golfo de Arauco.	58
Tabla N°4.4: Resultados modelo numérico de Dirección (°), para las distintas playas del Golfo de Arauco.	59
Tabla N°4.5: Resultados de altura significativa dominante (m), para las distintas playas del Golfo de Arauco.	60
Tabla N°4.6: Resultados de periodo peak dominante (seg), para las distintas playas del Golfo de Arauco.	61
Tabla N°4.7: Resultados de dirección dominante (grados), para las distintas playas del Golfo de Arauco.	61
Tabla N°4.8: Resultados de Modelación SWAN, realizada para la condición de oleaje tipo swell proveniente del Noroeste.	67
Tabla N°4.9: Resultados de Modelación SWAN, realizada para la condición de oleaje tipo seas proveniente del Noroeste.	68

1. Introducción

En la gran mayoría de las regiones alrededor del mundo, principalmente en los países en vías de desarrollo, las series de datos medidos en aguas someras no son suficientemente largas para caracterizar el clima marítimo y obtener los parámetros de ola necesarios al correcto dimensionamiento de las estructuras portuarias y de protección de la costa. (Bonanata et al., 2010).

En nuestro país, pese a contar con una extensa costa, los fenómenos relacionados al clima de oleaje son poco conocidos y carecen de estudios científicos. Solo en el momento en que ocurren destrozos ocasionados por oleajes extrémales o tsunamis es cuando se presta importancia a los distintos parámetros de oleajes, como lo son la altura de ola cercana a la costa, rompimiento de ola, periodos y direcciones de estas.

Las playas no son elementos estáticos de la costa, una característica conocida por cualquier observador que se haya acercado a estas, es que no se mantienen fijas en una misma posición con un oleaje uniforme, sino que cambian su configuración, perfil, planta a lo largo del tiempo y parámetros de oleaje durante el año.

Debido al efecto que causa el oleaje en las costas, la caracterización mensual del clima dominante es fundamental para ampliar y perfeccionar las investigaciones y proyectos que son llevados por científicos de la costa e ingenieros costeros.

1.1. Motivación

La franja litoral es limitada y sujeta a múltiples usos que en algunos casos son contrapuestos. Entre estos usos destacan el transporte marítimo y por consiguiente las infraestructuras portuarias, la actividad pesquera, la navegación deportiva, el turismo de masas y su principal soporte son las playas. La confluencia de estos intereses ha constituido, constituye y constituirá la principal preocupación de los poderes públicos, de los profesionales y de la sociedad. (Antonio Lechuga Álvaro, 2002).

Las playas son uno de los elementos más dinámicos del relieve terrestre y como señalaron los pioneros en su estudio constituyen una excelente defensa del territorio. Al mismo tiempo el valor ambiental y paisajístico de las playas es innegable. De lo anterior se deduce la fragilidad inherente de las mismas y la necesidad de evitar su inestabilidad y deterioro. (Antonio Lechuga Álvaro, 2002).

Toda obra marítima se construye para satisfacer, durante un determinado intervalo de tiempo, diversos requerimientos de fiabilidad, funcionalidad y operatividad (ROM, 1991).

Es así que la motivación de estudiar y realizar una correcta caracterización del clima marítimo es fundamental para un buen dimensionamiento de las estructuras portuarias y protección costera, y para ello generalmente no se cuenta con series de datos necesarios en aguas someras para una correcta caracterización de estos, para suplir la falta de datos es necesario investigar y realizar modelos de propagación de oleajes desde aguas profundas hacia aguas someras.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Caracterizar el clima de oleaje dominante de manera mensual en las distintas playas de interés en el Golfo de Arauco, utilizando la herramienta computacional DELFT-3D.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el clima de oleaje en aguas profundas frente al Golfo de Arauco.
- Confeccionar un modelo de propagación de oleaje entre aguas profundas hacia aguas someras utilizando el software Delft3D.
- Realizar un análisis de los parámetros de oleaje entre 7 playas del Golfo de Arauco.

1.3. Metodología propuesta

- Contar con la batimetría y topografía de la zona de estudio, estos datos son un punto de partida en la ejecución de los modelos numéricos, los cuales se obtendrán directamente de la base de datos proporcionada y luego de analizadas se verá la opción de complementar o simplificar a través de distintas bases de datos y/o distintos softwares.
- Recopilación de datos en aguas profundas. A partir de estos datos espectrales y a través de distintas técnicas y/o modelos de reanálisis de datos se obtendrán los parámetros de dirección, periodo peak y altura significativa de oleaje necesarios para realizar el modelo de propagación de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras.
- Caracterización del clima de oleaje, en base a los parámetros de oleaje obtenidos anteriormente, se utilizará como herramienta el software Matlab o algún software estadístico con el cual se realizará una correcta caracterización del clima de oleaje en aguas profundas, donde se obtendrán los distintos escenarios a modelar a partir del análisis realizado a tablas de incidencia, rosas de oleaje y análisis estadísticos de los datos para los distintos periodos de tiempo.

- Modelo SWAN a través del software DELFT3D modulo WAVE, donde se realizará la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras, esperando obtener datos de las playas cercanas a la costa de Golfo de Arauco a una profundidad de 10 metros aproximadamente.

La metodología del modelo SWAN se presenta en la figura 1.1.

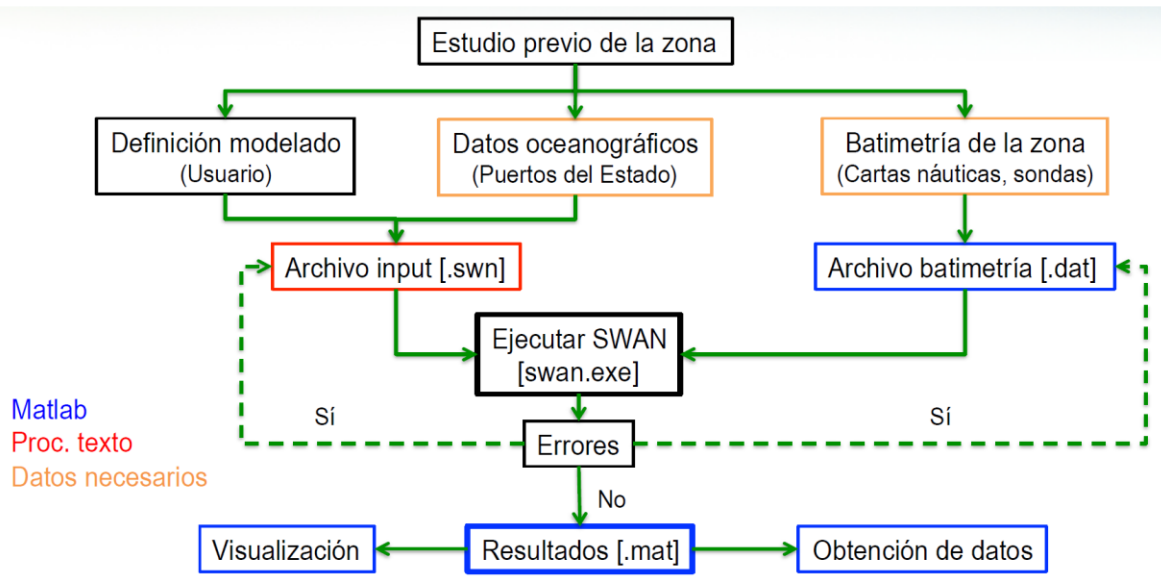


Figura N°1.1: Esquema de funcionamiento del modelo SWAN.

Fuente: Desconocida.

- Finalmente, obtener datos del modelo de propagación en la zona de estudio a una profundidad de 9.5 a 10 metros, para así realizar una comparación y análisis de los resultados.

2. Marco Teórico

2.1. Procesos Costeros

2.1.1. Conceptos generales

El viento es responsable de la generación del oleaje que se desplaza sobre la superficie del agua y que juega un rol muy importante en la modificación de la línea costera. Si observamos el mar durante una tormenta, su superficie parece estar en un estado de confusión y es difícil apreciar que entre el desorden es posible detectar los diferentes trenes de olas que allí se generan.

Las olas son movimientos ondulatorios, oscilaciones periódicas de la superficie del mar, formadas por crestas y depresiones que se desplazan horizontalmente.

Una vez que las olas son creadas, las tensiones gravitacionales y superficiales son activadas permitiendo que la ola se propague (Dean y Dalrymple, 1991). El viento corresponde a la perturbación que mayormente incide en la hidrodinámica costera y en la ingeniería marítima en general. La condición de ondas propagándose sobre aguas en reposo es una condición omnipresente.

En la etapa inicial de la generación del oleaje debido a la acción del viento, las fluctuaciones turbulentas de la presión atmosférica inducen olas de pequeño tamaño, llamadas ondas capilares. Estas fluctuaciones son tradicionalmente inestables y son atenuadas una vez que el viento deja de soplar, debido al efecto de la tensión superficial. Cuando la velocidad del viento aumenta, las olas crecen de tamaño y las fuerzas de tipo gravitacionales son suficientes para mantener la propagación del oleaje (Massel, 1996).

2.1.2. Pronóstico y generación del oleaje

Las primeras técnicas de pronóstico y generación de oleaje fueron desarrolladas durante y después de la segunda guerra mundial (Tolman et al., 2001). Estas usaban modelos simples

basados en relaciones empíricas entre variables dependientes como altura de ola significativa, periodo de ola, con variables independientes como velocidad del viento, profundidad, etc. (Montoya y Osorio, 2008, Agudelo et al., 2005). En la ecuación (1) se muestra un ejemplo de una formulación empírica para el cálculo de la altura de ola significativa en términos de la velocidad del viento en la superficie, la aceleración de la gravedad, la profundidad del agua, la distancia sobre la cual el viento ha soplado de manera constante y uniforme (Fetch) y unas constantes adimensionales.

$$H_s(V_s, d, F) = \frac{V_s^2}{g} 8_{\infty} \tanh \left(K_3 \left(\frac{d * g}{V_s^2} \right)^{m_3} \right) * \tanh \left[\frac{K_1 \left(\frac{F * g}{V_s^2} \right)^{m_3}}{\tanh \left(K_3 \left(\frac{d * g}{V_s^2} \right)^{m_3} \right)} \right], \quad (1)$$

Donde:

V_s : es la velocidad del viento en la superficie (m/s)

d : es la profundidad del agua (m)

g : es la aceleración de la gravedad (m/s^2)

F : es el Fetch (m)

K_1 y K_2 son constantes adimensionales

Además de existir formulaciones empíricas para el cálculo de la altura de ola significativa, en la literatura se encuentran expresiones similares para el cálculo del periodo peak (T_p) (Montoya y Osorio, 2008, Agudelo et al., 2005), en términos de las mismas variables independientes.

En la época de los años 80's, USACE (1984) introdujo un modelo paramétrico para lograr determinar la altura de ola significativa (H_s) y el periodo peak (T_p) para una tormenta mediante las siguientes expresiones (Montoya y Osorio, 2008,).

$$H_s = 5.03e^{\frac{R \cdot \Delta P}{4700}} \left(1 + \frac{0.29 * \alpha * V_{fm}}{\sqrt{V_{max}}} \right), \quad (2)$$

$$T_p = 8.6e^{\frac{R \cdot \Delta P}{9400}} \left(1 + \frac{0.145 * \alpha * V_{fm}}{\sqrt{V_{max}}} \right), \quad (3)$$

Las ecuaciones (2) y (3) son formulaciones empíricas en términos de algunos parámetros de las tormentas como: el radio máximo de la tormenta (R), la diferencia de presiones en el ojo de la tormenta y el límite exterior de la tormenta (ΔP), la velocidad de movimiento de la tormenta (V_{fm}), la velocidad máxima del viento para una tormenta en movimiento (V_{max}) y un parámetro adimensional (α). (Agudelo et. Al., 2005) utilizan estas expresiones para el cálculo de regímenes extrémales.

Las principales desventajas de estos modelos empíricos radican en que la mayoría de ellos solo permiten obtener pronósticos locales o puntuales de la altura y el periodo de ola significativa para un estado determinado del mar en el cual se tienen condiciones constantes (velocidad del viento, fetch, dirección) para aguas profundas. Además, son totalmente ineficientes para realizar análisis numéricos en dos dimensiones y no permiten obtener ningún tipo de información espectral del oleaje (Montoya y Osorio, 2008).

Teniendo en cuenta las falencias de sus antecesores, los denominados modelos de base física surgieron para darle más rigurosidad a la física del fenómeno al considerar la evolución espacial y temporal de la energía que influye en el aumento y decaimiento del oleaje. Todos estos modelos se basan en resolver la ecuación de la energía dada por la siguiente expresión (Montoya y Osorio, 2008).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (C_g F) + \sigma \partial \left(\frac{c_g F}{\partial \sigma} \right) + \partial \left(\frac{c_g F}{\partial \theta} \right) = S_t, \quad (4)$$

Donde,

F: Densidad de acción de energía

C_g : Celeridad de grupo

σ : Frecuencia

Θ : Dirección

S_t , se puede calcular como

$$S_t = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} , \quad (5)$$

S_{in} está relacionada con la energía suministrada por el viento, S_{nl} representa las interacciones no lineales entre ondas, S_{ds} es el término que considera la disipación de energía por el rompimiento de olas en aguas profundas (Whitecapping) y el rompimiento de oleaje inducido por el fondo en aguas someras y S_{bot} está relacionado con la pérdida o disipación de energía debida a la fricción con el fondo en aguas someras y con corrientes marinas para aguas profundas.

Los modelos de base física se clasifican según la forma en que resuelven la ecuación de energía del oleaje y la evolución teórica y experimental en la estimación de los términos que componen las fuentes o sumideros de energía. De acuerdo con esto, los modelos se clasifican en modelos de primera generación, segunda generación y de tercera generación, de lo cual se hablará más adelante, en la sección de análisis de oleaje.

2.1.3. Oleaje desde aguas profundas a aguas someras

La relación matemática que vincula las variables del oleaje se denomina ecuación de dispersión lineal. Esta se muestra a continuación:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) , \quad (6)$$

Cuando el oleaje proveniente de aguas profundas se propaga hacia la costa, ocurren procesos físicos en los cuales este interactúa con el fondo del mar. El oleaje puede cambiar con vientos locales, pero el fondo del mar cambia permanentemente ciertos parámetros del oleaje cuando pasa desde aguas profundas a aguas intermedias.

En teoría, cuando las olas están en aguas profundas, se cumple la condición:

$$\frac{h}{L} > \frac{1}{2}, \quad (7)$$

Donde, h: profundidad con respecto al nivel del mar y L: longitud de la ola.

En estas aguas, la tangente hiperbólica de la ecuación de dispersión es igual a uno, debido a que el producto entre el número de onda y altura es tan grande que tiende hacia el infinito, por tanto. La celeridad es proporcional al periodo de la onda

$$C = gT/2\pi, \quad (8)$$

En aguas intermedias, se mantiene la ecuación de dispersión lineal, en que la altura con respecto a la longitud de la ola se mantiene dentro de los rangos de

$$\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}, \quad (9)$$

Luego, cuando las olas pasan a estar en aguas someras se cumple la condición:

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20}, \quad (10)$$

En que la celeridad es proporcional a la profundidad

$$C = \sqrt{gh}, \quad (11)$$

El producto entre el número de onda y la altura tiende a ser 0, por tanto si $kh \rightarrow 0$, $\tanh kh \rightarrow kh$.

Luego, numerosos parámetros cambian cuando las olas se aproximan a la costa, entre ellas está la longitud de onda, ángulo de aproximación, etc. Se debe tener conciencia, de que las olas no transportan materia, solo mantienen el flujo de energía con un periodo constante.

Para explicar la alteración de parámetros involucrados, existen diferentes procesos costeros que se manifiestan cuando el grupo de olas entra en aguas de transición y se acercan a aguas someras. Estos procesos son:

2.1.3.1 Refracción.

A medida que el frente de ondas se propaga desde aguas profundas a aguas someras, este se ve afectado por un cambio de dirección producto de diferencias en la celeridad en el frente de olas que viaja a distintas profundidades. La celeridad de la onda es mayor a mayor profundidad, esto implica que el tren de ondas viaja más rápido bajo esta condición. Si el frente de ondas incide oblicuo a la costa, este comenzará a sufrir una disminución de la velocidad de la parte del tren que va más cerca de la costa, tendiendo a girarse hacia este.

Este proceso se puede explicar físicamente con la ley de Snell, en ella se expresan los coeficientes de refracción K_r y explica que cuando una onda atraviesa un medio, cambia su ángulo con respecto a la vertical. En aguas intermedias y someras, la ola disminuye su velocidad debido a la disminución de altura de la superficie con respecto al fondo, y el coeficiente de refracción $K_r = \sqrt{\frac{\cos(\theta_0)}{\cos(\theta)}} \approx 1$ disminuye debido a que el ángulo de refracción es cada vez menor.

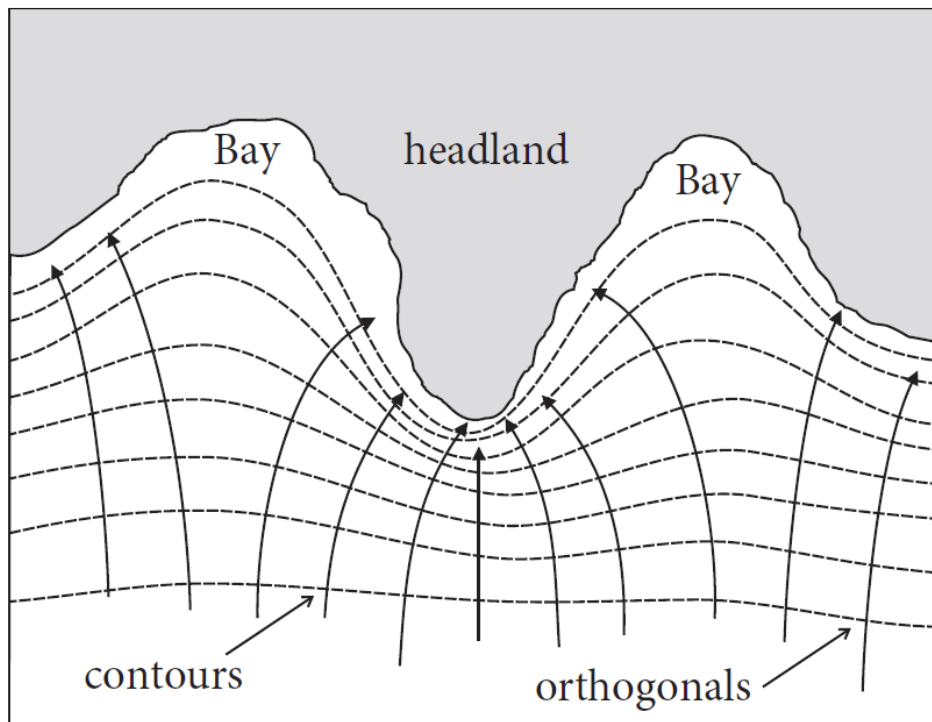


Figura N°2.1: Refracción de ondas sobre una batimetría irregular.

Fuente: Davison-Arnott (2010)

2.1.3.2 Difracción.

Si considerará la posibilidad de una onda larga que tiene una altura variable a lo largo de su cresta. Como esta onda se propaga hacia adelante, habrá una transferencia lateral de energía de las ondas a lo largo de la cresta (perpendicular a la dirección de propagación de la onda). La transferencia de energía será a partir de los puntos de mayor a menor altura de las ondas. Este proceso se conoce como la difracción de la onda.

Producto de la presencia de obstáculos tanto naturales como antrópicos, el frente de ondas, sufre una pérdida de energía en el sentido longitudinal del frente, lo que genera una presencia de oleaje en zonas de sombra, donde no incide el frente, esto producto de una transformación lateral de energía. Es importante considerar que este fenómeno también produce pequeños cambios en las alturas de las olas, producto de la dispersión de energía.

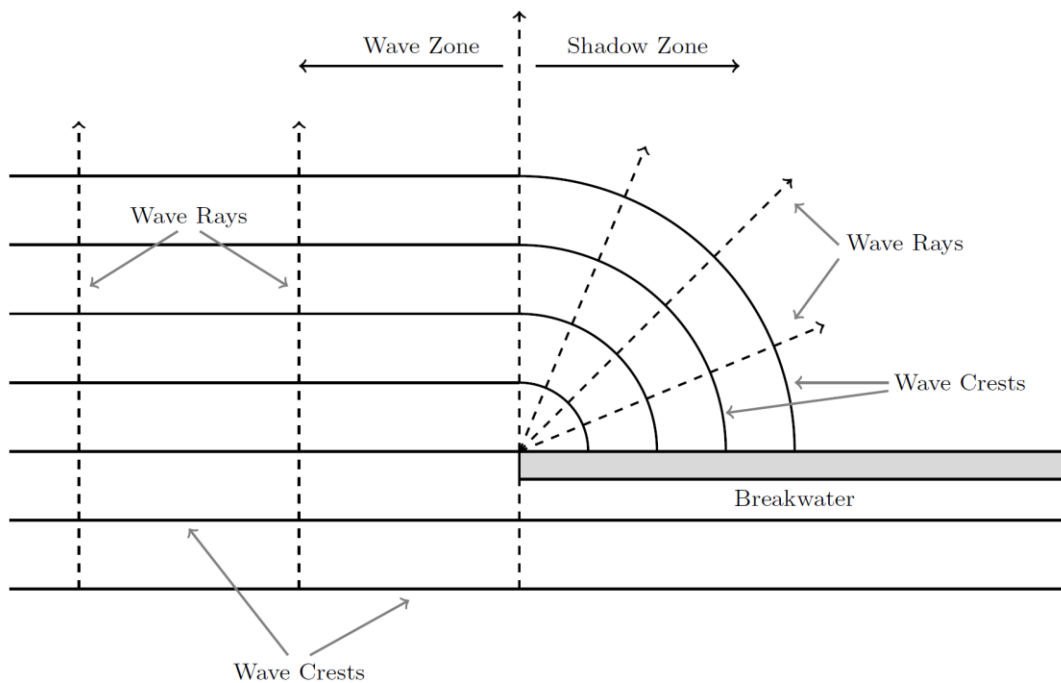


Figura N°2.2: Difracción del oleaje en una zona protegida por un dique.

Fuente: Kamphuis (2010)

2.1.3.3 Reflexión.

La reflexión es un fenómeno mediante el cual incide una onda sobre un elemento que actúa como obstáculo, en el cual una parte de la onda se refleja, es decir, se propaga en otras direcciones y sentido producto de la incidencia sobre ese elemento. En el caso de un frente de ondas paralelo al obstáculo, la onda se refleja completamente (reflexión total), originando una onda de la misma longitud y dirección, pero en sentido contrario.

2.1.3.4 Asomeramiento o Shoaling.

A medida que el tren de olas se propaga hacia las costas, los efectos del fondo se vuelven más importantes y palpables, uno de los efectos más importantes es el asomeramiento, el cual plantea que cuando las ondas entran en aguas someras, estas disminuyen su velocidad, lo que ocasiona que la longitud de onda se reduzca. El flujo de energía permanece constante y la disminución de la velocidad es compensada por un aumento de la altura de las ondas (eso implica, un aumento de la densidad de las ondas).

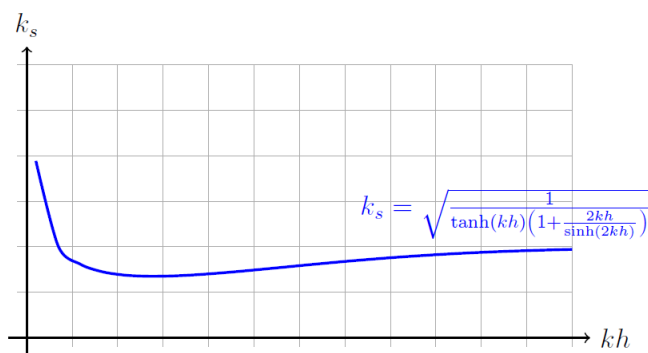


Figura N°2.3: Gráfico de la variación de la altura de onda en función de la profundidad.

Para valores pequeños de h , la altura de la onda aumenta súbitamente.

Fuente: Desconocida.

En palabras sencillas, el asomeramiento describe la transformación de la onda; a medida que la profundidad disminuye, aumenta la altura de la onda y disminuye su longitud.

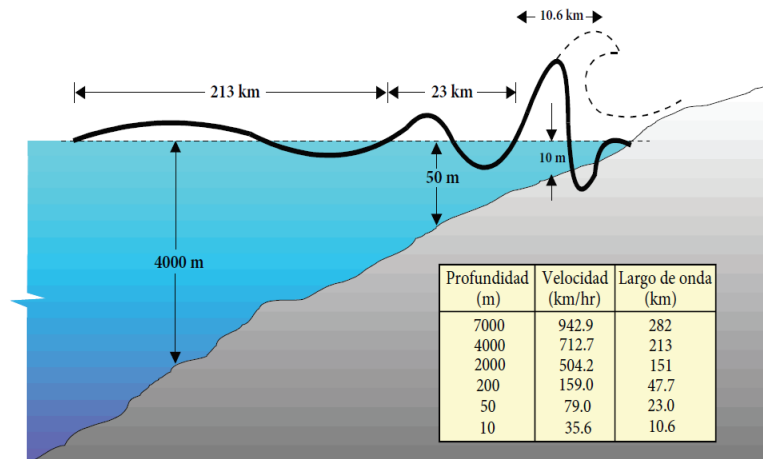


Figura N°2.4: Esquema de la transformación de una onda debido al asomeramiento.

Fuente: SHOA (1995)

Como el flujo de energía se conserva tanto en los cambios de aguas profundas a aguas someras, la única pérdida de energía se aprecia en el rompimiento de la ola.

2.1.3.5 Rompimiento de la ola (Breaking)

Es el momento en el que la ola está cerca de la línea de costa (asomeramiento), se hace inestable y llega a romper. Esto ocurre debido a que la velocidad de las partículas es mayor a la celeridad.

Es complejo saber en qué lugar puede romper la ola. Varios estudios han propuesto que la ola debería romper en aguas someras, cuando se cumple la condición (Deflt3D, Wave):

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h} = 0.73 \quad (12)$$

Donde, h: profundidad con respecto al nivel del mar y H_b : Altura de la ola cuando va a romper. O también puede considerarse un rango para definir la zona de rompiente (entre 0.59 a 1.2) en que la ola puede romper (Dean y Dalrymple).

2.2. Modelación numérica

2.2.1. Propagación de oleaje con SWAN

2.2.1.1 Introducción

SWAN (Simulating Waves Nearshore) es un modelo de propagación de oleaje espectral que simula la energía contenida en las ondas en su propagación desde superficies oceánicas hasta las zonas costeras, tomando en cuenta diferentes procesos a los que se ve sometido el oleaje durante su propagación, tales como: asomeramiento, refracción, rompimiento, difracción, disipación por fondo, generación del oleaje por viento, modelado con obstáculos, etc. Se utiliza principalmente donde sea necesario propagar el oleaje sobre grandes superficies oceánicas (generación de oleaje por viento), y dentro de sus utilidades se encuentra el cálculo de transporte de sedimentos, propagación de régimen medio, obtención de cota de inundación y estudio de la morfodinámica litoral.

2.2.1.2 Limitaciones y zonas de aplicación

SWAN presenta algunas limitaciones:

- La difracción es modelada en sentido restringido.
- No tiene en cuenta la reflexión (aunque pueden modelarse obstáculos).
- No calcula corrientes inducidas por el oleaje, pero si pueden ser introducidas como entrada. Por tanto, calcula el efecto de la corriente sobre el oleaje, pero no al revés.

Esto implica que el modelo dará resultados con grado alto de fiabilidad en zonas que:

- No presenten grandes obstáculos ni construcciones que produzcan mucha difracción.
- No presenten cambios bruscos de profundidad (reflexión).
- Abarquen una zona relativamente amplia, con resoluciones espaciales mayores a 10 m.

2.2.2. Bases físicas del modelo SWAN

El software Delft3D wave con el cual se realizará la modelación utiliza como base principal el modelo SWAN, que tiene un sistema de coordenadas, grillas y condiciones de contorno. Para describir la interacción de la ola actual, en todo el dominio, se debe considerar como evoluciona el espectro de densidad de energía, que se expresa como:

$$\frac{dE(f,\theta;x,y,t)}{dt} = S(f,\theta;x,y,t), \quad (13)$$

Donde los términos del lado izquierdo indican los cambios de la energía espectral (E), f es la frecuencia, θ es la dirección del espectro, “x” e “y” indican los cambios de la posición de la ola, ya que derivando con respecto al tiempo (t) se obtienen las celeridades en los posiciones horizontales del dominio $dx/dt = c_{g,x}$ y $dy/dt = c_{g,y}$. El término del lado derecho (S) identifica la energía generada localmente.

Esta expresión se utiliza para cada celda de la malla, en que los cambios de energía son:

$$\begin{aligned} \text{Cambios de energía en la celda} = & \text{importación neta de energía} \\ & + \text{generación local de energía}, \end{aligned} \quad (14)$$

Esta expresión, se relaciona tanto para el tiempo como para las posiciones horizontales. En los cambios de energía en la celda, se formula como

$$\frac{\partial E(f,\theta)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta t = \left(E(f,\theta) \Delta x \Delta y + \frac{\partial E(f,\theta)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta t \right) - E(f,\theta) \Delta x \Delta y, \quad (15)$$

Donde Δx : intervalo con respecto al eje x, Δy : intervalo con respecto al eje y, Δt : intervalo con respecto al tiempo.

La ecuación n°15 se expresa como, la energía que sale de la celda, menos la que entra de ella.

Para la importación neta de energía, se toma en cuenta las posiciones horizontales, ya que la celeridad cambia con respecto a la profundidad ($c = \sqrt{gh}$). La siguiente figura muestra la alteración de energía tanto en la posición “x” como “y”.

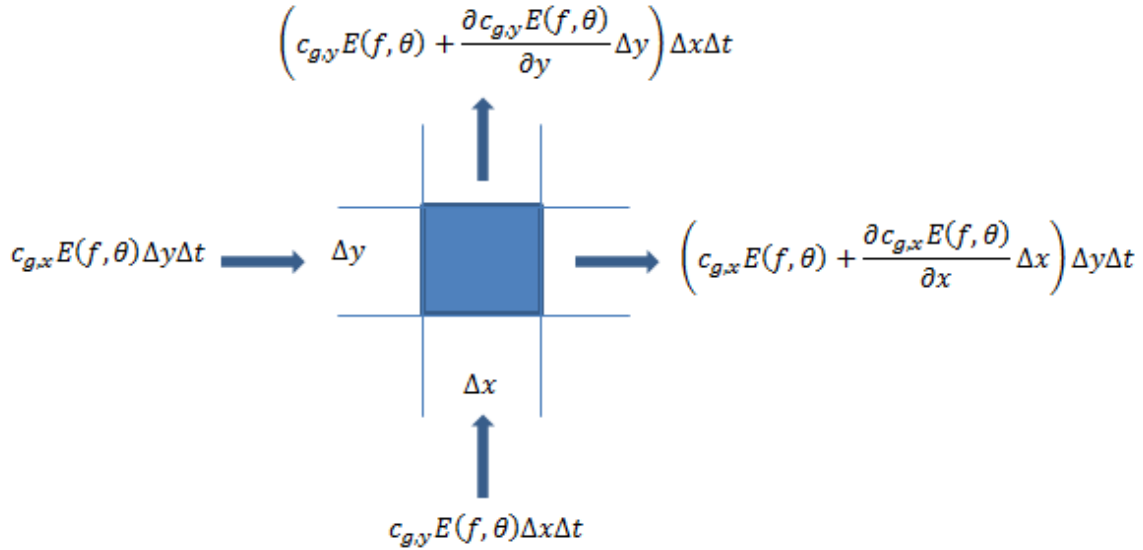


Figura N°2.5: Propagación de energía sobre una celda de la grilla en las posiciones horizontales x e y.

En la figura 2.5, la importación de energía es igual a la entrada de ella menos la exportada. Por lo tanto

$$\begin{aligned} \text{Importación neta de energía (x)} &= c_{g,x}E(f,\theta)\Delta y\Delta t - \left(c_{g,x}E(f,\theta) + \frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta)}{\partial x}\Delta x \right)\Delta y\Delta t \\ &= -\frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta)}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta t, \end{aligned} \quad (16)$$

Igual para “y”

$$\text{Importación neta de energía (y)} = -\frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta)}{\partial y}\Delta x\Delta y\Delta t, \quad (17)$$

Tener en cuenta que estos resultados son debidos a los cambios de celeridad en la entrada y salida de la celda.

El último término que queda por definir en la ecuación n°14, es la generación local de energía, que, durante un intervalo de tiempo, se expresa como:

$$\text{Generación de energía local} = S(f,\theta)\Delta x\Delta y\Delta t, \quad (18)$$

Donde $S(f,\theta)$ representa los efectos de generación, interacciones de olas y disipaciones por unidad de tiempo en una superficie. Por lo tanto, la energía de balance en la celda $\Delta x\Delta y$ en un intervalo de tiempo Δt es

$$\frac{\partial E(f,\theta)}{\partial t} \Delta x\Delta y\Delta t = -\frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta)}{\partial x} \Delta x\Delta y\Delta t - \frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta)}{\partial y} \Delta x\Delta y\Delta t + S(f,\theta)\Delta x\Delta y\Delta t, \quad (19)$$

Dividiendo los términos en $\Delta x\Delta y\Delta t$ y moviendo las derivadas de energía hacia la izquierda, se obtiene la ecuación de balance de energía espectral, que muestra la variación de los componentes de la ola según su posición en x e y para cada celda y en un instante e tiempo.

$$\frac{dE(f,\theta;x,y,t)}{dt} + \frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y} = S(f,\theta;x,y,t), \quad (20)$$

La ecuación (20) demuestra que los cambios de la energía que se producen en el transcurso de la celda, son el resultado de disipaciones e interacciones de las olas. Tener en cuenta que esta ecuación es para aguas profundas.

Para aguas someras se mantiene la misma teoría, donde las únicas diferencias son:

- Aparecen los fenómenos de asomeramiento, refracción y difracción.
- Las complejidades de los términos son mayores, ya que además de todas las interacciones necesarias para el modelamiento, se debe agregar la fricción del fondo, mayor interacción entre olas y la profundidad de rompimiento de la ola.

Para modelar estos fenómenos, se debe distribuir la energía de cada celda. Para ello, se debe considerar en la ecuación de balance, los cambios de distribución de energía direccional ($\Delta\theta$).

Por lo que la importación neta de energía queda como

$$\begin{aligned} \text{Importación neta de energía} &= c_0 E(f,\theta)\Delta x\Delta y\Delta t - \left(c_0 E(f,\theta) + \frac{\partial c_0 E(f,\theta)}{\partial \theta} \Delta\theta \right) \Delta x\Delta y\Delta t \\ &= -\frac{\partial c_0 E(f,\theta)}{\partial \theta} \Delta\theta \Delta x\Delta y\Delta t, \quad (21) \end{aligned}$$

Donde c_0 es la velocidad de refracción o difracción

Considerando este resultado en el balance de energía para aguas profundas ecuación (20), y dividiendo todos los términos en $\Delta\theta\Delta x\Delta y\Delta t$, se obtiene

$$\frac{dE(f,\theta;x,y,t)}{dt} + \frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial \theta} = S(f,\theta;x,y,t), \quad (22)$$

Esta expresión es la ecuación de balance de energía para aguas someras.

En corrientes cercanas a la costa, la ecuación de balance necesita suplementar los términos de energía transferida entre las olas, las corrientes y los efectos de propagación de oleaje. Por lo anterior, se debe agregar el traspaso de energía entre distintas frecuencias de los distintos procesos.

Como la energía transferida entre las olas y las corrientes no es fácil de representar, debido a los diferentes sentidos de los vectores entre ellos, se debe considerar el balance de acción de la ola $N(\sigma,\theta)$, que corresponde a la razón entre la ecuación de balance de energía $E(\sigma,\theta)$ y la frecuencia relativa radial .

$$N(\sigma,\theta) = \frac{E(\sigma,\theta)}{\sigma}, \quad (23)$$

La razón de este cambio, (en contraste con la energía de la ola) es que la acción de la ola $N(\sigma,\theta)$ se conserva en presencia de corrientes.

Por lo tanto, la ecuación de balance de la acción de la onda, que incluye los cambios de frecuencia, es entonces

$$\begin{aligned} \frac{dN(\sigma,\theta;x,y,t)}{dt} + \frac{\partial c_{g,x}N(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}N(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial y} \\ + \frac{\partial c_{\theta}E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma}E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma,\theta;x,y,t)}{\sigma}, \end{aligned} \quad (24)$$

Donde el quinto término del lado izquierdo representa los cambios de frecuencia en las olas.

2.2.2.1 Esquema General del Funcionamiento de SWAN.

Swan funciona discretizando el dominio espacial en mallas estructuradas que pueden anidarse. Los datos de oleaje se prescriben en una o varias de las aristas de la malla de mayor

superficie. Para las mallas anidadas los datos se toman del espectro interpolando en la ejecución de la malla anterior.

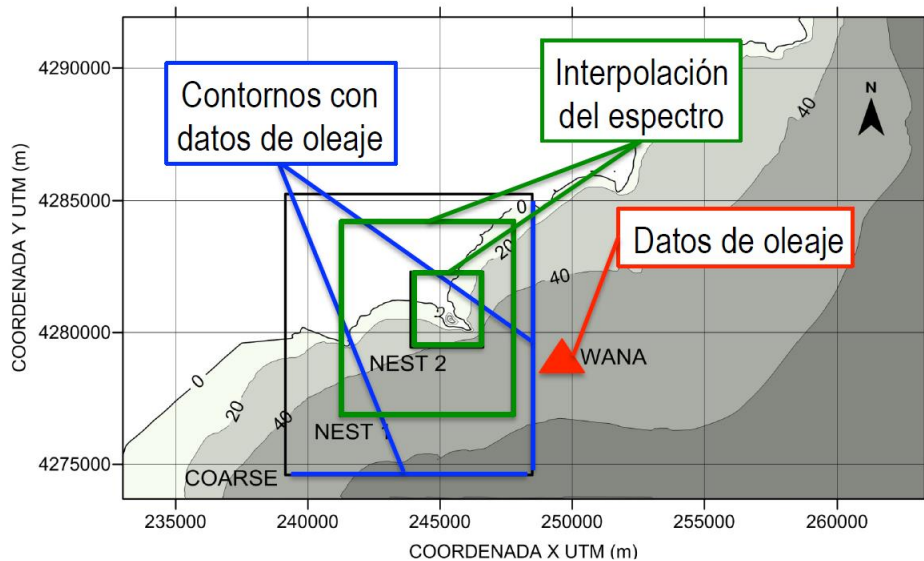


Figura N°2.6: Ejemplo Mallas anidadas en funcionamiento de modelo SWAN.

Fuente: Desconocida.

SWAN ha sido validado y verificado con éxito en una gama de experimentos complejos de campo y de laboratorio (Ris et al., 1999; WL \ Delft Hydraulics, 1999, 2000)

2.2.3. Grilla Computacional y Condiciones de borde

La grilla computacional opera con 4 dimensiones, dos de ellas son las orientaciones x e y , θ para las coordenadas esféricas y σ que es la frecuencia.

Una de las consideraciones importantes en la grilla computacional (para el modelo de propagación de oleaje), es el tiempo de cálculo que se requiere para las aplicaciones de rutina. Este tiempo, se ve afectado en gran medida, por los esquemas numéricos que se utilizan, sobre todo, los de propagar las ondas a través del espacio geográfico. Estos esquemas son por lo general, las diferencias finitas explícitas, que están sujetas al criterio de Courant, que establece que la energía de las olas no puede viajar más de una celda geografía en un paso de tiempo. Esto implica que

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{c_{g,x}} \quad \text{y} \quad \Delta t < \frac{\Delta y}{c_{g,y}}, \quad (25)$$

Dónde: Δx y Δy son los tamaños de las celdas geográficas en las direcciones “x” e “y”, c_g es la celeridad grupal de las olas en el modelo. En teoría c_g es igual a \sqrt{gh} donde h es la profundidad.

Cuando la ola se propaga hacia la costa, disminuye cada vez más la celeridad grupal debido a que la profundidad va siendo linealmente menor, por tanto, es necesario realizar grillas con celdas de menor tamaño para tener un número de Courant cercano a 1.

3. Métodos

3.1. Área de estudio

El Golfo de Arauco se ubica en el Océano Pacífico en la costa chilena, en la Región del Bío-Bío, entre los paralelos 37°10' y 36°45' de latitud sur.

El estudio se centra entre las playas Escuadrón, ubicada al norte del golfo de Arauco en las coordenadas 36°54'36" Latitud Sur y 73°10'35" Longitud Oeste y por el Sur Punta Lavapíe ubicada en las coordenadas 37°15'0" Latitud Sur y 73°56'4" Longitud Oeste. Abarcando un total de 7 puntos de interés o playas dentro del Golfo de Arauco, las cuales son Llico (37°17'4" Latitud Sur y 73°54'1" Longitud Oeste), Tubul Oeste (37°17'4" Latitud Sur y 73°47'1" Longitud Oeste), Arauco (37°17'3" Latitud Sur y 73°21'8" Longitud Oeste), Chivilingo (37°11'0" Latitud Sur y 73°17'5" Longitud Oeste) y Coronel (37°08'3" Latitud Sur y 73°17'6" Longitud Oeste).

El estudio abarca un total de 80 km de línea costera del Golfo de Arauco, y frente a estas playas en estudio se encuentra la Isla Santa María, situada frente a las costas de la provincia de Arauco en la VII Región del Bío-Bío, Chile, esta tiene 11.5 kilómetros de largo, en sentido norte-sur, y entre 0.5 y 6.5 km de ancho en sentido este-oeste, abarca así una superficie total

de 35 km², debido a la isla se condicionan los parámetros de oleajes y fenómenos físicos que ocurren dentro del Golfo de Arauco.

Los datos de oleaje se obtendrán de un punto conocido en las coordenadas 37° 0'0.00" Latitud Sur y 74° 0'0.00" Longitud Oeste, a una distancia de 40 km de la Isla Santa Maria, 42 km de distancia con la Playa Punta Lavapíe y 75 km de playa Escuadrón, para el estudio se trabajara con la base de datos del National Oceanographic Atmospheric Administration (NOAA), desde el 2005 hasta el 2014, donde se extraerá datos de viento que se analizaran para así obtener los parámetros de oleaje en aguas profundas de altura significativa, periodo peak y dirección de oleaje. La figura 3.1 muestra la localización de la zona en estudio.



Figura N°3.1: Ubicación de las zonas y playas de estudio.

Fuente: Adaptado desde Google Earth.

3.2. Reanálisis de series de oleaje en aguas profundas

3.2.1. Datos de oleaje de tercera generación

La evolución de los computadores y las limitaciones que tenían los modelos de primera y segunda generación impulsaron la aparición de los modelos de tercera generación, en los cuales a diferencia de las generaciones anteriores no imponen una forma definida del espectro y tanto la ecuación de transporte de energía como los términos no lineales pueden calcularse completamente. Ahora con esta generación de modelos para la predicción de oleaje es posible observar la evolución en el espacio y en el tiempo del espectro de frecuencias, la altura de la ola significativa H_s , entre otros, lo cual los hace mucho más precisos y útiles en el campo de la ingeniería.

Dentro de estos modelos se encuentra el WAM (Ciclo 1 a 4) (WAMDI Group, 1988), WAVEWATCH III (Tolman, 1989; 2002b), MRI-III (Ueno y Ishizaka, 1997), JWA3G (Suzuki y Isozaki, 1994), y el SWAN (Booij et al., 1999), entre otros (Montoya y Osorio, 2008).

Cada uno de ellos estima de forma diferente los sumideros o fuentes de energía tratando de mejorar los resultados obtenidos con el modelo al ser comparados con los datos oceánicos obtenidos con las boyas.

Un aspecto importante de este tipo de modelos es que la parametrización de la función exacta de transferencia no lineal de energía contiene el mismo número de grados de libertad que el espectro en sí mismo y el balance de energía es cerrado o ajustado mediante la especificación de una función de disipación (Montoya y Osorio, 2008).

Se utilizará el modelo WAVEWATCH III (Tolman, 1989; 2002b) de la NOAA, el cual pronostica el clima de oleaje alrededor de todo el mundo a partir de datos de viento de estaciones meteorológicas e imágenes de radar. En ella, el sistema funciona por medio de los vientos globales, con registro de datos de hasta 60 años.

3.2.2. Modelo WAVEWATCH III

Los datos utilizados para el análisis y caracterización del clima de olas en aguas profundas fueron extraídos del módulo de reanálisis del modelo WAVEWATCH III. El modelo WWIII (Tolman 1997, 1999) es un modelo de tercera generación como fue mencionado con anterioridad, desarrollado por la NOAA/NCEP (WAMDIG 1988, Komen et al. 1994) y que resuelve la ecuación de conservación de la densidad espectral de la onda.

El modelo asume que las propiedades del medio (profundidades y corrientes), así como el campo de ondas, varían en escalas espaciales y temporales mucho superior a las escalas de variación de una única onda. El WWIII permite simular la generación y propagación de espectros de olas con base en los datos de viento, considerando los procesos de generación, iteraciones no lineales ola-ola, disipación por whitecapping y fricción con el fondo.

Este modelo de mallas globales anidadas se presenta en la figura 3.2. Donde están las superficies y se analiza el comportamiento del oleaje producido por los vientos globales.

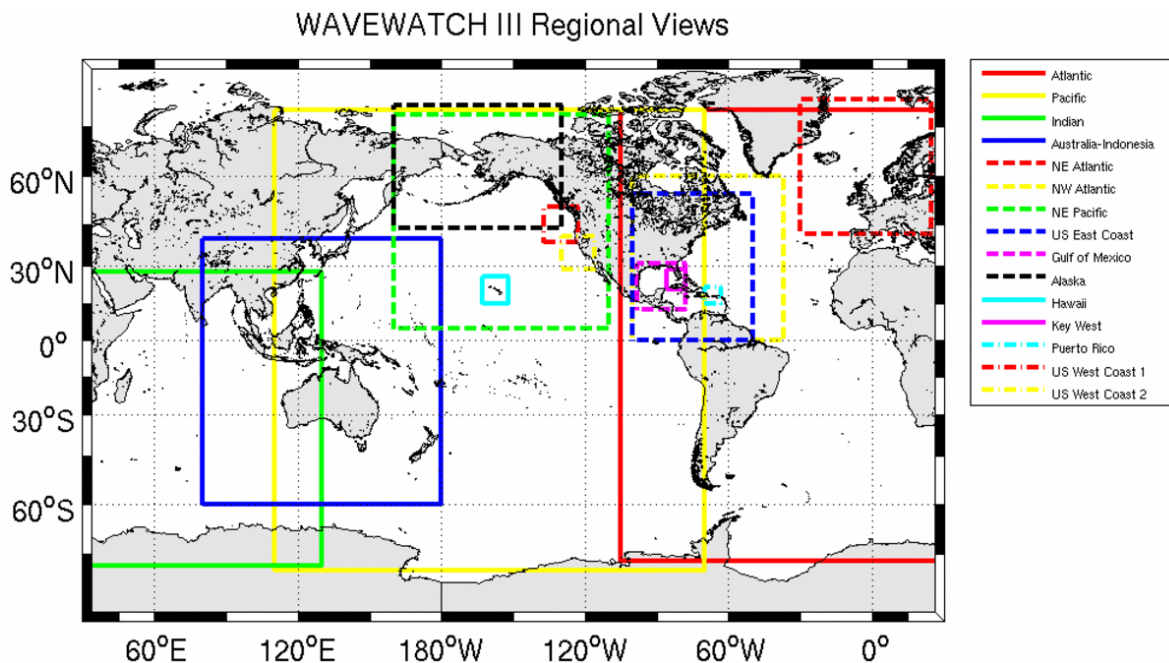


Figura N°3.2: Regiones del Modelo global (NOAA Wavewatch III).

Fuente: Sitio web Noaa.

3.3. Clima de oleaje

3.3.1. Caracterización anual del oleaje

Para realizar la caracterización del oleaje en aguas profundas, se utilizó como herramienta el software Matlab, con el cual se obtuvimos los parámetros de Altura significativa, Periodo Peak y Dirección del oleaje a partir los datos de velocidades y alturas de viento, en diferentes direcciones y para distintos periodos de tiempo.

Se presentará la metodología utilizada para realizar la caracterización del oleaje en aguas profundas, y así encontrar la altura significativa (H_s), periodo peak (T_p) y dirección de oleaje (en grados $^\circ$), parámetros representativos para cada mes del año.

Sabemos que el oleaje procede de la dirección oeste principalmente (tercer y cuarto cuadrante), esto debido a la geografía de nuestro país. Por lo que realizaremos un análisis general y luego más detallado en los cuadrantes mencionados, donde utilizaremos los intervalos mostrados en la tabla N°3.1, tabla obtenida en relación a la rosa de direcciones que se muestra en la figura N°3.3, donde se aprecia con claridad cada dirección definida.

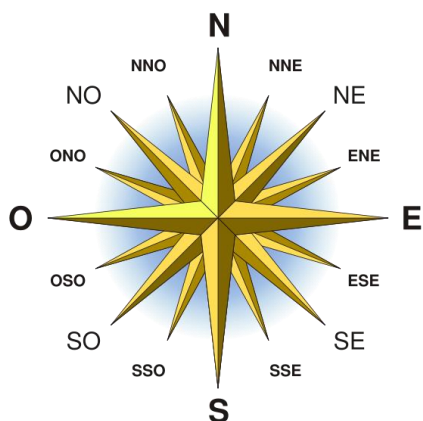


Figura N°3.3: Rosa de los vientos.

Tabla N°3.1: Intervalos en grados, asociados a cada dirección.

Dirección	Intervalo (°)
N	11.25 - 348.75
NNO	348.75 - 326.25
NO	326.25 - 303.75
ONO	303.75 - 281.25
O	281.25 - 258.75
OSO	258.75 - 236.25
SO	236.25 - 213.75
SSO	213.75 - 191.25
S	191.25 - 168.75

El 3 y 4 cuadrante fueron separados en 9 direcciones, señaladas en la tabla 3.1, donde cada dirección abarca 22.5° y por un tema de simplicidad para realizar los escenarios de modelación se agruparon en 3 intervalos de procedencia, los cuales son noroeste, oeste y suroeste y se muestran en la tabla 3.2.

Tabla N°3.2: Distribución de intervalos de direcciones y porcentajes de incidencia, según su ángulo de incidencia.

	Dirección	Intervalo	Incidencia (%)
Noroeste	N	11.25- 348.75	0.1
	NNO	348.75 - 326.25	
	NO	326.25 - 303.75	
Oeste	ONO	303.75 - 281.25	25.8
	O	281.25 - 258.75	
	OSO	258.75 - 236.25	
Suroeste	SO	236.25 - 213.75	74.1
	SSO	213.75 - 191.25	
	S	191.25 - 168.75	
		TOTAL	100

En primera instancia se analizó la data total, para tener información general de los parámetros de oleaje. Y luego un análisis más detallado de manera mensual. A continuación, la figura N°3.4 y N°3.5 muestran los gráficos polares y rosas de oleaje de la base de datos especificando su dirección según los intervalos de la tabla 3.2, donde se distingue el detalle

de cada intervalo de 22.5° y también de color rojo las direcciones noroeste, oeste y suroeste con las que trabajaremos, tanto para la altura significativa (m) y periodo peak (seg) de oleaje.

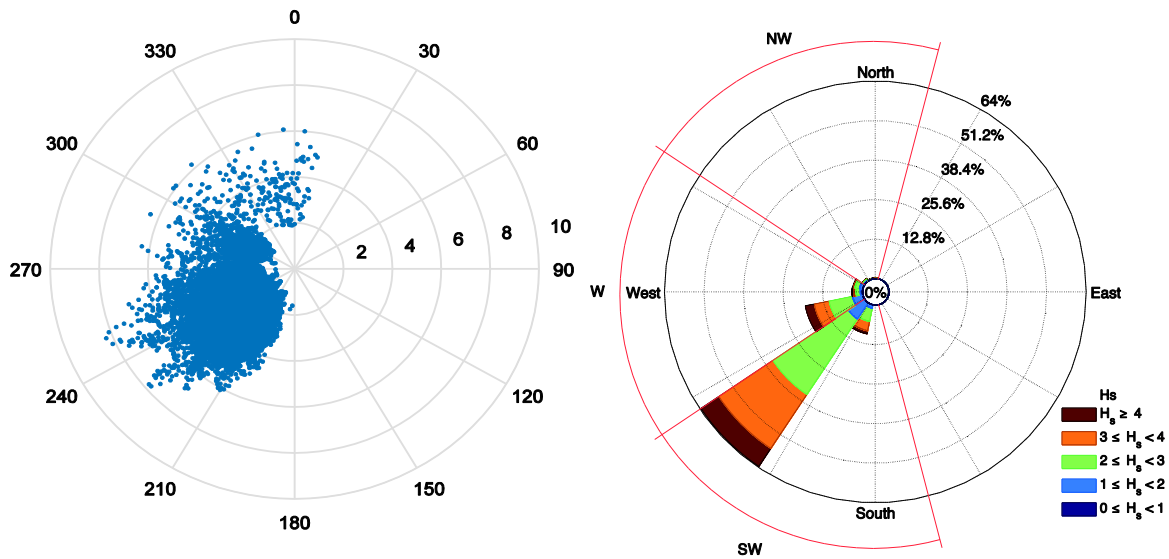


Figura N°3.4: Rosa de los vientos para la data total de Altura Significativa (H_s) en relación a su dirección de procedencia ($^\circ$) e incidencia (%).

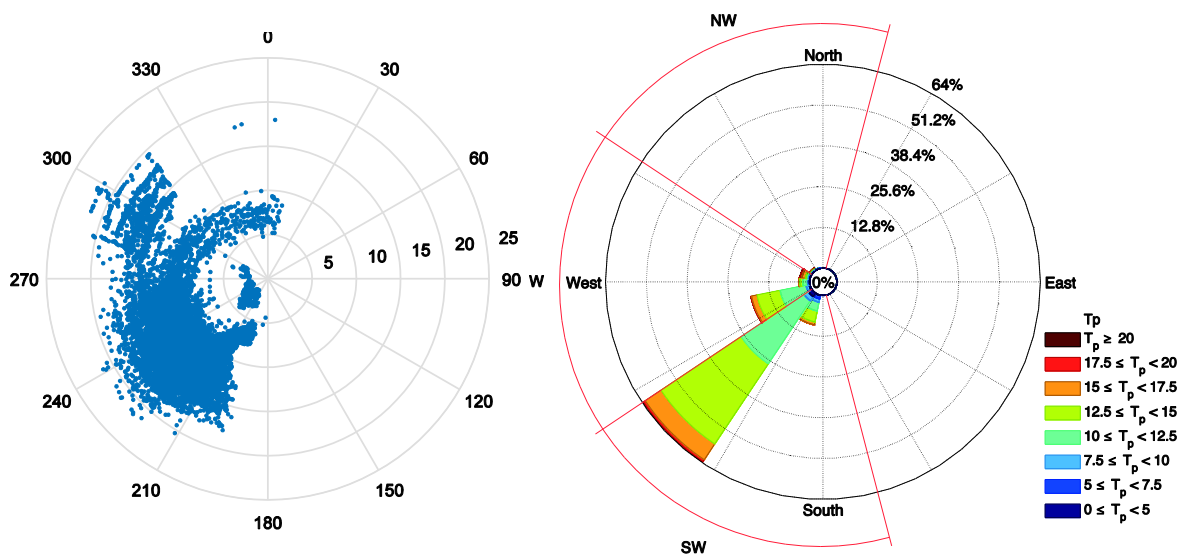


Figura N°3.5: Rosa de los vientos para la data total de Periodo Peak (T_p) en relación a su dirección de procedencia ($^\circ$) e incidencia (%).

De las figuras N° 3.4 y 3.5 se aprecia con claridad que la mayor cantidad de datos se centra por el lado suroeste y oeste (tercer y cuarto cuadrante), tanto para parámetros de altura de ola, como también para periodo peak, también vemos como la rosa de oleaje está dividida en 3 direcciones las cuales se delimitan de color rojo.

Por medio de distintas rutinas en Matlab. Se pudo cuantificar y analizar los datos obtenidos de los 9 años de estudio, teniendo un total de 28.853 datos. Datos que se separaron según altura significativa y periodo peak en relación a su dirección de procedencia. La tabla N°3.3 muestra el porcentaje de incidencia según cada intervalo de dirección descrito con anterioridad, esto con el fin de buscar los escenarios más probables y ocurrentes en el análisis de oleaje mensual.

Tabla N°3.3: Tabla de porcentaje de incidencia (%) asociado a la dirección del oleaje (°) en aguas profundas.

	Dirección	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
Noroeste	N	0	0	0	0.1	0.4	0.7	0.4	0.8	0.2	0	0	0
	NNO	0	0	0	0.2	0.4	0.6	1.2	0.7	0.0	0	0	0
	NO	1.2	1.5	0.1	0.3	0.9	1.0	0.5	0.8	0.2	0.7	2.1	2.5
Oeste	ONO	13.1	8.0	1.4	1.4	2.7	1.6	2.7	1.3	0.1	1.2	1.2	5.0
	O	3.3	3.0	1.8	1.8	5.2	5.1	5.9	6.5	3.3	1.0	1.0	1.9
	OSO	12.9	12.8	12.6	15.2	11.9	19.5	32.8	32.5	30.1	18.6	13.7	11.9
Suroeste	SO	64.1	63.9	76.5	69.7	70.0	57.5	44.9	49.6	59.5	70.1	69.1	69.2
	SSO	5.4	10.8	7.5	11.4	8.5	14.1	11.7	7.6	6.6	8.4	12.9	9.5
	S	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

De la tabla 3.3 se puede distinguir que los mayores porcentajes de incidencia se presentan en las direcciones OSO, SO y SSO, es decir oleajes con mayor procedencia desde la dirección Sur Oeste, luego se presentan en menor cantidad, pero no menos importantes oleajes de la dirección OSO, O y ONO, los cuales alcanzan porcentajes importantes que se deben considerar. Finalmente, oleajes que provienen de la dirección NO, NNO y N, se presentan de manera casi nula, como eventos aislados o tormentas poco ocurrentes provenientes del norte, pero que de igual forma representarán un escenario a modelar.

De igual forma se realizaron las tablas de incidencia de altura de oleaje (metros), y periodo peak (s), según su dirección de procedencia ($^{\circ}$), donde se visualiza los parámetros generales de oleaje característicos para cada intervalo de dirección. Valores mostrados en las Tablas 3.4 y 3.5, respectivamente.

Tabla N°3.4: Tabla de incidencia de altura de oleaje (m), según su ángulo de incidencia ($^{\circ}$) para los 9 años de datos. Siendo A (%) porcentaje de ocurrencia por cada clase.

H (m)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	A (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Noroeste	N	0	4	17	26	16	3	2	0	0	68	0.24
	NNO	0	2	19	29	22	5	1	0	0	78	0.3
	NO	0	86	106	50	20	11	3	0	0	276	0.96
Oeste	ONO	3	301	436	124	46	11	1	0	0	922	3.2
	O	1	190	390	229	106	43	5	0	0	964	3.3
	OSO	9	949	2215	1414	565	203	69	14	3	5441	18.9
Suroeste	SO	12	1793	8473	6073	1646	290	54	12	0	18353	63.6
	SSO	0	312	1267	884	249	34	3	0	0	2749	9.5
	S	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0.01
Total		25	3639	12923	8829	2670	600	138	26	3	28853	
A (%)		0.09	12.6	44.8	30.6	9.3	2.1	0.48	0.09	0.01		

De la tabla 3.4 diferenciamos alturas con mayor porcentaje de incidencia, las que se encuentran en el rango de los 2 a 4 metros, alcanzando un 75% del total de olas, también se presentan porcentajes considerables entre 1-2. Finalmente, alturas de olas mayores a 6 metros se presentan en un porcentaje muy bajo menos del 1%, pero considerados de igual forma.

Tabla N°3.5: Tabla de periodo peak (s) según su ángulo de incidencia (°) para los 9 años de datos. Siendo A (%) porcentaje de ocurrencia por cada clase.

	T (s)	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
Noroeste	N	0	0	7	44	15	0	0	0	1	1	0	68	0.2
	NNO	0	0	2	49	25	1	0	0	1	0	0	78	0.3
	NO	0	0	3	30	44	10	4	91	82	12	0	276	0.96
Oeste	ONO	0	15	3	25	99	83	43	295	285	53	21	922	3.2
	O	2	14	0	6	169	364	207	169	29	4	0	964	3.3
	OSO	8	58	0	12	284	1775	2073	945	251	31	4	5441	18.9
Suroeste	SO	14	338	14	28	444	4590	8092	4006	738	75	14	18353	63.6
	SSO	0	33	21	409	183	597	888	525	90	2	1	2749	9.5
	S	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.01
	Total	24	460	50	603	1263	7420	11307	6031	1477	178	40	28853	
	A (%)	0.08	1.6	0.2	2.1	4.4	25.7	39.2	20.9	5.1	0.6	0.14		

De la tabla 3.5 se extrae con claridad los periodos peak con mayor incidencia de la data de datos, los cuales están en el rango de los 10-16 segundos, y representarían oleajes tipo Swell, provenientes de la dirección suroeste y oeste principalmente, según los intervalos definidos en la tabla 3.2.

Con el fin de describir los posibles estados de mar más representativos, se realizó un análisis de datos mensuales, para así definir los parámetros de entradas o condiciones a utilizar en el modelo SWAN, en relación a sus intervalos direccionales de estudio con los cuales se trabajará mes a mes.

3.3.2. Caracterización mensual del oleaje

La caracterización del clima marítimo se realizó de manera mensual, esto con el fin de detallar con mayor exactitud, todas las condiciones posibles a utilizar en nuestro modelo numérico. Para ello se mostrará a continuación el análisis realizado con el mes de enero, analizando gráficas polares, tablas de incidencias y distintos parámetros de oleajes extraídos luego del análisis estadístico.

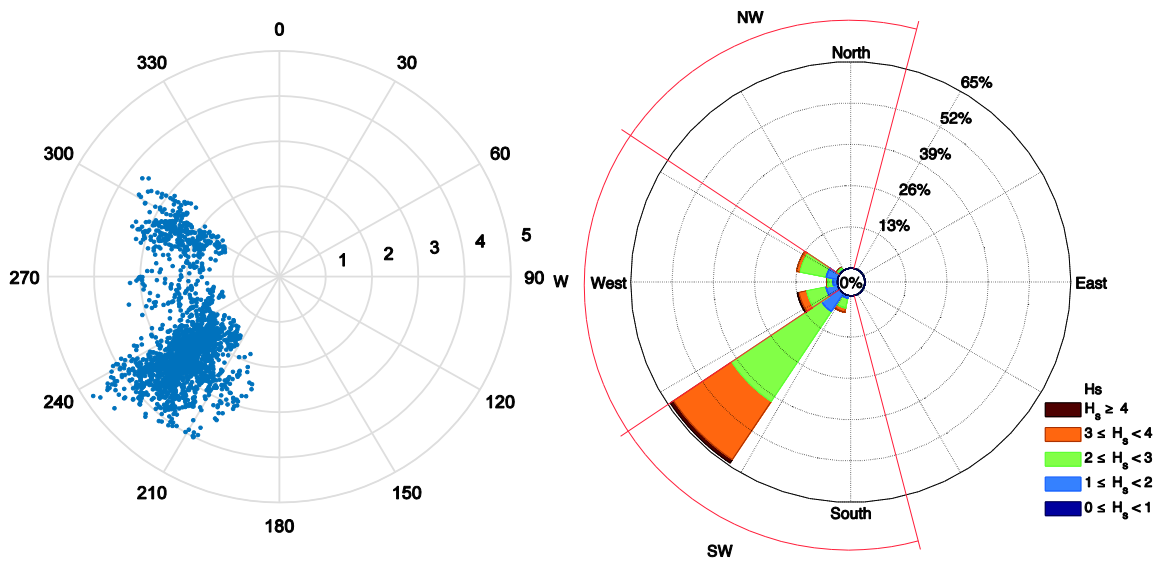


Figura N°3.6: Rosa de los vientos del mes de enero. Altura Significativa (m) en relación a su dirección de procedencia (°) e incidencia (%)

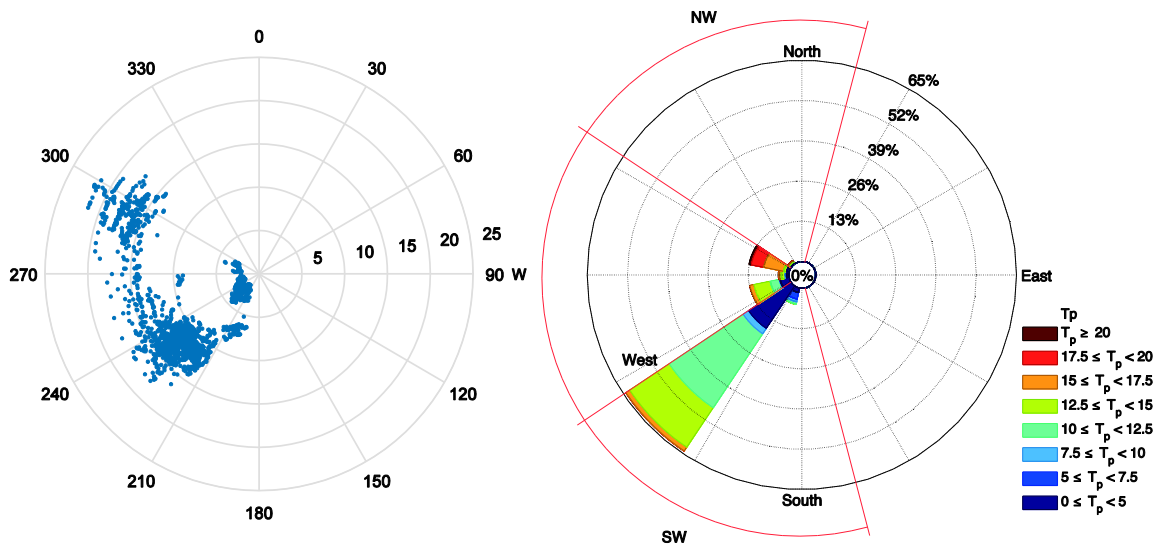


Figura N°3.7: Rosa de los vientos del mes de enero. Periodo Peak (s) en relación a su dirección de procedencia (°) e incidencia (%).

Tabla N°3.6. Tabla de incidencia de altura significativa del oleaje (m) en aguas profundas para el mes de enero. A(%) Porcentaje de ocurrencia por cada clase.

H (m)		0	1	2	3	4	Total	A (%)
		1	2	3	4	5		
Noroeste	N	0	0	0	0	0	0	0
	NNO	0	0	0	0	0	0	0
	NO	0	2	18	7	0	27	1.20
Oeste	ONO	0	81	187	26	0	294	13.12
	O	0	29	39	6	0	74	3.30
	OSO	0	83	137	55	14	289	12.90
Suroeste	SO	0	152	763	493	29	1437	64.12
	SSO	0	18	71	30	1	120	5.35
	S	0	0	0	0	0	0	0
Total		0	365	1215	617	44	2241	
A (%)		0	16.29	54.22	27.53	1.96		

Tabla N°3.7. Tabla de incidencia del periodo peak (s) en aguas profundas para el mes de enero. A(%) Porcentaje de ocurrencia por cada clase.

T (s)		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
Noroeste	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
	NNO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
	NO	0	0	0	0	0	0	0	17	9	1	0	27	1.2
Oeste	ONO	0	15	2	0	0	0	3	82	138	37	17	294	13.1
	O	2	14	0	0	9	0	5	35	6	3	0	74	3.3
	OSO	8	58	0	0	5	52	89	65	12	0	0	289	12.9
Suroeste	SO	14	338	14	1	47	469	428	109	17	0	0	1437	64.1
	SSO	0	33	1	53	14	14	5	0	0	0	0	120	5.4
	S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
Total		24	458	17	54	75	535	530	308	182	41	17	2241	
A (%)		1.07	20.44	0.76	2.41	3.35	23.87	23.65	13.74	8.12	1.83	0.76		

De la tabla 3.6 se puede extraer que la altura de oleaje predominante en el mes de enero va en el rango de los 2 a 3 metros alcanzando casi un 55% de incidencia de oleaje con esta altura

de ola, mientras que de la tabla 3.7, se extrae que la mayor incidencia en relación al periodo peak (s) se encuentra en los rangos de 2 a 4 segundos y desde 10 a los 14 segundos, con un 20% y 46% respectivamente, cabe señalar que en este mes se presentan dos escenarios distintos. Oleajes generados por vientos locales los cuales generan oleajes de bajos periodos (tipo seas) y oleajes generados por vientos en aguas profundas, los cuales generan periodos mayores (tipo swell), y están representados con mayor incidencia entre los 10 y 14 segundos. Por ende, para el mes de enero fue necesario (al igual que otros meses) realizar un análisis más detallado, donde se identificó el tipo de oleaje (seas y/o swell) según su dirección de procedencia, ya sea oleaje proveniente del sur u oeste.

Primero se identifica los parámetros de oleajes generales del mes de enero, promedio simple de Hs (m), Tp (seg) y dirección (°), esto de la data completa del mes de enero. Y luego se separó los parámetros de oleaje según su dirección de procedencia mostrada en la tabla 3.5 y tipo de oleaje (seas o swell). La tabla N°3.8 señala los parámetros de oleaje para la data completa del mes de enero.

Tabla N°3.8: Parámetros de oleaje de la data completa del mes de enero.

	Enero
Hs (m)	2.7
Tp (seg)	10.8
Dp (°)	239.4

El tipo de oleaje se separó en tipo seas y tipo swell relacionados a su ángulo de incidencia indicada con anterioridad (noroeste, oeste y suroeste) en la tabla 3.5, separación del tipo de oleaje mostrado en las figuras 3.8 y 3.9.

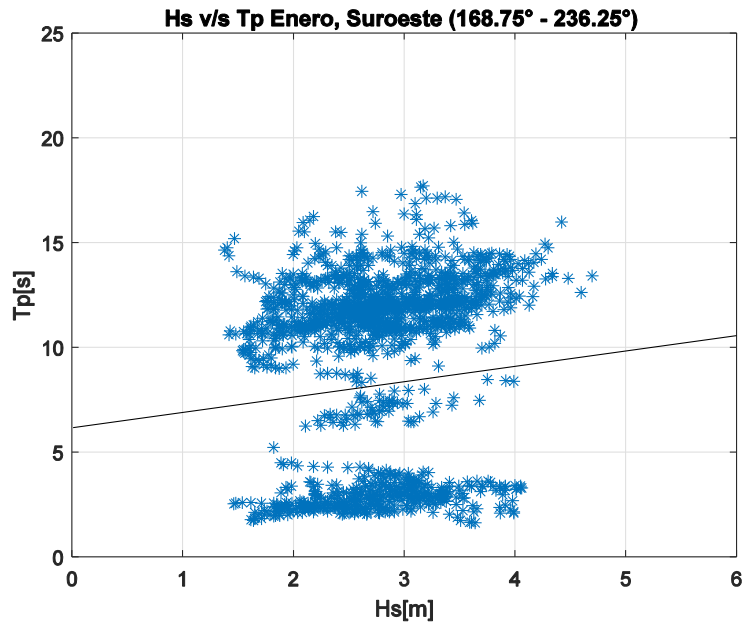


Figura N°3.8: Altura significativa (m) vs periodo peak (s), del mes de enero asociado a la dirección suroeste ($168.75^\circ - 236.25^\circ$)

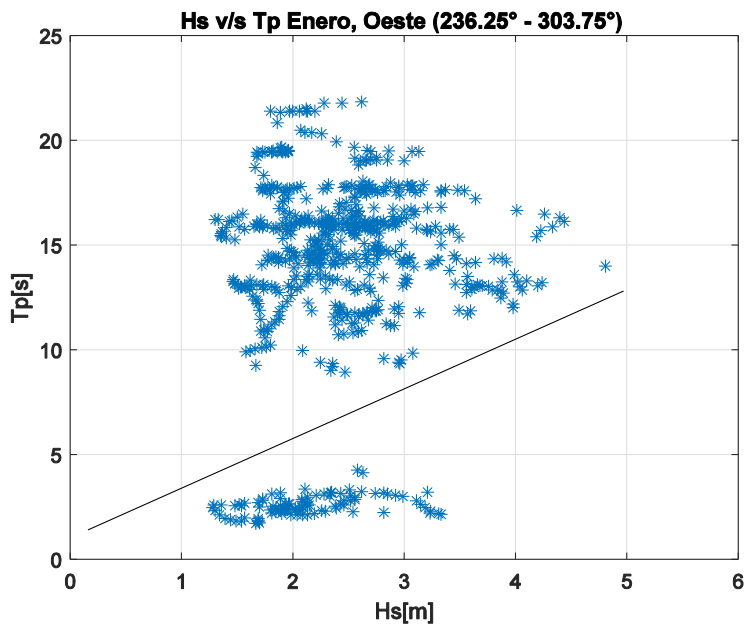


Figura N°3.9: Altura significativa (m) vs periodo peak (s), del mes de enero asociado a la dirección oeste ($236.25^\circ - 303.75^\circ$)

De la figura 3.8 asociada a la dirección de procedencia suroeste, se distingue como la nube de puntos es uniforme tanto bajo la línea y sobre ella, donde los oleajes tipo Seas se encuentran bajo la línea negra y vienen representados por bajos periodos y sobre la línea se encuentran los oleajes tipo Swell.

No así, la figura 3.9, que muestra gran cantidad de datos sobre la línea los que representan grandes periodos de oleaje asociados a oleajes del tipo swell, mientras que un bajo porcentaje de estos se presentan como oleaje tipo Seas, esto para la dirección de procedencia Oeste.

De igual forma se muestran la rosa de oleaje para altura significativa y periodo peak, que destacan de mejor forma la cantidad de datos en cada dirección, para cada mes. Esto según la tabla 3.2 en la que se aprecia cada sub intervalo de 22.5° y los límites en rojo de las direcciones noroeste, oeste y suroeste de cada mes. Rosas de oleaje que tomaran solo los intervalos NO, O y SO, no fue posible realizarlo con precisión debido a que divide la gráfica polar en 5.3 intervalos, lo que no es posible graficar en la rosa de oleaje, es por ello que se anexa rosas de oleajes divididas en 5 intervalos, que sería el caso que más se asemeja a lo esperado.

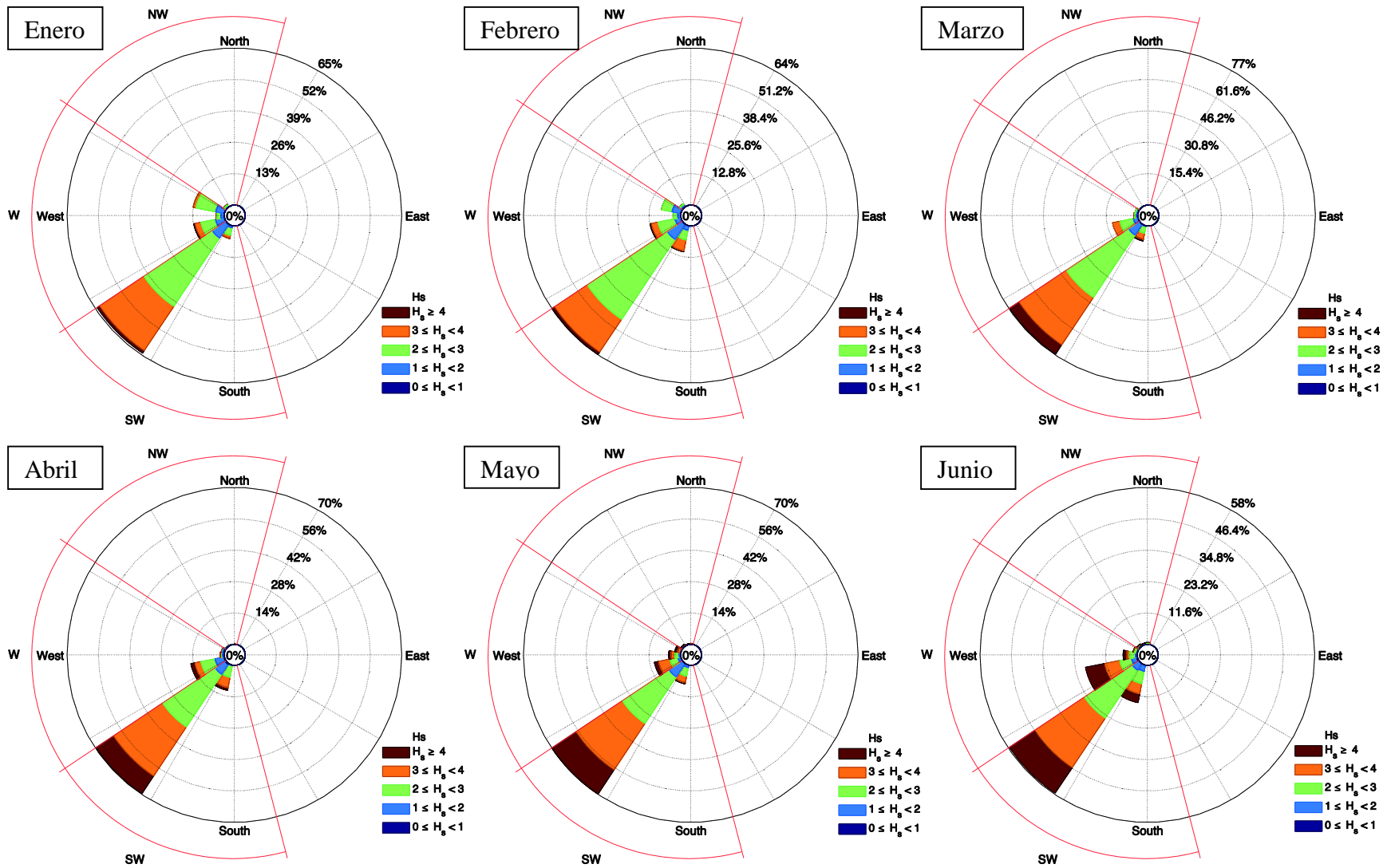


Figura N°3.10: Rosa de oleaje de altura significativa (m) para los meses de enero a junio.

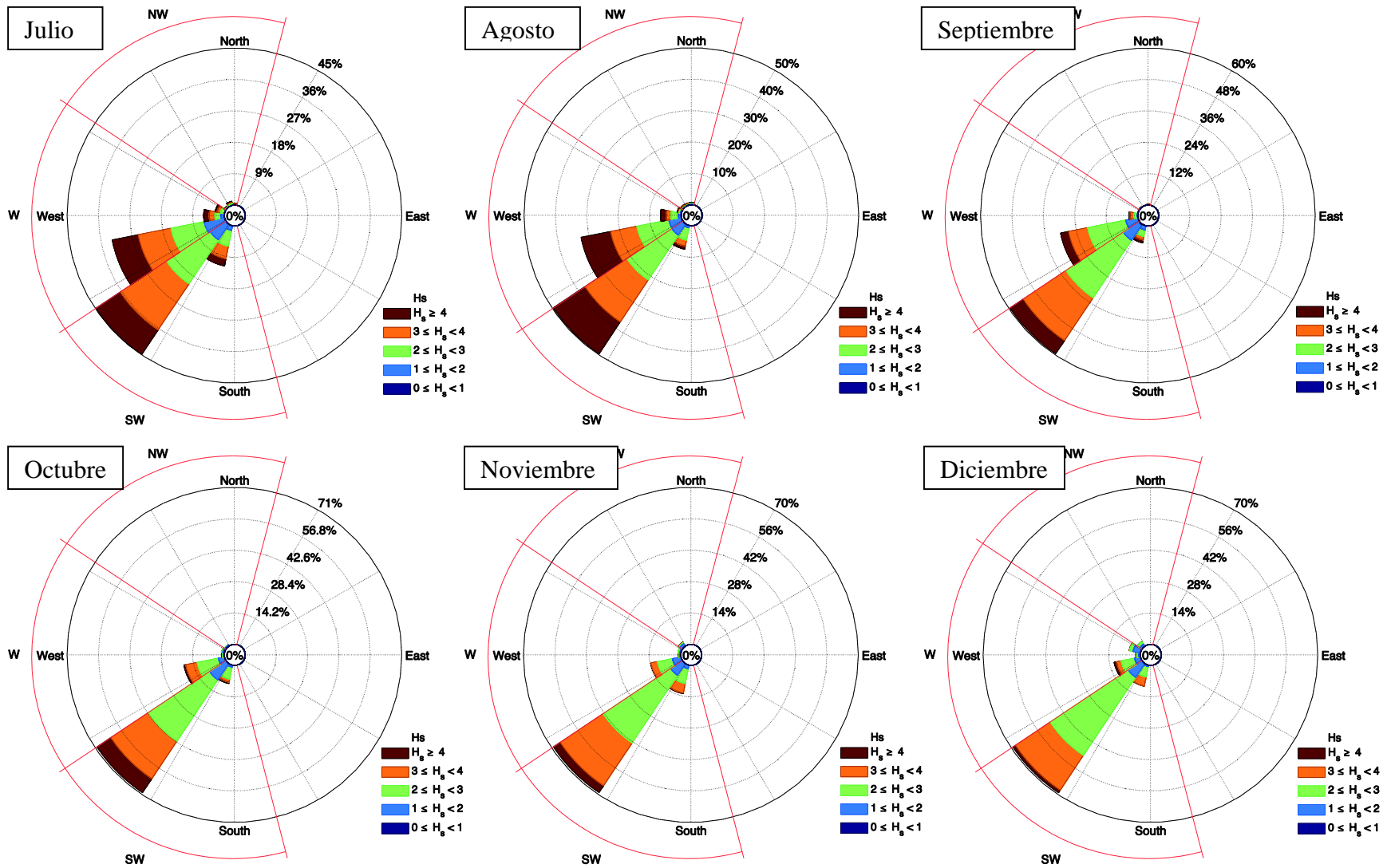


Figura N°3.11: Rosa de oleaje de altura significativa (m) para los meses de julio a diciembre.

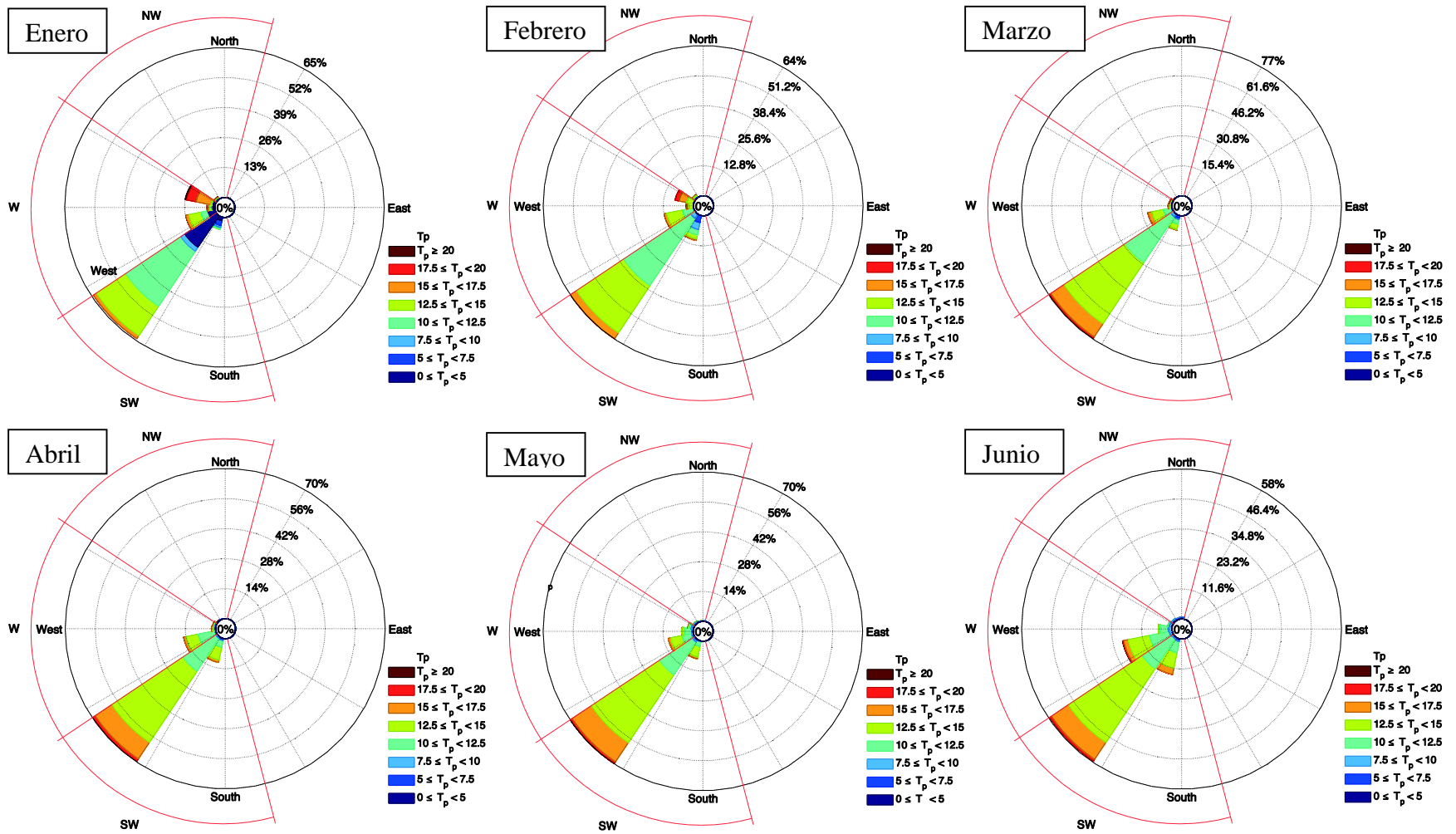


Figura N°3.12: Rosa de oleaje de periodo peak (s) para los meses de enero a junio.

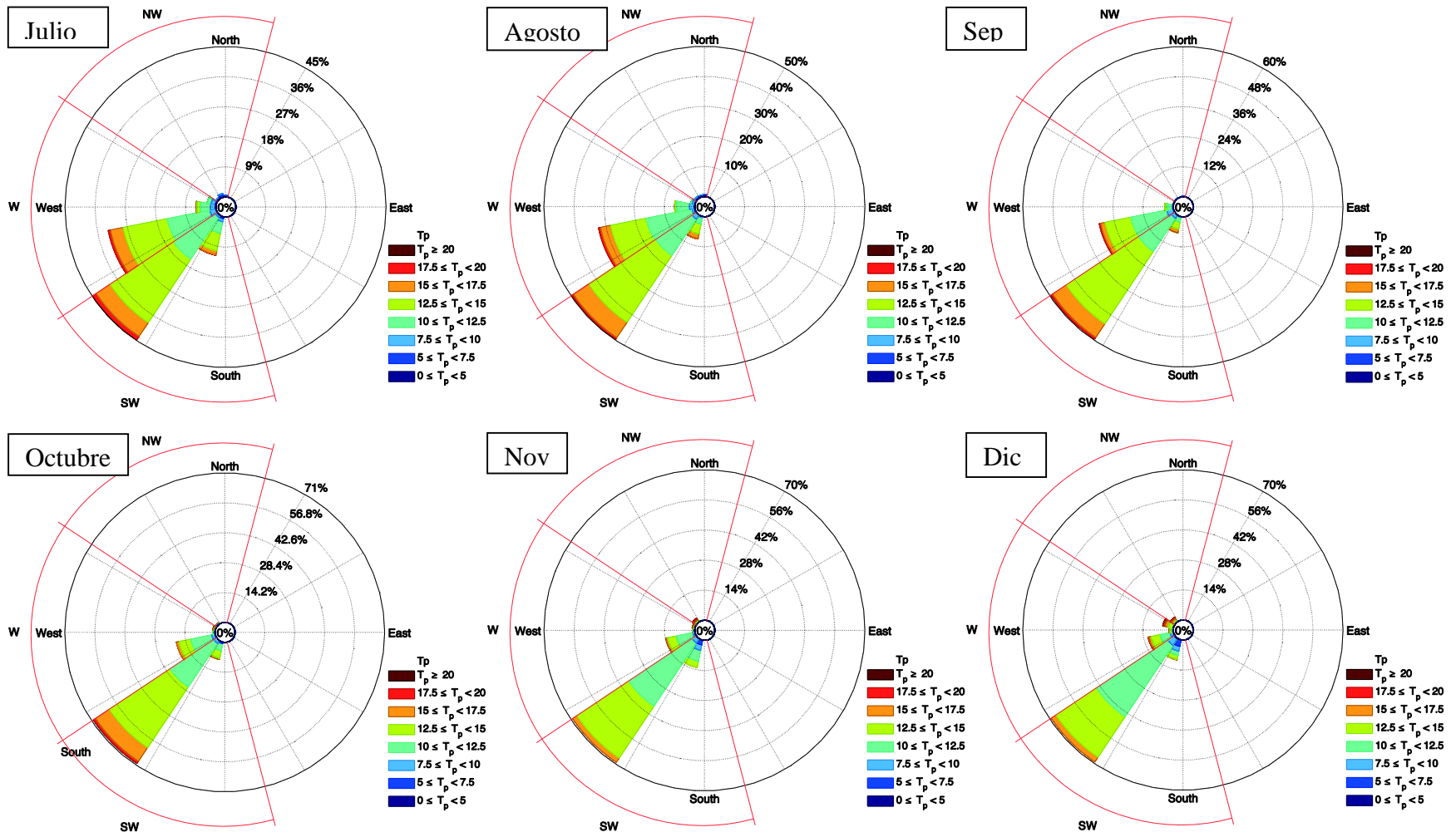


Figura N°3.12: Rosa de oleaje de periodo peak (s) para los meses de julio a diciembre.

Finalmente se obtuvo los parámetros del mes de enero con detalle, según su dirección de procedencia y tipo de oleaje, los cuales se muestran en la tabla 3.9.

Tabla N°3.9: Parámetros de oleaje del mes de enero, según su dirección de procedencia y tipo de oleaje.

	Enero			
	Suroeste		Oeste	
	Seas	Swell	Seas	Swell
Hs (m)	2.7	2.8	2.1	2.5
Tp (seg)	3.4	12.2	2.6	15.2
Dirección (°)	222.4	226	256	268.7
Incidencia (%)	20.5	49	4.4	24.9
N° olas	459	1099	99	558
Oleaje total	2241			

Tanto los meses de enero, febrero y diciembre poseen un oleaje del tipo seas y swell, y su procedimiento se realizó con el mismo detalle del mes de enero. Para los meses restantes se obtuvieron los parámetros de oleaje solamente según su dirección, esto debido a que presentaban un tipo de oleaje mixto. Las siguientes tablas 3.10, a 3.13 resumen los parámetros de oleajes para todos los meses en aguas profundas.

Tabla N°3.10: Porcentaje de incidencia mensual, según su dirección de procedencia.

	Dirección	Porcentaje de incidencia (%)											
		Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
Noroeste	N												
	NNO	1.2	1.5	0.1	0.6	1.7	2.3	2.1	2.3	0.5	0.7	2.2	2.5
	NO												
Oeste	ONO												
	O	29.3	23.8	15.8	18.4	19.8	26.2	41.3	40.4	33.5	20.8	15.9	18.9
	OSO												
Suroeste	SO												
	SSO	69.5	74.7	84.1	81.0	78.4	71.5	56.5	57.3	66.0	78.5	82.0	78.7
	S												

Tabla N°3.11: Altura significativa mensual, según su dirección de procedencia.

		Altura significativa (m)											
	Dirección	Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dici
Noroeste	N	2.7	2.2	2.4	2.6	4.5	4.0	3.5	3.2	3.4	1.7	2.1	2.1
	NNO												
	NO												
Oeste	ONO	2.4	2.4	2.5	2.7	3.3	3.5	3.2	3.4	2.9	2.7	2.4	2.5
	O												
	OSO												
Suroeste	SO	2.8	2.7	2.9	3.1	3.1	3.2	3.2	3.3	2.9	2.9	2.8	2.7
	SSO												
	S												

Tabla N°3.12: Periodo Peak mensual, según su dirección de procedencia.

		Período peak (seg)											
	Dirección	Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
Noroeste	N	15.9	14.3	15.8	11.0	9.5	8.2	7.5	7.6	7.4	16.0	16.2	16.2
	NNO												
	NO												
Oeste	ONO	13.3	14.2	13.6	12.8	12.2	12.3	12.5	12.3	12.3	12.3	12.4	13.4
	O												
	OSO												
Suroeste	SO	9.6	12.1	12.9	13.4	13.5	13.5	13.1	13.3	13.3	13.0	12.1	11.8
	SSO												
	S												

Tabla N°3.13: Dirección promedio mensual, según su intervalo de dirección asociados.

		Dirección (°)											
	Dirección	Enero	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
Noroeste	N	306.4	307.4	305.6	326.0	323.1	327.7	336.1	333.4	331.1	305.9	312.2	309.2
	NNO												
	NO												
Oeste	ONO	268.7	264.7	250.6	249.6	257.2	252.5	251.0	250.0	246.3	247.3	247.7	259.2
	O												
	OSO												
Suroeste	SO	226.0	223.2	224.1	222.8	222.9	221.4	222.1	223.1	223.8	223.9	222.4	223.5
	SSO												
	S												

De las tablas 3.10 a 3.13 se obtiene información relacionada al comportamiento mensual de los parámetros de oleajes en aguas profundas, como fue mencionado con anterioridad y se aprecia en la tabla 3.12 la mayor incidencia procede de la dirección suroeste, teniendo sobre un 50% de incidencia mensual. La incidencia de la dirección oeste generalmente fluctúa entre los 20% y 40% y el resto del oleaje procede del noroeste de manera aislada entre 1% y 2 %.

La tabla 3.11 muestra la altura significativa mensual, de donde se obtuvo que las mayores alturas de ola se encontraban entre los meses de mayo y agosto, esto independiente de la dirección de procedencia. Para los meses de octubre a abril se ve con claridad que el rango de altura de oleaje es relativamente uniforme, siendo generalmente entre los 2 y 3 metros para cualquier dirección.

La tabla 3.12 entrega valores que son importantes a considerar, para las direcciones de incidencia del oeste y suroeste los valores de periodo de oleaje se mantienen sobre los 10 segundos exceptuando la condición del mes de enero procedente del suroeste. No así para la dirección noroeste, en la cual identificamos valores muy elevados de periodos, los cuales alcanzan los 16 segundos en los meses de octubre, noviembre y diciembre, y también valores más bajos del rango de los 7 a 9.5 segundos para los meses de mayo a septiembre. Por lo que es importante considerar dos escenarios para la condición noroeste según su tipo seas y swell.

Pero debido a su baja incidencia se modelará como dos escenarios únicos y no de manera mensual.

La tabla 3.13 muestra la dirección de incidencia según los 3 intervalos definidos a partir del estudio previo, donde se aprecia la poca variabilidad que se tiene para los distintos meses del año.

Finalmente obtuvimos todos los parámetros necesarios para trabajar con nuestro modelo numérico, los cuales se resumen en la tabla 3.14. Parámetros obtenidos a partir de las tablas anteriormente mostradas, y en el caso de los meses enero, febrero y diciembre separados por tipo de oleaje según su dirección de procedencia.

Tabla N°3.14: Resumen de parámetros de oleaje, según sus direcciones y tipos de oleajes para cada mes.

Mes	Dirección	Tipo	Hs (m)	Tp (seg)	Dirección (°)	Incidencia (%)
Enero	Oeste	Seas	2.1	2.6	256.0	4.4
		Swell	2.5	15.2	268.7	24.9
	Suroeste	Seas	2.7	3.4	222.4	20.5
		Swell	2.8	12.2	226.0	49.0
Febrero	Oeste	Swell	2.4	14.1	263.6	23.8
	Suroeste	Seas	2.6	7.7	222.7	7.5
		Swell	2.7	12.5	223.0	67.2
Marzo	Oeste	Mixto	2.5	13.6	250.6	15.8
	Suroeste	Mixto	2.9	13.0	224.1	82.2
Abril	Oeste	Mixto	2.7	12.8	249.6	18.4
	Suroeste	Mixto	3.1	13.4	222.8	81.0
Mayo	Oeste	Mixto	3.3	12.2	257.2	19.8
	Suroeste	Mixto	3.1	13.5	222.9	78.4
Junio	Oeste	Mixto	3.5	12.3	252.5	26.2
	Suroeste	Mixto	3.2	13.5	221.4	71.5
Julio	Oeste	Mixto	3.2	12.5	251.0	41.3
	Suroeste	Mixto	3.2	13.1	222.1	56.5
Agosto	Oeste	Mixto	3.4	12.3	250.0	40.4
	Suroeste	Mixto	3.3	13.3	223.1	57.3
Septiembre	Oeste	Mixto	2.9	12.3	246.3	33.5
	Suroeste	Mixto	2.9	13.3	223.8	66.0
Octubre	Oeste	Mixto	2.7	12.3	247.3	20.8
	Suroeste	Mixto	2.9	13.0	223.9	78.5
Noviembre	Oeste	Mixto	2.4	12.4	247.7	15.9
	Suroeste	Mixto	2.8	12.1	222.4	82.0
Diciembre	Oeste	Swell	2.5	13.4	259.2	18.6
	Suroeste	Seas	2.8	7.9	221.7	7.2
		Swell	2.7	12.2	223.5	71.8
Cond. Norte	Noroeste	Swell	2.2	16.1	321.1	---
	Noroeste	Seas	3.6	7.8	319.8	---

Obteniéndose así un total de 30 condiciones iniciales, condiciones obtenidas del análisis estadístico detallado realizado de manera mensual. En estas 30 condiciones se consideró dos condiciones de oleaje provenientes de la dirección noroeste. Condiciones aisladas y con una muy baja incidencia (0.1%) en las costas del Golfo de Arauco, pero no menos preciable, ya que causa un gran efecto en estas costas, por lo cual se incluyó. La condición noroeste es

independiente del mes de estudio, ya que se modelará como una condición única para nuestras playas en estudio, y así ver los efectos y parámetros de oleaje que causa.

3.4. Modelo Numérico

Se utilizó el software DELFT3D, la extensión WAVE, para realizar la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras y así obtener los parámetros de oleajes en las costas del Golfo de Arauco. Este software trabaja con el modelo SWAN de tercera generación y fue utilizado para realizar el modelo de propagación de oleaje desde nuestro punto conocido en las coordenadas 37° 0'0.00" Latitud Sur y 74° 0'0.00" Longitud Oeste (mar dentro) hasta las costas del Golfo de Arauco. Punto donde se realizó el estudio mostrado en el capítulo 3.3.1 para cada mes, donde finalmente se obtuvo la tabla N°3.14. Debido a que no se encuentran estaciones de mediciones de oleaje en las costas del Golfo de Arauco es que el modelo numérico no podrá ser calibrado ni validado, por lo que este será un modelo experimental.

El modelo numérico se creó por medio de grillas sobre la batimetría en estudio, en que abarca aproximadamente 3.330 km², donde se consideró el criterio del número de Courant en que las velocidades de propagación del modelo son menores a los tiempos de cálculo, dando valores cercanos a 1, esto para asegurar la estabilidad el modelo.

3.4.1. Generación de batimetría y mallas computacionales

La batimetría utilizada se construyó a partir de la base de datos GEBCO, Cartas Náuticas y batimetrías de detalle obtenidas en el proyecto DIN 13-2011 y fue proporcionada por el departamento de ingeniería civil de la UCSC, batimetría que fue trabajada y simplificada hasta acotarla a nuestra área de interés. Esta se muestra a continuación en la figura 3.10.

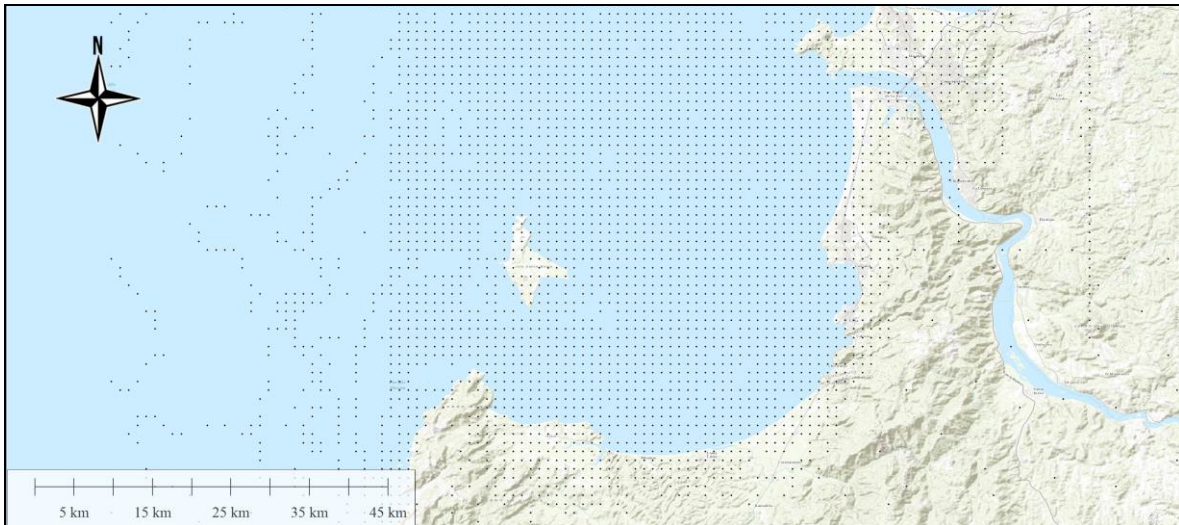


Figura N°3.10: Batimetría simplificada de la zona de estudio.

La figura 3.10 muestra la batimetría simplificada con la ayuda del Software Matlab y Global Mapper, batimetría que se exportó, para finalmente trabajarla y operarla por medio del software DEFLT3D en el módulo RGFGRID, donde se importó de Global Mapper la línea de costa en formato (.ldb), esto para definir de mejor forma las grillas y su tamaño a utilizar.

SWAN recibe la información sobre la batimetría en un archivo (.dat) que debe tener un número fijo de columnas y filas, por otra parte, es importante mencionar que al modelo hay que darle los datos en un formato concreto en el que los puntos bajo el agua tienen valores positivos y los puntos de tierra negativo, por lo que se realizó este cambio en Matlab.

Finalmente, para simular los procesos de propagación de olas desde el punto conocido de reanálisis hasta las costas del Golfo de Arauco, fueron creadas 6 mallas de cálculo anidadas, con resoluciones distintas, como se aprecia en la figura 3.11. La malla exterior y más grande es una malla curvilínea que presenta contornos de entrada de oleaje noroeste, oeste y suroeste, a medida que cambia la profundidad se recomienda cambiar la resolución de las mallas. En las 4 mallas más pequeñas ubicadas en las costas del golfo de Arauco se encuentran nuestras playas de interés, donde extraemos resultados más detallados del modelo.

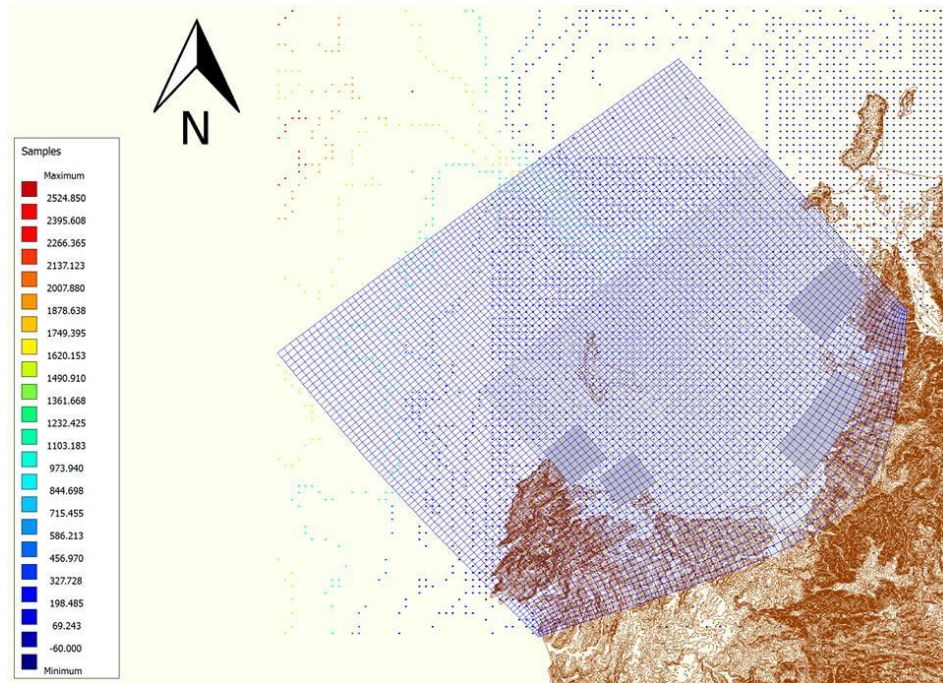


Figura N°3.11: Batimetría y mallas en el módulo Delft3D-RGFGRID

SWAN recomienda, que, al utilizar distintos tamaños de mallas, donde las más pequeñas se ubican dentro de mallas de mayor tamaño es necesario anidar las mallas computacionales, estas deben subdividirse en cuadrillas que intercepten de manera perfecta sus vértices y desde la grilla más grande, se subdivide en cuadrillas más pequeñas múltiplos de 3, en este caso desde una cuadrilla se generan 9 cuadrillas más pequeñas, el detalle se puede apreciar en la figura 3.12 junto con los tamaños de cada cuadrícula usados en cada malla.

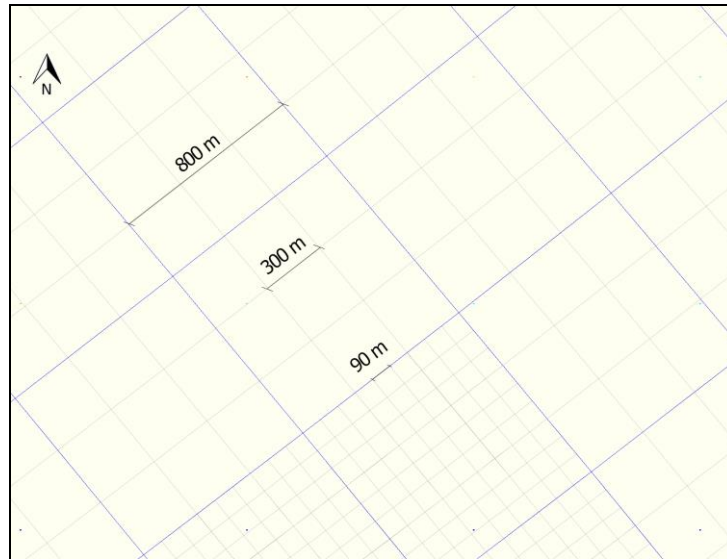


Figura N°3.12: Resoluciones espaciales entre mallas anidadas.

Las mallas computacionales o grillas, abarcan el área total de estudio y se encuentran superpuestas, teniendo en común su vértice y estas son mallas ortogonales y regulares, desde el punto conocido mar adentro, donde se define la condición noroeste y por otro lado suroeste con una resolución de 800, 300 y 90 metros de longitud de borde de las respectivas grillas de mayor a menor. Donde las playas coinciden o están en las proximidades de las mallas pequeñas.

Luego de definidas las mallas a utilizar se trabajó en el módulo QUICKIN, donde en base a la batimetría utilizada se interpolaron las profundidades por triangulación lineal de cada malla, para asignar un valor de batimetría a cada esquina y centro de cada malla y cuadrícula, generando un archivo con extensión (*.dep) tal como se aprecia en la figura 3.13.

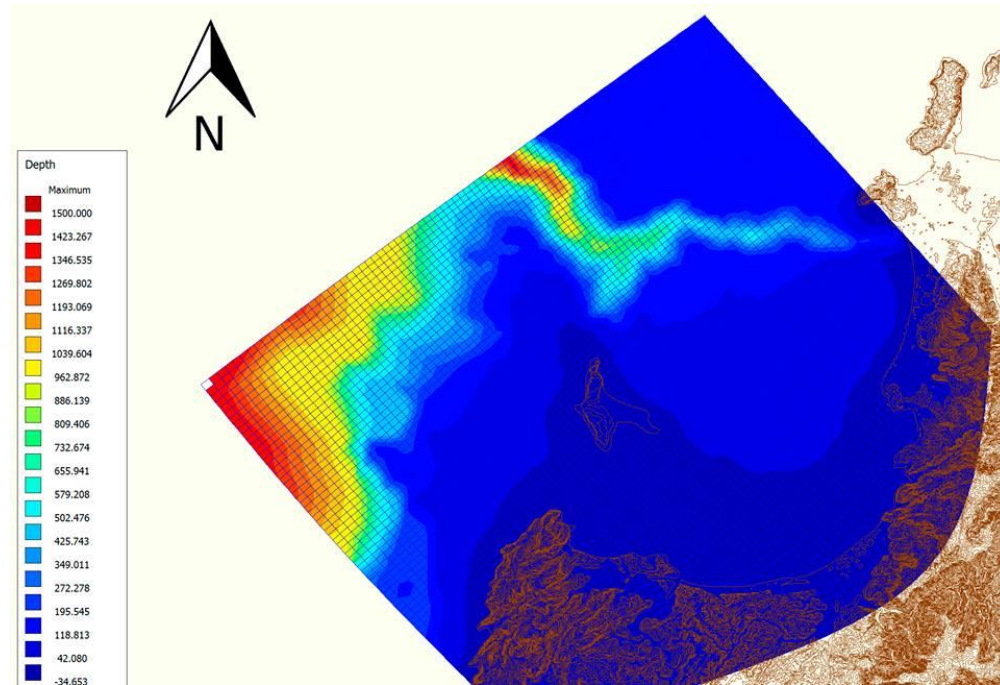


Figura N°3.13: Interpolación triangular lineal entre mallas y batimetrías.

3.4.2. Simulación utilizando el modulo WAVE

Finalizado los procesos de generación de mallas e interpolación de estas, en relación a sus batimetrías correspondientes y teniendo los 30 casos ya definidos, a través del análisis estadístico realizado a los datos de reanálisis en aguas profundas, se realiza la propagación de oleaje hacia aguas someras. A continuación, mostraremos los inputs necesarios para realizar la simulación en el módulo WAVE.

1. Grillas:

- “Grilla computación y batimetría”: Se importa en primer lugar las distintas mallas computacionales definidas con anterioridad, para luego asociarlas a sus respectivas batimetrías.
- “Resolución espectral”: Se trabajó con los valores propuestos por defecto, donde el espacio de dirección es circular. Y sólo se modifica el número de frecuencias espaciales que por defecto trabaja con 24 componentes frecuenciales y se modificó a 48, para obtener resultados más detallados.

- “Anidamientos”: Se anidan las mallas de manera simultánea según tamaño, es decir, desde las más pequeñas y con mayor resolución hasta las más grandes y con menor resolución.
2. Tiempo de modelación (Time frame): Este parámetro se utiliza, para indicar la duración de la modelación. En este caso, el sector en estudio no cuenta con data real medida de manera instrumental, por lo que se omitió este input, y se modeló en un tiempo único. Debido a esto se utilizó una condición estacionaria con un nivel de marea de 0 metros.
 3. Condiciones de borde (Boundaries): Se definieron las condiciones de borde según la forma de las mallas computaciones, ya que es aquí donde se ingresan al modelo las condiciones de oleaje, para ello se definió la condición según su orientación a la cual se le asoció una orientación NW, W y SW, como se aprecia en la figura 3.14. Ya que es de donde procede el oleaje. Se utilizó un oleaje uniforme con una dispersión direccional de 5°.

En relación a la especificación espectral, se utilizó un espectro JONSWAP, el cual recomienda el manual para mares no desarrollados totalmente, con un parámetro de gamma de 3.3.

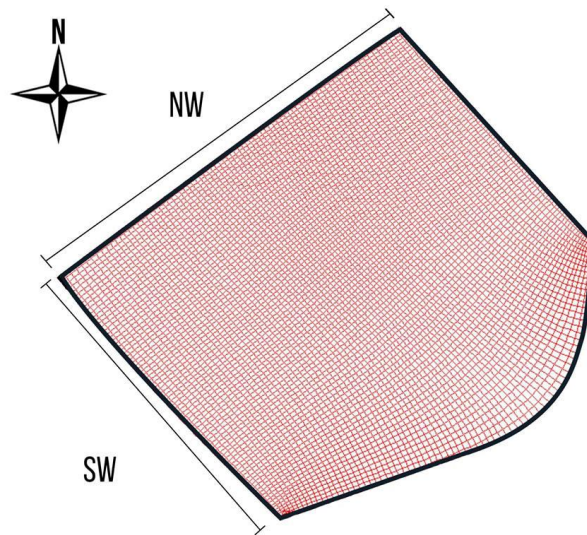


Figura N°3.14: Condiciones de borde, grilla grande

4. Parámetros físicos (Physical parameters): Los parámetros constantes fueron definidos por defecto, densidad del agua salada, gravedad, dirección norte, convención y fuerzas.

Dentro de los procesos físicos se considera refracción, difracción, disipación con el fondo y por rotura (coeficientes definidos como default), donde también se consideró la acción del viento en algunos escenarios, con el fin de ver la influencia de este en el oleaje local.

5. Salidas del modelo (Output parameters): El modelo fue ejecutado en el modo estacionario, considerando los procesos mencionados con anterioridad, por lo que se consideró una salida de datos resultados modales en cada elemento de las grillas creadas que se visualizan por medio de quickplot y muestra distintos diagramas de los parámetros resultantes, y también en puntos específicos de la costa a través de la creación de boyas virtuales arrojando así tablas de datos en coordenadas específicas que indican dirección ($^{\circ}$), altura significativa (m) y periodo peak (s) en las boyas virtuales y datos espectrales en 1 y 2 dimensiones.

3.5. Post proceso con QUICKPLOT

Para la visualización y animación de los resultados numéricos producidos por los módulos DELFT3D-WAVE, respecto a las modelaciones realizadas, se utilizó una interfaz DELFT3D-MATLAB llamada QUICKPLOT, la cual integra perfectamente de manera fácil y flexible los resultados modales en cada elemento de las grillas creadas a través de MATLAB.

3.6. Clima dominante mensual en las playas del Golfo de Arauco

Se realizó una caracterización mensual única del clima dominante para cada playa, aplicando un promedio ponderado mensual, mostrado en la ecuación 26.

$$\left(\frac{(X_1 \times \%_1 + X_2 \times \%_2 + X_3 \times \%_3 + \dots)}{\sum \%} \right) \quad (26)$$

Donde,

X_1, X_2, \dots : Indican el dato de interés.

$\%_1, \%_2, \dots$: Indica el porcentaje de incidencia, asociado al dato.

$\sum\%$: Sumatoria porcentaje (cercano a 100).

Obteniéndose así, los parámetros de oleaje dominantes, para cada playa por cada mes del año. Los cuales se muestran en las tablas de resultados que indican altura significativa (m), periodo peak (s) y dirección (grados) dominantes para cada playa según los meses del año.

4 Resultados

Finalmente se generaron los escenarios de modelación, con la metodología indicada en el capítulo 3, para cada tipo de oleaje y dirección en cada mes del año.

Valores de entrada que fueron aplicados a las condiciones de borde del modelo numérico SWAN. Obteniéndose los 30 escenarios de modelación mostrados en la tabla 3.14.

Se crearon las 7 boyas virtuales en el modelo, en las mallas pequeñas cercanos a las playas Punta Lavapíe, Llico, Tubúl, Arauco, Chivilingo, Coronel y Escuadrón, tal como se indica en la figura 4.1.

Verificando la condición de que los puntos de interés de extracción de datos o boyas virtuales, se encuentren cercanos a las coordenadas indicadas con anterioridad en el punto 3.1 y que cumplan la condición de ubicarse a una profundidad de 9.5-10 metros, como lo muestra la tabla 4.1, para así poder realizar un análisis y caracterización de las playas, con parámetros de oleaje a una misma profundidad respecto el fondo.

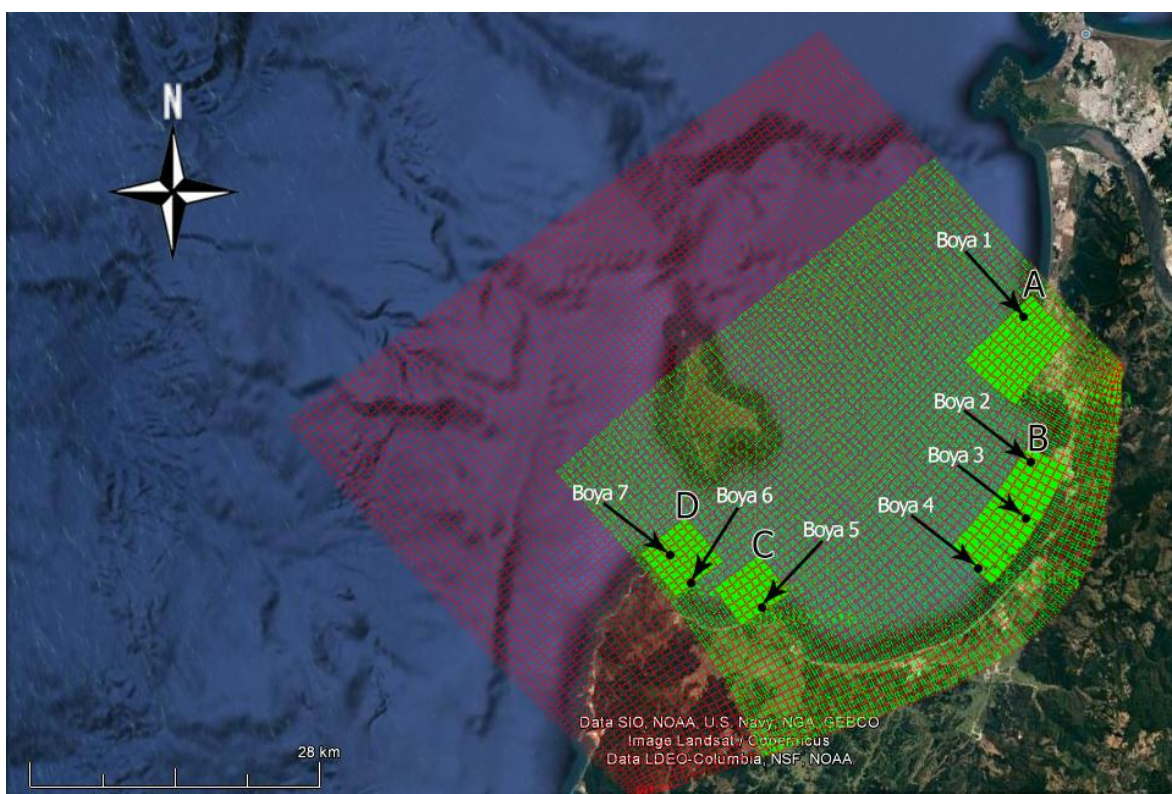


Figura N°4.1: Superposición de grillas y ubicación de boyas virtuales.

La figura 4.1 muestra la ubicación de las boyas virtuales creadas en las distintas grillas, para la extracción de datos. Donde se aprecian las 5 grillas pequeñas, que son mostradas con mayor detalle en la figura 4.2.

Tabla N°4.1: Boyas asociadas a sus respectivas playas y profundidades.

N° de boya	Playa	Profundidad (m)
1	Escuadrón	10.2
2	Coronel	10.9
3	Chivilingo	10.7
4	Arauco	10.4
5	Tubúl	10.5
6	Llico	9.8
7	Lavapíe	9.8

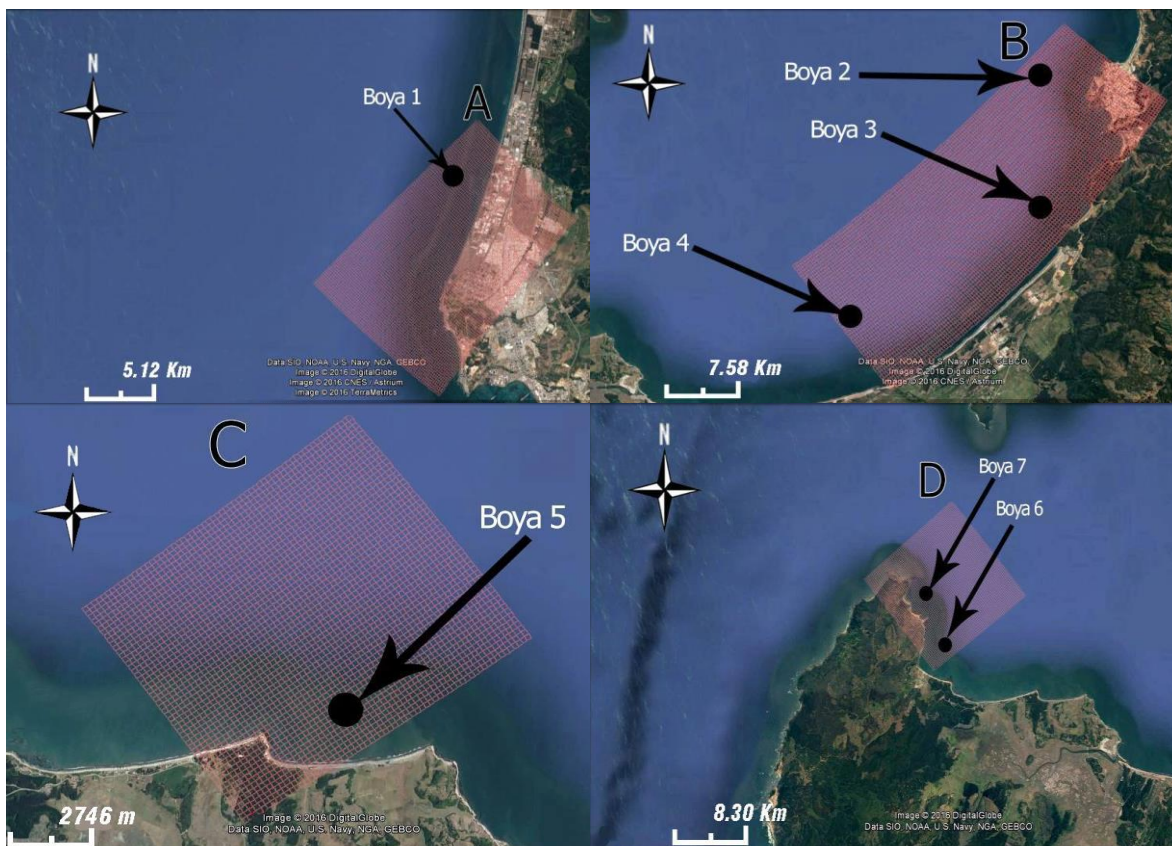


Figura N°4.2: Detalle mallas pequeñas y boyas virtuales creadas.

4.1. Post proceso de resultados con quickplot.

La figura 4.3 muestran mapas de refracción y alturas de oleaje para condiciones de oleaje del mes de enero, desde la dirección suroeste (swell y seas, respectivamente), mientras que la figura 4.4 muestra otras dos propagaciones de oleaje realizadas para el mismo mes, desde la dirección oeste (swell y seas, respectivamente). Estos resultados obtenidos a través del modelo numérico de propagación de oleaje, ejecutando el modelo con las condiciones iniciales mostradas en la tabla 3.14 para el mes de enero.

La figura 4.5 y 4.6 muestran los resultados obtenidos para la modelación de la condición exclusiva procedente del noroeste, esto según su oleaje swell y seas. Mientras que el resto de las modelaciones se encuentran en el capítulo de anexos.

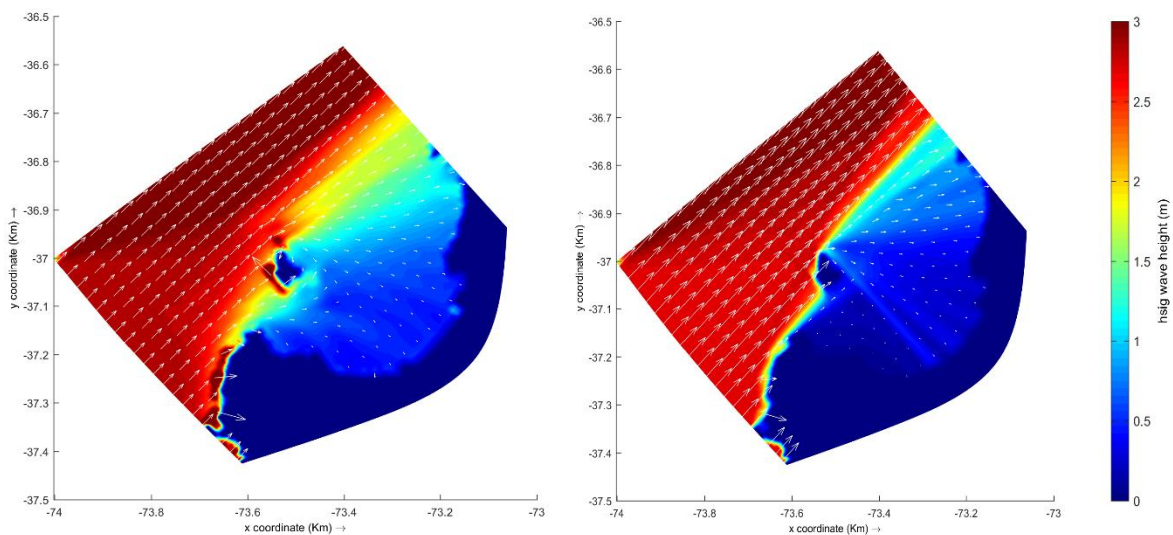


Figura N°4.3: Altura significativa en relación a la dirección de propagación, para condición de oleaje tipo swell (izquierda) y seas (derecha) proveniente del suroeste en el mes de enero.

De la figura 4.3 se distingue los diagramas y variación de la altura significativa a través de la mayor grilla creada, esto asociado a sus vectores direccionales, donde claramente la altura significativa (m) en aguas profundas es uniforme. La cual se divide de color rojo, pero esta

propagación cambia a medida que se acerca a la Isla Santa Maria, donde alcanza mayores alturas de ola en la parte oeste de la isla y luego disminuye de manera abrupta para el golfo de Arauco, exceptuando la playa escuadrón ubicada en la parte norte de la costa.

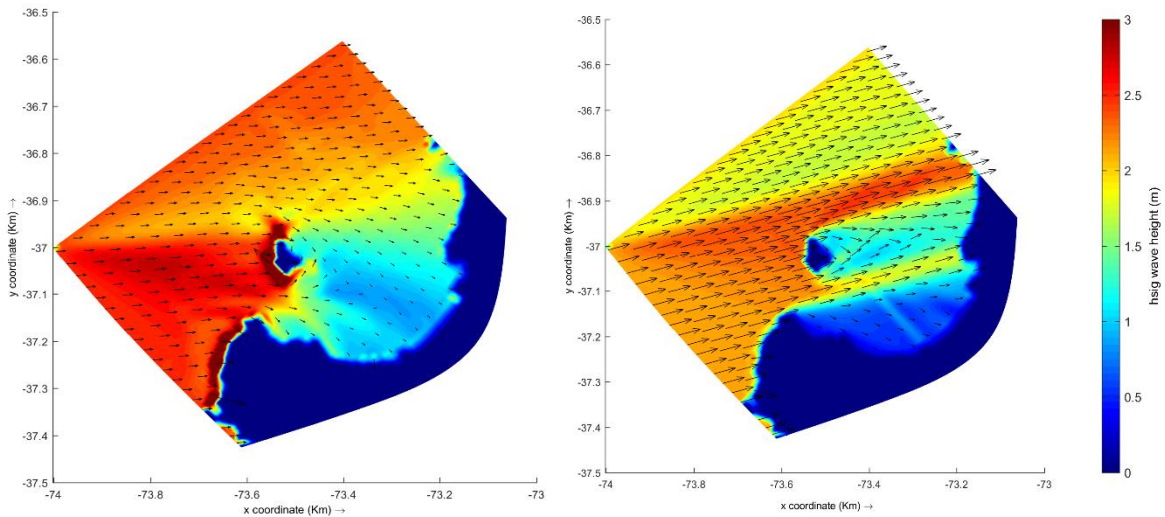


Figura N°4.4: Altura significativa en relación a la dirección de propagación, para condición de oleaje tipo swell (izquierda) y seas (derecha) proveniente del oeste en el mes de enero.

La figura 4.4 muestra un mayor efecto en las costas del Golfo de Arauco, en relación al oleaje proveniente de la dirección oeste, donde el oleaje impacta de manera más directa en toda la parte sur y norte del Golfo, afectando principalmente a las playas de Lavapíe, Llico y Escuadrón. Se distingue la dirección en que se difracta el oleaje en la parte posterior de la Isla Santa Maria y como la morfología del Golfo de Arauco protege a sus costas, debido a esto se generan oleajes bastantes bajos dentro de la costa del Golfo.

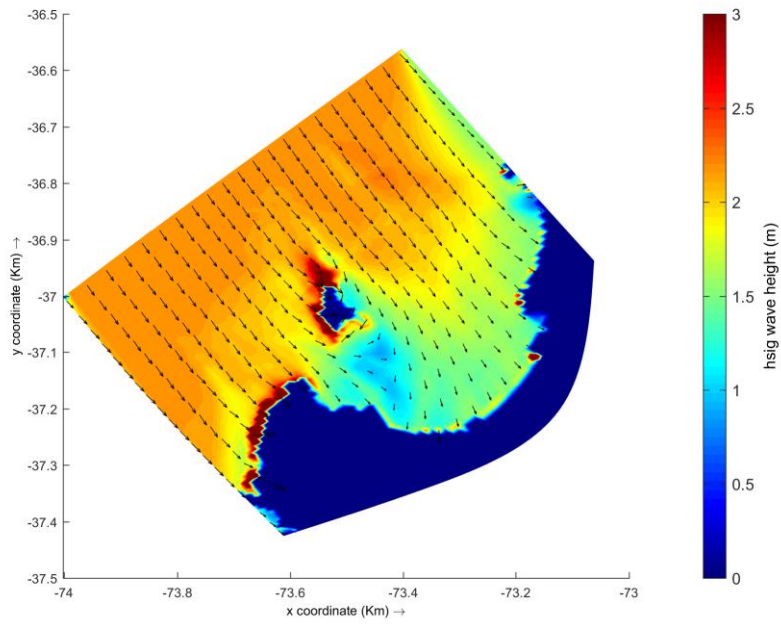


Figura N°4.5: Altura significativa en relación a la dirección de propagación, para condición de oleaje tipo swell proveniente del noroeste en el mes de enero.

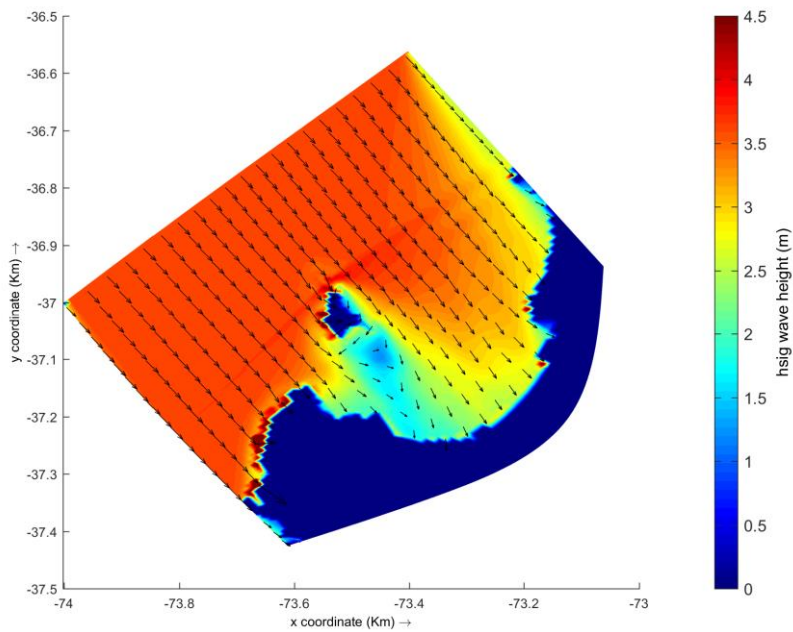


Figura N°4.6: Altura significativa en relación a la dirección de propagación, para condición de oleaje tipo seas proveniente del noroeste en el mes de enero.

La figura 4.5 y 4.6 grafican el comportamiento del oleaje incidente de la dirección noroeste el cual afecta la parte norte y noroeste del Golfo de Arauco, exceptuando la parte sur donde se ubica punta Lavapíe y Llico, playas protegidas por la Isla Santa Maria donde también baja la altura significativa por efectos de dispersión del oleaje y por refracción.

La condición norte es una condición aislada, pero claramente es la condición más desfavorable para las costas del Golfo, las alturas de ola alcanzan valores elevados a medida que se acercan a la costa y empiezan a sentir el fondo marino. Por lo que al momento de realizar un diseño en el borde costero es importante de considerar.

Vemos de igual forma los vectores direccionales de oleaje, en los cuales se aprecia cómo se difracta el oleaje, debido a la Isla Santa Maria y como se alcanzan alturas del orden de los 4 metros en la cara noroeste de esta. También se aprecia de manera general el comportamiento de las playas en estudios.

4.2. Resultados modelos SWAN

Los resultados del modelo SWAN son presentados en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4. Las cuales indican altura significativa (m), periodo peak (s) y dirección (°).

Tabla N°4.2: Resultados modelo numérico de altura significativa (m), para las distintas playas del Golfo de Arauco.

Mes	Dirección	Tipo	Playa. Hs (m)						
			Lavapíe	Llico	Tubúl	Arauco	Chivilingo	Coronel	Escuadrón
Enero	Oeste	Seas	0.57	0.27	0.60	0.73	0.75	0.94	1.48
		Swell	1.45	1.06	1.54	1.01	1.01	1.27	2.07
	Suroeste	Seas	0.09	0.06	0.09	0.18	0.06	0.08	0.55
		Swell	0.56	0.31	0.48	0.45	0.49	0.46	0.96
Febrero	Oeste	Swell	1.29	0.86	1.28	0.86	0.89	1.12	1.87
	Suroeste	Seas	0.27	0.12	0.13	0.23	0.29	0.10	0.49
		Swell	0.52	0.29	0.45	0.41	0.44	0.43	0.86
Marzo	Oeste	Swell	1.05	0.64	0.99	0.75	0.79	0.90	1.70
	Suroeste	Swell	0.61	0.34	0.54	0.48	0.50	0.52	0.98
Abril	Oeste	Swell	1.05	0.63	0.98	0.77	0.84	0.90	1.76
	Suroeste	Swell	0.65	0.36	0.57	0.49	0.48	0.52	0.84
Mayo	Oeste	Swell	1.47	0.89	1.37	1.05	1.18	1.31	2.42
	Suroeste	Swell	0.66	0.37	0.60	0.53	0.52	0.58	1.04
Junio	Oeste	Swell	1.44	0.85	1.32	1.04	1.17	1.24	2.41
	Suroeste	Swell	0.65	0.37	0.59	0.52	0.52	0.57	1.02
Julio	Oeste	Swell	1.28	0.76	1.18	0.93	1.03	1.09	2.14
	Suroeste	Swell	0.62	0.35	0.55	0.49	0.50	0.53	0.98
Agosto	Oeste	Swell	1.29	0.76	1.19	0.95	1.07	1.11	2.21
	Suroeste	Swell	0.69	0.39	0.62	0.55	0.56	0.60	1.10
Septiembre	Oeste	Swell	0.99	0.58	0.91	0.74	0.83	0.85	1.74
	Suroeste	Swell	0.62	0.35	0.56	0.49	0.50	0.54	0.99
Octubre	Oeste	Swell	0.95	0.56	0.87	0.71	0.79	0.81	1.66
	Suroeste	Swell	0.60	0.34	0.53	0.48	0.50	0.51	0.97
Noviembre	Oeste	Swell	0.86	0.51	0.79	0.64	0.71	0.74	1.49
	Suroeste	Swell	0.50	0.27	0.42	0.40	0.45	0.40	0.86
Diciembre	Oeste	Swell	1.11	0.60	0.97	0.58	0.54	0.63	0.90
	Suroeste	Seas	0.29	0.15	0.17	0.28	0.35	0.20	0.72
		Swell	0.50	0.28	0.43	0.40	0.45	0.41	0.86
Promedio			0.81	0.47	0.74	0.61	0.65	0.69	1.32
Des. Estándar			0.38	0.26	0.39	0.24	0.28	0.34	0.57

Tabla N°4.3: Resultados modelo numérico de Periodo Peak (seg), para las distintas playas del Golfo de Arauco.

Mes	Dirección	Tipo	Playa. Tp (s)						
			Lavapíe	Llico	Tubúl	Arauco	Chivilingo	Coronel	Escuadrón
Enero	Oeste	Seas	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
		Swell	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6
	Suroeste	Seas	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
		Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
Febrero	Oeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
	Suroeste	Seas	7.4	8.3	8.3	7.4	7.4	7.4	8.3
		Swell	12.1	13.8	13.8	12.1	12.1	13.8	12.1
Marzo	Oeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
	Suroeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Abril	Oeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	12.1	13.8	12.1
	Suroeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Mayo	Oeste	Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	Suroeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Junio	Oeste	Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	Suroeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Julio	Oeste	Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	Suroeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Agosto	Oeste	Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	Suroeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Septiembre	Oeste	Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	Suroeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Octubre	Oeste	Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	Suroeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Noviembre	Oeste	Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	Suroeste	Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
Diciembre	Oeste	Swell	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
	Suroeste	Seas	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
		Swell	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
Promedio			12.0	12.1	12.1	12.0	12.0	12.1	12.0
Des. Estándar			3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

Tabla N°4.4: Resultados modelo numérico de Dirección (°), para las distintas playas del Golfo de Arauco.

Mes	Dirección	Playa. Dirección (°)							
		Tipo	Lavapíe	Llico	Tubúl	Arauco	Chivilingo	Coronel	Escuadrón
Enero	Oeste	Seas	296	319	299	292	282	277	272
		Swell	345	344	311	320	294	292	290
	Suroeste	Seas	303	360	317	294	276	289	269
		Swell	346	352	314	315	290	286	280
Febrero	Oeste	Swell	345	344	310	318	292	290	288
	Suroeste	Seas	336	343	310	308	289	271	273
		Swell	346	353	314	316	290	287	280
Marzo	Oeste	Swell	345	347	310	317	291	289	284
	Suroeste	Swell	346	353	314	316	290	287	281
Abril	Oeste	Swell	345	346	310	316	291	288	284
	Suroeste	Swell	346	352	313	316	290	287	279
Mayo	Oeste	Swell	344	344	309	314	291	287	285
	Suroeste	Swell	347	353	314	317	290	288	281
Junio	Oeste	Swell	344	345	309	314	290	288	284
	Suroeste	Swell	347	353	314	317	290	288	281
Julio	Oeste	Swell	344	345	308	312	289	284	278
	Suroeste	Swell	347	353	314	317	290	287	280
Agosto	Oeste	Swell	345	346	309	314	290	288	283
	Suroeste	Swell	346	353	314	317	290	287	281
Septiembre	Oeste	Swell	345	347	310	314	290	287	283
	Suroeste	Swell	347	353	314	317	290	287	281
Octubre	Oeste	Swell	345	347	310	314	290	287	283
	Suroeste	Swell	346	353	314	316	290	287	281
Noviembre	Oeste	Swell	345	347	310	314	290	288	283
	Suroeste	Swell	346	353	314	315	290	286	279
Diciembre	Oeste	Swell	344	344	307	310	287	280	279
	Suroeste	Seas	338	348	315	311	290	285	277
		Swell	346	353	314	315	290	286	278
Promedio			341	348	311	313	289	286	280
Des. Estándar			12	7	4	6	3	4	4

De las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 distinguimos los parámetros resultantes para cada condición inicial impuesta de manera mensual, diferenciando la dirección de oleaje y tipo de este. Se obtuvieron de igual forma valores promedios para cada playa, esto considerando todos los meses del año y donde apreciamos oleajes promedios menores al metro de altura con una

desviación estándar bastante baja, lo que significa que el rango de valores tanto para la tabla 4.2 y las restantes es acotado y no tiene valores extremos, ni muy alejados de la media.

4.3. Resultados clima dominante mensual en las playas del Golfo de Arauco

Tabla N°4.5: Resultados de altura significativa dominante (m), para las distintas playas del Golfo de Arauco.

Mes	Playas. Hs (m)						
	Lavapíe	Llico	Tubúl	Arauco	Chivilingo	Coronel	Escuadrón
Enero	0.7	0.4	0.7	0.5	0.5	0.6	1.2
Febrero	0.8	0.5	0.8	0.6	0.6	0.7	1.2
Marzo	0.7	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	1.1
Abril	0.7	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	1
Mayo	0.8	0.5	0.8	0.6	0.7	0.7	1.3
Junio	0.9	0.5	0.8	0.7	0.7	0.7	1.4
Julio	0.9	0.5	0.8	0.7	0.7	0.8	1.5
Agosto	0.9	0.5	0.9	0.7	0.8	0.8	1.6
Septiembre	0.7	0.4	0.7	0.6	0.6	0.6	1.2
Octubre	0.7	0.4	0.6	0.5	0.6	0.6	1.1
Noviembre	0.6	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5	1
Diciembre	0.6	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4	0.9
Promedio	0.8	0.4	0.7	0.6	0.6	0.6	1.2
Des. Estándar	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2

Tabla N°4.6: Resultados de periodo peak dominante (seg), para las distintas playas del Golfo de Arauco.

Mes	Playas. Tp (s)						
	Lavapíe	Llico	Tubúl	Arauco	Chivilingo	Coronel	Escuadrón
Enero	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
Febrero	12.2	13.0	13.0	12.2	12.2	12.9	12.3
Marzo	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Abril	13.8	13.8	13.8	13.8	13.5	13.8	13.5
Mayo	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4
Junio	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3
Julio	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
Agosto	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1
Septiembre	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
Octubre	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4
Noviembre	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
Diciembre	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
Promedio	12.8	12.9	12.9	12.8	12.8	12.9	12.8
Des. Estándar	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

Tabla N°4.7: Resultados de dirección dominante (grados), para las distintas playas del Golfo de Arauco.

Mes	Playas. Dirección (m)						
	Lavapíe	Llico	Tubúl	Arauco	Chivilingo	Coronel	Escuadrón
Enero	334	350	313	311	287	288	280
Febrero	344	348	312	315	291	286	282
Marzo	346	352	313	317	290	288	281
Abril	346	351	313	316	290	287	280
Mayo	346	351	313	317	290	288	282
Junio	346	351	313	317	290	288	282
Julio	346	350	311	315	290	286	280
Agosto	346	350	312	316	290	288	282
Septiembre	346	351	312	316	290	287	281
Octubre	346	352	313	316	290	287	281
Noviembre	346	352	314	315	290	286	280
Diciembre	345	351	313	314	289	285	278
Promedio	345	351	313	315	290	287	281
Des. Estándar	3.3	1.1	0.6	1.7	0.9	0.9	1.3

De la tabla 4.5 y 4.6, las cuales contienen las alturas (m) y periodos peak (seg) dominante respectivamente, se obtuvieron las gráficas, que se muestran a continuación. Las cuales resumen los parámetros de altura de ola dominante representados mediante las barras, y sus periodos asociados a cada mes se distinguen mediante líneas, esto para cada playa en estudio, según los meses del año.

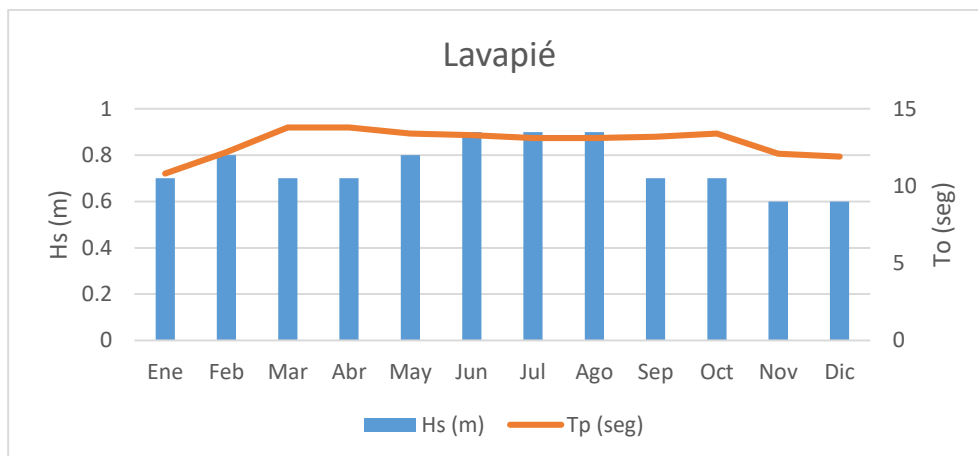


Figura N°4.7: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Punta Lavapié por meses del año.

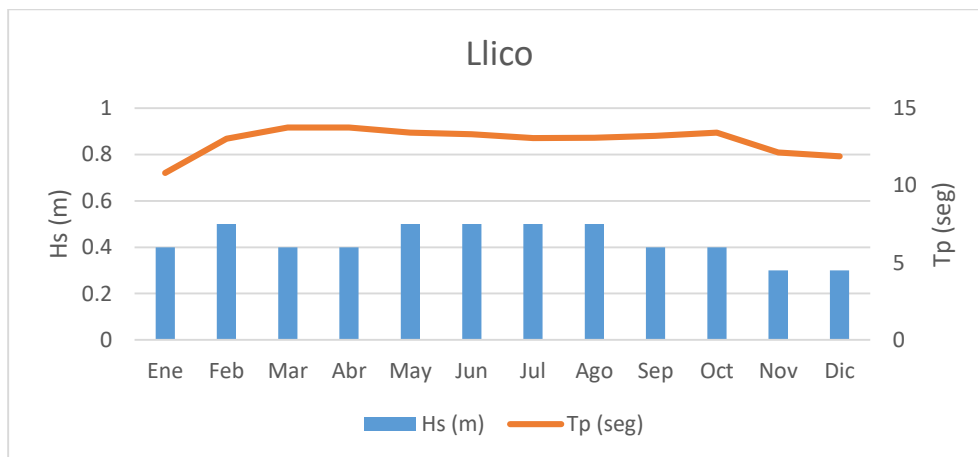


Figura N°4.8: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Llico por meses del año.

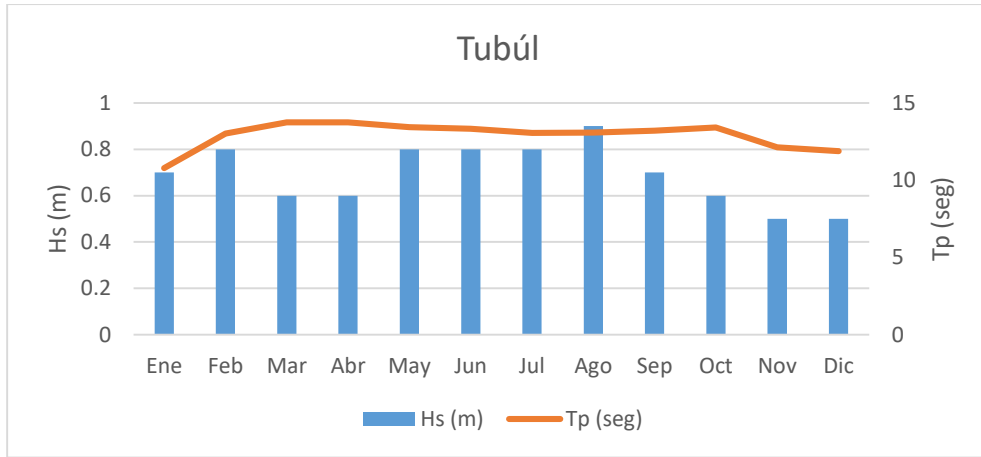


Figura N°4.9: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Tubúl por meses del año.

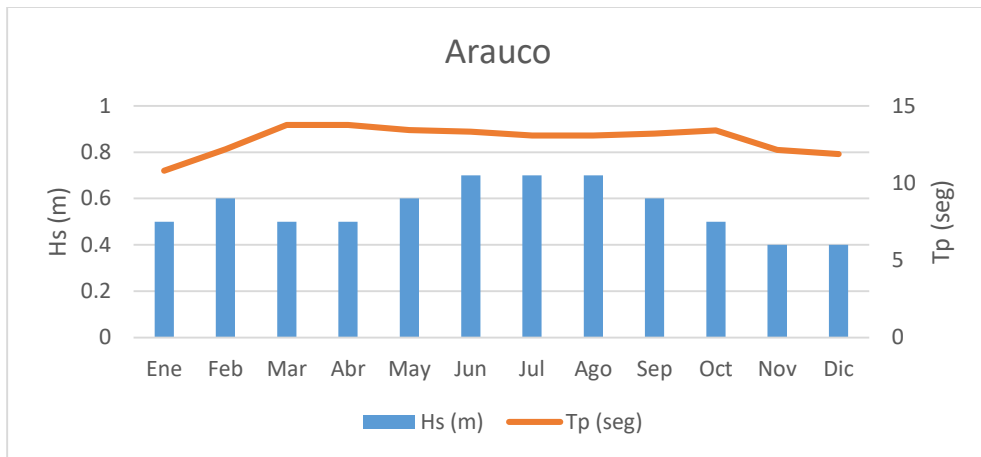


Figura N°4.10: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Arauco por meses del año.

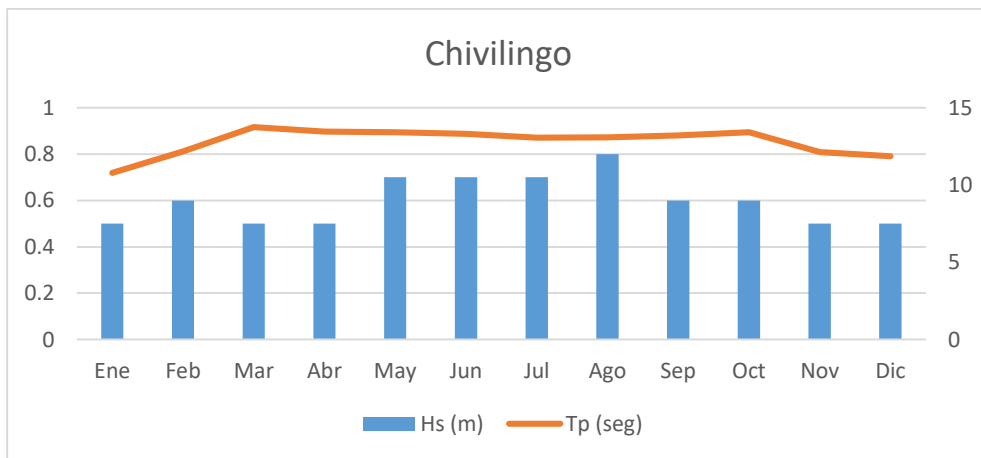


Figura N°4.11: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Chivilingo por meses del año.

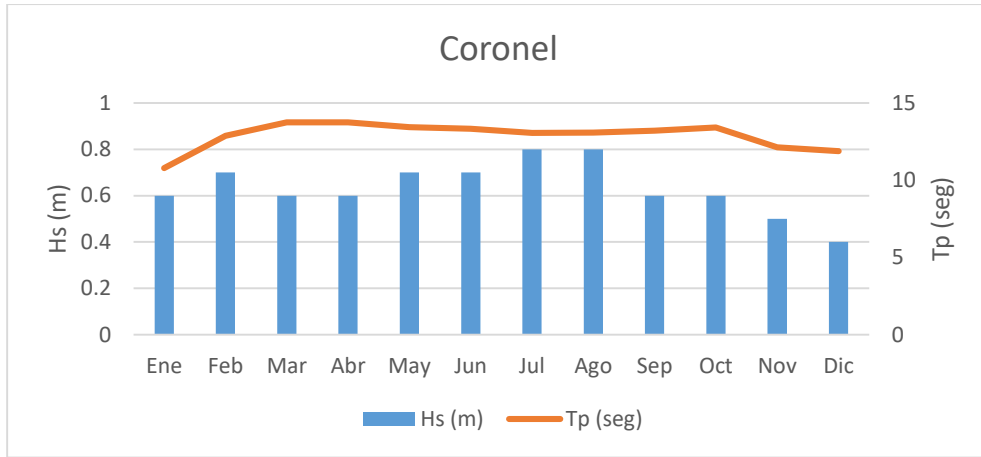


Figura N°4.12: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Coronel por meses del año.

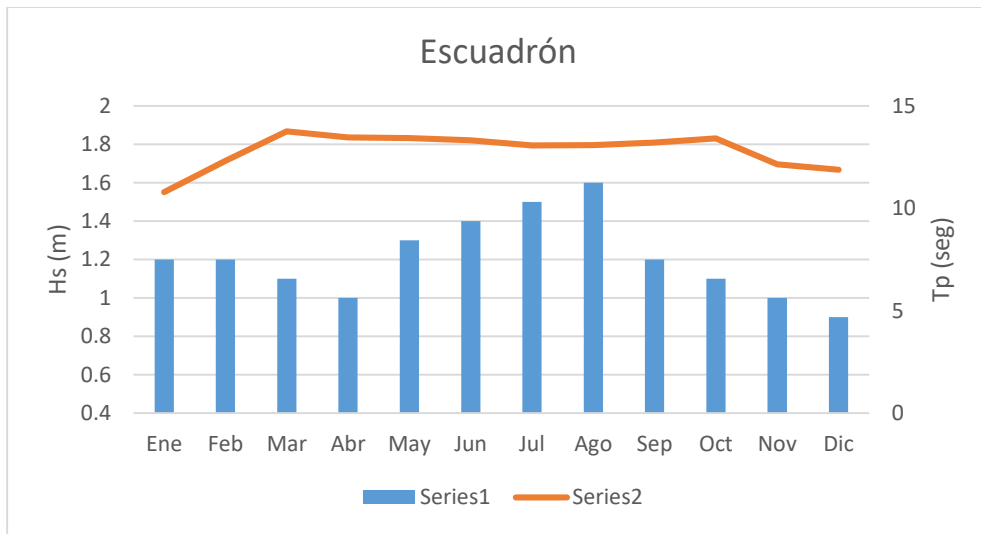


Figura N°4.13: Hs (m) y Tp (seg) dominantes en playa Escuadrón por meses del año.

A continuación, se presentan las gráficas 4.14 y 4.15 que muestran una comparativa entre las playas en estudio.

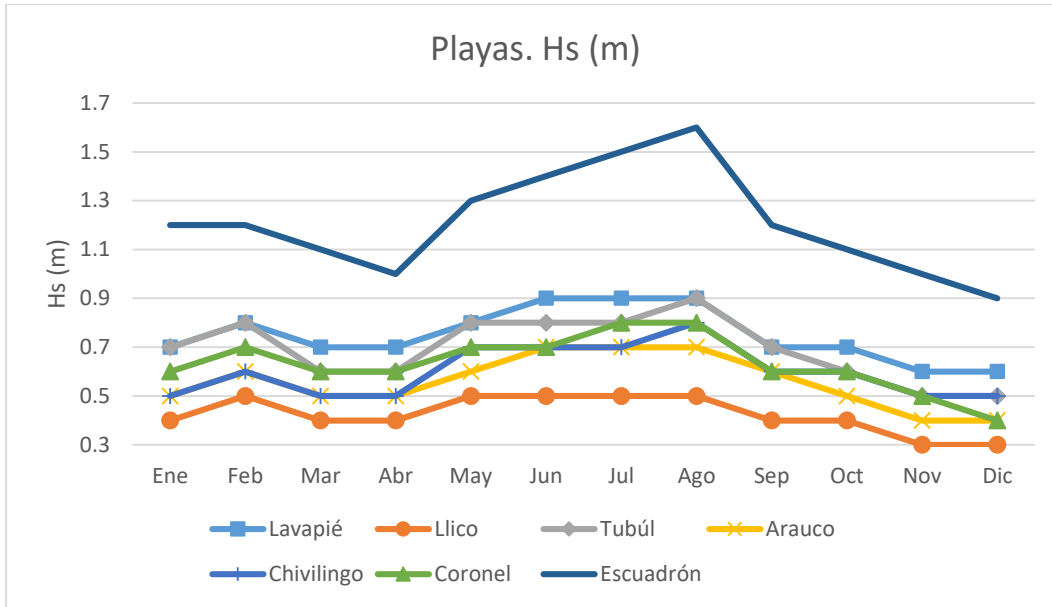


Figura N°4.14: Comparativa de altura significativa (m) entre playas en estudio, durante el año.

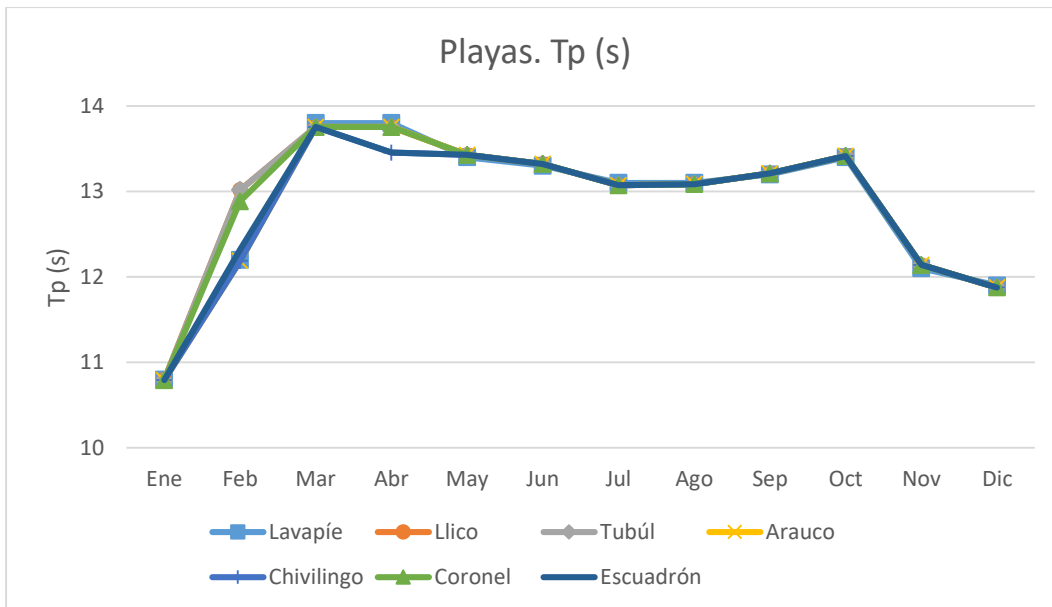


Figura N°4.15: Comparativa de periodo peak (s) entre playas en estudio, durante el año.

De las gráficas 4.7 a 4.13, se aprecia el comportamiento del oleaje en las playas en estudio. Se diferencia las mayores alturas de olas (m) tanto en los meses de enero y febrero, oleaje de

verano que se caracteriza por ser generado por vientos locales. También en invierno en los meses de junio, julio y agosto, se aprecian alturas de ola similares, el cual es un oleaje tipo swell proveniente de aguas profundas.

A su vez vemos, como la playa escuadrón es la que registra las mayores alturas de olas, lo cual era de esperar debido a su ubicación que la deja más expuesta a mar abierto, a diferencia de las otras, las cuales son protegidas de manera natural por la Isla Santa Maria.

Si bien las alturas de oleaje de las playas mencionadas alcanzan una gran altura de ola en los meses señalados, estas siguen siendo bastantes bajas (no superan el metro de altura). Esto se debe al fenómeno que ocasiona la Isla Santa Maria, también sumado a la morfología y orientación que tiene el Golfo de Arauco en relación a las direcciones de oleaje que principalmente provienen del suroeste, oleaje que es de poco impacto en el Golfo. El oleaje proveniente del suroeste solo afecta la parte oeste de la Isla Santa Maria, provocando en la Isla alturas de olas del orden de los 1.5 a 2.5 metros y también un efecto casi nulo en las playas del Golfo de Arauco.

Por otra parte, el oleaje proveniente del Oeste impacta prácticamente de manera directa y perpendicular a la Isla Santa Maria, la cual bloquea el oleaje proveniente de esta dirección y provoca grandes alturas de olas en la cara oeste y alrededor de la misma Isla, alcanzando alturas de olas de hasta 3 metros, en donde se pueden apreciar los fenómenos de asomeramiento y difracción.

En relación a los periodos se aprecia un rango de periodo relativamente coincidente en las playas en estudios, los cuales van desde los 10 seg, los meses de verano (enero, febrero, noviembre y diciembre), hasta cercano los 15 segundos los meses de invierno donde se registran los periodos más largos para los meses de marzo, abril y octubre. Si bien son periodos bastantes largos, que generalmente son característicos de un oleaje tipo Swell, esto se debe a que los valores mostrados en las gráficas son valores ponderados, no así lo mostrado en la tabla 4.3 en la cual muestra los periodos entregados por el modelo SWAN para cada escenario propuesto, en donde se aprecian periodos del rango de 2 a 7 segundos para un oleaje tipo seas, los cuales son valores poco incidentes en comparación al oleaje tipo swell para cada mes.

La grafica 4.14 muestra la comparativa entre playas para Hs (m), donde se observa con claridad como el oleaje aumenta de enero a febrero para luego disminuir los meses de marzo y abril, esto para todas las playas en estudio. Luego vuelve a aumentar y alcanza su peak entre los meses de mayo a agosto y posterior a esto vuelve a descender alcanzando su altura mínima en los meses de noviembre y diciembre. En relación a las playas, como mencionamos con anterioridad y se aprecia claramente en la figura las mayores alturas de olas se encuentran en las playas de Escuadrón representada por una línea azul, playa que excede sobre los 30 centímetros de altura de ola (m) al resto de las playas durante todo el año, luego la sigue punta Lavapíe y Tubúl.

La figura 4.15 muestra los periodos peak (s), los cuales son prácticamente idénticos para las 7 playas en estudios tal cual se aprecia la figura, tomando valores sobre los 11 segundos.

4.4. Resultados condiciones de oleaje proveniente del noroeste

Como se indicó en el capítulo 3, se modeló dos condiciones de oleaje proveniente de la dirección noreste, analizadas como condiciones de modelamiento únicas (es decir no se modelaron de manera mensual) y separadas en tipo seas y swell, que no depende ni caracteriza un mes de ocurrencia. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.8 y 4.9.

Tabla N°4.8: Resultados de Modelación SWAN, realizada para la condición de oleaje tipo swell proveniente del Noroeste.

Playa	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Lavapíe	1.5	16.5	348.1
Llico	1.4	16.5	349.0
Tubúl	1.5	16.5	325.6
Arauco	1.8	16.5	330.6
Chivilingo	1.5	16.5	299.3
Coronel	1.8	16.5	302.9
Escuadrón	2.1	16.5	298.3

Tabla N°4.9: Resultados de Modelación SWAN, realizada para la condición de oleaje tipo seas proveniente del Noroeste.

Playa	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Lavapie	2.3	7.8	346.3
Llico	2.2	7.8	348.2
Tubúl	2.3	7.8	326.3
Arauco	2.6	7.8	329.3
Chivilingo	2.5	7.8	298.6
Coronel	2.8	7.8	302.5
Escuadrón	2.8	7.8	299.0

A partir de los resultados obtenidos para la condición noroeste del modelo SWAN, que fueron mostrados en las tablas 4.8 y 4.9 se generó la gráfica 4.16 que representa la altura significativa (m) en las distintas playas del Golfo de Arauco para las condiciones mencionadas. De las tablas se extrae la poca variabilidad de periodo (s), tanto en oleaje tipo seas y swell, presentando valores constantes de 16.5 s y 7.8 s, para la condición swell y seas respectivamente.

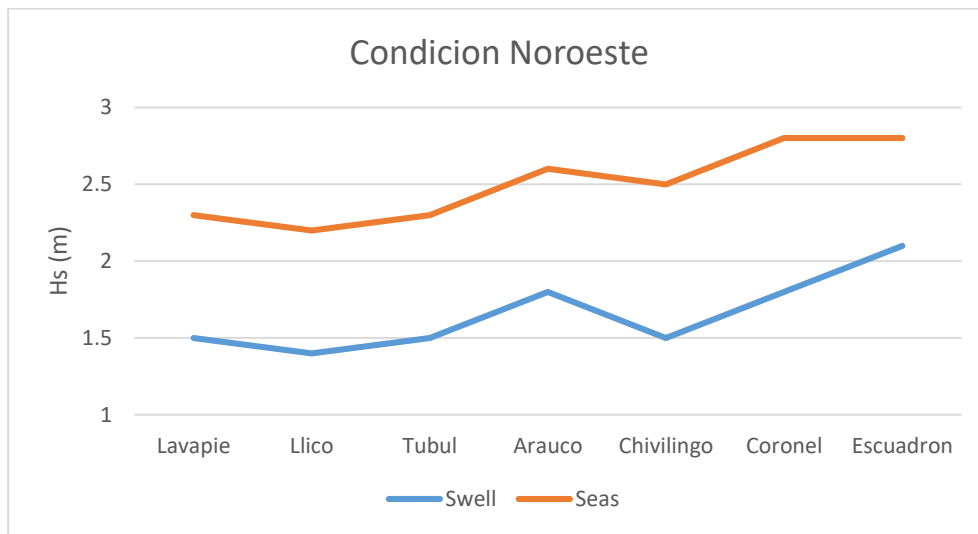


Figura N°4.16: Hs (m) para la condición noroeste tipo swell y seas en las distintas playas del Golfo de Arauco.

La figura 4.16 muestra el comportamiento de las playas para la condición noroeste, nuevamente y como se mencionó durante el análisis realizado en los puntos 4.1 a 4.3 las mayores alturas de oleaje se alcanzan en las playas de escuadrón, coronel y Arauco. Mientras que el oleaje tipo seas representando por la línea naranja excede por poco menos de 1 metro al oleaje tipo swell, esto en las 7 playas en estudio.

La condición noroeste con un oleaje tipo seas es la condición más extrema y que presenta mayores alturas de olas en las playas en estudio, por lo que es importante de considerar al momento de realizar algún tipo de diseño en las costas del Golfo de Arauco

Los resultados de la dirección de aproximación del oleaje se muestran en una gráfica única, esto debido a los valores analizados de las tablas 4.4, 4.7, 4.8 y 4.9 en las cuales se aprecia como la dirección de oleaje para cada playa varía muy poco (menos de 10 grados) en relación a los distintos meses y condiciones de estudio. Esto se debe a que la dirección dominante en las costas se ve influenciada por el fondo marino y el fenómeno de refracción explicando en el punto 2.2.3.1 que está directamente relacionado a la profundidad. Por lo que independiente del mes o condición de estudio, el oleaje se comporta direccionalmente parecido a una profundidad de 10 metros. Dirección de aproximación promedio mostradas en la figura 4.17.



Figura N°4.17: Resultado de direcciones promedio en las playas en estudio.

La figura 4.17 muestra los resultados, en relación a la dirección de aproximación del oleaje en aguas someras, esto para cada playa en estudio. Cabe destacar que la dirección de llegada dominante del oleaje, difiere bastante en relación a la dirección de entrada de oleaje definida en la caracterización del clima marítimo en aguas profundas, esto debido a lo explicado con anterioridad, a que la dirección del oleaje se modifica a medida que empieza a sentir el fondo marino y ocurriendo los fenómenos de refracción y difracción.

5. Discusiones y Conclusiones

5.1. Discusiones

- Si bien el modelo SWAN implementado en DELFT, es un modelo numérico de propagación espectral probado y validado mundialmente, el cual incorporó de manera correcta la batimetría y condiciones de oleaje analizadas de manera mensual. Importante reiterar que, este modelo numérico no fue calibrado ni validado, debido a que actualmente el Golfo de Arauco no cuenta con estaciones de medición de datos, por lo que es un modelo experimental.
- Adicional a los estudios mostrados, se incorporó escenarios de modelación para el mes de enero que incluye una velocidad de viento de 40 km/hora desde la dirección 225°, fenómeno que se quiso incorporar para ver la acción del viento en los parámetros de oleaje. Obteniendo los resultados expuestos en la tabla 6.6 del capítulo anexos, donde se aprecia con claridad la poca y casi nula incidencia que este tiene sobre los parámetros de oleaje.
- Las playas del Golfo de Arauco, poseen un comportamiento mensual similar entre ellas, lo cual queda expresado en la figura 4.14, es decir su aumento o disminución de altura de oleaje durante el año es grupal, esto debido a su cercanía. Por otra parte, existen diferencias en la magnitud del oleaje de cada una de las playas, pese a su similar comportamiento y variabilidad durante el año, estas pueden diferir en hasta 1.5 metros aproximadamente de altura significativa, como lo es el caso de Escuadrón y Llico que presenta su peak de altura de ola en el mes de agosto, donde Escuadrón triplica la magnitud de oleaje de Llico.
- Escuadrón: Playa más expuesta al mar abierto del Golfo de Arauco y presenta los mayores valores de altura de ola.
Coronel, Chivilingo, Arauco y Tubúl: Presentan un comportamiento similar las cuales difieren levemente en su altura de oleaje (0.2 metros de diferencia máxima), playas que alcanzan su altura de oleaje peak en los meses de invierno producto de

oleajes mixtos. Estas playas presentan alturas de ola bajas, menores a 1 metro durante todo el año, exceptuando la condición norte seas y swell, donde pueden alcanzar alturas de olas (m) sobre los 2.5 metros.

Llico: Presenta las menores alturas de ola en comparación al resto de las playas y muy poca variabilidad de esta durante el año, presentando su oleaje máximo en febrero con 0.5 metros y su altura de ola mínima el mes de diciembre con 0.3 metros.

Punta Lavapíe: Ubicada al extremo sur del Golfo de Arauco, esta playa presenta oleajes bajos de menos de 1 metro, excediendo levemente a las ya mencionadas Coronel, Chivilingo, Arauco y Tubul. Pese a ser una de las playas más expuesta junto a Escuadrón, y suponiendo en un principio que esta obtendría parámetros sobre la media, especialmente en la condición oeste que impacta de manera más directa, tal es el caso de Escuadrón. Punta Lavapíe presenta un comportamiento poco variable durante el año.

5.2. Conclusiones

En el presente trabajo fue presentada la descripción de la metodología utilizada para la caracterización del clima marítimo dominante en las playas del Golfo de Arauco, esto a partir de una serie de datos obtenida en aguas profundas. En donde se realizó:

- Caracterización mensual del clima de oleaje en aguas profundas, a partir del módulo de reanálisis del modelo WAVEWATCH III, obteniéndose así de manera confiable los datos de oleaje en aguas profundas, para así realizar una correcta caracterización del clima de oleaje en aguas profundas. Esto según su dirección y tipo de oleaje presentado.
- Se demostró que el modelo SWAN, implementado en el software DELFT3D, es una excelente herramienta computacional, la cual es capaz de generar una propagación de oleaje en grandes extensiones de mar abierto. El modelo se realizó de manera correcta, según lo indicado por los manuales de uso DELFT, pese a que el modelo

no pudo ser calibrado y validado. Se realizó un modelo estable, según el criterio de Courant obteniendo resultados esperados y coherentes con los procesos físicos que ocurren en la zona de estudio.

- Debido a la procedencia del oleaje y la morfología del Golfo de Arauco, se obtuvieron resultados esperados de Hs, Tp y dirección para las distintas playas del Golfo de Arauco, siendo así las playas más expuestas las más propensas a parámetros más críticos de oleaje. Y teniendo valores estables a lo largo de todo el año las playas más protegidas del mar abierto.
- En relación a las condiciones impuestas al modelo SWAN, se distinguió con claridad como la condición noroeste seas presentes en los meses de invierno (mayo a septiembre), es la que más afecta a las playas del Golfo de Arauco. Las cuales, al recibir el oleaje proveniente de la dirección noroeste, se comportan como si estuviesen expuestas al mar abierto. Y mantienen en la costa parámetros de oleajes similares a los generados en aguas profundas.

6. Referencias

Antonio Lechuga Álvaro, (2002). El uso del espacio litoral: Infraestructuras y playas. I Congreso de Ingeniería Civil, territorio y Medio Ambiente, Libro de Territorio y Medio Ambiente Congreso de Ingeniería Civil, Madrid.

Rafael Bonanata, Raul Medina, Lucas Silveira, Lindno Benedet.(2010). Metodología para la caracterización del clima marítimo en un punto cerca de la costa a partir de una serie de datos en aguas profundas. VI Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria.

ROM 03.91 (1991). Recomendaciones para Obras Marítimas. Waves Recommendation (Annex: Climate on the Spanish Coastlines).

Dean y Dalrymple, (1991); Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. London (1991).

Massel, S.R., (1996). Ocean surface waves: their physics and prediction. World Scientific publishing, London, UK.

Tolman, H.L.; Balasubramaniyan, B.; Burroughs, L. D; Chalikov, D. V.; Chao, Y. Y.; Chen, H. S and Gerald V. M (2001). Development and implementation of wind-generated ocean surface wave models at NCEP. NOAA/NCEP/Environmental Modeling Center, Camp Springs, Maryland. NCEP notes. 311-333.

Montoya R.D y Osorio A. (2008). Los modelos de generación de oleaje de viento: Características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. Avances en recursos hidráulicos (15): 47-74.

Agudelo, P.; Restrepo, A.F.; Molares R.; Tejada C.E.; Torres, R. y Osorio A.F. (2005). Determinación del clima medio y extremos en el Caribe Colombiano. Boletín científico del CIOH. 23. 33-45.

US Army Corps of Engineers (USACE), (1984). Shore Protection manual, Vicksburg, Mississippi, pp. 3-81-3-84.

Davidson-Arnott, R. (2010). An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. R.Davidson-Arnott.

Kamphuis, W. (2010). Introduction to Coastal Engineering and management (Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 16). Word Scientific Publishing Company; 2 Edition.

SHOA (1995). Maremotos en la costa de Chile. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Pub. 3016, 2ª. Edición.

Ris, R.C., N. Booij and L.H. Holthuijsen, (1999). A third- generation wave model for coastal regions, Part II, Verification, J. Geoph. Research C4, 104, 7649-7666.

WAMDI Group (13 authors) (1998). The WAM model- A third generation ocean wave prediction model. J. Phys. Ocenaogr., 18, 1775-1810.

Tolman, H.L. (1989). The numerical model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Technical Report 89-2. Faculty of civil engineering. Delft University of Technology. ISSN 0169-6548.

Ueno, K. y Ishizaka, M. (1997). Efficient computational scheme of nonlinear energy transfer of wind waves. Sokkou-jihou, 65, S181-S187.

Suziki, Y. y Isozaki, I. (1994). On the development of a global ocean wave model JWA3G. Proc. Pacific Ocean Remote Sensing Conf. In Melbourne, Australia, 195-201.

Booij, N., Rogers, W.E., Kaihatu, J.M., and Holtuijsen, L., (1999). Improving the Numerics of a Third-Generation Wave Action Model. Stennins Space Center, MS: Naval Research Laboratory. NRL/FR/7320-99-9695, 1-66.

Delft Hydraulics. Agosto 1998. A review of the physical formulations in SWAN.

Adcock and P. H. Taylor, Enero (2016). Estimating ocean wave directional spreading from an Eulerian Surface elevation time history.

Deltares, 4.00 ed. Delft3D-RGFGRID User Manual, 2014.

Deltares, 4.00 ed. Delft3D-QUICKIN User Manual, 2014.

Deltares, 4.00 ed. Delft3D-WAVE User Manual, 2014.

Deltares, 4.00 ed. Delft3D-QUICKPLOT User Manual, 2014.

Leo H. Holthuijsen, (2007). Waves in oceanic and Coastal Waters. Cambridge

7. Anexos

7.1. Tablas de incidencia de Altura significativa (m)

Enero

H (m)		0	1	2	3	4	5	Total	A (%)
		1	2	3	4	5	6		
Dirección (grados)	N	0	0	0	0	0	0	0	0
	NNO	0	0	0	0	0	0	0	0
	NO	0	2	18	7	0	0	27	1.20
	ONO	0	81	187	26	0	0	294	13.12
	O	0	29	39	6	0	0	74	3.30
	OSO	0	83	137	55	14	0	289	12.90
	SO	0	152	763	493	29	0	1437	64.12
	SSO	0	18	71	30	1	0	120	5.35
S	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total		0	365	1215	617	44	0	2241	
A (%)		0	16.29	54.22	27.53	1.96	0		

Febrero

H (m)		0	1	2	3	4	5	Total	A (%)
		1	2	3	4	5	6		
Dirección (grados)	N	0	0	0	0	0	0	0	0
	NNO	0	0	0	1	0	0	1	0.04
	NO	0	12	19	2	0	0	33	1.46
	ONO	0	82	98	1	0	0	181	7.99
	O	0	26	40	2	0	0	68	3.0
	OSO	0	54	160	61	14	0	289	12.76
	SO	0	167	888	362	29	1	1447	63.89
	SSO	0	42	91	101	10	0	244	10.77
S	0	2	0	0	0	0	2	0.09	
Total		0	385	1296	530	53	1	2265	
A (%)		0.0	17.0	57.2	23.4	2.3	0.0		

Marzo

H (m)		0	1	2	3	4	5	6	Total	A (%)
		1	2	3	4	5	6	7		
Dirección (grados)	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	NNO	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	NO	0	0	3	0	0	0	0	3	0.12
	ONO	0	10	24	1	0	0	0	35	1.41
	O	0	14	25	6	0	0	0	45	1.8
	OSO	0	56	167	90	1	0	0	314	12.61
	SO	0	158	915	694	124	12	3	1906	76.55
	SSO	0	6	85	76	20	0	0	187	7.51
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	
Total		0	244	1219	867	145	12	3	2490	

Abril

H (m)		0	1	2	3	4	5	6	Total	A (%)
		1	2	3	4	5	6	7		
Dirección (grados)	N	0	0	1	2	0	0	0	3	0
	NNO	0	0	2	2	0	0	0	4	0.17
	NO	0	4	2	1	0	0	0	7	0.29
	ONO	3	15	4	10	2	0	0	34	1.41
	O	1	14	12	16	0	0	0	43	1.8
	OSO	3	98	154	66	35	8	2	366	15.19
	SO	7	129	681	633	195	25	9	1679	69.67
	SSO	0	4	128	112	28	2	0	274	11.37
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	
Total		14	264	984	842	260	35	11	2410	
A (%)		0.6	11.0	40.8	34.9	10.8	1.5	0.5		

Mayo

H (m)		1	2	3	4	5	6	7	Total	A (%)
		2	3	4	5	6	7	8		
Dirección (grados)	N	0	1	3	4	1	2	0	11	0.4
	NNO	0	0	4	5	0	1	0	10	0.40
	NO	0	2	4	8	6	2	0	22	0.88
	ONO	0	1	36	25	5	0	0	67	2.69
	O	13	50	40	20	7	0	0	130	5.22
	OSO	30	91	129	21	17	7	2	297	11.93
	SO	176	623	616	251	60	12	4	1742	69.96
	SSO	26	98	73	14	0	0	0	211	8.47
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total		245	866	905	348	96	24	6	2490	

Junio

H (m)		0	1	2	3	4	5	6	7	Total	A (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Dirección (grados)	N	0	0	5	5	7	0	0	0	17	0.7
	NNO	0	0	1	3	6	5	0	0	15	0.62
	NO	0	0	5	8	7	2	1	0	23	0.95
	ONO	0	3	20	10	4	0	1	0	38	1.57
	O	0	15	52	26	18	11	2	0	124	5.13
	OSO	5	48	106	137	109	51	11	4	471	19.48
	SO	0	68	516	532	228	39	7	0	1390	57.49
	SSO	0	54	113	92	65	15	1	0	340	14.06
	S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	5	188	818	813	444	123	23	4	2418	

Julio

H (m)		1	2	3	4	5	6	7	8	Total	A (%)
		2	3	4	5	6	7	8	9		
Dirección (grados)	N	0	1	10	0	0	0	0	0	11	0.4
	NNO	0	12	9	8	0	0	0	0	29	1.16
	NO	0	3	6	3	1	0	0	0	13	0.52
	ONO	1	27	26	10	3	0	0	0	67	2.69
	O	25	41	41	33	5	1	0	0	146	5.86
	OSO	147	241	238	121	41	17	8	3	816	32.77
	SO	133	377	396	159	39	9	4	0	1117	44.86
	SSO	33	115	90	38	13	2	0	0	291	11.69
	S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	339	817	816	372	102	29	12	3	2490	
	A (%)	13.6	32.8	32.8	14.9	4.1	1.2	0.5	0.1		

Agosto

H (m)		0	1	2	3	4	5	6	7	Total	A (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Dirección (grados)	N	0	4	7	2	5	2	0	0	20	0.8
	NNO	0	2	4	8	3	0	0	0	17	0.68
	NO	0	1	5	11	2	2	0	0	21	0.84
	ONO	0	6	12	8	4	3	0	0	33	1.33
	O	0	21	59	38	23	20	2	0	163	6.55
	OSO	1	100	258	211	146	73	21	0	810	32.53
	SO	0	105	428	399	210	79	11	4	1236	49.64
	SSO	0	18	99	48	24	1	0	0	190	7.63
	S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	1	257	872	725	417	180	34	4	2490	
	A (%)	0.0	10.3	35.0	29.1	16.7	7.2	1.4	0.2		

Septiembre

H (m)		0	1	2	3	4	5	6	Total	A (%)
		1	2	3	4	5	6	7		
Dirección (grados)	N	0	0	1	4	0	0	0	5	0.2
	NNO	0	0	0	1	0	0	0	1	0.04
	NO	0	0	2	3	0	0	0	5	0.21
	ONO	0	0	0	1	1	0	0	2	0.08
	O	0	3	30	39	8	0	0	80	3.31
	OSO	0	114	359	178	64	8	5	728	30.11
	SO	5	173	638	474	140	8	0	1438	59.47
	SSO	0	39	60	34	26	0	0	159	6.58
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total		5	329	1090	734	239	16	5	2418	
A (%)		0.2	13.6	45.1	30.4	9.9	0.7	0.2		

Octubre

H (m)		1	2	3	4	5	Total	A (%)
		2	3	4	5	6		
Dirección (grados)	N	0	0	0	0	0	0	0.0
	NNO	0	0	0	0	0	0	0.00
	NO	12	5	0	0	0	17	0.68
	ONO	18	10	1	0	0	29	1.16
	O	4	14	3	4	0	25	1.00
	OSO	68	243	131	20	2	464	18.63
	SO	219	831	506	172	18	1746	70.12
	SSO	21	138	35	12	3	209	8.39
S	0	0	0	0	0	0	0	
Total		342	1241	676	208	23	2490	
A (%)		13.7	49.8	27.1	8.4	0.9		

Noviembre

H (m)		1	2	3	4	5	6	Total	A (%)
		2	3	4	5	6	7		
Dirección (grados)	N	0	1	0	0	0	0	1	0.0
	NNO	0	0	1	0	0	0	1	0.04
	NO	31	13	6	0	0	0	50	2.07
	ONO	10	19	0	0	0	0	29	1.20
	O	12	7	4	0	0	0	23	0.95
	OSO	92	163	71	4	0	0	330	13.69
	SO	149	875	552	77	9	3	1665	69.09
	SSO	38	162	102	9	0	0	311	12.90
S	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total		332	1240	736	90	9	3	2410	
A (%)		13.8	51.5	30.5	3.7	0.4	0.1		

Diciembre

H (m)		1	2	3	4	5	6	Total	A (%)
		2	3	4	5	6	7		
Dirección (grados)	N	0	0	0	0	0	0	0	0.0
	NNO	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	NO	24	29	2	0	0	0	55	2.45
	ONO	75	34	4	0	0	0	113	5.04
	O	14	21	8	0	0	0	43	1.92
	OSO	59	136	47	16	3	6	267	11.91
	SO	164	938	416	32	0	0	1550	69.17
	SSO	13	107	91	2	0	0	213	9.50
	S	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	349	1265	568	50	3	6	2241	
	A (%)	15.6	56.4	25.3	2.2	0.1	0.3		

7.2. Tablas de incidencia de Periodo peak(seg)

Enero

T (s)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
NNO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
NO	0	0	0	0	0	0	0	17	9	1	0	27	1.2
ONO	0	15	2	0	0	0	3	82	138	37	17	294	13.1
O	2	14	0	0	9	0	5	35	6	3	0	74	3.3
OSO	8	58	0	0	5	52	89	65	12	0	0	289	12.9
SO	14	338	14	1	47	469	428	109	17	0	0	1437	64.1
SSO	0	33	1	53	14	14	5	0	0	0	0	120	5.4
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
Total	24	458	17	54	75	535	530	308	182	41	17	2241	
A (%)	1.07	20.44	0.76	2.41	3.35	23.87	23.65	13.74	8.12	1.83	0.76		

Febrero

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20		
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNO	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.04
NO	0	2	0	0	0	25	6	0	33	1.46
ONO	0	0	0	0	16	88	69	8	181	7.99
O	0	0	0	0	29	30	9	0	68	3.00
OSO	0	0	0	81	137	58	13	0	289	12.76
SO	0	1	47	531	646	199	23	0	1447	63.89
SSO	2	104	31	41	41	18	7	0	244	10.77
S	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0.09
Total	4	108	78	653	869	418	127	8	2265	
A (%)	0.2	4.8	3.4	28.8	38.4	18.5	5.6	0.4		

Marzo

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
NNO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
NO	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0.12
ONO	0	0	0	0	2	17	16	0	0	35	1.41
O	0	0	2	2	6	31	4	0	0	45	1.81
OSO	0	0	6	79	120	84	25	0	0	314	12.61
SO	0	0	40	470	864	436	84	9	3	1906	76.55
SSO	2	41	5	40	74	21	4	0	0	187	7.51
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	2	41	53	591	1066	592	133	9	3	2490	
A (%)	0.1	1.6	2.1	23.7	42.8	23.8	5.3	0.4	0.1		

Abril

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
N	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0.1
NNO	0	4	0	0	0	0	0	0	0	4	0.2
NO	0	1	0	0	0	1	5	0	0	7	0.29
ONO	0	1	7	8	4	7	7	0	0	34	1.41
O	0	0	0	6	13	22	2	0	0	43	1.78
OSO	0	0	8	144	139	61	12	2	0	366	15.19
SO	0	0	16	255	787	517	89	13	2	1679	69.67
SSO	1	8	13	40	131	69	12	0	0	274	11.37
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	2	16	44	453	1074	677	127	15	2	2410	
A (%)	0.1	0.7	1.8	18.8	44.6	28.1	5.3	0.6	0.1		

Mayo

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
N	0	3	6	0	0	0	1	1	0	11	0.4
NNO	0	4	4	1	0	0	1	0	0	10	0.40
NO	1	1	13	7	0	0	0	0	0	22	0.88
ONO	0	2	25	26	7	3	4	0	0	67	2.69
O	0	0	19	65	39	7	0	0	0	130	5.22
OSO	0	1	19	83	110	74	10	0	0	297	11.93
SO	0	8	22	293	741	554	112	10	2	1742	69.96
SSO	0	0	7	36	111	54	3	0	0	211	8.47
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1	19	115	511	1008	692	131	11	2	2490	
A (%)	0.0	0.8	4.6	20.5	40.5	27.8	5.3	0.4	0.1		

Junio

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
N	1	13	3	0	0	0	0	0	0	17	0.7
NNO	0	5	10	0	0	0	0	0	0	15	0.62
NO	0	8	13	2	0	0	0	0	0	23	0.95
ONO	0	4	22	12	0	0	0	0	0	38	1.57
O	0	0	33	72	18	0	1	0	0	124	5.13
OSO	0	1	25	135	196	81	22	7	4	471	19.48
SO	0	1	15	176	663	435	90	9	1	1390	57.49
SSO	0	9	16	86	102	107	20	0	0	340	14.06
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1	41	137	483	979	623	133	16	5	2418	
A (%)	0.0	1.7	5.7	20.0	40.5	25.8	5.5	0.7	0.2		

Julio

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
N	0	9	2	0	0	0	0	0	0	11	0.4
NNO	1	19	9	0	0	0	0	0	0	29	1.16
NO	0	4	9	0	0	0	0	0	0	13	0.52
ONO	1	10	26	27	3	0	0	0	0	67	2.69
O	0	2	39	64	29	9	3	0	0	146	5.86
OSO	0	2	44	219	337	153	54	7	0	816	32.77
SO	0	0	17	239	527	241	79	12	2	1117	44.86
SSO	0	15	22	65	99	81	6	2	1	291	11.69
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	2	61	168	614	995	484	142	21	3	2490	
A (%)	0.1	2.4	6.7	24.7	40.0	19.4	5.7	0.8	0.1		

Agosto

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20		
N	4	12	4	0	0	0	0	0	20	0.8
NNO	1	14	2	0	0	0	0	0	17	0.68
NO	1	12	7	1	0	0	0	0	21	0.84
ONO	0	6	17	10	0	0	0	0	33	1.33
O	0	3	39	96	21	4	0	0	163	6.55
OSO	0	4	19	284	319	132	46	6	810	32.53
SO	0	0	41	264	505	364	56	6	1236	49.64
SSO	0	4	5	45	63	54	19	0	190	7.63
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	6	55	134	700	908	554	121	12	2490	
A (%)	0.2	2.2	5.4	28.1	36.5	22.2	4.9	0.5		

Septiembre

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20		
N	0	5	0	0	0	0	0	0	5	0.2
NNO	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.04
NO	1	2	2	0	0	0	0	0	5	0.21
ONO	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0.08
O	0	0	9	43	21	6	0	1	80	3.31
OSO	0	1	64	271	283	77	27	5	728	30.11
SO	0	8	28	210	726	388	72	6	1438	59.47
SSO	0	4	1	40	41	60	13	0	159	6.58
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1	21	106	564	1071	531	112	12	2418	
A (%)	0.0	0.9	4.4	23.3	44.3	22.0	4.6	0.5		

Octubre

T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
NNO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NO	0	0	0	0	0	8	9	0	0	17	0.68
ONO	0	1	0	0	0	13	15	0	0	29	1.16
O	0	1	4	14	4	2	0	0	0	25	1.00
OSO	0	0	41	191	150	71	11	0	0	464	18.63
SO	0	0	38	414	802	399	79	10	4	1746	70.12
SSO	4	9	5	60	92	35	4	0	0	209	8.39
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	4	11	88	679	1048	528	118	10	4	2490	
A (%)	0.2	0.4	3.5	27.3	42.1	21.2	4.7	0.4	0.2		

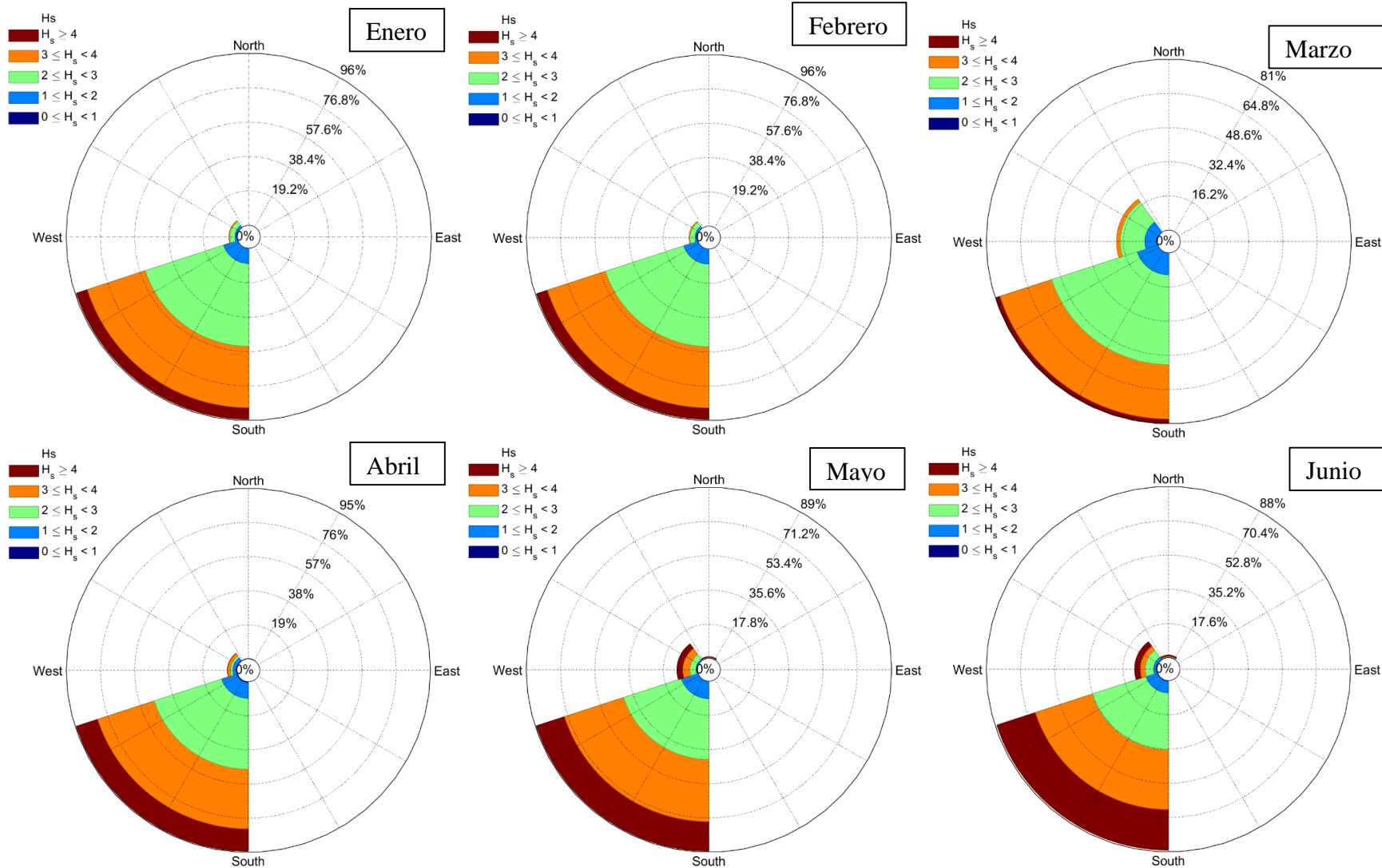
Noviembre

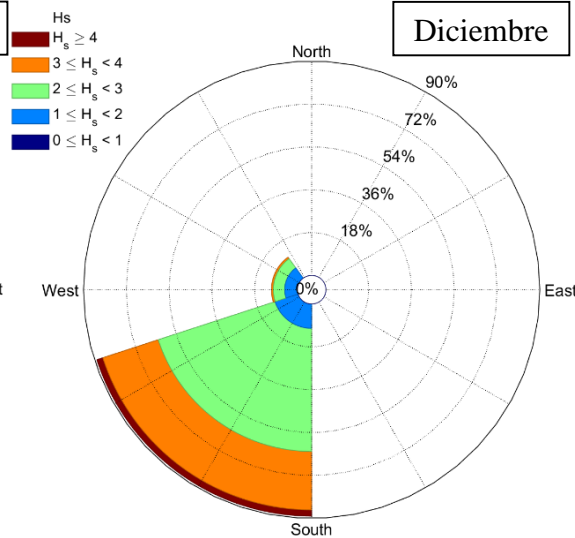
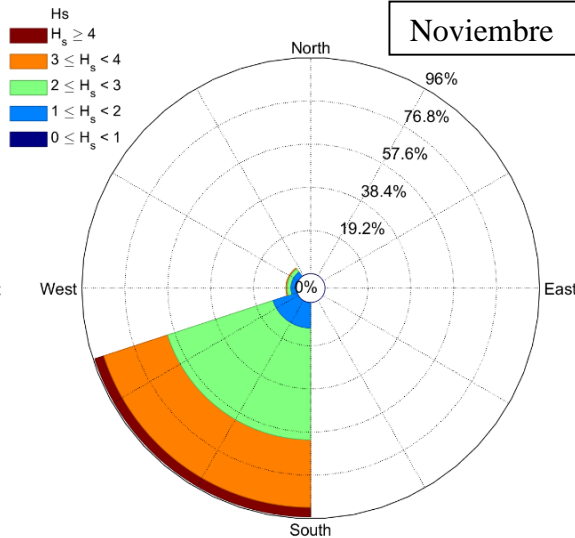
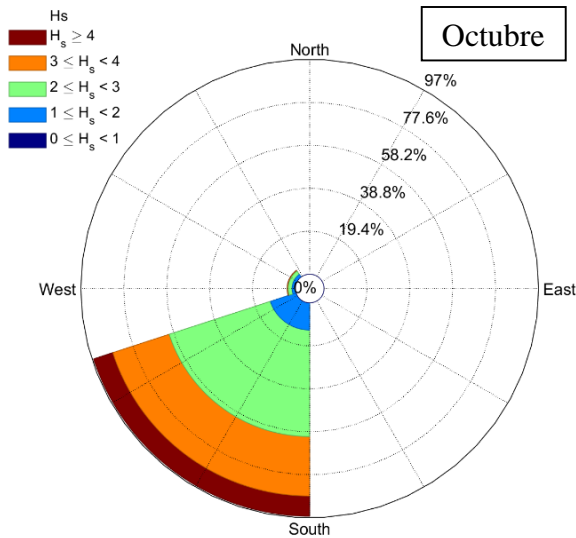
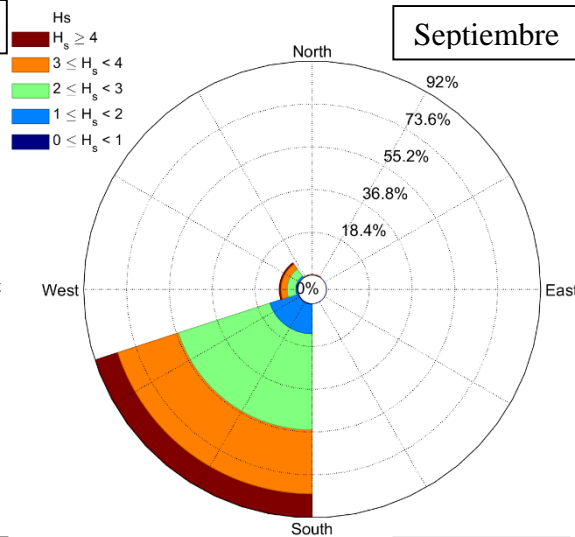
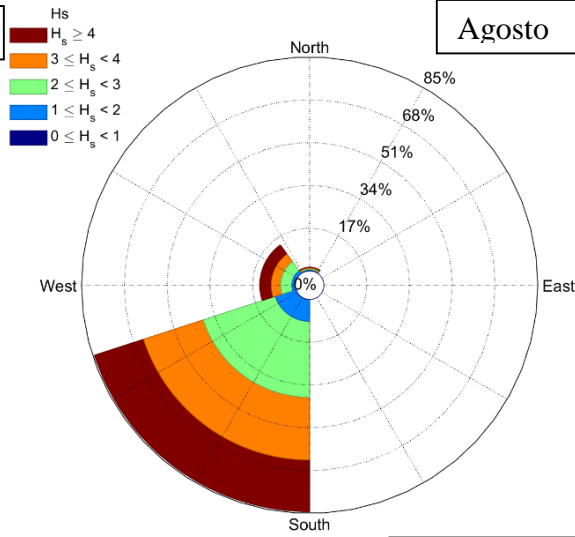
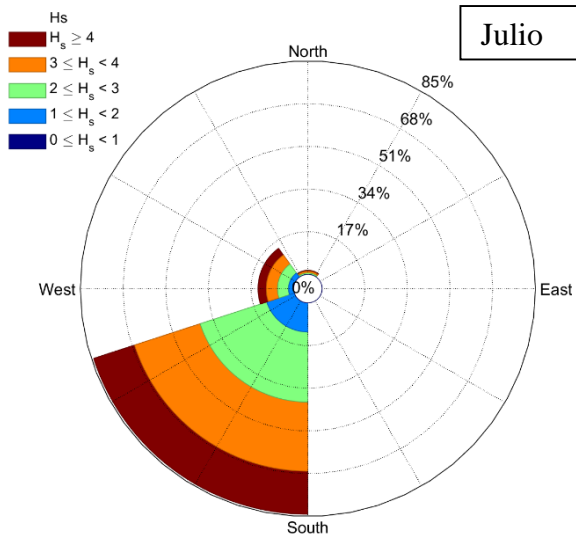
T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20		
N	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0
NNO	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.04
NO	0	0	0	0	4	11	27	8	50	2.07
ONO	0	0	0	0	5	15	9	0	29	1.20
O	0	0	9	2	4	7	1	0	23	0.95
OSO	0	1	21	150	105	47	6	0	330	13.69
SO	0	0	56	622	755	214	18	0	1665	69.09
SSO	0	72	44	96	85	14	0	0	311	12.90
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1	74	130	870	958	308	61	8	2410	
A (%)	0.0	3.1	5.4	36.1	39.8	12.8	2.5	0.3		

Diciembre

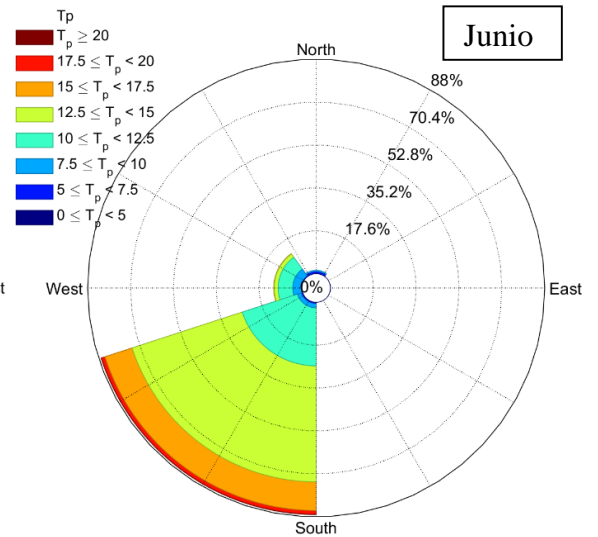
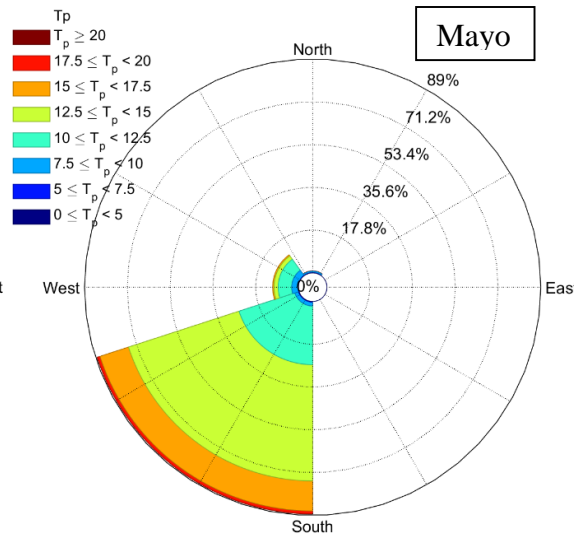
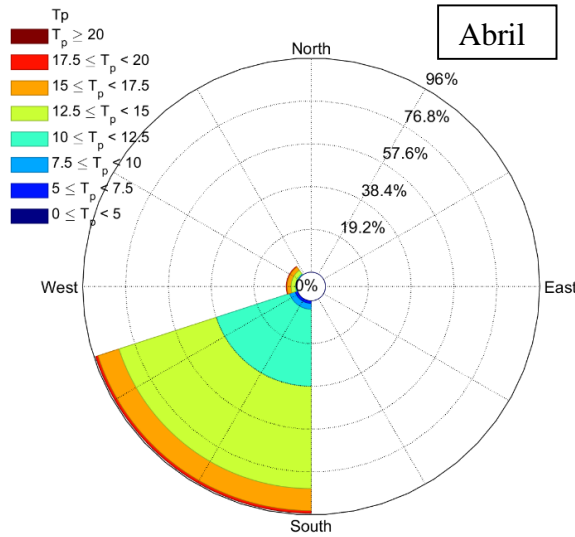
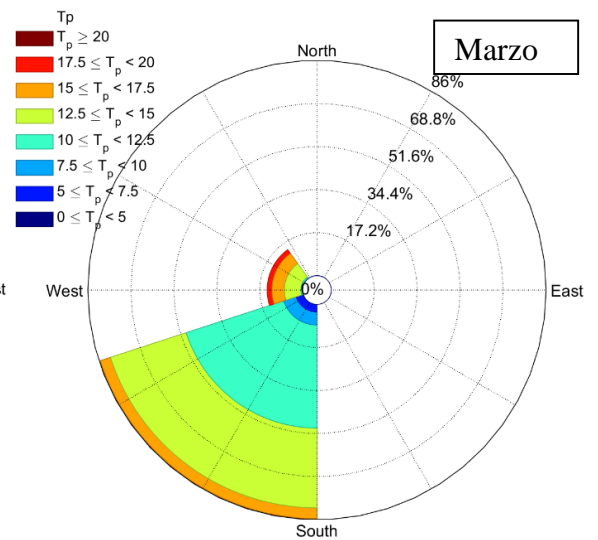
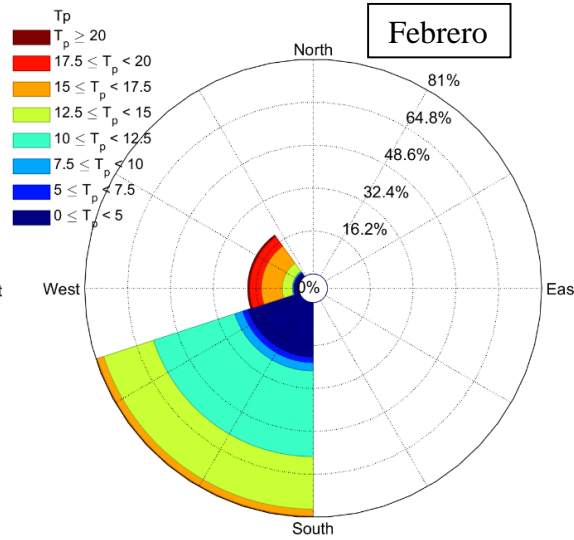
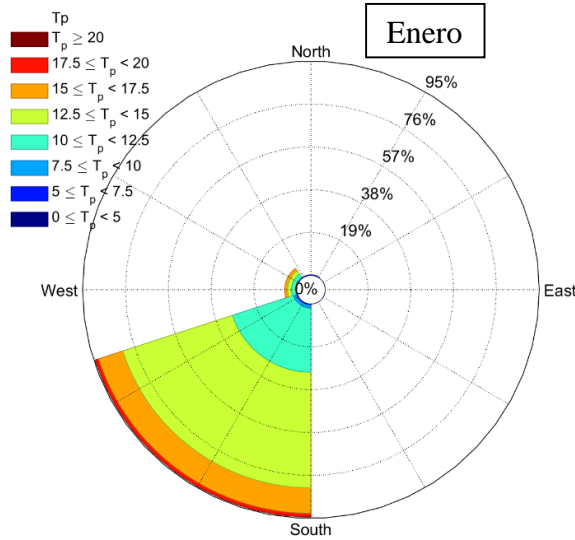
T (s)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	Total	A (%)
	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
NNO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
NO	0	0	0	0	0	26	26	3	0	55	2.5
ONO	0	1	0	0	3	70	27	8	4	113	5.0
O	0	0	6	0	18	16	3	0	0	43	1.9
OSO	0	2	32	86	88	42	13	4	0	267	11.9
SO	0	9	77	647	648	150	19	0	0	1550	69.2
SSO	11	90	20	34	44	12	2	0	0	213	9.5
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	11	102	135	767	801	316	90	15	4	2241	
A (%)	0.5	4.6	6.0	34.2	35.7	14.1	4.0	0.7	0.2		

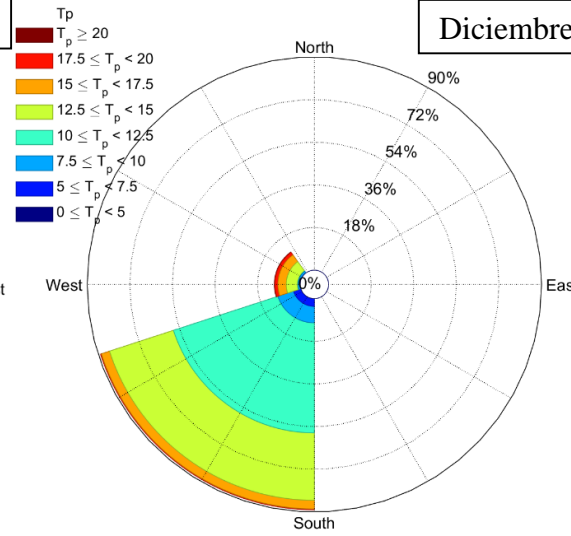
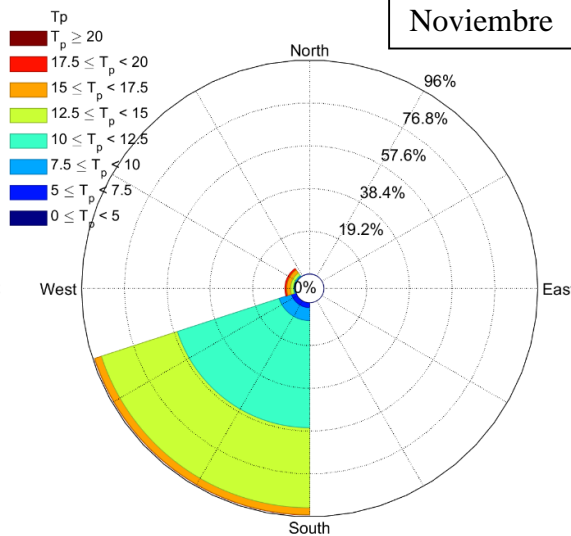
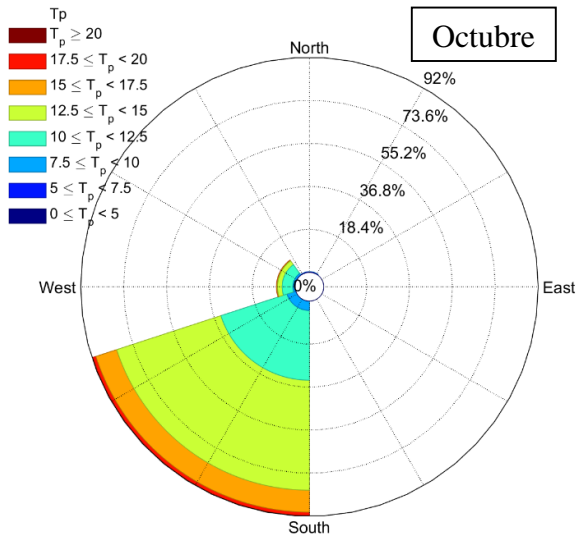
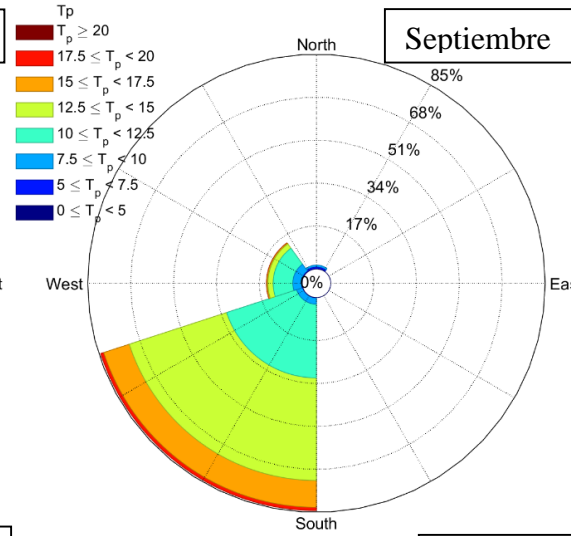
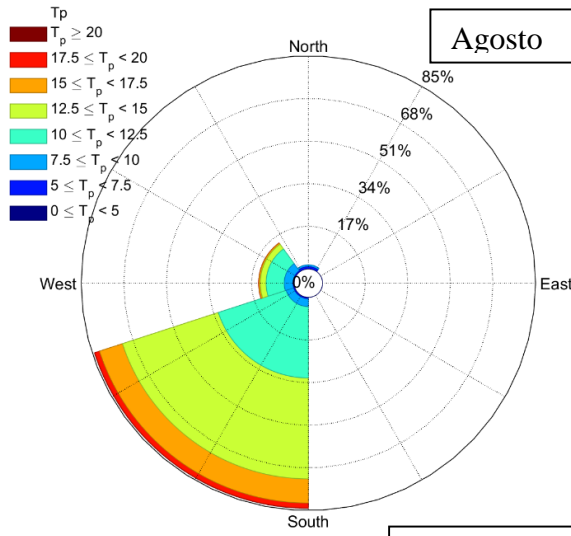
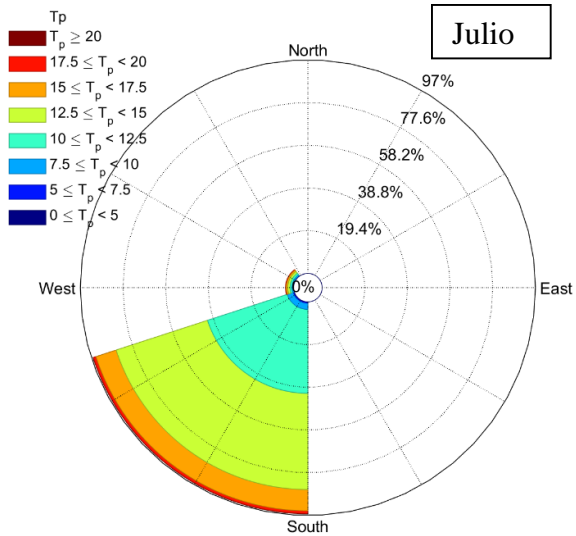
7.3. Rosa de oleaje. Altura significativa (m).





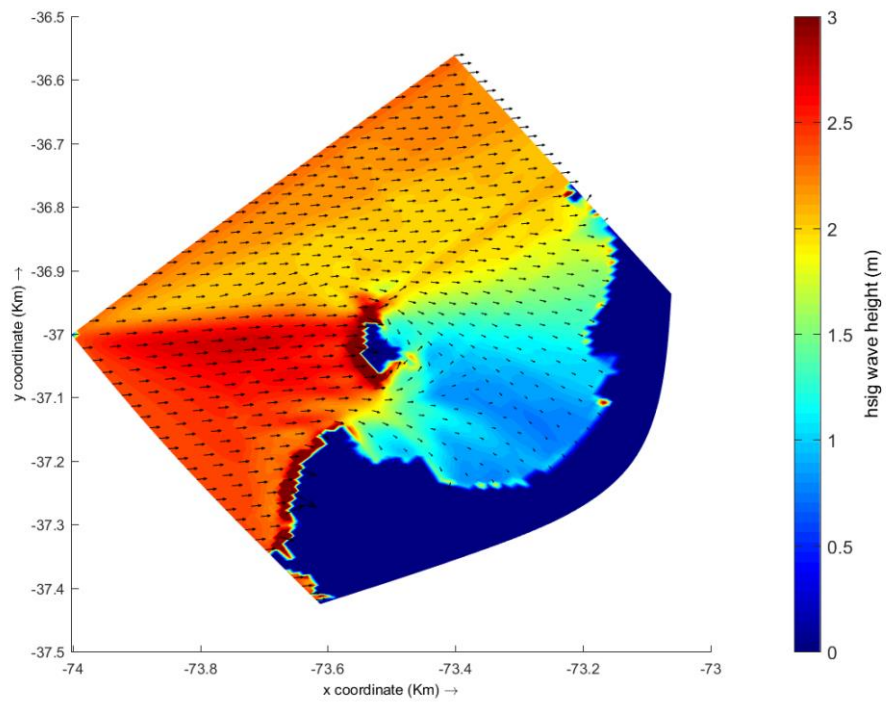
7.4. Rosa de oleaje. Periodo Peak (s).



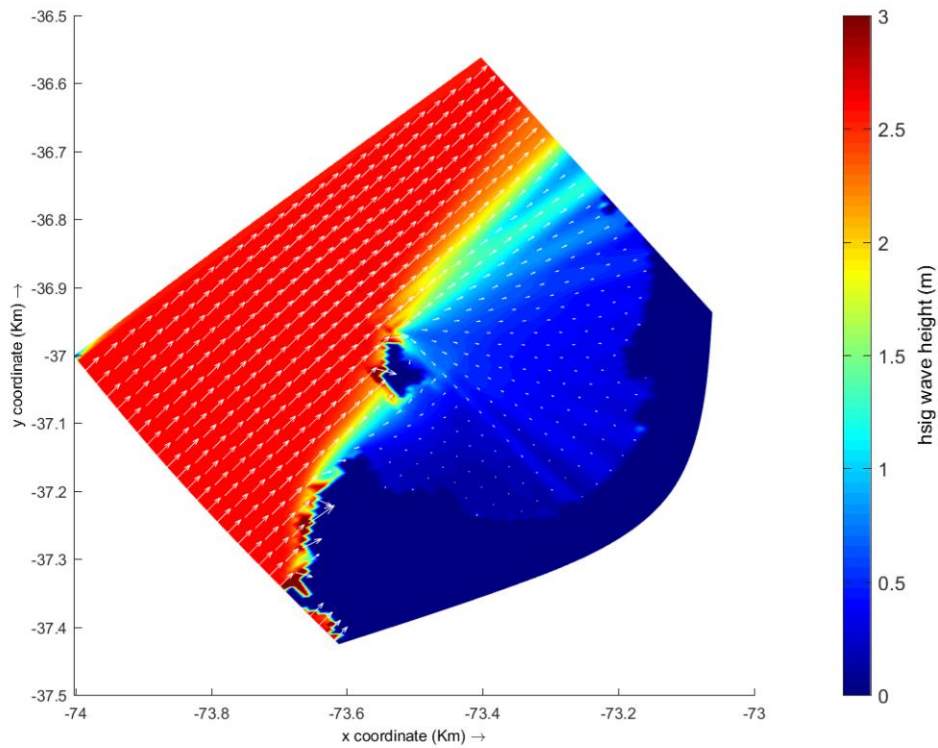


7.5. Escenarios de modelación para cada mes

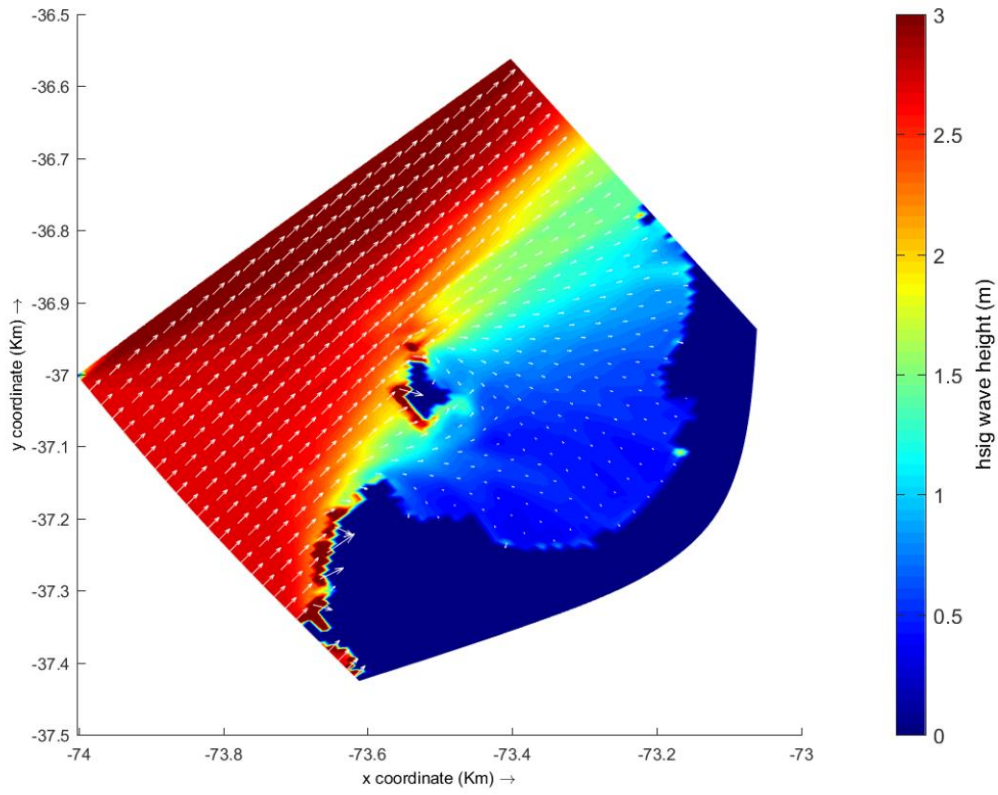
Febrero oeste swell.



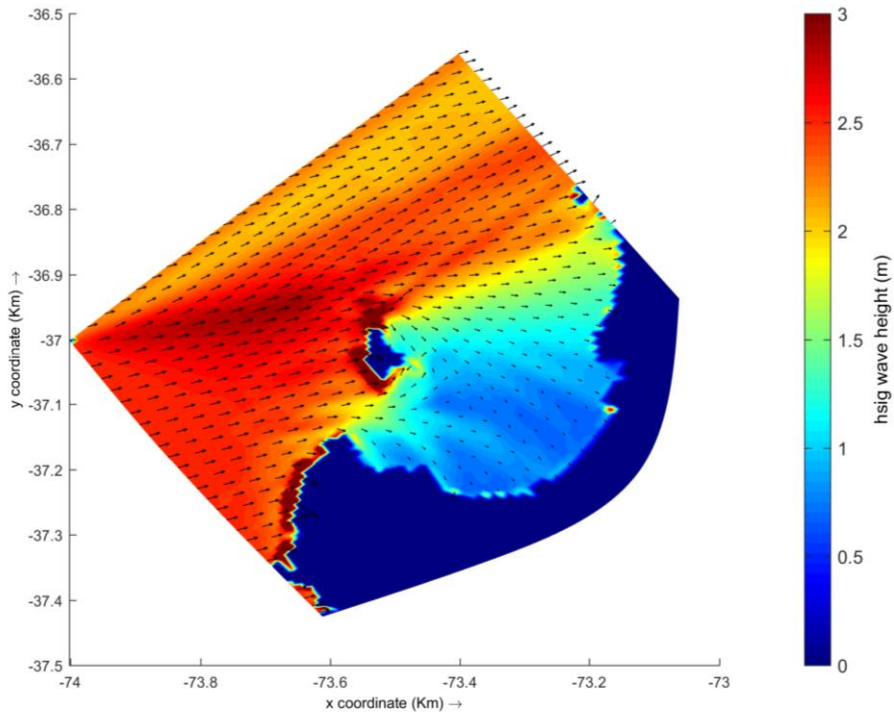
Febrero suroeste seas.



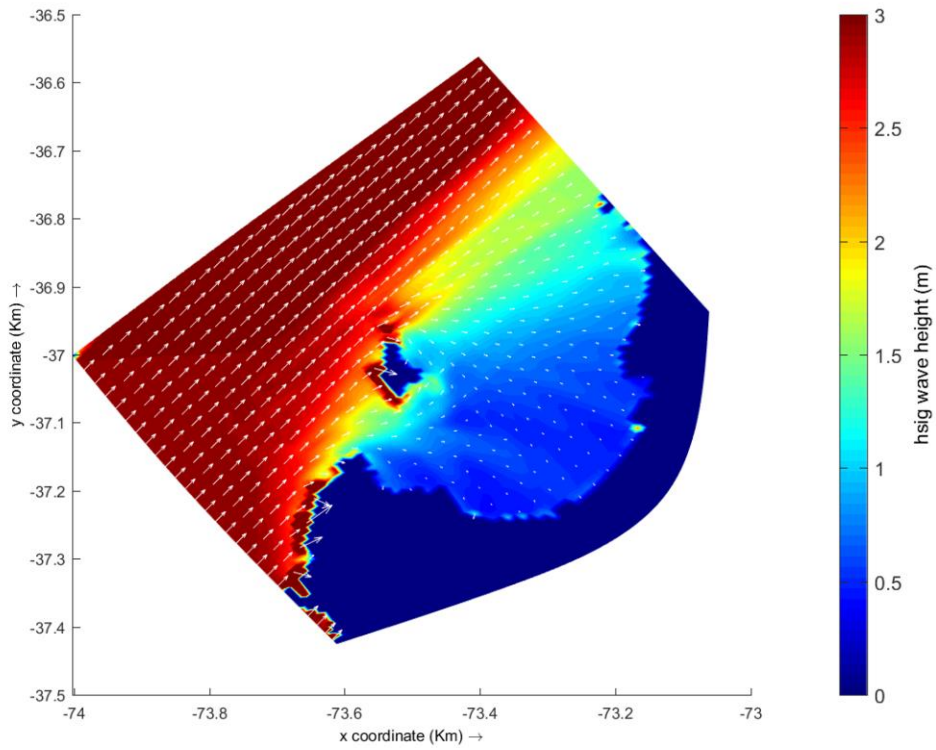
Febrero suroeste swell.



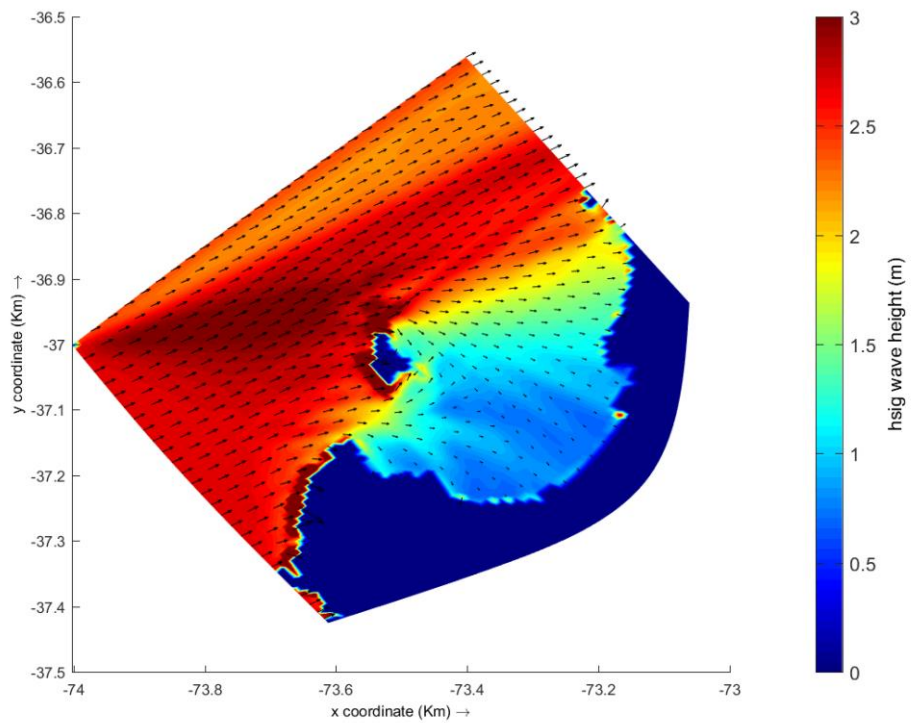
Marzo oeste swell.



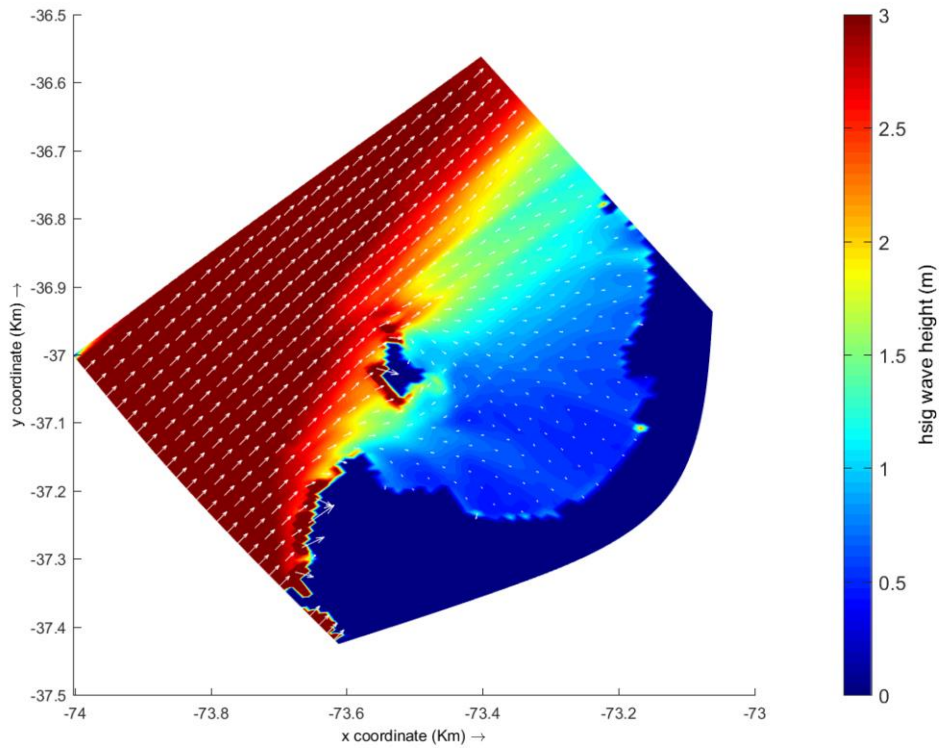
Marzo suroeste swell.



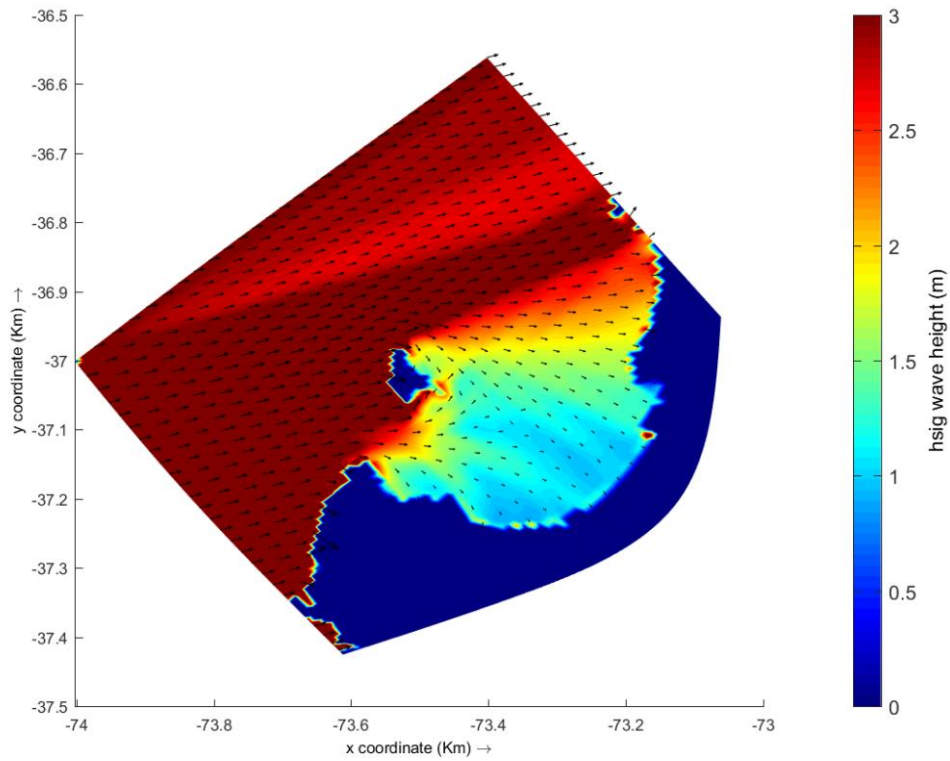
Abril oeste swell



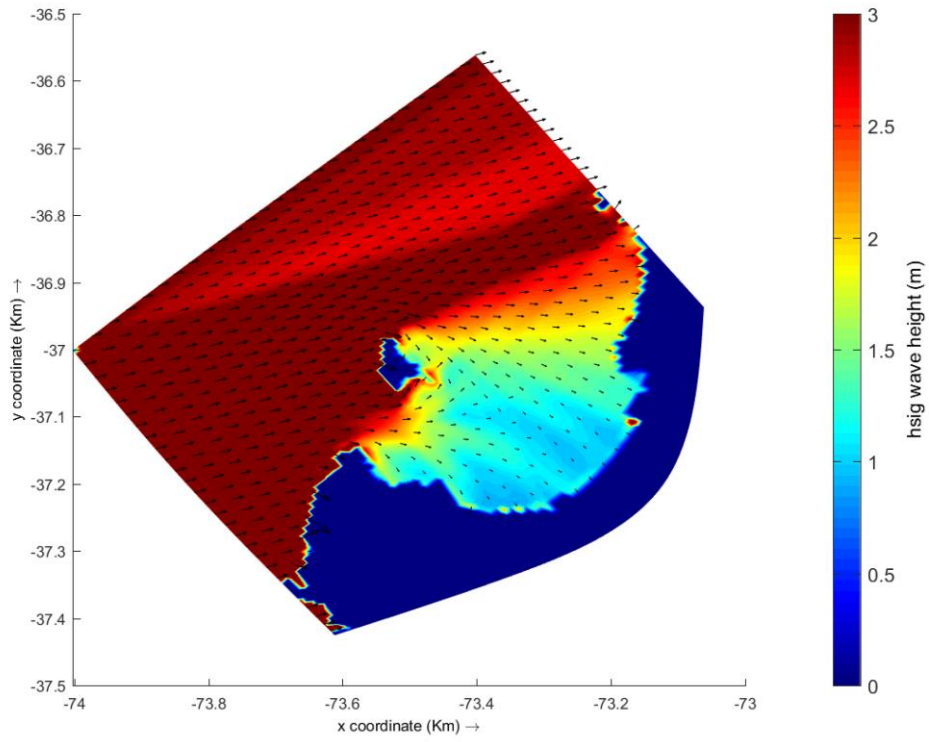
Abril suroeste swell.



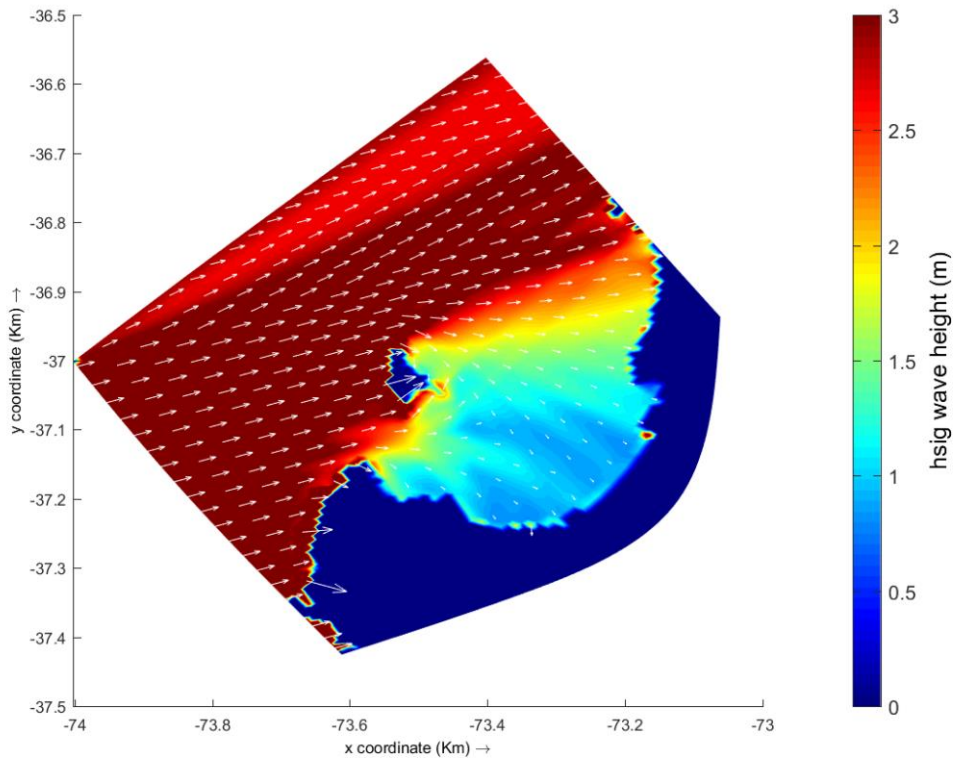
Mayo oeste swell.



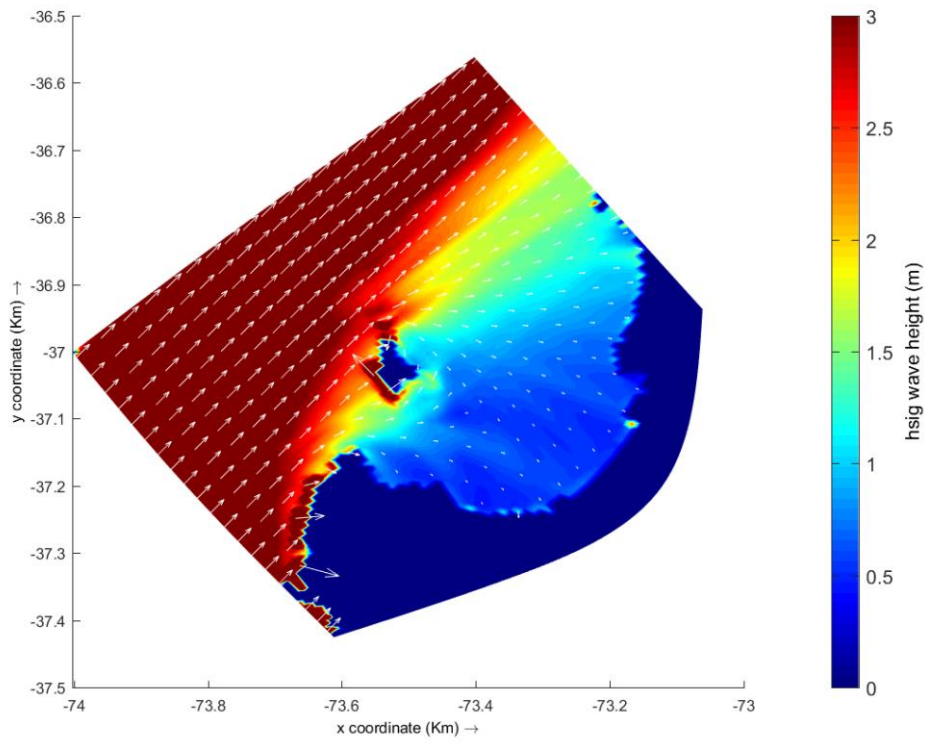
Mayo suroeste swell.



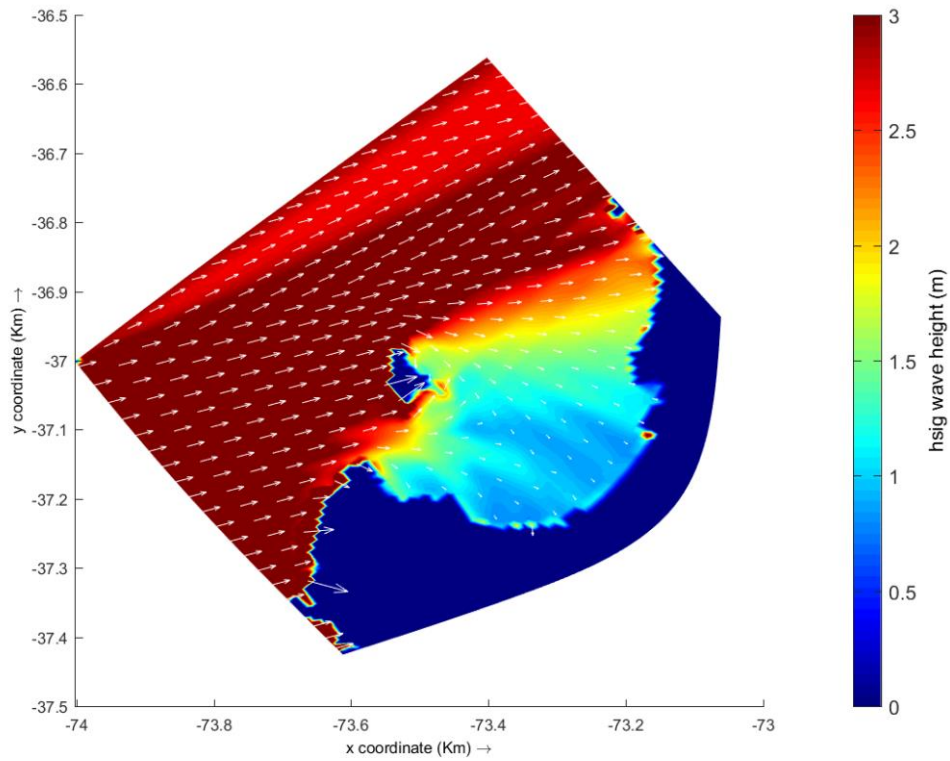
Junio oeste swell.



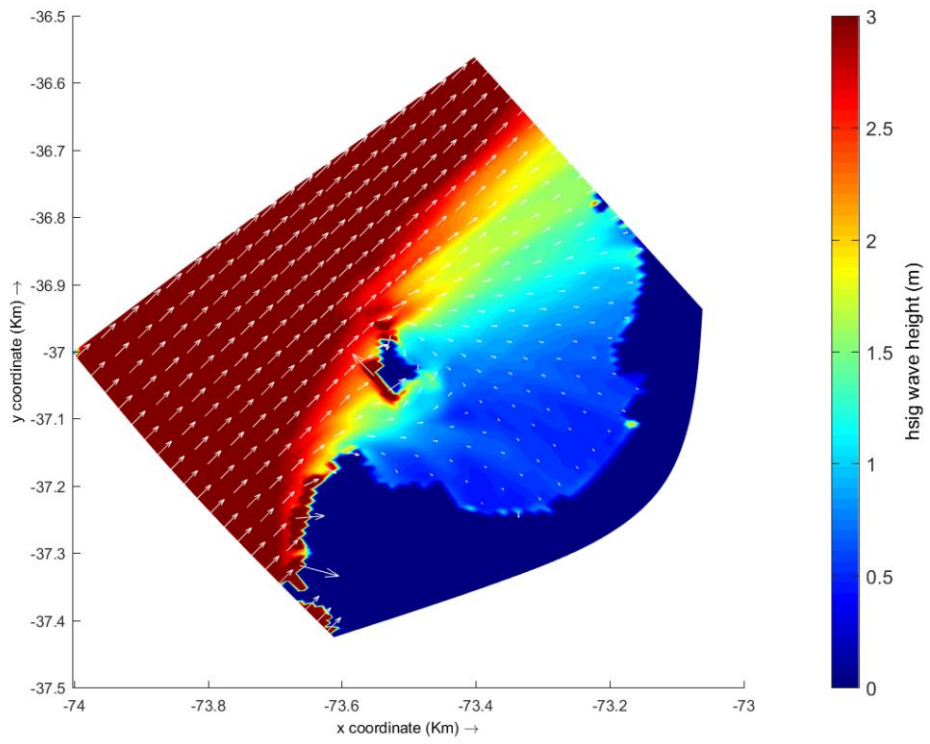
Junio suroeste swell.



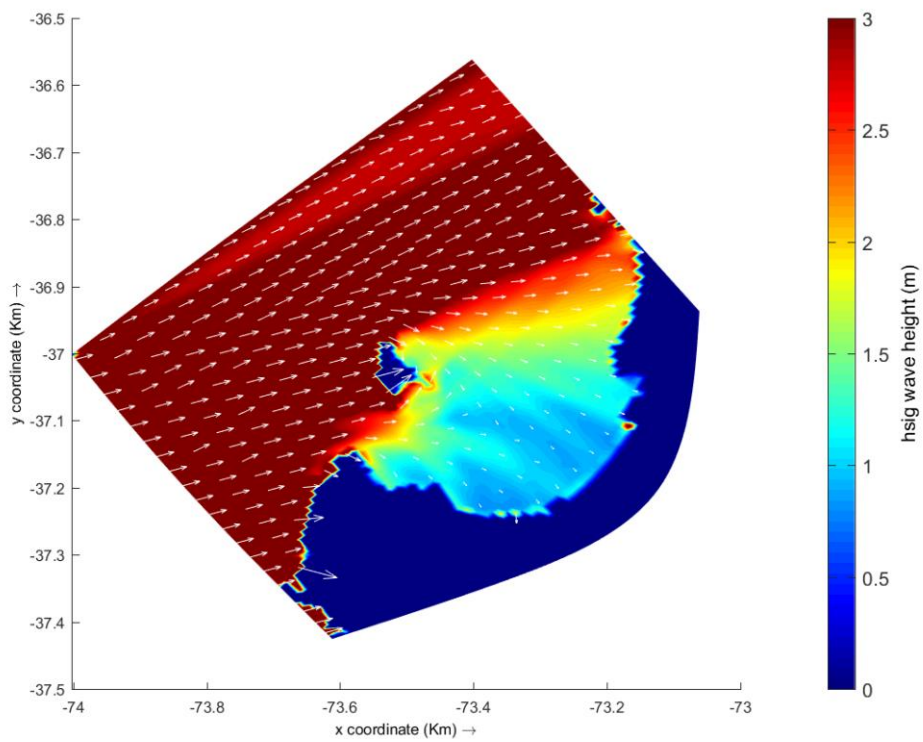
Julio oeste swell.



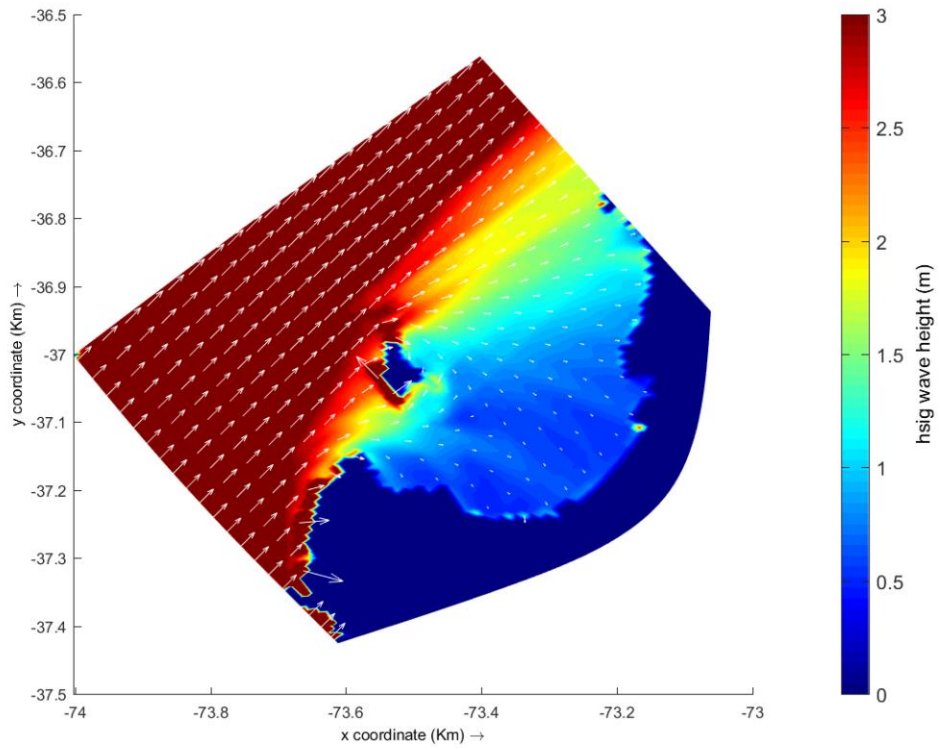
Julio suroeste swell.



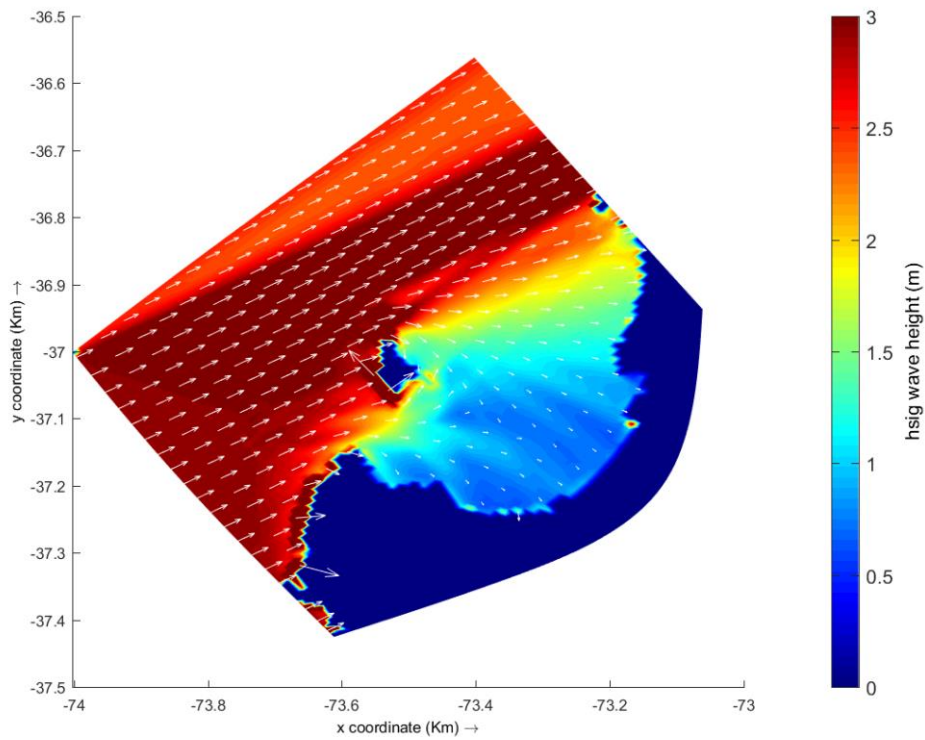
Agosto oeste swell.



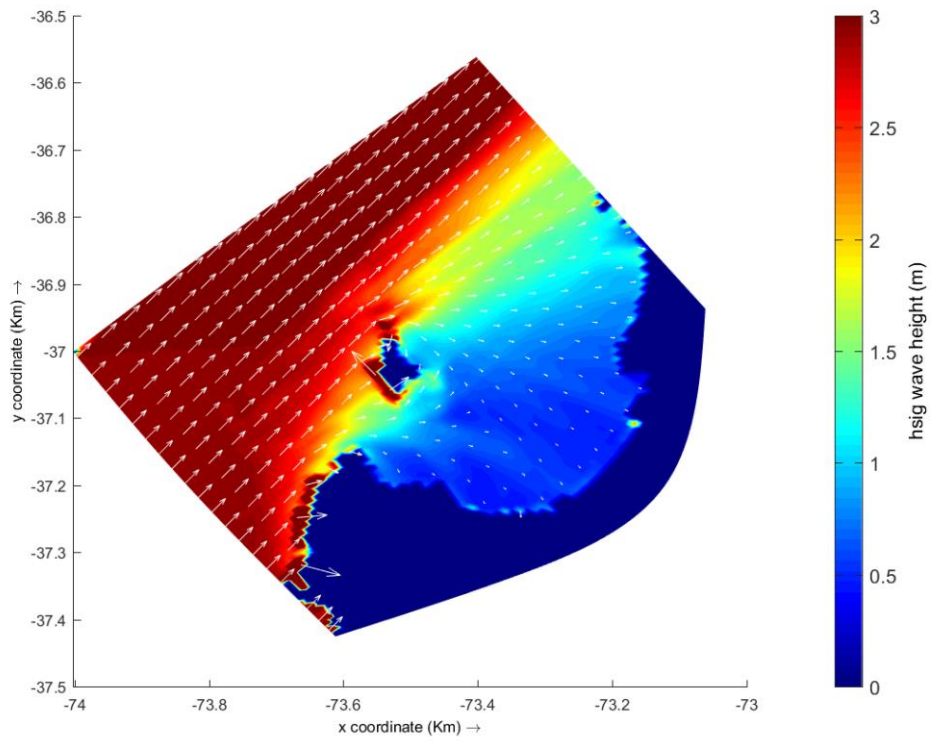
Agosto suroeste swell.



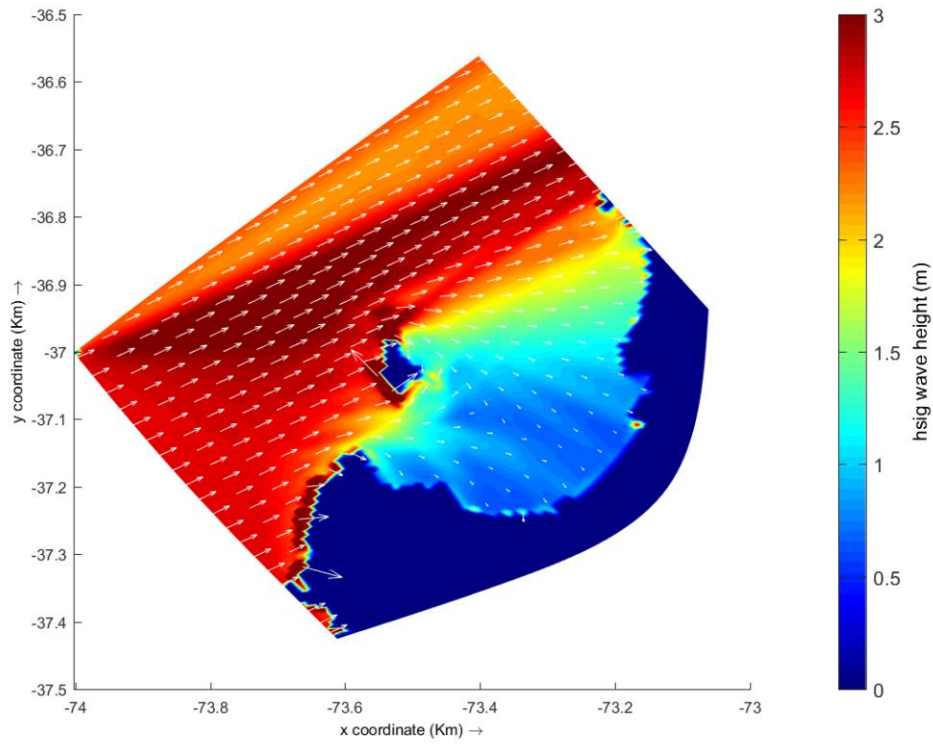
Septiembre oeste swell.



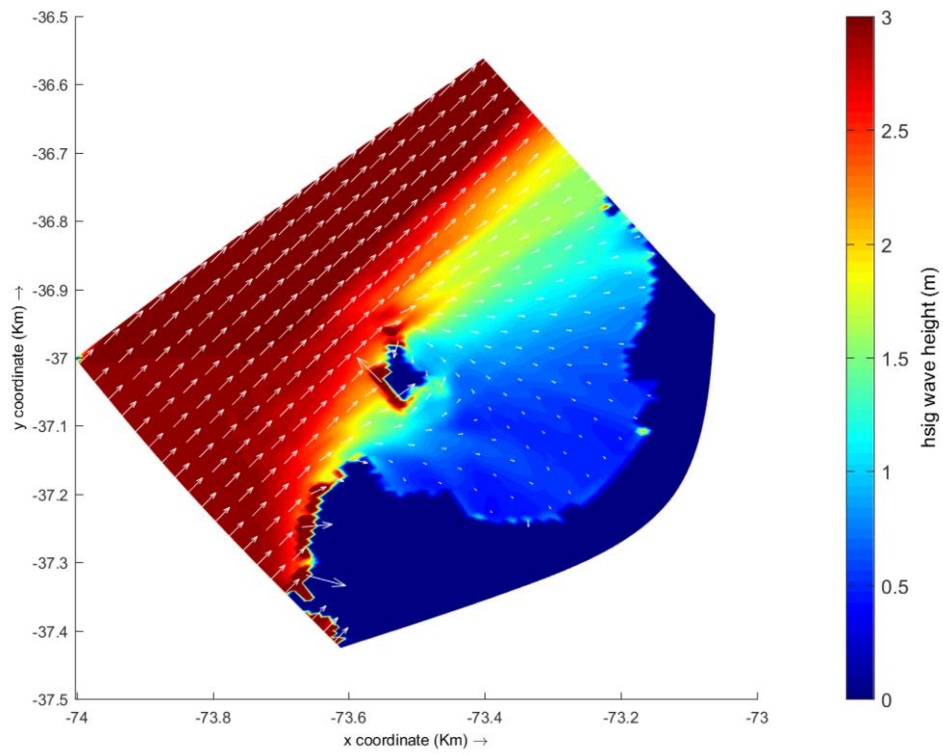
Septiembre suroeste swell.



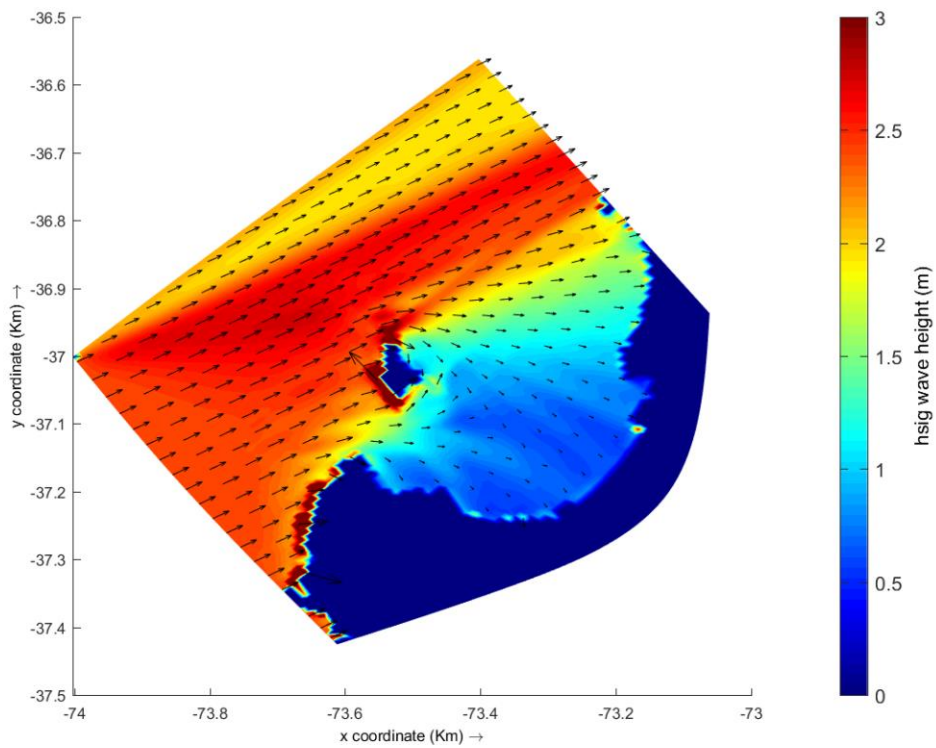
Octubre oeste swell.



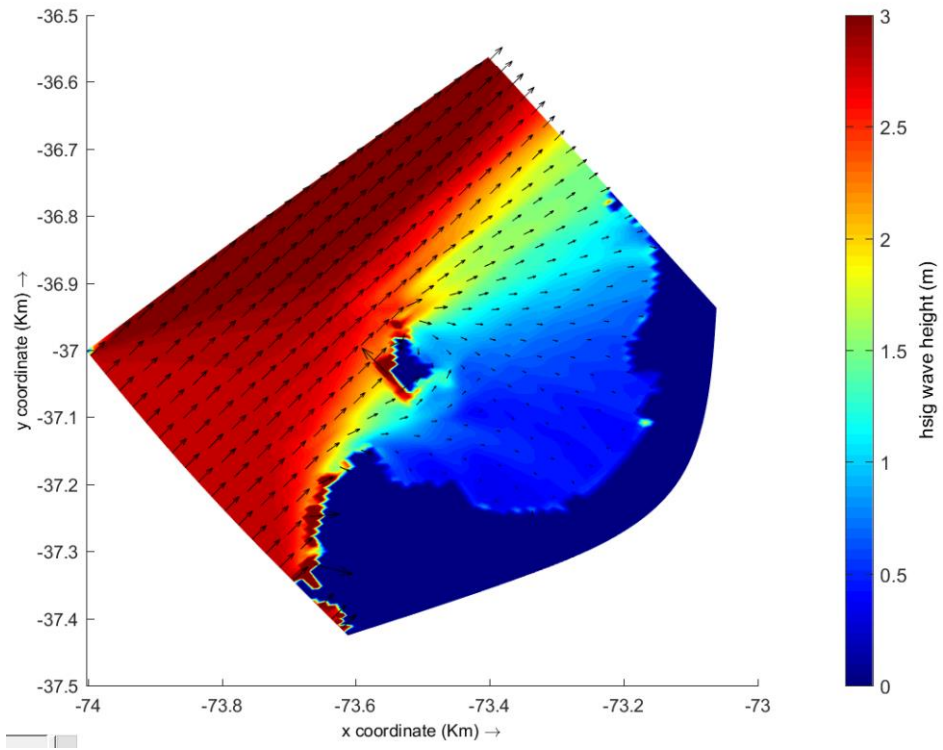
Octubre suroeste swell.



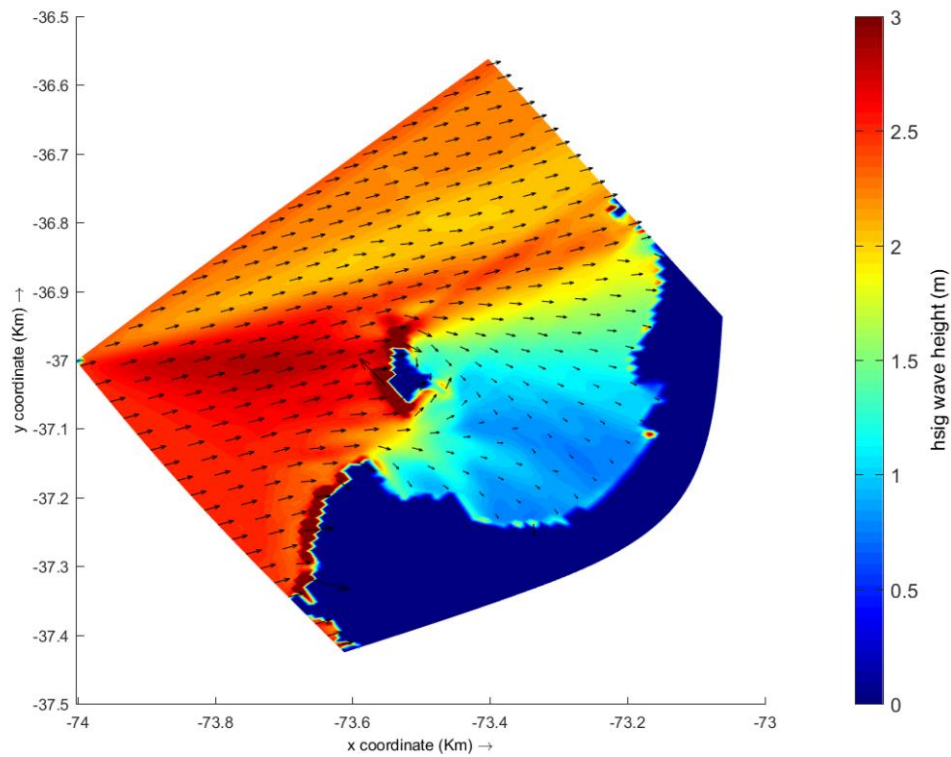
Noviembre oeste swell.



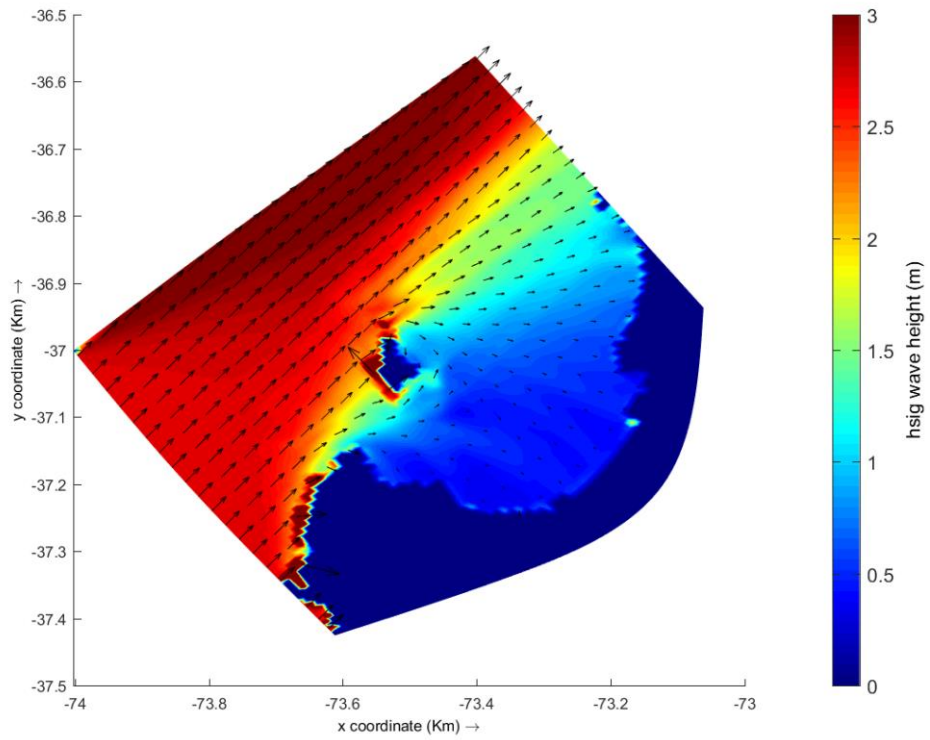
Noviembre suroeste swell.



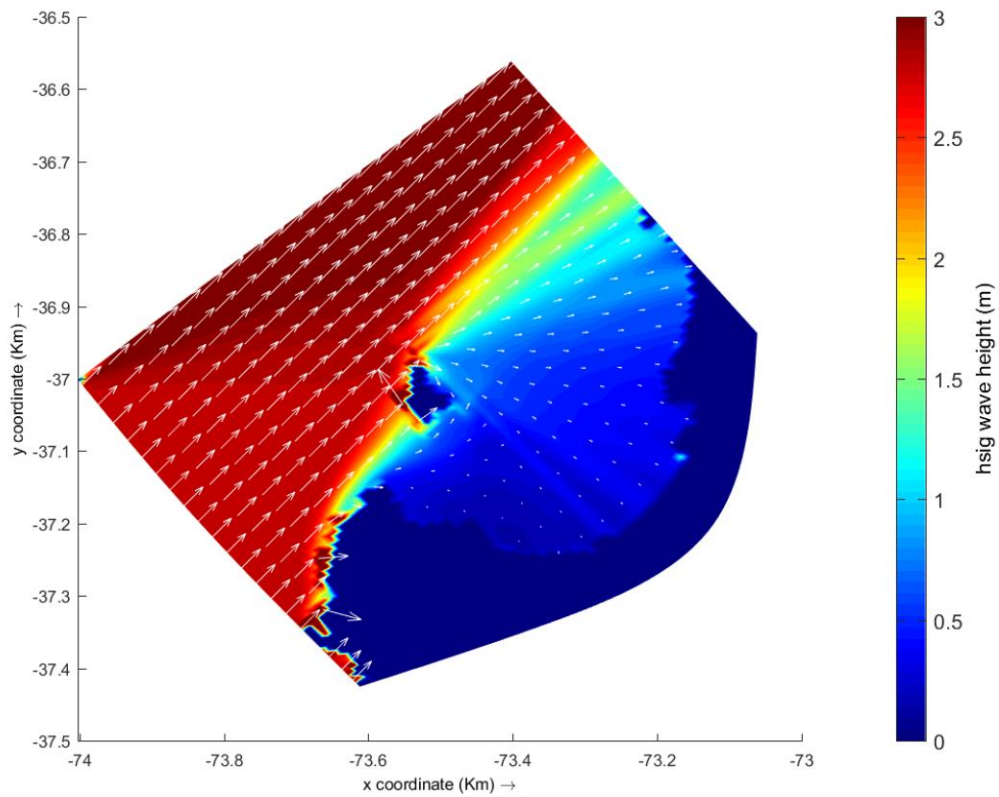
Diciembre oeste swell.



Diciembre suroeste swell.



Diciembre suroeste seas.



7.6. Discusiones

ENERO CON VIENTO (40 KM/H, 225°)															
	Enero, Suroeste, Seas				Enero, Suroeste, Swell				Enero, Oeste, Seas				Enero, Oeste, Swell		
Playa	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)		Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)		Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)		Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)
Lavapíe	0.1	3.5	304.0		0.6	12.1	345.0		0.6	2.7	296.2		1.4	15.6	344.8
Llico	0.1	3.5	358.2		0.3	12.1	348.4		0.3	2.7	312.8		1.0	15.6	343.0
Tubul	0.1	3.5	312.9		0.5	12.1	309.9		0.6	2.7	297.1		1.5	15.6	310.2
Arauco	0.2	3.5	294.0		0.4	12.1	314.3		0.8	2.7	290.7		0.9	15.6	319.5
Chivilingo	0.1	3.5	273.1		0.5	12.1	289.6		0.7	2.7	276.6		1.0	15.6	293.4
Coronel	0.1	3.5	273.6		0.5	12.1	286.3		1.0	2.7	272.8		1.3	15.6	292.3
Escuadron	0.6	3.5	269.0		0.9	12.1	280.0		1.5	2.7	271.4		2.1	15.6	289.9
ENERO SIN VIENTO															
Lavapíe	0.1	3.5	302.6		0.6	12.1	345.7		0.6	2.7	295.9		1.4	15.6	344.8
Llico	0.1	3.5	360.0		0.3	12.1	352.4		0.3	2.7	319.4		1.1	15.6	343.9
Tubul	0.1	3.5	317.0		0.5	12.1	313.6		0.6	2.7	298.9		1.5	15.6	311.1
Arauco	0.2	3.5	293.8		0.4	12.1	314.9		0.7	2.7	291.7		1.0	15.6	319.8
Chivilingo	0.1	3.5	275.8		0.5	12.1	289.7		0.7	2.7	282.4		1.0	15.6	293.5
Coronel	0.1	3.5	288.6		0.5	12.1	286.4		0.9	2.7	276.9		1.3	15.6	292.5
Escuadron	0.6	3.5	269.3		1.0	12.1	279.8		1.5	2.7	271.9		2.1	15.6	289.8