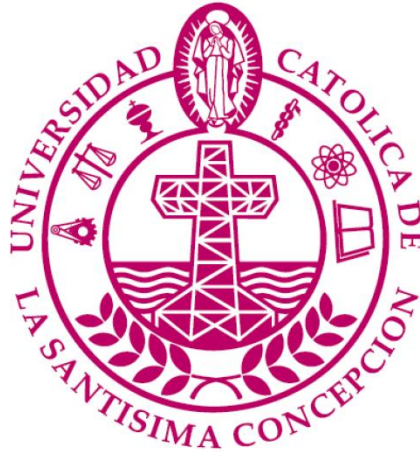


UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Civil



## **ESTIMACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN LA BARRA DEL RIO MATAQUITO**

**CESAR GABRIEL CERDA SANDOVAL.**

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

**Profesor Guía**

Mauricio Villagrán.

**Profesor Informante**

Rafael Aránguiz.

Concepción, Octubre 2016

## **Resumen:**

Los estuarios son sistemas costeros de gran importancia económica y social, están ligados con la propagación del oleaje. La morfología de la barra sedimentaria que suelen proteger a los estuarios, se mantiene en un equilibrio dinámico natural gracias a los procesos hidrodinámicos que ocurren en la costa y que están fuertemente condicionados por el oleaje. Por tanto, las intervenciones de origen natural (terremotos, tormentas, etc.) o humanas (espigones, retención de sedimentos, entre otras) alteran la sustentabilidad del sistema, generando un impacto ambiental. Por estos motivos, es importante estudiar los diferentes procesos que ocurren en estos ecosistemas, siendo uno de los más relevantes la dinámica litoral del sedimento.

Para estimar el comportamiento sedimentario en el litoral, es necesario realizar una propagación del oleaje que permita cuantificar la cantidad de energía que llega a la costa. Una herramienta conocida mundialmente para realizar esta propagación es el modelo matemático Delft 3D, que permite caracterizar los procesos hidrodinámicos costeros en forma precisa y con bajos costos computacionales.

La primera etapa de este trabajo es, caracterizar y clasificar los datos de oleaje, para identificar la barra en el lugar y el oleaje reinante. El estudio del oleaje consiste en realizar una estadística de los datos de aguas profundas, para obtener parámetros mensuales representativos, los cuales son de entrada para el modelo numérico. La etapa siguiente es calibrar y validar el modelo, formando y ajustando principalmente la grilla para la continua propagación del oleaje. Luego se identifica la zona de rompiente, para obtener los parámetros de salida del modelo e ingresar estos en las expresiones de transporte de sedimentos.

Los resultados obtenidos, muestran que el flujo neto de sedimentos en la costa, es cercano a un millón de metros cúbicos al año y sigue una orientación suroeste. El mayor transporte ocurre en julio y alcanza los 200 mil metros cúbicos. Adicionalmente se observan variaciones de transporte de sedimentos en el periodo estival inducidas por la aparición estacional de oleaje proveniente desde el Noreste.

## **Abstract**

Estuaries are coastal systems that are of great economic and social importance, linked to the wave propagation. The morphology of the sedimentary bar that usually protect estuaries, remains in a natural dynamic balance through hydrodynamic processes occurring on the coast and are strongly influenced by the wave. Therefore, interventions natural (earthquakes, storms, etc.) or human (breakwaters, sediment retention, among others) alter the sustainability of the system, causing an environmental impact. For these reasons, it is important to study different processes occurring in these ecosystems, being one of the most important coastal sediment dynamics.

To estimate the sedimentary behavior on the coast, it is necessary to perform a wave propagation to quantify the amount of energy reaching the coast. A tool known worldwide for this spread is the mathematical Delft 3D model to characterize coastal hydrodynamic processes accurately and with low computational costs.

The first stage of this work is to characterize and classify wave data to identify the bar in place and reigning wave. The wave study is to perform a statistical data deepwater monthly to obtain representative parameters, which are input to the numerical model. The next step is to calibrate and validate the model, forming and adjusting the grid mainly for continuous wave propagation. The breach zone is then identifies, for the output parameters of the model and enters these in expressions of sediment transport.

The results show that the net flow of sediment on the coast is close to one million cubic meters per year and follows a southwest orientation. The increased transport occurs in July and reaches 200 thousand cubic meters. Additionally sediment transport variations are observed in the summer period, induced by the seasonal appearance of waves coming from Northeast.

*A mi familia*

## **Agradecimientos:**

A mis amigos (Luis Zamora, Diego Espinoza, Evans Aravena, Marcelo Catril, Juan Borquez, Juan Olivera, Mauricio Acuña, José Arriagada y Heraldo Vallejos) que sin ellos, sería menos de lo que soy ahora.

Agradecer a los profesores (Solange Loyer, Claudio Oyarzo, Nelson Maureira, Diego Caamaño) que me ayudaron a pasar momentos difíciles que tuve en mis últimos años de carrera, y en especial a Mauricio Villagrán, que nunca se cansó de enseñarme bien.

A mis amigas que siempre me ayudaron con las asignaturas y situaciones difíciles de la vida, Karla Contreras, Karen Leal, Javiera Padilla, Nicole Sarmiento y en especial a Karen Salgado, que siempre me enseñó a ser más fuerte.

A mis hermanos Javier, Carolina y Rene Cerda Sandoval que me apoyaron a seguir hasta el final.

A Camila González Vivanco, que sin ella no habría podido encontrar la felicidad. Además de enseñarme a ser maduro y de siempre apoyarme en momentos difíciles.

A mi madre, María Eugenia Sandoval Guerrero, que siempre apoyo en todo, nunca dejándome caer.

Y a mi Padre, Rene Gabriel Cerda Arriagada, que nunca descansaste por compartir conmigo, que nunca descansaste por ayudarme, que nunca descansaste por hacerme feliz, que nunca descansaste de que estuviéramos juntos en familia. Gracias por todo lo que has hecho por mi tanto en esta vida como en la otra.

# Índice de contenidos

1.	Introducción.....	1
1.1	Motivación .....	2
1.2	Objetivos .....	2
1.2.1	Objetivo general .....	2
1.2.2	Objetivos específicos .....	2
2.	Marco teórico.....	3
2.1	Zona de estudio. ....	3
2.2	Procesos costeros.....	4
2.2.1	Generación del oleaje.....	4
2.2.2	Oleaje desde aguas profundas a aguas someras. ....	5
2.3	Modelación numérica. ....	8
2.3.1	Marco numérico de propagación de oleaje.....	8
2.3.2	Bases físicas del modelo SWAN. ....	8
2.3.3	Grilla computacional y condiciones de borde.....	12
2.4	Transporte de sedimentos. ....	13
2.4.1	Formulas del transporte de sedimentos. ....	14
	CERC.....	14
	Kamphuis. ....	16
3.	Caracterización del clima de oleaje .....	18
3.1	Datos de oleaje de reanálisis (Modelo WAVEWATCHIII) .....	18
3.2	Caracterización anual del oleaje. ....	19
3.3	Caracterización mensual del oleaje.....	24
4.	Modelo numérico.....	40
4.1	Descripción de la metodología a aplicar. ....	40
4.2	Batimetría. ....	40
4.3	Grillas.....	41
4.4	Parámetros. ....	43
4.5	Calibración y validación del modelo. ....	46
5.	Resultados. ....	53
5.1	Modelación desde aguas profundas hasta la zona de rompiente.....	53

5.2	Cálculo y resultados del transporte total de sedimentos.....	55
6.	Conclusiones. ....	62
7.	Bibliografías.....	63
8.	Anexos. ....	64
	Tablas de incidencia altura significativa (m). ....	64
	Tablas de incidencia periodo peak (s). ....	70
	Diagrama de caja del oleaje proveniente del Norte. ....	76
	Escenarios de modelación para cada mes. ....	77

## Índice de figuras

<b>Figura N°1:</b> Ubicación de la desembocadura del río Mataquito. ....	3
<b>Figura N°2:</b> Refracción de un frente de olas a la playa. Las líneas segmentadas representan las curvas de nivel (Campino, 2011). ....	6
<b>Figura N°3:</b> Asomeramiento de la ola (González – Rubiera, julio 2014) .....	7
<b>Figura N°4:</b> Movimiento de la partícula al llegar a la costa (SHOA). ....	7
<b>Figura N°5:</b> Propagación de energía sobre una celda de grilla en las posiciones horizontales x e y. ....	9
<b>Figura N°6:</b> Volumen de control en el transporte de sedimentos en la costa debido al rompimiento de la ola (J. Campino, 2011). ....	13
<b>Figura N°7:</b> Flujo de sedimentos con respecto a la dirección de la ola (D. Fitzrald, 1996). .....	14
<b>Figura N°8:</b> Correlación del flujo de energía por unidad de largo de la playa (PI) y la tasa de transporte dinámica total (II) (Komar y Inman, 1970). ....	16
<b>Figura N°9:</b> Regiones del Modelo global (NOAA Wavewatch III) .....	18
<b>Figura N°10:</b> Grados con respecto a cada dirección del oleaje.....	19
<b>Figura N°11:</b> Grafico polar para la altura significativa y periodo peak. Estos datos están en función de la dirección de procedencia. ....	20
<b>Figura N°12:</b> Rosa de oleaje de todos los datos para la altura significativa. ....	22
<b>Figura N°13:</b> Rosa de oleaje de todos los datos para el periodo peak. ....	22
<b>Figura N°14:</b> Rosas de oleaje de altura significativa para todos los meses. ....	27
<b>Figura N°15:</b> Rosas de oleaje de periodo peak para todos los meses. ....	28
<b>Figura N°16:</b> Altura significativa (Hs) vs Tiempo peak (Tp) de cada mes. Constituye los datos del sur de Enero a Junio. ....	29

<b>Figura N°17:</b> Altura significativa (Hs) vs Tiempo peak (Tp) de cada mes. Constituye los datos del sur de Julio a Diciembre.....	30
<b>Figura N°18:</b> Diagrama de caja desde el sur al oeste, indicando la altura significativa. ....	32
<b>Figura N°19:</b> Diagrama de caja de altura significativa para el tipo de oleaje Seas. (Procedente de los 180° a 270°) .....	33
<b>Figura N°20:</b> Diagrama de caja de altura significativa para tipo de oleaje Swell. (Procedente de los 180° a 270°) .....	34
<b>Figura N°21:</b> Diagrama de caja desde el sur al oeste, indicando el periodo peak. (Procedente de los 180° a 270°) .....	34
<b>Figura N°22:</b> Diagrama de caja de periodo peak tipo de oleaje seas. (Procedente de los 180° a 270°) .....	35
<b>Figura N°23:</b> Diagrama de caja de periodo peak tipo de oleaje swell. (Procedente de los 180° a 270°).....	36
<b>Figura N°24:</b> Diagrama de caja desde el sur al oeste, indicando la dirección del oleaje. (Procedente de los 180° a 270°) .....	36
<b>Figura N°25:</b> Diagrama de caja dirección. Tipo de oleaje seas. (Procedente de los 180° a 270°) .....	37
<b>Figura N°26:</b> Diagrama de caja dirección. Tipo de oleaje swell. (Procedente de los 180° a 270°) .....	38
<b>Figura N°27:</b> Batimetría tomada de la zona estudio. La figura A muestra toda la batimetría de la zona de estudio y la figura B representa la batimetría tomada de forma manual (estación total). .....	41
<b>Figura N°28:</b> Superposición de grillas para el análisis de propagación de oleaje. ....	42
<b>Figura N°29:</b> Superposición de malla fina con boya ADCP.....	42
<b>Figura N°30:</b> grilla (rojo) con condiciones de borde (línea azul), se considera en todo el contorno de la costa debido a que también hay entrada de mar en ella.....	44

<b>Figura N°31:</b> Altura de la ola y sentido de la propagación de oleaje. En la figura A se muestra la propagación de oleaje del Noroeste, en la B se ubica el oleaje sur seas y en C se ubica el sur swell. ....	45
<b>Figura N°32:</b> Relación de alturas significativas del día 8 de diciembre de 2012. ....	48
<b>Figura N°33:</b> Comparación entre el espectro medido en la boya ADCP y el generado por el programa SWAN. Datos tomados y creados para las 06:00 hrs.....	50
<b>Figura N°34:</b> Comparación entre el espectro medido en la boya ADCP y el generado por el programa SWAN. Datos tomados y creados para las 12:00 hrs.....	50
<b>Figura N°35:</b> Resultados del espectro bidimensional del Modelo SWAN. ....	51
<b>Figura N°36:</b> Espectro bidimensional medido de la boya ADCP. ....	52
<b>Figura N°37:</b> Boyas ubicadas en la zona de rompiente. Se considera un ancho de 200 m y largo de 2000 metros. ....	53
<b>Figura N°38:</b> Transporte de sedimentos proveniente del sur y norte con la ecuación de CERC por cada mes.....	57
<b>Figura N°39:</b> Transporte de sedimentos proveniente del sur y norte con la ecuación de Kamphuis por cada mes.....	58
<b>Figura N°40:</b> A) Transporte de sedimentos con la ecuación de Kamphuis, B) Transporte de sedimentos con la ecuación de CERC. ....	59
<b>Figura N°41:</b> Transporte de sedimento neto para todo el año. Gráfico creado utilizando la ecuación de CERC.....	60
<b>Figura N°42:</b> Transporte de sedimento neto para todo el año. Gráfico creado utilizando la ecuación de Kamphuis.....	60

## Índice de Tablas

<b>Tabla N°1.</b> Distribución porcentual del oleaje según dirección de procedencia. ....	21
<b>Tabla N°2.</b> Tabla de incidencia de altura significativa (m) de todos los datos de oleaje. ...	21
<b>Tabla N°3.</b> Tabla de incidencia del periodo peak (segundos) de todos los datos de oleaje.	21
<b>Tabla N°4.</b> Tabla de incidencia de altura del oleaje en aguas profundas para el mes de enero. A(%) Porcentaje de ocurrencia por cada clase. ....	24
<b>Tabla N°5.</b> Tabla de incidencia del periodo peak en aguas profundas para el mes de enero. A(%) Porcentaje de ocurrencia por cada clase. ....	24
<b>Tabla N°6:</b> Probabilidad de ocurrencia en las 4 direcciones más predominantes. ....	25
<b>Tabla N°7:</b> Probabilidad de ocurrencia en las alturas de olas más predominantes. ....	25
<b>Tabla N°8:</b> Probabilidad de ocurrencia en el periodo de las olas más predominantes. ....	25
<b>Tabla N°9:</b> Número de datos para cada mes y tipo de oleaje. ....	31
<b>Tabla N°10:</b> Probabilidad de ocurrencia para cada tipo de oleaje en cada mes. ....	31
<b>Tabla N°11:</b> Cuadro de resumen para los escenarios de modelación. ....	39
<b>Tabla N°12:</b> Error porcentual de los parámetros sin viento. ....	46
<b>Tabla N°13:</b> Error porcentual de los parámetros con viento. ....	47
<b>Tabla N°14:</b> Comparación de la altura significativa medidos de la ADCP y de los ingresados y generados por el modelo para el 8 de diciembre de 2012. ....	48
<b>Tabla N°15:</b> Comparación del periodo peak medidos del ADCP y de los ingresados y generados por el modelo para el 8 de diciembre de 2012. ....	49
<b>Tabla N°16:</b> Comparación de la direcciones medidas del ADCP y de los ingresados y generados por el modelo para el 8 de diciembre de 2012. ....	49
<b>Tabla N°17:</b> Parámetros de rompiente para cada tipo de oleaje en el mes. ....	54
<b>Tabla N°18:</b> Transporte de sedimentos calculado con la ecuación de CERC. ....	56

<b>Tabla N°19:</b> Transporte de sedimentos calculado con la ecuación de Kamphuis.....	56
<b>Tabla N°20:</b> Transporte de sedimento en el año para cada tipo de oleaje.....	61
<b>Tabla N°21:</b> Promedios anuales de cada parámetro según el tipo de oleaje. ....	61

## **1. Introducción**

El estuario de Mataquito está ubicado en la región del Maule, comuna de Licantén, en las coordenadas UTM (756960; 6123100) aproximadamente 40 kilómetros al noreste de Constitución. Morfológicamente este estuario consiste en una laguna costera activa de casi 2 kilómetros de largo, en que los procesos costeros e hidrológicos forman barras sedimentarias. El sector en estudio ha sido de gran interés debido a que en el terremoto y tsunami de 27 de Febrero del 2010 se destruyó la gran barra que protegía la laguna, generando importantes cambios morfológicos en la boca del estuario, después de un año de ocurrido el terremoto, la barra se regenero prácticamente en su totalidad, cambiando de posición la desembocadura a 4 kilómetros más al sur de la posición previa al tsunami. En el transcurso del tiempo, la boca ha ido migrando hacia el norte tendiendo hacia su posición original, manteniendo un equilibrio dinámico, sugiriendo que la dinámica litoral corresponde a un transporte sedimentario anual en la misma dirección de la migración.

Dado la importancia de este fenómeno, se plantea estudiar el flujo sedimentario generado por el oleaje que activa la migración de la boca del estuario, aplicando condiciones de aguas profundas en un modelo hidrodinámico SWAN, debidamente calibrado para estimar el transporte de sedimentos utilizando ecuaciones tradicionales.

Este documento presenta la morfodinámica de la barra del río Mataquito, a partir del estudio de la propagación del oleaje y la identificación de la zona de rompiente en la costa, necesario para cuantificar el transporte de sedimentos en el sector. El estudio utilizará para ello el modelo matemático de propagación de oleaje SWAN que esta implementado en el software Delft3D.

## **1.1 Motivación**

Los procesos morfológicos que se producen en la costa pueden depender de distintas condiciones, siendo la más importante el clima de oleaje en el lugar de estudio. Para caracterizar el oleaje del lugar, se deben modelar diferentes fenómenos físicos como refracción, reflexión y asomeramiento, que están condicionados por la batimetría del lugar. La sedimentación a lo largo de la costa está influenciada también por la topografía, propiedades del suelo y clasificación del estuario (M. Hume, 2007).

Cuantificar la tasa de transporte sedimentaria permite estudiar la evolución y los procesos morfodinámicos que ocurren en un sector costero e identificar problemas o cambios que alteran el equilibrio de las costas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Estimar la tasa neta y dirección del transporte litoral del sedimento, frente a la barra sedimentaria del río Mataquito en la región del Maule.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar el clima de oleaje reinante en el sector de estudio.
- Confeccionar, calibrar y validar un modelo de propagación de oleaje costero utilizando el software Delft3D.
- Cuantificar el transporte de sedimentos litoral frente a la barra del río Mataquito.

## 2. Marco teórico.

### 2.1 Zona de estudio.

El estudio se realiza en el estuario del río Mataquito, 40 kilómetros al norte de Constitución, comuna de Licantén, VII región del Maule, zona central de Chile. Esta zona está caracterizada por poseer un régimen de mareas del tipo micromareal, con climas de oleaje energéticos (altura de olas mayor a 2 metros) que provienen del Suroeste (J. Campino, 2010).

El estuario del Mataquito tiene una laguna costera de 2 kilómetros, que es protegida por una barra de sedimentos, creada por el sentido del oleaje. La laguna posee una mezcla de aguas dulces y saladas, que pueden tener diferentes proporciones, debido a periodos de tormentas y crecidas del río. El río tiene un caudal medio anual de 150 m<sup>3</sup>/s, en que puede llegar hasta 1600 m<sup>3</sup>/s durante los períodos de crecida (C. Rifo, 2015).

Los datos de oleaje se obtuvieron de una boya ubicada en las coordenadas UTM (755672 m E, 6126222 m N), a una distancia de 1.180 metros al oeste con respecto a la costa, y a 3 kilómetros al norte de la desembocadura (figura N°1). Para el estudio se registraron datos de aguas profundas con respecto a la altura significativa, periodo peak y dirección del oleaje en otra boya con coordenadas UTM (728154 m E, 6124100 m S), para realizar una estadística básica realizando rosa de los vientos, tabla de incidencia y diagrama de caja.



**Figura N°1:** Ubicación de la desembocadura del río Mataquito.

## **2.2 Procesos costeros.**

### **2.2.1 Generación del oleaje.**

Matemáticos y físicos han realizado métodos de cálculo de generación del oleaje. Uno de ellos es Navier Stokes que presentó una teoría para las olas de pequeña amplitud en aguas profundas (teoría de olas de Stokes). Después el físico Kelvin (1871) propuso el primer método de generación de oleaje llamado mecanismo de inestabilidad Kelvin – Helmholtz, que también se presenta en diferentes fluidos.

Jeffreys (1924, 1925) también presenta estudios de los fenómenos que ocurren en el oleaje, destacando el impulso del viento al tener una mayor velocidad que la ola. Basando un concepto simple de balance de energía en el oleaje, se estimó un coeficiente que puede ser usado para calcular el crecimiento de las olas debidas al viento (Sheltering).

Después se presentaron dos teorías básicas que permitieron explicar de mejor forma el crecimiento de las olas de viento; presentadas por Phillips y Miles en 1957. Phillips propuso que las fluctuaciones aleatorias de presión del viento sobre la superficie del agua, producían alteraciones sobre ella generando el oleaje. Miles retomando estudios pasados (Lock (1954) y Wuest (1949)) encontró la relación existente entre las fluctuaciones aleatorias de presión entre el aire y el agua. Luego explica la generación del oleaje siguiente manera

- Las fluctuaciones de presión, por efectos del viento turbulento, producen perturbaciones o pequeñas ondas.
- Cuando la amplitud es lo suficientemente grande, para perturbar las líneas de corriente de viento, puede producirse separación de crestas.
- El mecanismo de la ola se retroalimenta y la amplitud crece muy rápidamente dado que este entra en resonancia.

En síntesis, la generación del oleaje no depende solo de las condiciones en aguas profundas, sino que también depende generalmente de la velocidad del viento (v. locales) y la duración de la tormenta.

### 2.2.2 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:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (\text{ec.1})$$

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:

$$\frac{h}{L} > \frac{1}{2} \quad (\text{ec. 2})$$

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  $kh \rightarrow \infty$   $\tanh kh \rightarrow 1$ . La celeridad es proporcional al periodo de la onda

$$C = gT/2\pi \quad (\text{ec.3})$$

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

$$\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2} \quad (\text{ec. 4})$$

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

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20} \quad (\text{ec. 5})$$

En que la celeridad es proporcional a la profundidad

$$C = \sqrt{gh} \quad (\text{ec. 6})$$

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

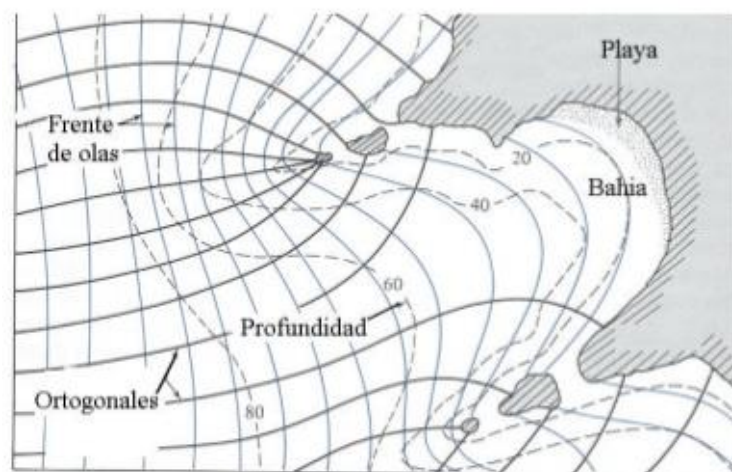
Luego, numerosos parámetros cambian cuando las olas se aproximan a la costa, entre ellas está la longitud de onda, ángulo de aproximación, etc. Se debe tener conciencia, de que las olas no transportan materia, solo mantienen el flujo de energía con un periodo constante.

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

**Refracción:** Proceso en el cual la ola cambia su sentido y velocidad debido a los cambios en la profundidad. Las olas tienden a disminuir su altura y la dirección cambia dependiendo de la morfología. 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

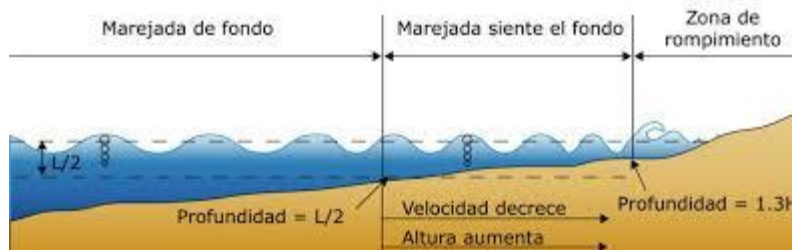
fondo, y el coeficiente de refracción  $K_r = \sqrt{\frac{\cos(\theta_0)}{\cos(\theta)}} \approx 1$  disminuye debido a que el ángulo de refracción es cada vez menor.

La siguiente imagen muestra la refracción de un grupo de olas dependiendo de la irregularidad del fondo y de la línea de costa.



**Figura N°2:** Refracción de un frente de olas a la playa. Las líneas segmentadas representan las curvas de nivel (Campino, 2011).

**Asomeramiento o Shoaling:** corresponde al aumento de la altura de la ola, a medida que disminuye la profundidad del mar. En aguas intermedias hay una leve disminución de la altura del grupo de olas, pero a medida que llega a aguas someras la altura crece drásticamente. Pero el flujo de energía se mantiene casi constante hasta la rompiente.



**Figura N°3:** Asomeramiento de la ola (González – Rubiera, julio 2014)

A medida que la ola llega a la costa, el movimiento orbital de las partículas, dentro de la onda va siendo más rápido, llegando al rompimiento de esta, como se muestra en la figura N°3.



**Figura N°4:** Movimiento de la partícula al llegar a la costa (SHOA).

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.

**Rompimiento de la ola:** 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):

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h} = 0.73 \quad (\text{ec. 7})$$

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 romperse (Dean y Dalrymple).

## **2.3 Modelación numérica.**

### **2.3.1 Marco numérico de propagación de oleaje.**

El modelo SWAN (Simulating WAve Nearshore) tiene como objetivo principal, simular la energía contenida de las olas (en una propagación del oleaje), contando con los diferentes procesos (asomeramiento, refracción y rompimiento) desde aguas profundas hasta zonas costeras. SWAN funciona discretizando el dominio espacial en mallas que pueden anidarse, en que los datos de oleaje se prescriben en una o varias aristas de malla de mayor superficie.

### **2.3.2 Bases físicas del modelo SWAN.**

Delft3D wave 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:

$$\frac{dE(f,\theta;x,y,t)}{dt} = S(f,\theta;x,y,t) \quad (\text{ec. 9})$$

Donde los términos del lado izquierdo indican los cambios de la energía espectral ( $E$ ),  $f$  es la frecuencia,  $\theta$  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 las 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:

cambios de energía en la celda=importación neta de energía

$$+ \text{generación local de energía.} \quad (\text{ec. 10})$$

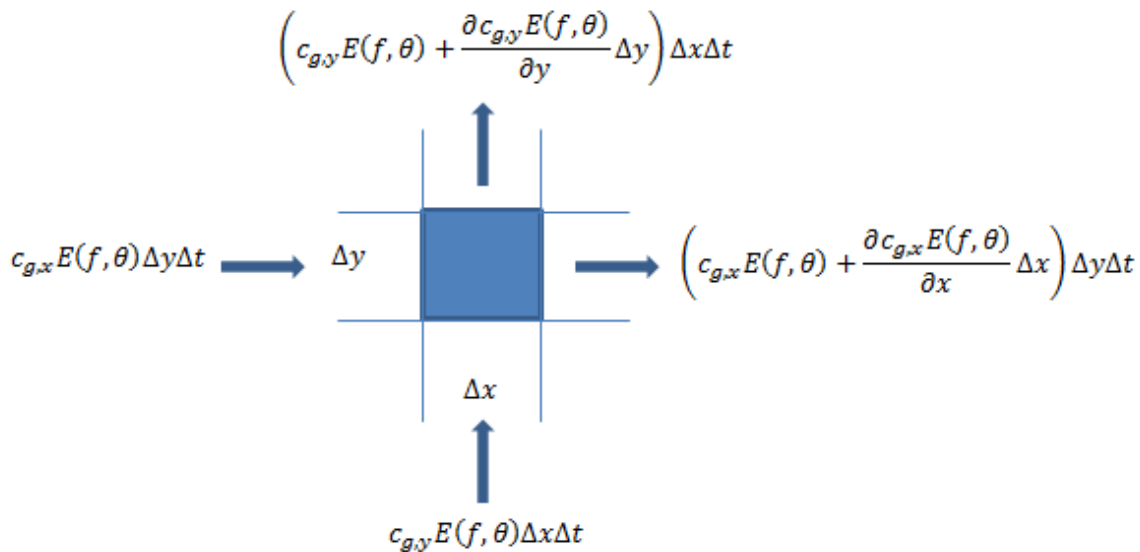
Esta expresión, se relaciona tanto para el tiempo como para las posiciones horizontales. En los cambios de energía, se formula como

$$\begin{aligned} \text{cambios de energía en la celda} &= \left( E(f,\theta)\Delta x\Delta y + \frac{\partial E(f,\theta)}{\partial t} \Delta x\Delta y\Delta t \right) - E(f,\theta)\Delta x\Delta y \\ &= \frac{\partial E(f,\theta)}{\partial t} \Delta x\Delta y\Delta t \quad (\text{ec. 11}) \end{aligned}$$

Donde  $\Delta x$ : intervalo con respecto al eje x,  $\Delta y$ : intervalo con respecto al eje y,  $\Delta t$ : intervalo con respecto al tiempo.

La ecuación n°10 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°5:** Propagación de energía sobre una celda de grilla en las posiciones horizontales x e y.

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

$$\begin{aligned} \text{importación neta de energía (x)} &= c_{g,x}E(f,\theta)\Delta y\Delta t - \left( c_{g,x}E(f,\theta) + \frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta)}{\partial x}\Delta x \right)\Delta y\Delta t \\ &= -\frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta)}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta t \quad (\text{ec. 12}) \end{aligned}$$

Igual para “y”

$$\text{importación neta de energía (y)} = -\frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta)}{\partial y}\Delta x\Delta y\Delta t \quad (\text{ec. 13})$$

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°9, es la generación local de energía, que durante un intervalo de tiempo, se expresa como:

$$\text{generación de energía local} = S(f,\theta)\Delta x\Delta y\Delta t \quad (\text{ec. 14})$$

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  $\Delta t$  es

$$\frac{\partial E(f,\theta)}{\partial t}\Delta x\Delta y\Delta t = -\frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta)}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta t - \frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta)}{\partial y}\Delta x\Delta y\Delta t + S(f,\theta)\Delta x\Delta y\Delta t \quad (\text{ec. 15})$$

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.

$$\frac{dE(f,\theta;x,y,t)}{dt} + \frac{\partial c_{g,x}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}E(f,\theta;x,y,t)}{\partial y} = S(f,\theta;x,y,t) \quad (\text{ec. 16})$$

La ecuación 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 en 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.
- La complejidad 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 deben distribuir la energía de cada celda. Para ello, se debe considerar en la ecuación de balance, los cambios distribución de energía direccional ( $\Delta\theta$ ). Por lo que la importación neta de energía queda como

$$\begin{aligned} \text{importación neta de energía} &= c_0 E(f, \theta) \Delta x \Delta y \Delta t - \left( c_0 E(f, \theta) + \frac{\partial c_0 E(f, \theta)}{\partial \theta} \Delta \theta \right) \Delta x \Delta y \Delta t \\ &= - \frac{\partial c_0 E(f, \theta)}{\partial \theta} \Delta \theta \Delta x \Delta y \Delta t \quad (\text{ec. 17}) \end{aligned}$$

Donde  $c_0$  es la velocidad de refracción o difracción

Considerando este resultado en el balance de energía para aguas profundas (ec. 16), y dividiendo todos los términos en  $\Delta\theta\Delta x\Delta y\Delta t$ , se obtiene

$$\frac{dE(f, \theta; x, y, t)}{dt} + \frac{\partial c_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial c_0 E(f, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} = S(f, \theta; x, y, t) \quad (\text{ec. 18})$$

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 cambio de frecuencia 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 ( $\sigma$ ).

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (\text{ec. 19})$$

La razón de este cambio, (en contraste con la energía de la ola) es que la acción de la ola 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

$$\frac{dN(\sigma,\theta;x,y,t)}{dt} + \frac{\partial c_{g,x}N(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}N(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta}E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma}E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma,\theta;x,y,t)}{\sigma} \quad (\text{ec. 20})$$

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

### 2.3.3 Grilla computacional y condiciones de borde.

La grilla computacional opera con 4 dimensiones, dos de ellas son las orientaciones x e y,  $\theta$  para las coordenadas esféricas y  $\sigma$  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 geográfica en un paso de tiempo. Esto implica que

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{c_{g,x}} \quad \text{y} \quad \Delta t < \frac{\Delta y}{c_{g,y}} \quad (\text{ec. 21})$$

Dónde:  $\Delta x$  y  $\Delta y$  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 menor a 1.

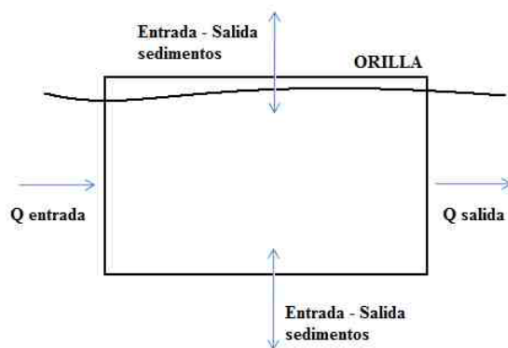
## 2.4 Transporte de sedimentos.

El transporte de sedimentos se genera gracias al oleaje, que cada ola transporta pequeñas cantidades de sedimento (arena) perpendicular a la playa (crossshore) y paralelo de ella (longshore). El oleaje no llega del todo perpendicular a la playa, se acerca a la costa con un ángulo de aproximación modificado por los veriles.

El transporte perpendicular a la costa puede tener grandes diferencias dependiendo de la estación del año. Entre otoño e invierno el oleaje es más brusco y puede transportar grandes cantidades de sedimentos formando barras mar adentro, dejando pobre al centro de la playa. En verano, el oleaje cambia de sentido estabilizando la playa, pero es menos energético, entonces se espera que esta se engrose y suavice su pendiente.

El transporte longitudinal de sedimentos (longshore) tiene una gran importancia en torno al ángulo de aproximación y energía del oleaje, ya que condiciona si el transporte de sedimentos es en un sentido o bidireccional. La acción turbulenta de las olas mueve las arenas y las deposita a lo largo de la costa.

En teoría, a lo largo de la costa, se considera un volumen de control con un caudal de sedimentos en la entrada y salida como se muestra en la siguiente diagrama:



**Figura N°6:** Volumen de control en el en el transporte de sedimentos en la costa debido al rompimiento de la ola (J. Campino, 2011).

El diagrama mostrado, explica el transporte de sedimentos paralelo a la costa, en que el rompimiento de la ola y la succión del agua provocan la erosión y deposición de sedimentos.

Estas barras pueden crecer o decrecer de diferente forma, dependiendo de la dirección del oleaje y corrientes de la deriva litoral.



**Figura N°7:** Flujo de sedimentos con respecto a la dirección de la ola (D. Fitzrald, 1996).

En la figura anterior, se puede observar que el transporte depende tanto de la dirección como la cantidad energética del oleaje. La figura 7-A se muestra una mayor cantidad de energía produciendo barras a lo largo de la costa. En cambio la figura 7-B muestra un oleaje tranquilo en que las arenas solamente se depositan tanto en la costa como en la entrada del río. En tormentas, el transporte de sedimentos puede cambiar la ubicación de la boca del río, alterando a la vez la altura y fondo del ella (D. Fitzrald, 1996).

#### 2.4.1 Formulas del transporte de sedimentos.

##### CERC.

Esta fórmula es atribuida al CERC (Coastal Engineering Research Center) para el transporte de sedimentos. Esta ecuación se basa en la relación del transporte de sedimento a lo largo de la costa y el contenido energético del oleaje.

$$Q_1 = k \frac{P_1}{16(\rho_s - \rho)(1-p)} \quad (\text{ec. 22})$$

$$P_1 = E_{fb} \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad (\text{ec. 23})$$

$$E_{fb} = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 c_{gb} \quad (\text{ec. 24})$$

Dónde:

k: Parámetro adimensional.

$\alpha_b$ : Angulo de aproximación de la ola ( $^\circ$ )

$c_{gb}$ : Celeridad grupal de la ola (m/s)

$H_b$ : Altura de rompimiento de la ola (m)

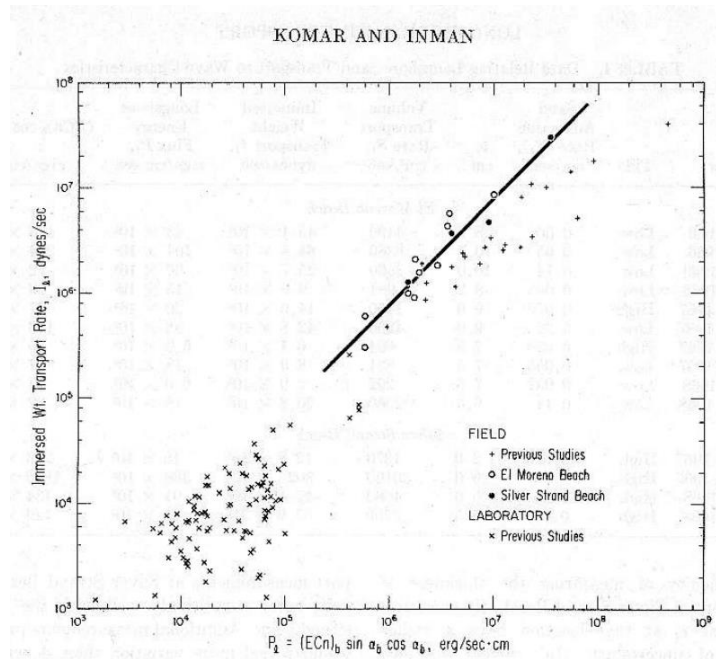
p: Porosidad. Este valor se considera entre los rangos de 0.3 a 0.4 debido a que es difícil obtener información en terreno.

$\rho_s$ : Densidad del sedimento. Comúnmente es igual a 2650 kg/m<sup>3</sup>

Tener en cuenta que estas expresiones se ajustan a los datos de rompimiento de la ola, por tanto sobreestima las condiciones de terreno (pendiente del fondo, suelos cohesivos o fangos, y diámetro de la partícula) y los periodos de oleaje.

El parámetro k es un coeficiente de proporcionalidad adimensional que es determinado por diferentes autores. En el Shore Protection Manual (1984) se propone un valor de 0.39 basado en cálculos donde se utiliza la altura significativa. También se determinó k por la altura media del rompimiento de la ola, dando un valor cercano a 0.92.

Posteriormente, Komar & Inman (1970) propusieron un valor de  $k=0.77$  para su utilización con la altura de ola en rotura  $H_b$ . Este valor es usado en cálculos de tasas de transporte costero. La figura N°8 muestra el gráfico de correlación entre el flujo de energía por unidad de largo de la playa ( $P_l$ ) y la tasa de transporte dinámica total ( $I_l$ ), donde se ajusta la constante k a una función lineal.



**Figura N°8:** Correlación del flujo de energía por unidad de largo de la playa ( $P_1$ ) y la tasa de transporte dinámica total ( $I_1$ ) (Komar y Inman, 1970).

Komar (1988) propuso que este coeficiente no depende del tamaño del grano debido a que no hubo ninguna dependencia del tamaño).

### **Kamphuis.**

Kamphuis (1991) realizó un experimento a escala pequeña en que propagaba olas hacia la orilla, midiendo la altura de las olas, los ángulos de aproximación, velocidades, las tasas de transporte de sedimentos (tanto en el fondo como la de suspensión) y las distribuciones de perfiles de playa. Con los datos, Kamphuis realizó un análisis adimensional considerando los siguientes parámetros.

$$Q_s = f(H, T, h, \rho, \mu, g, x, y, z, t, \rho_s, D) \quad (\text{ec.25})$$

Dónde:

$Q_s$ : Tasa de transporte de sedimento.

H: Altura de la ola

T: Periodo

h: Profundidad

$\rho$ : Densidad del agua.

$\rho_s$ : Densidad del sedimento  
 $\mu$ : Viscosidad dinámica del agua  
 $x, y, z$ : Direcciones  
 $t$ : Tiempo  
 $D$ : Diámetro del sedimento

Considerando en el análisis dimensional, que el transporte de sedimentos está expresado en kg/s, se puede reducir la ecuación asumiendo que los parámetros  $H = H_b$ ,  $T = T_p$  y que las direcciones  $x$  e  $y$  representan el ángulo de aproximación. Por tanto la ecuación adimensional puede quedar expresada como:

$$\frac{Q_s}{\rho_s H_{s,b}^3 / T_p} = \phi \left( \frac{H_{s,b}}{h_b}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{H_{s,b} \sqrt{g H_{s,b}}}{\mu / \rho}, \frac{H_{s,b}}{L_{o,p}}, m_b, \alpha_b, \frac{z}{H_{s,b}}, \frac{t}{T_p}, \frac{H_{s,b}}{D_{50}} \right) \quad (\text{ec.26})$$

La ecuación n°26 muestra que la tasa de transporte adimensional es función del índice de rotura ( $H_{s,b}/h_b$ ), de la densidad relativa del sedimento ( $\rho_s/\rho$ ), del número de Reynolds de la ola en rotura ( $H_{s,b} \sqrt{g H_{s,b}} / \mu / \rho$ ), del peralte de la ola ( $H_{s,b}/L_{o,p}$ ), de la pendiente de la playa ( $m_b$ ), del ángulo del aproximación del oleaje ( $\alpha_b$ ), de la profundidad en términos de altura de la ola ( $z/H_{s,b}$ ), del tiempo ( $t/T_p$ ) y de la relación entre altura de ola y diámetro de grano del sedimento ( $H_{s,b}/D_{50}$ ).

Ciertas relaciones de la ecuación se pueden suprimir, como la dependencia del número de Reynolds debido a que rotura de la ola es turbulenta y las relaciones  $\frac{\rho_s}{\rho}$ ,  $\frac{z}{H_{s,b}}$  y  $\frac{t}{T_p}$  son irrelevantes. Por tanto la ecuación queda expresada como:

$$Q_i = \frac{1.3 \cdot 10^{-3} \rho H_b^3}{(1-p) \rho_s T} \left( \frac{H_b}{L_o} \right)^{-1.25} \tan^{0.75}(\alpha) \left( \frac{H_b}{D_{50}} \right)^{0.25} \text{sen}^{0.62} \phi_b \quad (\text{ec. 27})$$

Esta expresión considera las condiciones de terreno sin haber una batimetría complicada, considerando un  $D_{50}$  cercano al de la arena. Además utiliza variables de aguas profundas. Pero no considera las corrientes y mareas que impiden o potencian el transporte de sedimentos hacia la costa.

Tener en cuenta que estas expresiones no considera el caso de una tormenta donde pueden cambiar significativamente las variables de la zona costera.

### 3. Caracterización del clima de oleaje

#### 3.1 Datos de oleaje de reanálisis (Modelo WAVEWATCHIII)

Los datos de oleaje fueron extraídos de una base de datos del proyecto WAVEWATCH III de la NOAA, que 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.

Las variables que se pronostican con el modelo son espectrales. Estos datos están disponibles en la red donde la posición de la boya es UTM (728154 m E, 6124100 m S).

El modelo consiste en mallas globales anidadas como se muestra en la figura N°9, En estas superficies, se analiza el comportamiento del oleaje producido por los vientos globales.

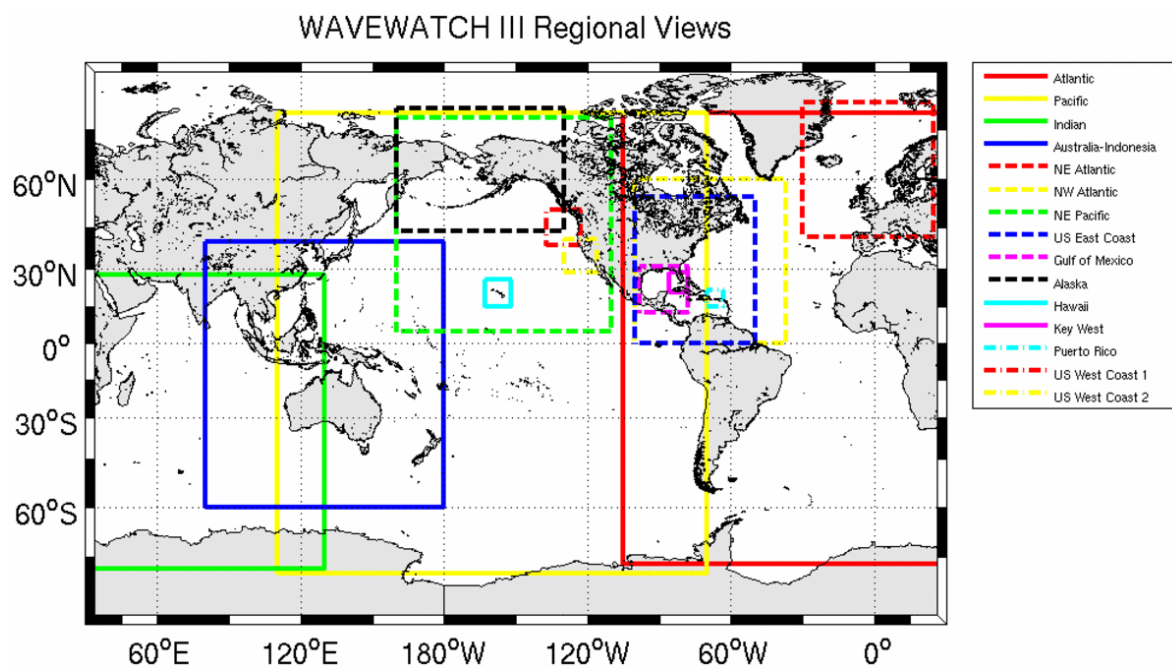


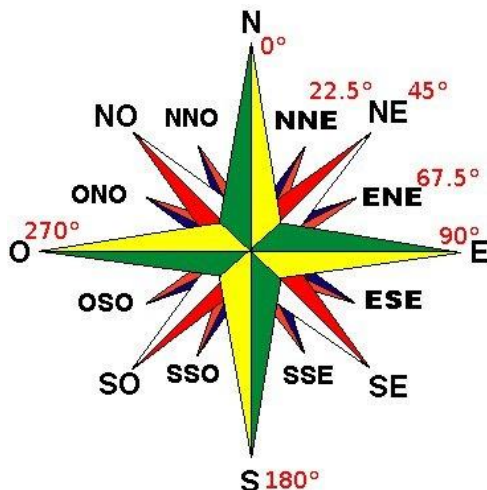
Figura N°9: Regiones del Modelo global (NOAA Wavewatch III)

### 3.2 Caracterización anual del oleaje.

A continuación se describe el análisis y caracterización del oleaje en aguas profundas para encontrar la altura significativa ( $H_s$ ), periodo peak ( $T_p$ ) y dirección del oleaje ( $^\circ$ ) promedio, representativo en el año. El análisis se realizó a una base de datos de oleajes tomados durante 16 años desde 1997 hasta el 2012 cada 3 horas, analizando 40842 datos.

Más adelante se realiza la caracterización mensual del oleaje, para poder identificar de mejor forma el oleaje a lo largo del año.

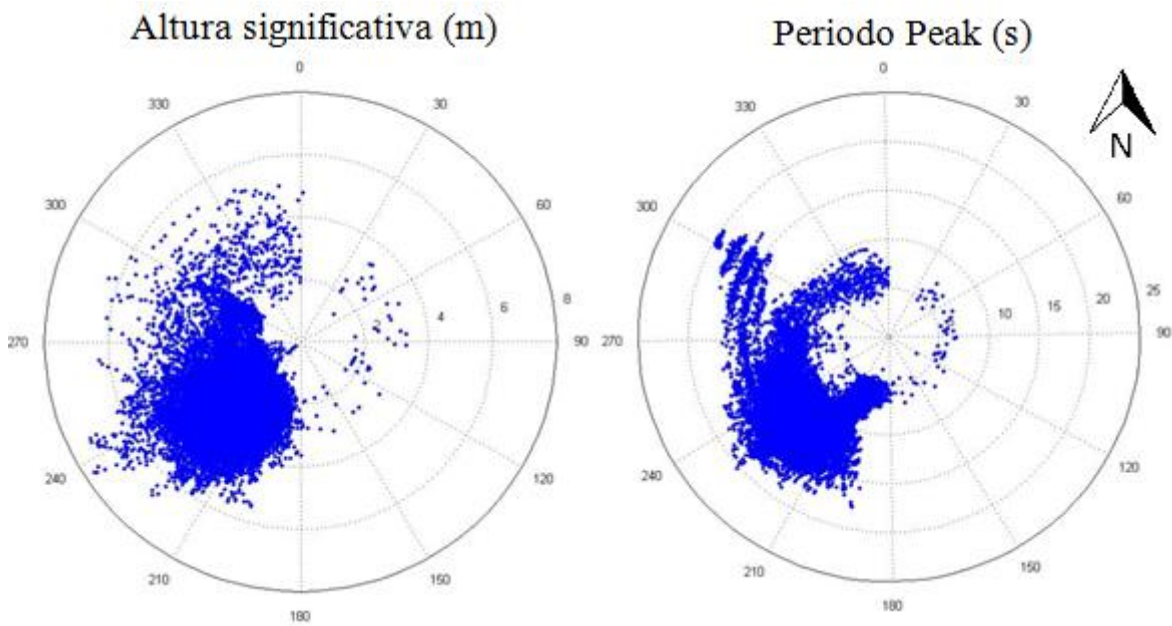
Se tomaron datos provenientes de una boya virtual con las coordenadas de proyección UTM (728154 m E, 6124100 m S). Como no se sabe la distribución de datos, se dividieron los cuadrantes en rangos de 22.5 grados para apreciar de mejor forma el oleaje, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura N°10:** Grados con respecto a cada dirección del oleaje

Así se define cual es la dirección predominante, la altura significativa y el periodo peak del oleaje.

La figura N°11 muestra los gráficos polares para la altura significativa y tiempo peak de oleaje indicando mayor escala de los datos cada vez más alejados del centro



**Figura N°11:** Grafico polar para la altura significativa y periodo peak. Estos datos están en función de la dirección de procedencia.

Las rosas muestran una gran concentración de eventos por el lado suroeste (tercer cuadrante), tanto para la altura significativa de la ola (2 a 6 metros) como para el periodo (5 a 18 segundos). Además de esto, se muestran diferentes tipos de oleaje, entre los 270° y 300°, que tienen rangos de periodos de 5 - 10 segundos (seas) y de 13 - 17 segundos (swell).

En el lado noroeste (cuarto cuadrante) se muestra un conjunto de datos que no se pueden despreciar, pero al tener una mayor dispersión que los datos del sur, mejor considerar todo el cuadrante norte como un conjunto, es decir, se debe caracterizar solo un clima de oleaje mensual en ese cuadrante.

Como la distribución de datos es dispersa entre los 180 a 360 grados, se realizaron tablas de incidencia para identificar las tendencias de los parámetros. La Tabla N°1, muestra en detalle las direcciones principales de ocurrencia, donde se observa que los oleajes entre el SSW y el WSW concentran el 93,85% del total.

**Tabla N°1.** Distribución porcentual del oleaje según dirección de procedencia.

Dirección		Probabilidad (%)
WSW	236.25°a 258.75°	19.47
SW	213.75°a 236.25°	58.61
SSW	191.25°a 213.75°	15.76
S	168.75°a 191.25°	2.39
NW	270°a 360°	5.63

Para de poder caracterizar de forma más clara el oleaje, las tablas N°2 y N°3 se muestra la incidencia de altura y periodo del oleaje por dirección para los 16 años en cuestión.

**Tabla N°2.** Tabla de incidencia de altura significativa (m) de todos los datos de oleaje.

DIRECCION	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	Total	A (%)
N	0	2	22	19	7	1	0	0	0	51	0.12
NNW	0	14	43	62	26	5	0	0	0	150	0.37
NW	0	22	68	85	33	5	0	0	0	213	0.52
WNW	0	215	475	141	63	14	3	0	0	911	2.23
W	3	197	462	212	84	16	4	0	0	978	2.39
WSW	11	1114	2737	1748	606	175	35	12	0	6438	15.7
SW	12	2311	10881	8209	2197	298	27	1	2	23938	58.61
SSW	0	710	3629	2956	598	62	0	0	0	7955	19.48
S	0	23	101	35	1	0	0	0	0	160	0.39
<b>Total</b>	26	4620	18446	13475	3615	576	69	13	2	40842	100.00
<b>A (%)</b>	0.06	11.31	45.16	32.99	8.85	1.41	0.17	0.03	0.00	100.00	

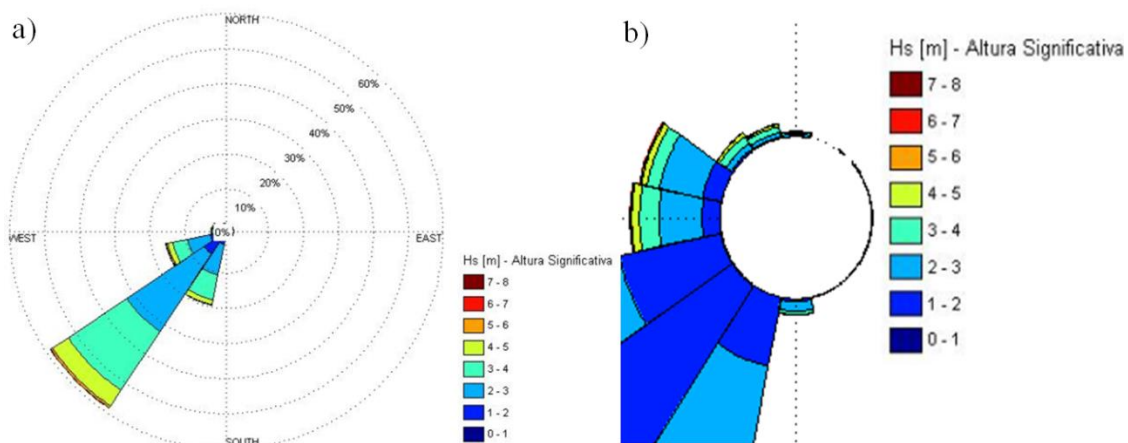
**Tabla N°3.** Tabla de incidencia del periodo peak (segundos) de todos los datos de oleaje.

DIRECCION	4 -- 6	6 -- 8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
N	19	30	2	0	0	0	0	0	51	0.12
NNW	43	83	23	0	0	0	0	0	150	0.37
NW	15	91	49	0	0	13	41	4	213	0.52
WNW	3	41	109	61	49	268	342	38	911	2.23
W	6	28	330	360	104	130	20	0	978	2.39
WSW	5	11	602	2695	2388	605	128	4	6438	15.76
SW	19	82	1290	8201	10855	2949	501	38	23938	58.61
SSW	438	2689	1200	1463	1645	468	50	0	7955	19.48
S	87	73	0	0	0	0	0	0	160	0.39
<b>Total</b>	667	3143	3605	12780	15041	4433	1082	84	40842	100.00
<b>A (%)</b>	1.63	7.70	8.83	31.29	36.83	10.85	2.65	0.21	100.000	

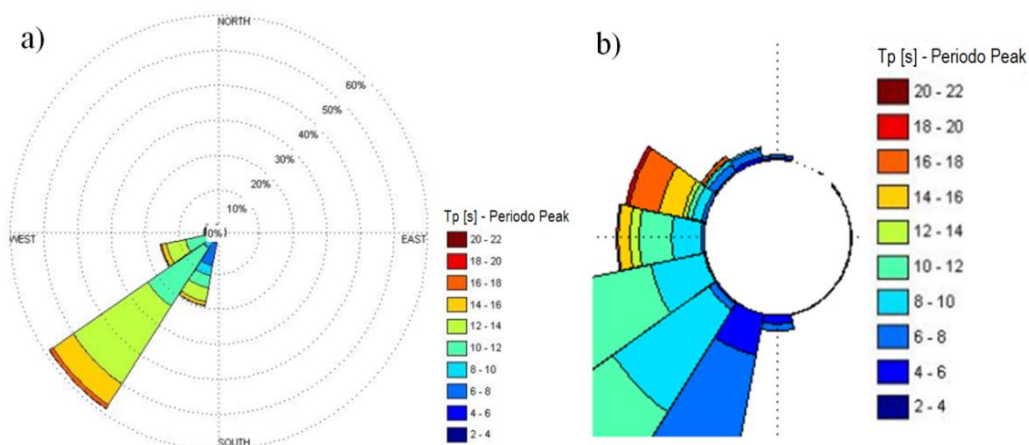
El oleaje tiene una altura significativa entre los 1 y 5 metros, concentrándose más entre los 2 a 4 metros (45 y 33%). Con respecto al periodo, los rangos son más variados, destacando periodos entre 10 a 14 segundos (31,29 y 36,83%)

También se muestra una gran cantidad de olas (2303 datos) del Oeste al Norte considerando alturas de hasta 5 a 6 metros con periodos de hasta 20 segundos, por tanto puede ser probable que estas olas sean provenientes de tormentas puntuales, que provienen de esa dirección y que tienen un gran contenido energético. Tener en cuenta que la cantidad de datos del oleaje provenientes del cuarto cuadrante, es pequeña con respecto a los el sur, por lo tanto se considera solo un tipo de oleaje general, con dirección hacia el noroeste.

Las siguientes figuras muestran la rosa de oleaje para altura significativa y periodo peak, que destacan de mejor forma la cantidad de datos en cada dirección.



**Figura N°12:** Rosa de oleaje de todos los datos para la altura significativa.



**Figura N°13:** Rosa de oleaje de todos los datos para el periodo peak.

Aquí se puede apreciar la distribución del oleaje según direcciones, observándose claramente que las alturas predominantes son de 2 a 4 metros, con un periodo de 10 a 14 segundos (imagen a). A mayor escala de las figuras (imagen b), se muestra la distribución de datos en el cuarto cuadrante, que tienen rangos similares de alturas significativas con respecto al tercer cuadrante. En el periodo, se muestran distintos rangos debido a la poca cantidad de datos.

Como la caracterización anual del oleaje muestra diferentes climas y parámetros (que es posible identificarlos pero no saber en qué tiempo ocurren), se realizó un estudio mensual, para ver como el oleaje se cambia con respecto al año.

### 3.3 Caracterización mensual del oleaje.

Para caracterizar el oleaje mensual, se realizaron tablas de incidencias y rosas de oleajes para cada mes con la misma cantidad de datos del estudio anual. La tabla N°4 y N°5 muestran las incidencias del mes de enero con las direcciones más predominantes. Los demás meses se pueden ver en el anexo.

**Tabla N°4.** Tabla de incidencia de altura del oleaje en aguas profundas para el mes de enero. A(%) Porcentaje de ocurrencia por cada clase.

DIRECCION	1-1.5	1.5-2	2- 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	Total	A (%)
WNW	2	73	82	73	23	7	1	0	261	8.02
W	0	10	20	6	1	0	0	0	37	1.14
WSW	11	37	76	33	14	4	0	0	175	5.38
SW	12	158	406	482	421	263	53	4	1799	55.30
SSW	5	51	123	218	316	176	59	17	965	29.66
S	0	1	1	10	0	0	0	0	12	0.37
<b>Total</b>	30	334	708	822	775	450	113	21	3253	100.00
A (%)	0.92	10.27	21.76	25.27	23.82	13.83	3.47	0.65	100.00	

**Tabla N°5.** Tabla de incidencia del periodo peak en aguas profundas para el mes de enero. A(%) Porcentaje de ocurrencia por cada clase.

DIRECCION	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	Total	A (%)
WNW	0	0	0	0	6	108	137	10	261	8.02
W	0	0	0	0	13	23	1	0	37	1.14
WSW	0	0	15	36	91	33	0	0	175	5.38
SW	5	23	207	872	627	60	5	0	1799	55.30
SSW	84	622	181	57	21	0	0	0	965	29.66
S	3	9	0	0	0	0	0	0	12	0.37
<b>Total</b>	92	654	403	965	758	228	143	10	3253	100.00
A (%)	2.83	20.10	12.39	29.66	23.30	7.01	4.40	0.31	100.00	

Con el fin de analizar cada mes, a continuación se muestran las siguientes tablas con las direcciones, alturas y periodos más predominantes de los 16 años.

**Tabla N°6:** Probabilidad de ocurrencia en las 4 direcciones más predominantes.

	A(%)											
Dirección	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
WSW	5.38	9.70	10.96	12.04	17.30	27.42	26.16	27.08	22.47	15.43	9.22	5.05
SW	55.30	53.56	68.67	63.92	61.19	51.51	52.32	47.33	55.19	69.36	63.66	60.59
SSW	29.66	27.50	14.02	22.35	11.56	13.81	12.91	17.27	17.75	13.17	24.81	30.46
N (270° a 360°)	8.14	6.58	3.95	0.86	3.67	3.65	2.18	2.55	1.78	0.69	0.80	3.18
<b>TOTAL</b>	98.48	97.34	97.60	99.17	93.72	96.39	93.57	94.23	97.19	98.65	98.49	99.28

**Tabla N°7:** Probabilidad de ocurrencia en las alturas de olas más predominantes.

	A(%)											
Altura ola (m)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1 a 2	11.19	12.16	12.68	11.95	11.68	6.55	12.65	11.39	11.97	9.55	13.28	10.73
2 a 3	47.03	56.30	46.90	44.55	42.31	37.14	34.71	38.84	44.13	43.20	51.19	56.68
3 a 4	37.66	27.73	34.85	32.69	35.26	32.22	35.40	32.87	31.36	36.35	29.97	29.26
4 a 5	4.12	3.75	5.01	9.48	8.52	19.09	13.86	13.02	10.73	9.50	5.37	3.33
>5	0.00	0.06	0.57	1.01	2.07	5.01	3.38	3.87	1.54	1.41	0.21	0.00
<b>TOTAL</b>	100	100	99.02	99.68	99.84	100	100	99.99	99.73	100	100	100

**Tabla N°8:** Probabilidad de ocurrencia en el periodo de las olas más predominantes.

	A(%)											
Periodo de la ola (segundos.)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
4 - 6	2.83	1.80	1.34	4.74	1.23	1.66	1.06	1.35	1.81	1.43	2.13	19.60
6 - 8	20.10	12.63	5.26	4.32	2.18	3.79	2.75	3.53	4.92	4.27	10.61	12.08
8 - 10	12.39	13.64	6.75	27.59	7.37	7.44	10.24	8.09	8.74	4.87	10.91	28.92
10 - 12	29.66	30.09	33.13	45.65	29.95	27.30	31.70	32.01	28.66	30.29	38.92	22.72
12 - 14	23.30	28.95	37.20	13.32	41.14	43.54	41.59	39.04	39.77	44.52	31.30	6.83
14 - 16	7.01	8.32	12.70	3.02	14.69	13.81	10.21	13.63	13.52	12.45	5.22	4.29
>16	4.71	4.57	3.57	0.71	3.38	2.46	2.43	2.35	2.55	2.15	0.92	2.82
<b>TOTAL</b>	100	98.20	99.95	99.35	99.94	100	99.98	100	99.97	99.98	100	97.26

En la tabla N°6 se puede notar que desde mayo hasta octubre hay un mayor porcentaje de olas que vienen del SW - WSW, y entre noviembre - abril la cantidad de olas predominan entre el SW - SSW.

Es notorio que el suroeste tiene una mayor probabilidad de ocurrencia, cambiando su magnitud a medida que transcurre el tiempo. Por tanto a comienzos del otoño el oleaje se concentra más en la dirección indicada.

Para el norte, es notorio que aumenta su probabilidad en meses del verano (enero y febrero), esto retarda el transporte de sedimentos proveniente del sur (mayor probabilidad de ocurrencia).

Se puede apreciar que en la tabla N°7 la ola aumenta su altura entre los meses de abril y septiembre, mientras que de noviembre a marzo la altura de la ola se predomina entre los 2 a 3 metros. Sin tener en cuenta el periodo peak, se puede decir que hay un mayor transporte de sedimentos en épocas de otoño e invierno en la dirección suroeste (tomando en cuenta los datos de la tabla N°6).

La tabla N°8 (periodo peak) muestra que desde noviembre a febrero el oleaje tiene un menor periodo y además sus datos son más dispersos en todos los rangos, en cambio desde marzo hasta octubre el oleaje tiene un mayor periodo y más concentrado (desde los 10 a los 16 segundos), dando una mayor predominancia en el rango de los 12 a 14 segundos.

Hay una menor probabilidad de ocurrencia con el oleaje bajo los 6 segundos en todos los meses, excepto en diciembre, cabe notar que el oleaje en este mes tiene una mayor distribución en comparación a la altura y a la dirección del oleaje.

Las siguientes figuras 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, la rosa mantiene la misma forma con respecto al año.

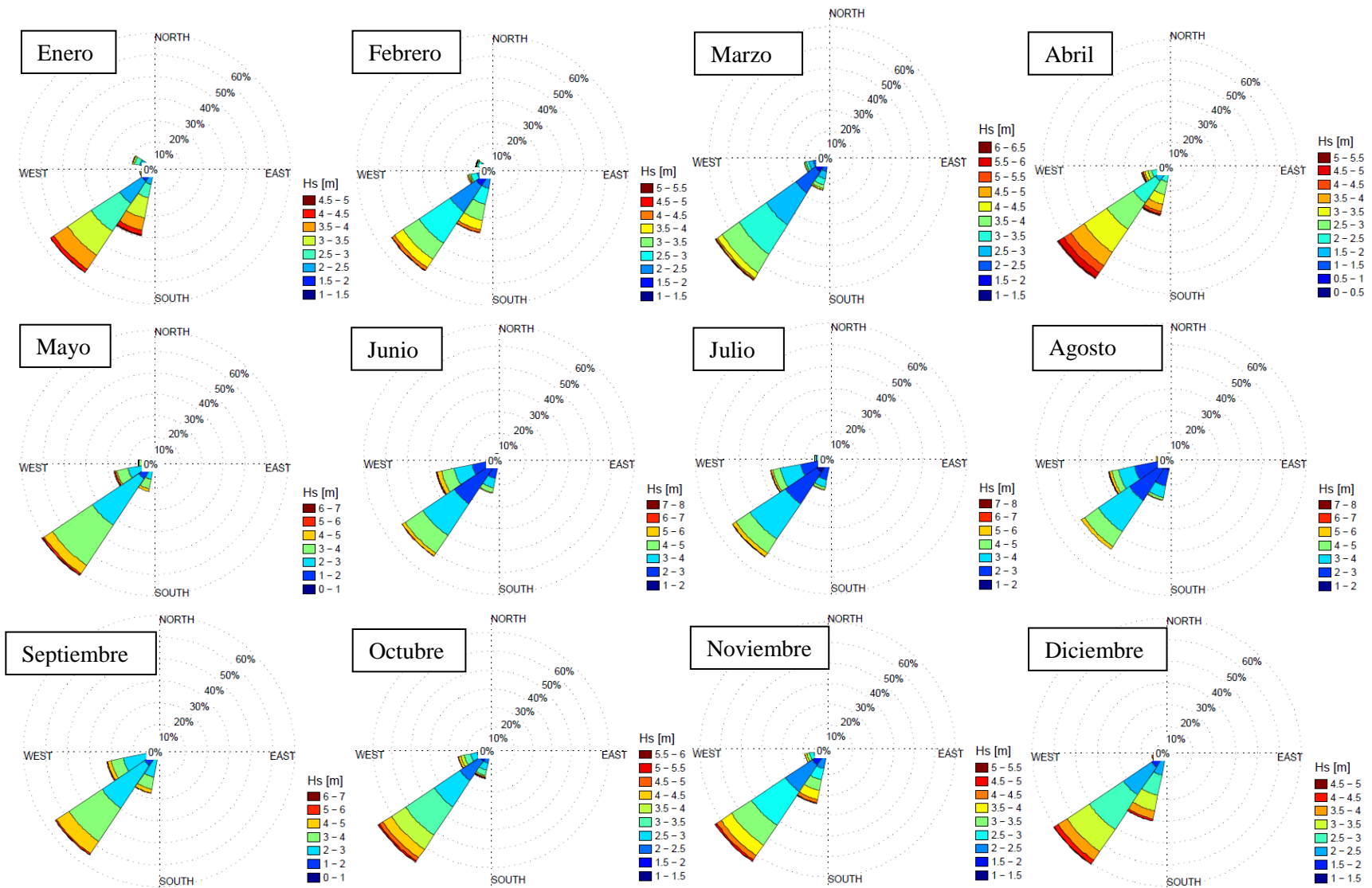


Figura N°14: Rosas de oleaje de altura significativa para todos los meses.

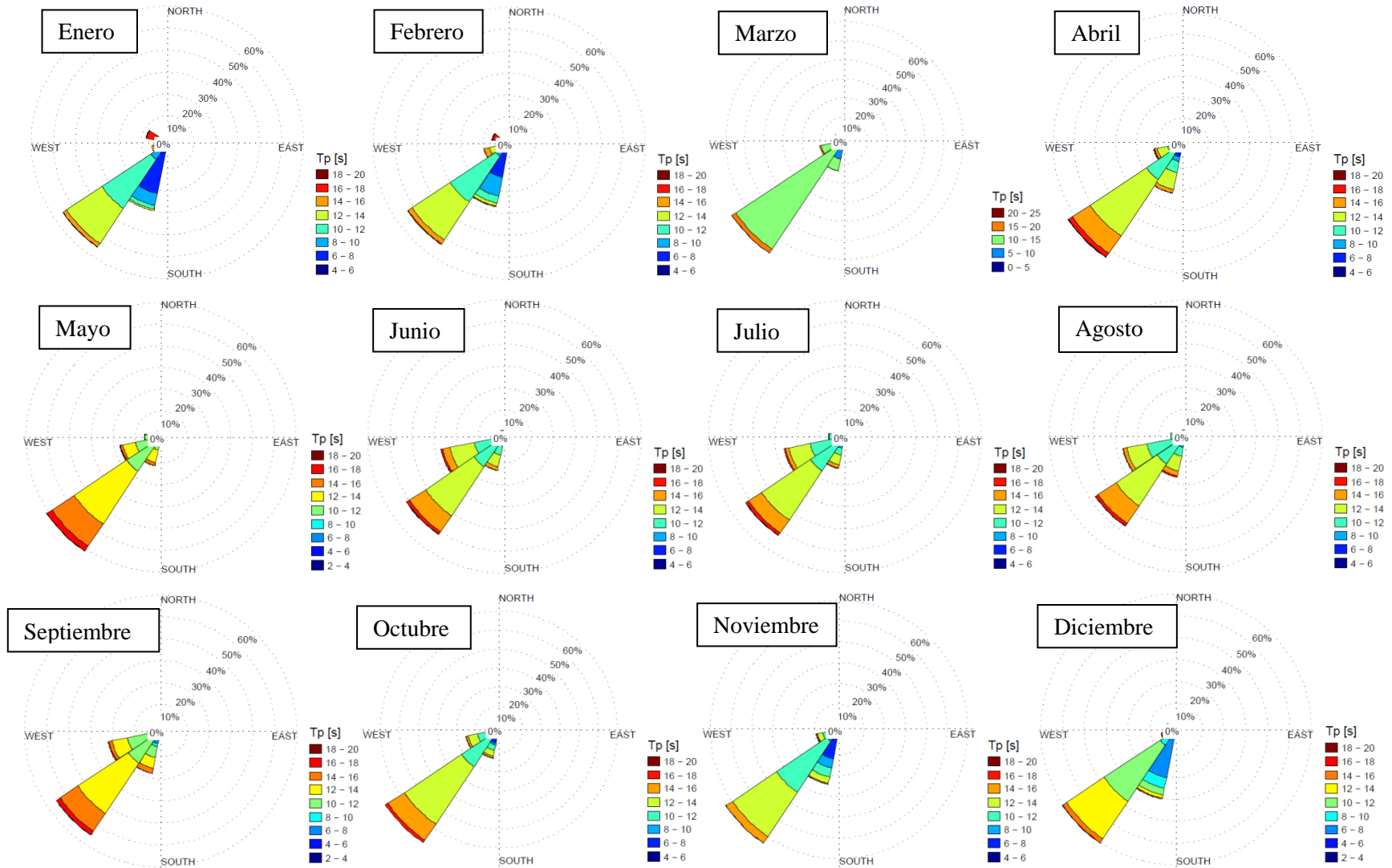
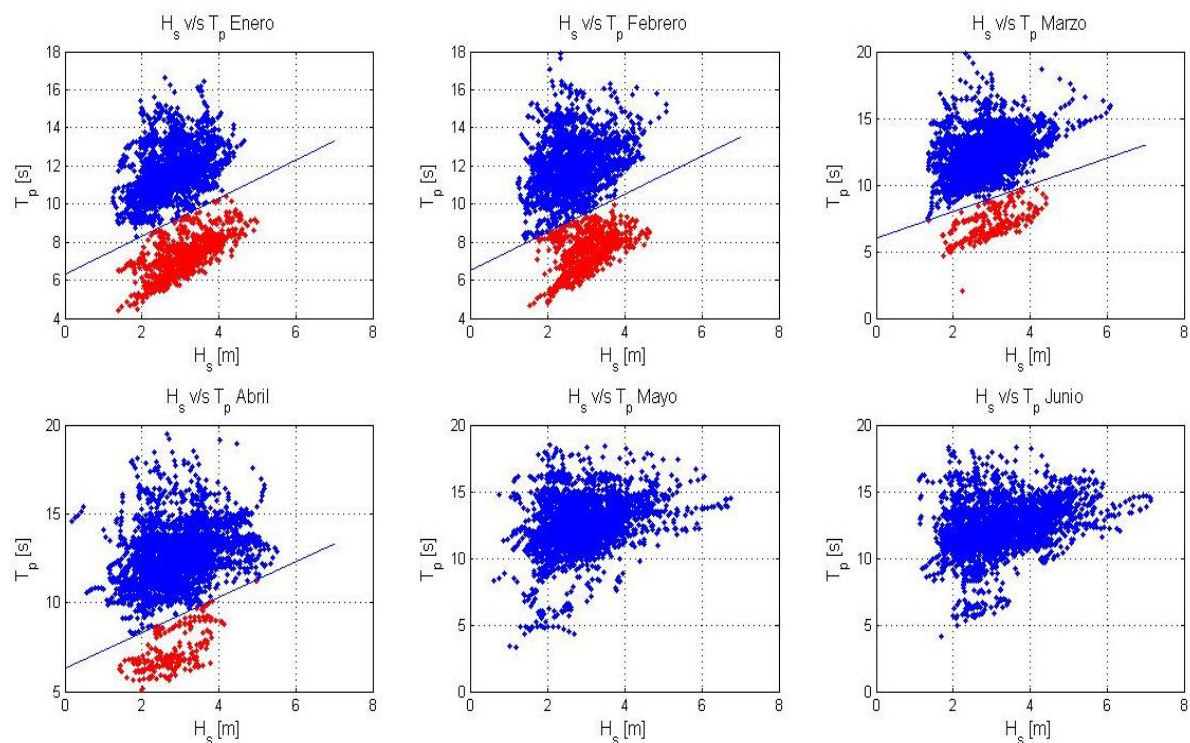


Figura N°15: Rosas de oleaje de periodo peak para todos los meses.

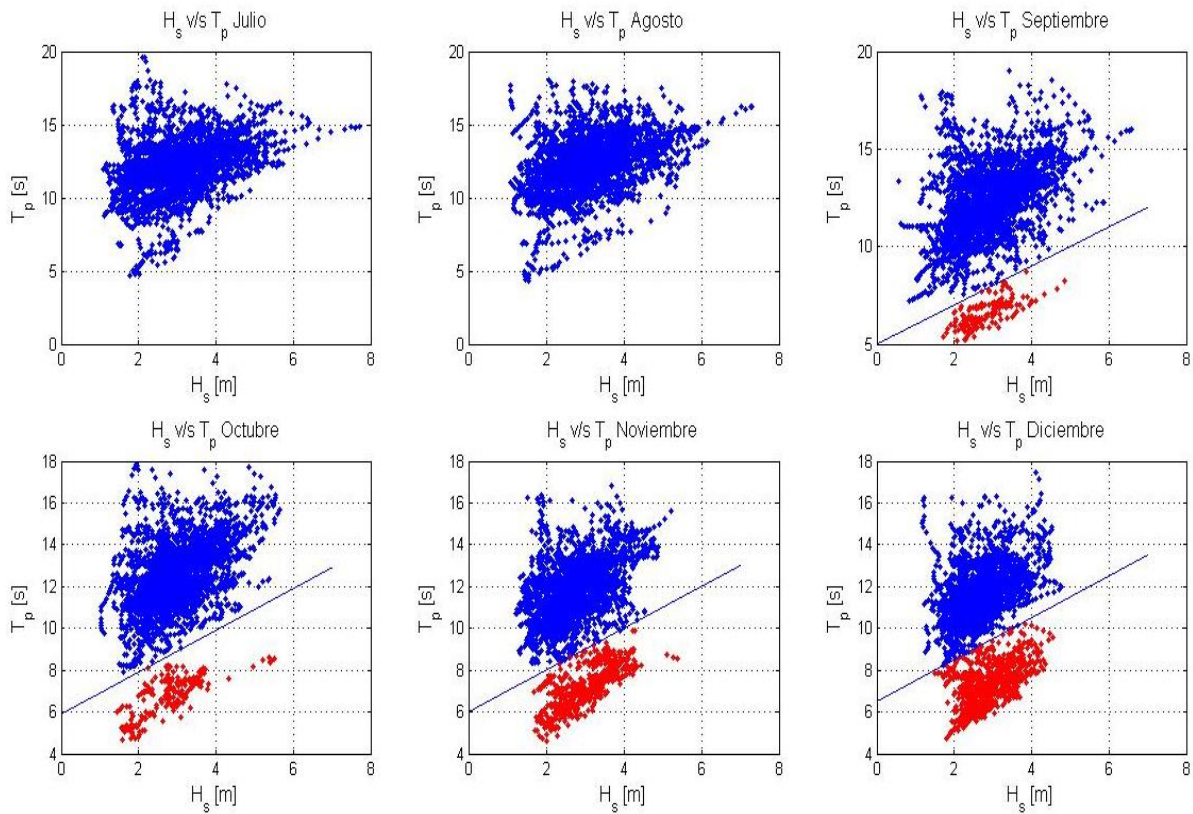
Con respecto a las figuras mostradas, cabe decir que el oleaje cambia su altura y periodo a lo largo del año, pero solo mantiene rangos de alturas predominantes entre 2 a 3 metros y periodos de 10 a 12 segundos.

En La figura N°15 se puede ver que aumenta la probabilidad, en el rango de periodo de 14 a 16 segundos, entre los meses desde abril a octubre; Además, las alturas se mantienen dentro de los intervalos de 2 a 4 metros. Por tanto, se puede decir que estos meses no cambia el tipo de oleaje.

Para observar las diferencias del tipo de oleaje de cada mes, las figuras N°16 y N°17 presentan la distribución de datos de altura significativa y periodo peak de los meses, apreciando la diferencias de una con respecto a otra. Tener en cuenta que el color azul representa el tipo de oleaje “swell” y el rojo representa el tipo de oleaje “seas”, estas son separadas además por una línea.



**Figura N°16:** Altura significativa ( $H_s$ ) vs Tiempo peak ( $T_p$ ) de cada mes. Constituye los datos del sur de Enero a Junio.



**Figura N°17:** Altura significativa ( $H_s$ ) vs Tiempo peak ( $T_p$ ) de cada mes. Constituye los datos del sur de Julio a Diciembre.

En los meses de Mayo hasta Agosto los datos se distribuyen en una nube de puntos que tiene un oleaje tipo swell predominante. Los otros meses tienen una diferencia significativa, más notoria desde Noviembre a Febrero.

En Diciembre y Enero la distribución de datos de cada tipo de oleaje cubre la misma área, dando la idea de que pueden tener la misma cantidad de datos. Las tablas N°9 y N°10 muestran la cantidad de datos para cada tipo de oleaje (seas y swell) y la probabilidad de ocurrencia en todos los meses, considerando también la distinción de los datos del norte con respecto al sur.

**Tabla N°9:** Número de datos para cada mes y tipo de oleaje.

Meses	SUR		NORTE	Total
	Seas	Swell		
<b>Enero</b>	930	2437	118	3485
<b>Febrero</b>	750	2181	243	3174
<b>Marzo</b>	268	3058	168	3494
<b>Abril</b>	247	3084	35	3366
<b>Mayo</b>	--	3246	240	3486
<b>Junio</b>	--	3192	171	3363
<b>Julio</b>	--	3299	183	3482
<b>Agosto</b>	--	3332	147	3479
<b>Septiembre</b>	251	3048	70	3369
<b>Octubre</b>	241	3211	33	3485
<b>Noviembre</b>	611	2723	40	3374
<b>Diciembre</b>	928	2436	121	3485

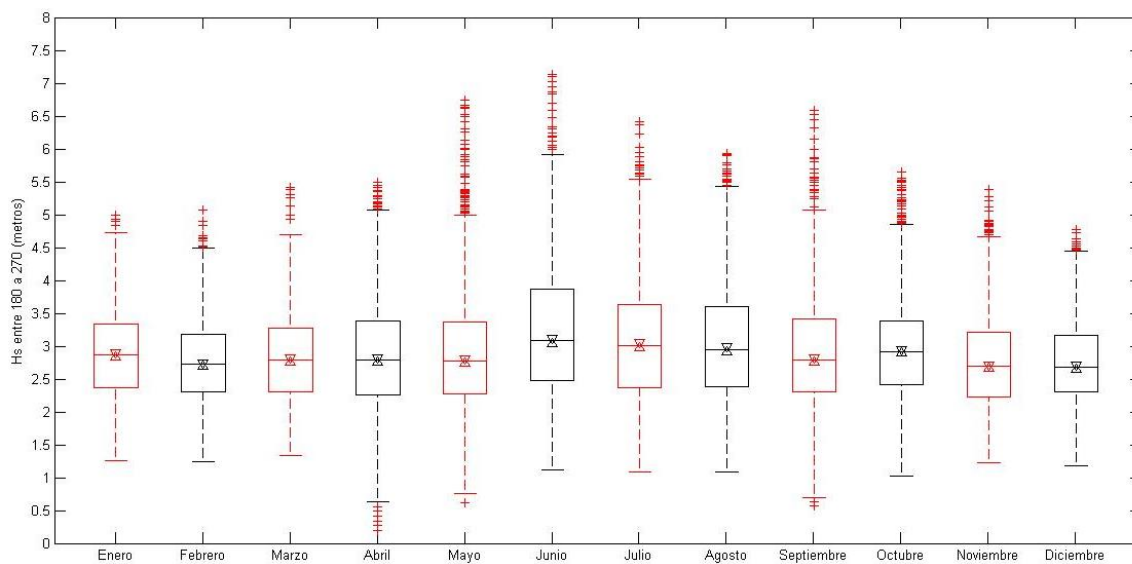
**Tabla N°10:** Probabilidad de ocurrencia para cada tipo de oleaje en cada mes.

Meses	SUR		NORTE	Total
	Seas	Swell		
<b>Enero</b>	0.267	0.699	0.034	1.000
<b>Febrero</b>	0.215	0.626	0.070	0.911
<b>Marzo</b>	0.077	0.877	0.048	1.003
<b>Abril</b>	0.071	0.885	0.010	0.966
<b>Mayo</b>	--	0.931	0.069	1.000
<b>Junio</b>	--	0.916	0.049	0.965
<b>Julio</b>	--	0.947	0.053	0.999
<b>Agosto</b>	--	0.956	0.042	0.998
<b>Septiembre</b>	0.072	0.875	0.020	0.967
<b>Octubre</b>	0.069	0.921	0.009	1.000
<b>Noviembre</b>	0.175	0.781	0.011	0.968
<b>Diciembre</b>	0.266	0.698	0.034	1.000

Las tablas muestran una diferencia significativa en la cantidad de datos para cada tipo de oleaje. Destacando los meses de Diciembre y Enero, en que hay una mayor probabilidad de ocurrencia para el oleaje tipo seas (26 %).

Con respecto a los datos del norte, se mantienen rangos de 3.5 a 7% entre los meses de Abril – Agosto y Diciembre –Marzo. Estos datos no son tan significativos como el tipo de oleaje Seas y Swell, pero no quiere decir que se desprecien en el transporte de sedimentos, ya que el norte puede tener una mayor escala de parámetros (Hs y Tp).

Como los meses no solo se diferencian en los rangos de parámetros, sino también en la distribución de datos para cada tipo de oleaje, se generan diagramas de caja para la altura significativa (Hs), periodo peak (Tp) y dirección del oleaje (°) para encontrar los valores promedios para el modelo de propagación de oleaje.

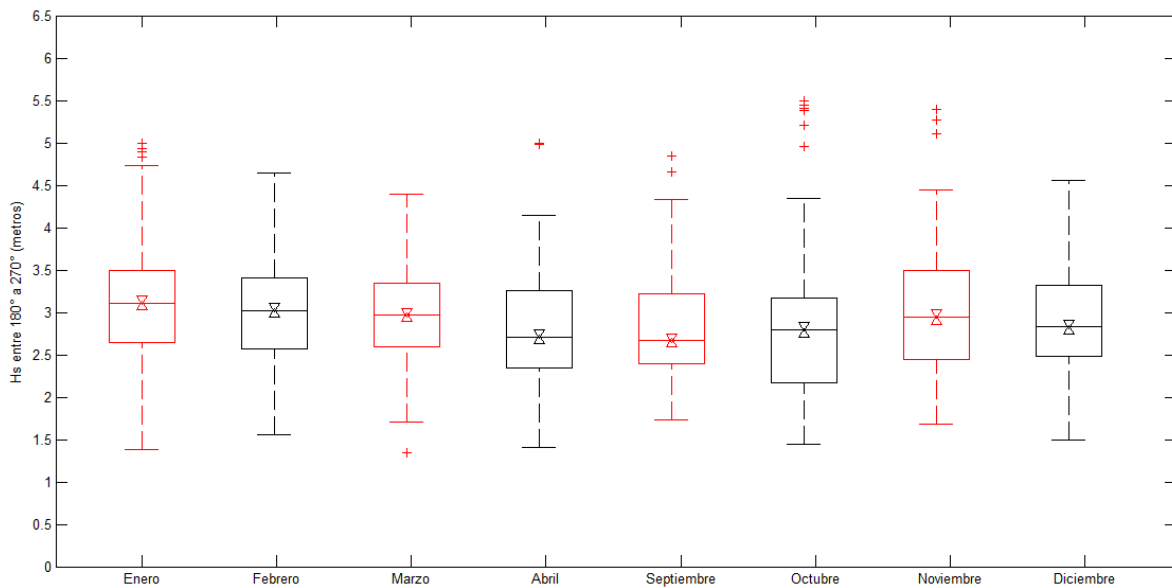


**Figura N°18:** Diagrama de caja desde el sur al oeste, indicando la altura significativa.

La Figura N°18 muestra una altura significativa promedio entre 2.5 a 3 metros en todos los meses. Pero la diferencia es que en las épocas de verano la dispersión de datos es menor comparada con la de invierno. A pesar que en graficos Hs vs Tp puede decir lo contrario, se observa que la nube de puntos está más compacta con respecto al eje de la altura significativa, por tanto los datos tendrán una menor varianza (En seas la nube de puntos solo crece pero se mantiene a la misma magnitud que swell).

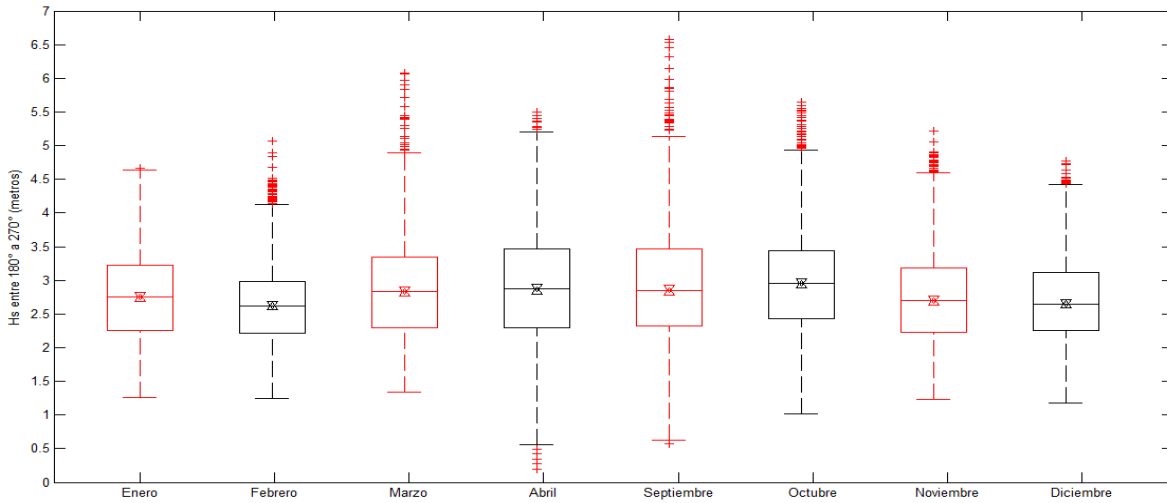
En el verano la altura decrece no tan significativamente (0.2 metros) con respecto a la de invierno, pero no presenta puntos dispersos de menor altura de oleaje que sus varianzas respectivas (outlayers).

Como se ven grandes cantidades de outlayers y grandes rangos de varianzas para cada mes, se realizaron diagramas para cada tipo de oleaje, swell y seas. La figura N°19 y N°20 muestran estos resultados. Cabe aclarar que entre los meses de mayo y agosto solo se consideró un tipo de oleaje, debido a que solo presenta una nube de puntos (figuras N°16 y N°17).



**Figura N°19:** Diagrama de caja de altura significativa para el tipo de oleaje Seas.  
(Procedente de los 180° a 270°)

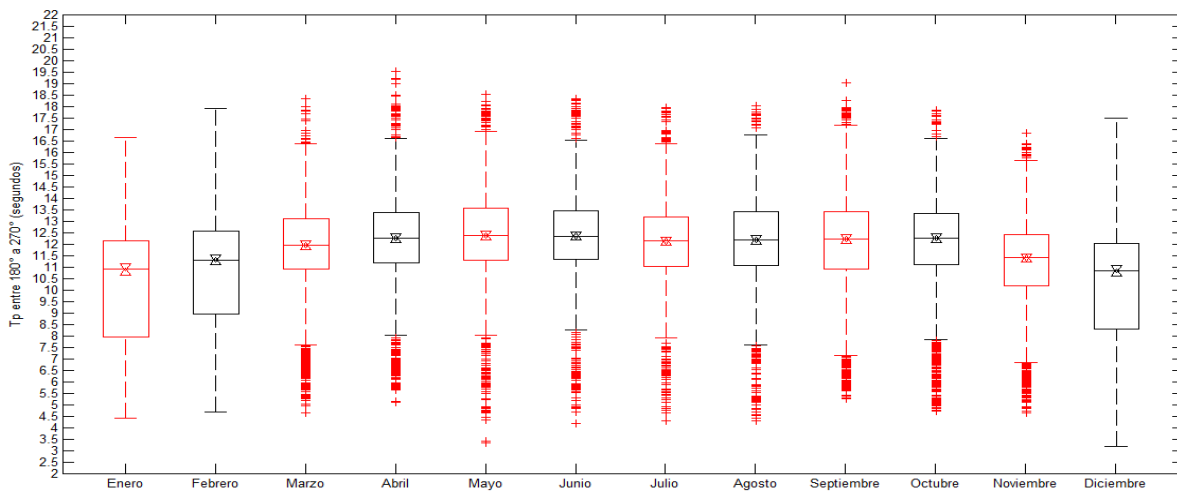
Este tipo de oleaje muestra un rango de altura promedio de 2.5 a 3.2 metros, dando varianzas menores en abril y septiembre y cada vez mayores al comienzo y fin del año. En octubre y noviembre se presentan outlayers a una altura de 5 a 5.5 metros.



**Figura N°20:** Diagrama de caja de altura significativa para tipo de oleaje Swell.  
(Procedente de los 180° a 270°)

La figura N°20 muestra varianzas mayores para los meses de abril y septiembre, y como los meses desde Mayo hasta Agosto forman solo una nube de puntos bien distribuidas, se podría decir que en los meses de invierno y otoño presentan varianzas con outlayers mayores, llegando hasta los 7 metros. Esto tiene directa relación con las figuras de Hs y Tp, ya que en ellas se muestra un rango de alturas más grandes.

En torno al periodo, se realizó el mismo análisis, la figura N°21 muestra los diagramas de caja de cada mes, mostrando también diferencias durante el año

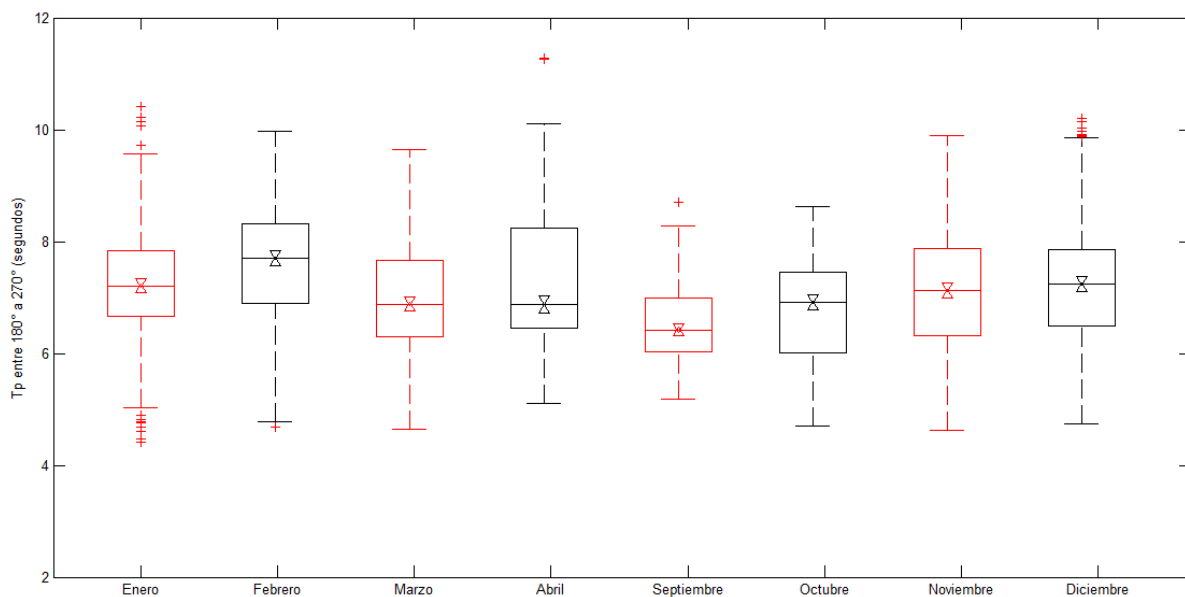


**Figura N°21:** Diagrama de caja desde el sur al oeste, indicando el periodo peak.  
(Procedente de los 180° a 270°)

En la figura N°21 muestra que en épocas de invierno los datos están más dispersos debido a que la nube de puntos es menos compacta. En el verano se muestra una gran nube de puntos pero que mantienen su conjunto, no habiendo outliers fuera de las varianzas en Diciembre, Enero y Febrero.

Los periodos peak de diciembre a febrero están dentro de un rango promedio de 11 a 12 (s), de marzo en adelante crecen superando los 12 (s) pero mantienen una varianza más pequeña que en verano, queriendo decir que en épocas de baja temperatura un grupo de datos puede estar fuertemente ligado y otros muy dispersos.

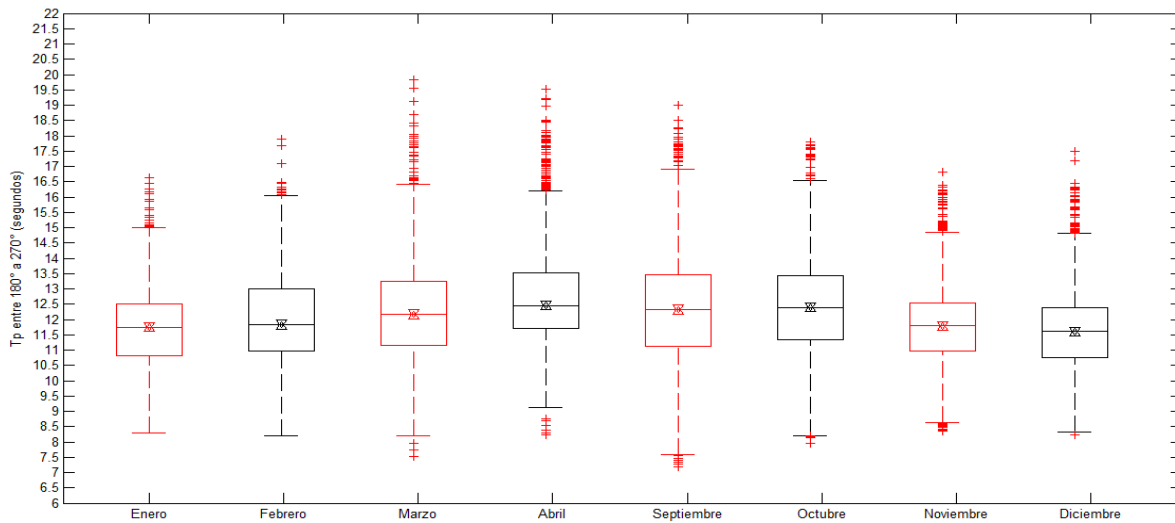
Para tener una mejor representación de este diagrama, se crearon más para cada tipo de oleaje (swell y seas). La figura N°22 y N°23 muestran los diagramas de caja respectivos de cada mes.



**Figura N°22:** Diagrama de caja de periodo peak tipo de oleaje seas.  
(Procedente de los 180° a 270°)

Aquí se muestra claramente que el oleaje tipo seas tiene un periodo de menor, ubicado en un rango entre los 6 a 8 segundos. Se aprecia además que desde noviembre a abril hay una mayor varianza con poca cantidad de outliers.

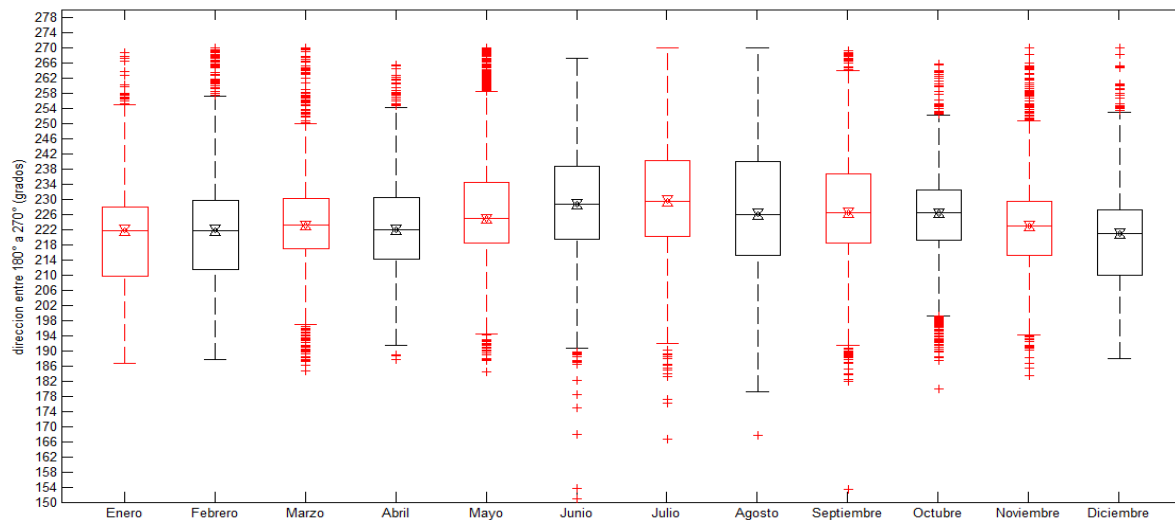
La siguiente figura muestra el tipo de oleaje swell, indicando claramente diferencias con el seas.



**Figura N°23:** Diagrama de caja de periodo peak tipo de oleaje swell. (Procedente de los 180° a 270°)

El oleaje muestra claramente un promedio entre los 11 a 13 (s), dando varianzas mayores en los meses desde marzo a octubre. Entre noviembre a febrero los datos mantienen un conjunto, pero igual hay outliers que indican que los datos no son totalmente compactos. Más outliers se muestran a mediados del año, ya que solo se va formando una nube de datos más dispersa (mayo a agosto figuras N°16 y N°17).

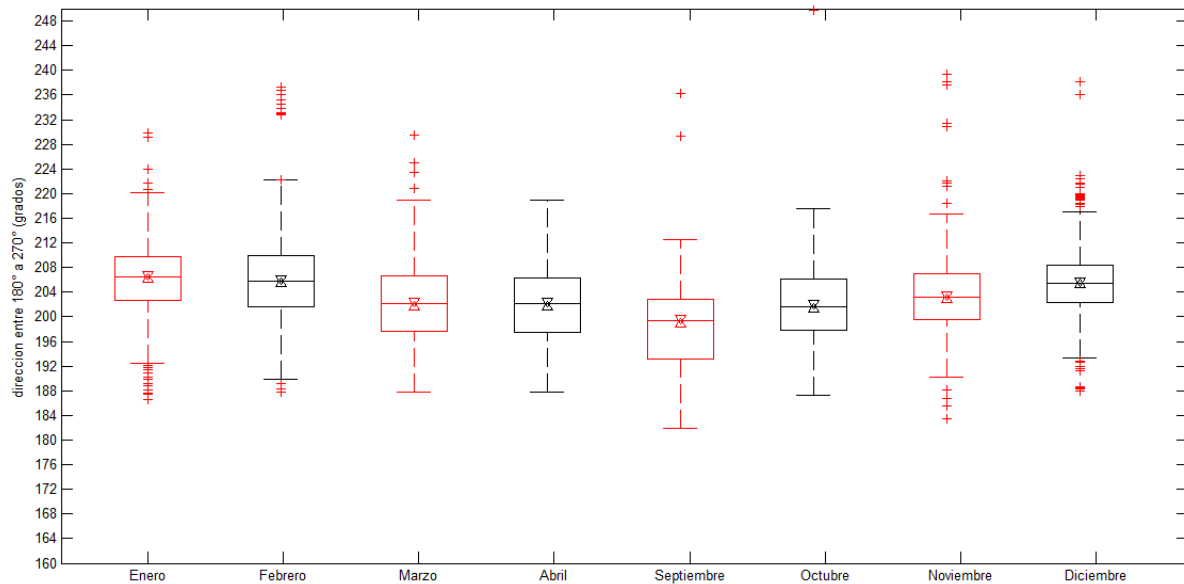
Por último, para ver la dirección del oleaje, se realizó un diagrama del oleaje del sur.



**Figura N°24:** Diagrama de caja desde el sur al oeste, indicando la dirección del oleaje. (Procedente de los 180° a 270°)

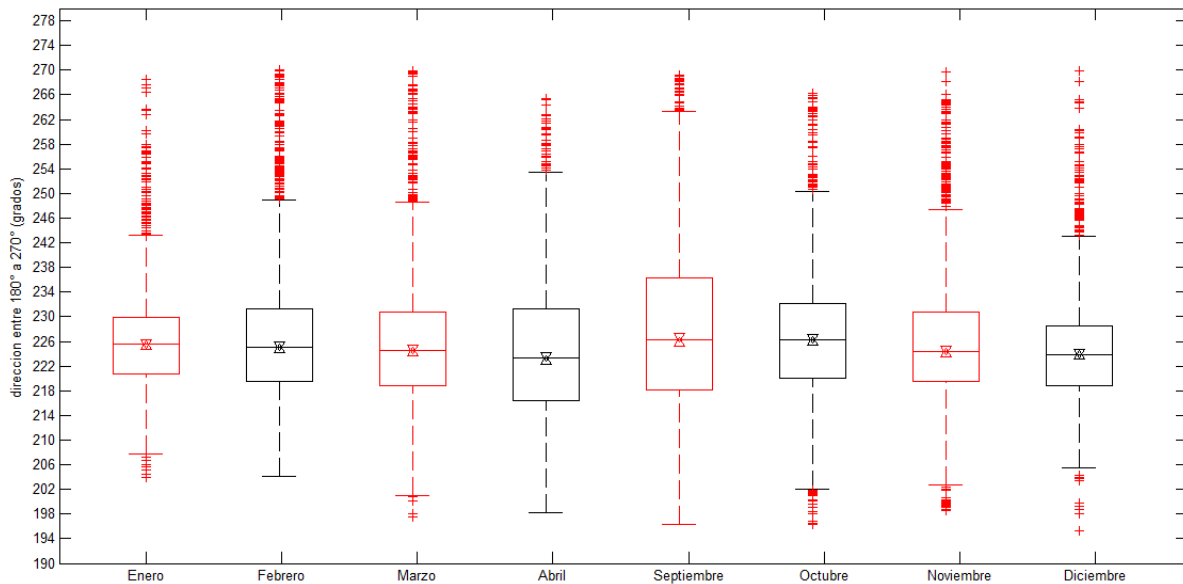
La figura N°24 se muestra que el promedio de la dirección del oleaje al suroeste esta entre los 220° a 230°. En invierno existe una leve inclinación más al oeste que al sur, además en las estaciones de frío se indican nubes de datos más compactas debido a que no presentan muchos outlayers (Junio-Agosto).

Se realizó de la misma manera que con los parámetros estudiados, diagramas de caja para cada mes.



**Figura N°25:** Diagrama de caja dirección. Tipo de oleaje seas.  
(Procedente de los 180° a 270°)

La figura N°25 muestra una diferencia total con respecto a la figura N°24, ya que como sus datos son menores, tienen una menor varianza y menores outlayers. El promedio de cada mes es de los rangos de 196° a 208° con varianzas de 10°. Se aprecian más outlayers a principio y fin de año, debido a que hay un mayor número de datos y dispersión de ellos. Hay un cambio de dirección a medida que se llega a mediados del año, pero no es apreciable este dato debido a que cada vez sigue siendo menor la nube de puntos comparado con swell (tabla N°9). La figura N°26 muestra la dirección del tipo de oleaje swell del sur.



**Figura N°26:** Diagrama de caja dirección. Tipo de oleaje swell.  
(Procedente de los 180° a 270°)

Claramente se muestra un oleaje diferente al de seas, ya que tiene un promedio mayor (entre 222° a 226°). Cada vez más cerca del comienzo y fin del año los datos tienen una varianza menor con más cantidad de outliers, pero en los meses de Abril y Septiembre la varianza crece.

En general el oleaje mantiene una dirección entre los 220° a 230° todo el año, pero en el verano el oleaje se distribuye manteniendo por una parte la misma dirección del año y por otra parte la dirección del tipo de oleaje seas.

También se realizaron los diagramas de caja de la orientación Norte (anexo) que mostraron desigualdad entre meses por no tener la misma magnitud de datos con respecto al sur. Pero igual se consideran dado que estos datos pueden ser producto de una tormenta o de condiciones que pueden afectar el transporte de sedimentos y a la vez el traslado de la boca del estuario.

A continuación se muestra la tabla de altura significativa, periodo peak y dirección de cada tipo de oleaje para todos los meses. Desde los meses de Mayo a Agosto se mantiene como solo un tipo de oleaje predominante al swell para el sur.

**Tabla N°11:** Cuadro de resumen para los escenarios de modelación.

Mes	Tipo de Oleaje	Hs (m)	Tp (seg)	Direccion (°)	% de ocurrencia en el mes
<b>Enero</b>	Sur-Swell	2.75	11.75	225.50	69.90
	Sur-Seas	3.08	6.80	206.05	26.70
	Norte	2.30	16.00	297.00	3.40
<b>Febrero</b>	Sur-Swell	2.60	11.85	225.08	62.60
	Sur-Seas	3.02	7.70	205.57	21.50
	Norte	2.40	16.10	294.00	7.00
<b>Marzo</b>	Sur-Swell	2.82	12.20	224.45	87.70
	Sur-Seas	2.97	6.90	202.51	7.70
	Norte	2.10	15.80	294.00	4.80
<b>Abril</b>	Sur-Swell	2.85	12.48	223.25	88.5
	Sur-Seas	2.70	6.80	202.05	7.10
	Norte	2.15	13.30	302.00	1.00
<b>Mayo</b>	Sur	2.75	12.00	224.75	93.10
	Norte	3.30	9.02	284.00	6.90
<b>Junio</b>	Sur	3.08	12.33	228.51	91.60
	Norte	3.25	7.70	316.00	4.90
<b>Julio</b>	Sur	3.01	12.10	229.05	94.70
	Norte	3.45	9.05	280.00	5.30
<b>Agosto</b>	Sur	2.94	12.18	226.00	95.60
	Norte	3.40	7.80	307.00	4.20
<b>Septiembre</b>	Sur-Swell	2.87	12.30	226.20	87.50
	Sur-Seas	2.67	6.35	199.30	7.20
	Norte	3.15	6.25	313.00	2.00
<b>Octubre</b>	Sur-Swell	2.96	12.42	226.21	92.10
	Sur-Seas	2.78	7.01	201.65	6.90
	Norte	2.70	9.30	316.00	0.90
<b>Noviembre</b>	Sur-Swell	2.70	12.78	224.45	78.10
	Sur-Seas	2.95	7.20	203.20	17.50
	Norte	2.90	15.60	295.00	1.10
<b>Diciembre</b>	Sur-Swell	2.64	11.58	223.90	69.80
	Sur-Seas	2.83	7.30	205.50	26.60
	Norte	2.10	15.90	299.00	3.40

## **4. Modelo numérico.**

### **4.1 Descripción de la metodología a aplicar.**

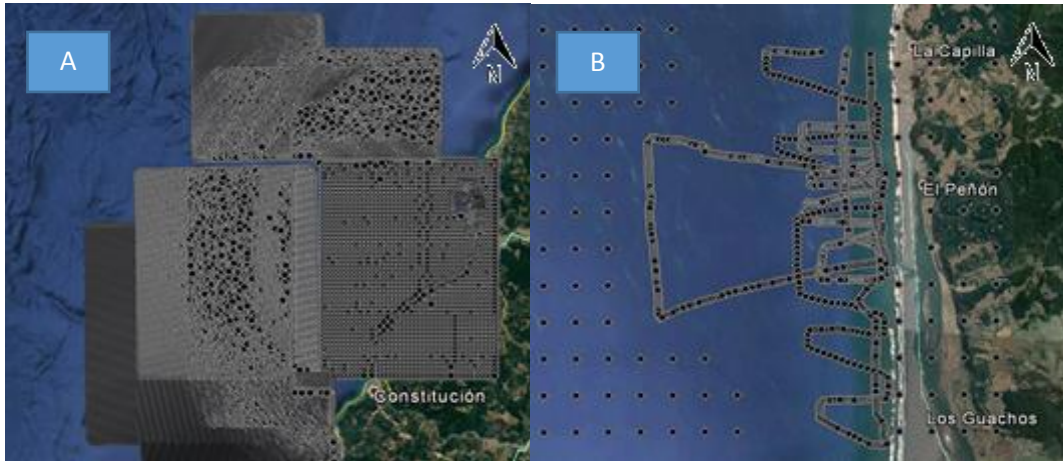
La presente sección describe la metodología utilizada para generar un modelo de propagación de oleaje desde aguas profundas hacia la costa (Delft3D), para luego estimar parámetros para la aplicación de las expresiones de transporte de sedimentos. Este modelo se valida a través de la comparación de datos reales de una ADCP instalada en la costa, con los resultados del modelo de propagación de oleaje. El programa Delft3D puede generar boyas virtuales colocadas en las mismas coordenadas de la boya real. El modelo será calibrado con datos espectrales de oleaje aplicados con diferentes condiciones de contorno (Hs, Tp y Dirección). Las condiciones de contorno fueron extraídas de una base de datos de reanálisis provenientes de aguas profundas.

El modelo numérico se creó por medio de una grilla sobre la batimetría en estudio, en que abarca aproximadamente 50 km<sup>2</sup>.

Se consideró el criterio de Courant en que las velocidades de propagación del modelo son menores a los tiempos de cálculo, dando valores menores a uno. A continuación se presenta la creación y sector del modelo numérico

### **4.2 Batimetría.**

La batimetría del área de estudio se obtuvo de un levantamiento detallado en la costa de estuario del Mataquito tomada por medio de un ecosonda, y otra batimetría de toda la costa de Chile para la consideración de aguas profundas (carta náutica). La figura N°27 muestra la batimetría tomada de forma manual en la boca del estuario de Mataquito.

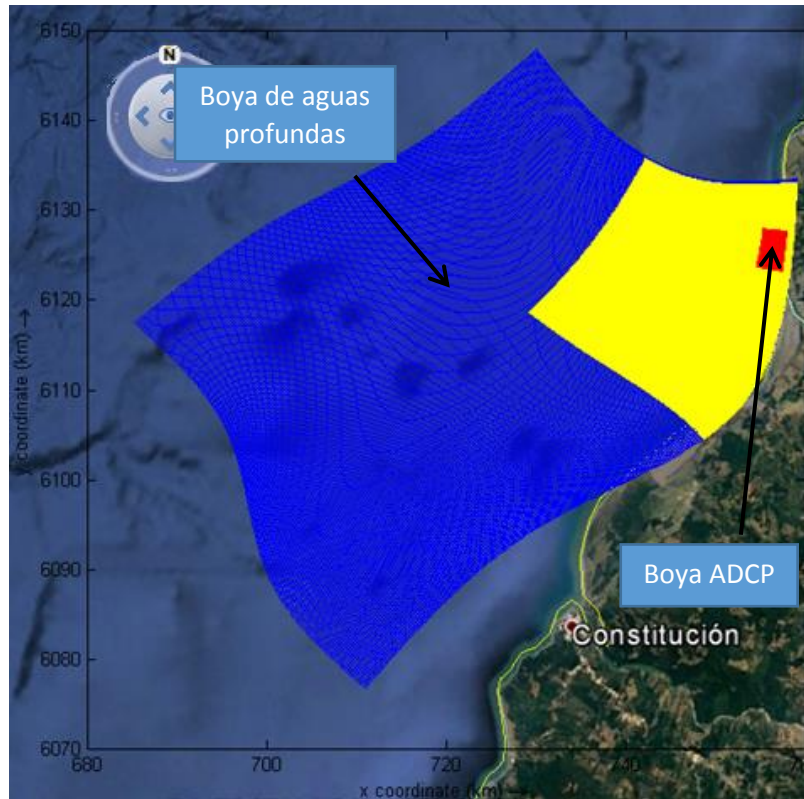


**Figura N°27:** Batimetría tomada de la zona estudio. La figura A muestra toda la batimetría de la zona de estudio y la figura B representa la batimetría tomada de forma manual (estación total).

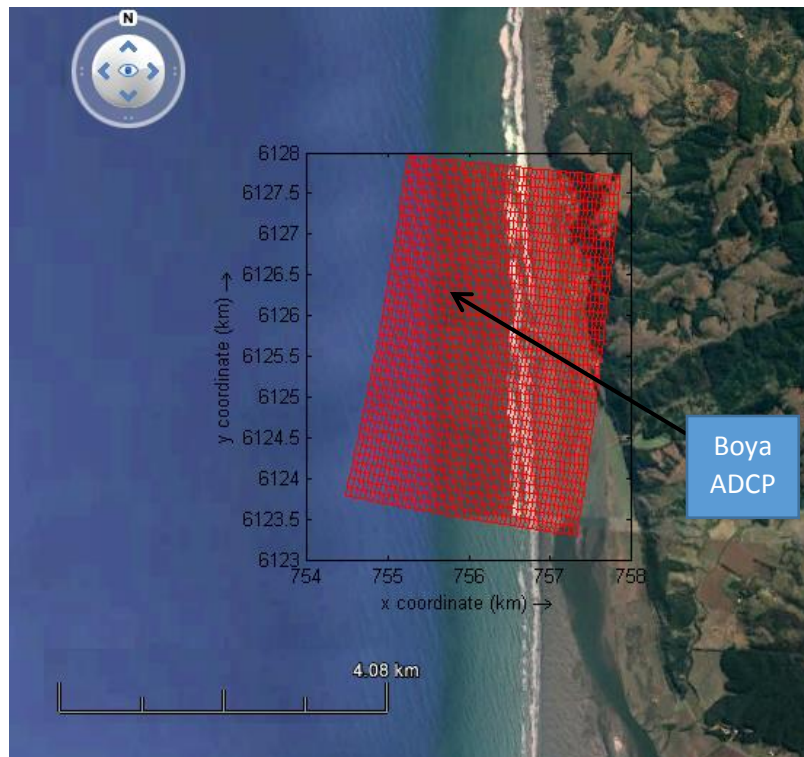
Estas coordenadas se operaron en los módulos Delft3D-RGFGRID para la generación de la grilla y en el módulo QUICKIN para la interpolación triangular lineal entre la grilla y la batimetría. La figura N°27 presenta toda la información batimétrica del área en estudio, donde se proyecta la grilla de cálculo del modelo numérico.

### 4.3 Grillas.

Para la creación y simulación del modelo desde el punto de reanálisis de WWIII hasta la boya ADCP, fueron creadas 3 mallas de cálculo anidadas superpuestas, de manera de satisfacer el sentido predominante de la propagación de oleaje, como se muestra en la figura N°28. La malla de mayor área es curvilínea y presenta contornos del noroeste, noreste y suroeste, para tener un número de Courant menor a 1 en la región de estudio. Las mallas 1,2 y 3 poseen resoluciones de 250, 80 y 50 m, respectivamente. En la malla de menor tamaño y mayor resolución, se ubica la boya ADCP que registra los parámetros del oleaje.



**Figura N°28:** Superposición de grillas para el análisis de propagación de oleaje.



**Figura N°29:** Superposición de malla fina con boya ADCP.

#### 4.4 Parámetros.

En primer lugar se tomó en cuenta el nivel del mar, en que al no tener certeza en qué nivel fueron tomados los datos, puede haber diferencias significativas en los resultados. Por tanto, se probaron diferentes correcciones del nivel del mar entre 0 a -3 m bajo el nivel del mar para calibrar de mejor forma el modelo. Además se incorporó el nivel del mar respectivo en cada simulación, ajustando la hora considerando la señal de marea medida en la ADCP

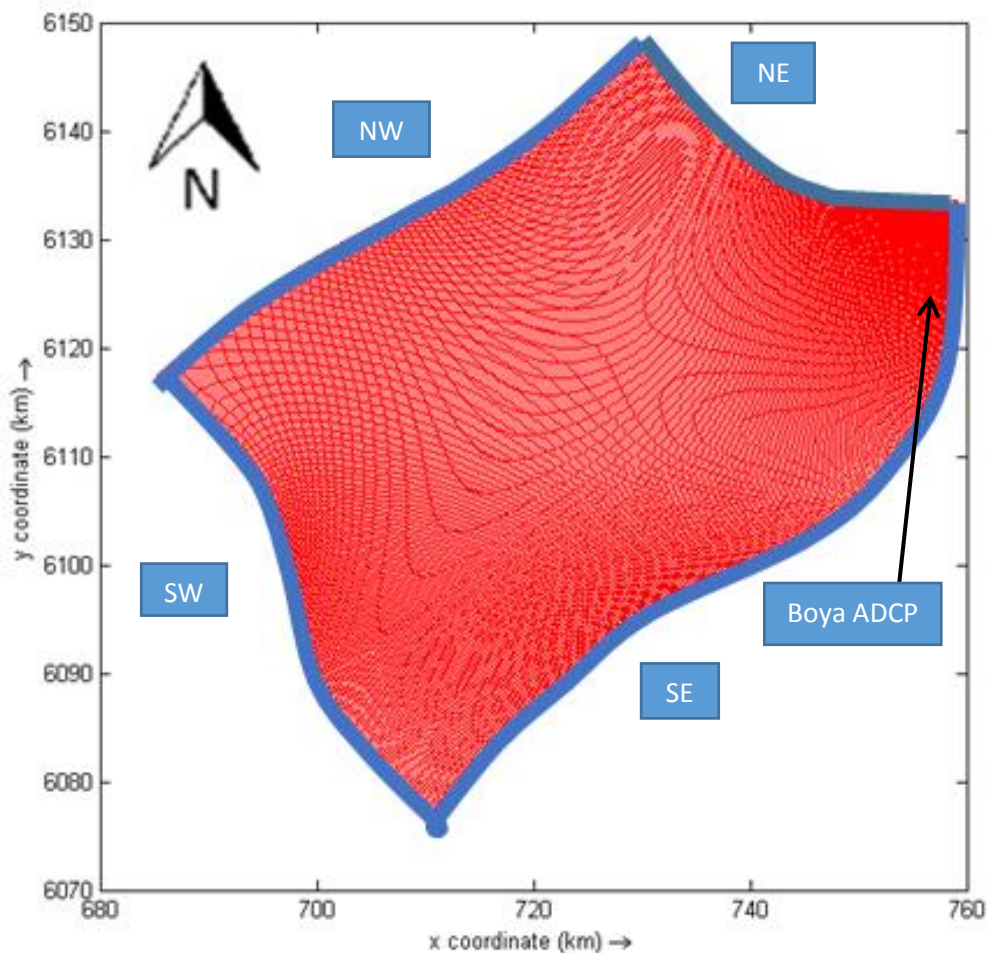
Se consideraron los modos de generación de procesos físicos, considerando la refracción, asomeramiento y además parámetros de ruptura de la ola ( $H_s$  y  $h$ ). El modelo se iteró 15 veces por cada celda (máximo número de iteraciones) para disminuir el error en los resultados

Condiciones de borde: se ingresan diferentes parámetros de entrada que dependen de las forzantes del oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$  y dirección), pero además se debe ingresar otros parámetros como:

- **Dispersión Direccional:** Parámetro que presenta el rango de dirección en que la ola transcurre hacia la costa y respecto a la dirección media de las olas. En la simulación, se tiene un valor de  $5^\circ$ .
- **Espectro:** Se utilizó un espectro JONSWAP, el cual corresponde a oleaje no totalmente desarrollado. Para ello se usó un parámetro gamma de 9. Esto generó un aumento máximo de 5 cm en la salida de altura significativa.
- **Coefficiente de fricción:** Se consideró un valor de  $0.038 \text{ m}^2/\text{s}^3$  considerando la expresión semi-empírica derivada de JONSWAP.
- **Parámetro de rompimiento de las olas:** se consideró un valor de 0.65 ya que los valores de ruptura cercanos a valores entre 0.7 a 0.8 muestran una disminución de la altura significativa.
- **Parámetros del viento:** Se consideró una velocidad y dirección uniforme promedio de todos los datos provenientes de aguas profundas (5.57 m/s), porque no es posible saber con certeza vientos locales en el sector de estudio.

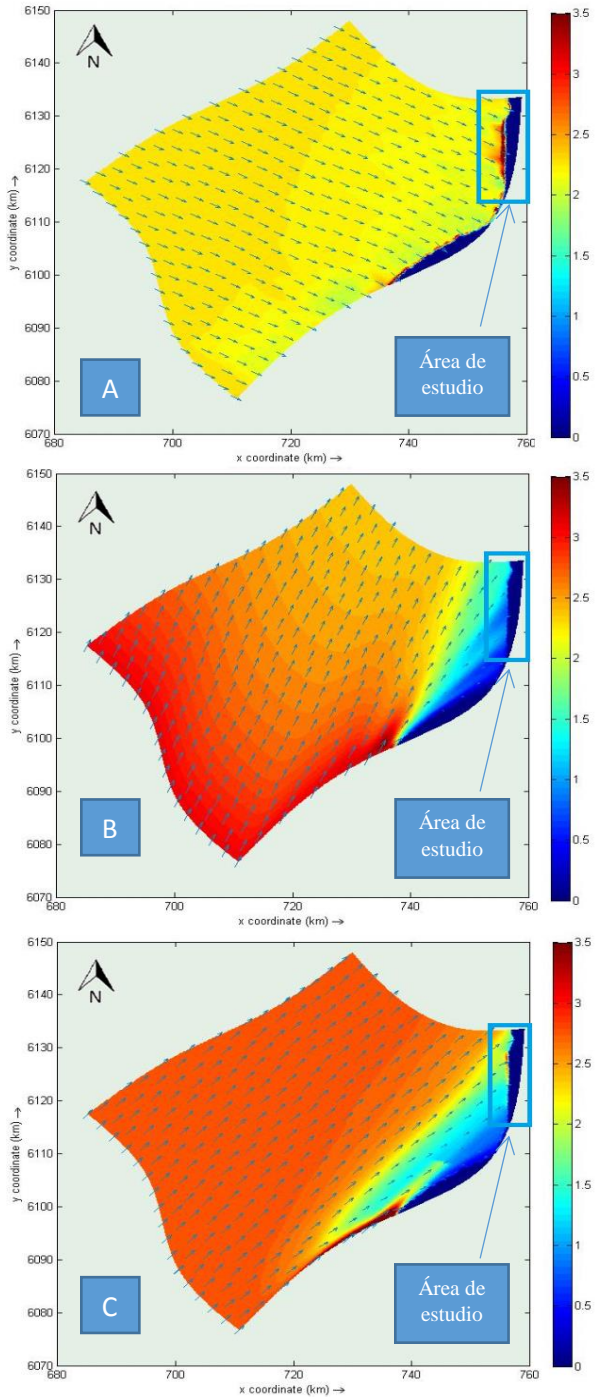
En los resultados, el modelo genera valores espectrales de una y dos dimensiones (presentando la varianza espectral a lo largo de las frecuencias), y los parámetros  $H_s$ ,  $T_p$  y dirección.

En la figura N°30 son presentados las condiciones de borde en toda la grilla del modelo, y en la figura N°31 se muestran 3 propagaciones de oleajes (sur swell, sur seas y oleaje proveniente del norte), provenientes de aguas profundas con diferentes alturas significantes y direcciones respectivamente.



**Figura N°30:** grilla (rojo) con condiciones de borde (línea azul), se considera en todo el contorno de la costa debido a que también hay entrada de mar en ella.

En la figura mostrada, las condiciones de borde de las grillas de menor tamaño son las salidas de la grilla más grande, así el modelo simula la propagación de oleaje de manera continua y a la vez siendo más concreta con una malla más fina.



**Figura N°31:** Altura de la ola y sentido de la propagación de oleaje. En la figura A se muestra la propagación de oleaje del Noroeste, en la B se ubica el oleaje sur seas y en C se ubica el sur swell.

En las figuras mostradas, se aprecia la variación de altura de ola a medida que se propaga hacia la costa, y se observa claramente cómo se refracta el oleaje. Recordemos que en el área de estudio, es la única zona que cuenta con una batimetría detallada en que las profundidades son menores con respecto a toda la costa (batimetría poco detallada). Por lo tanto, el área de estudio tendrá un mayor rompimiento de olas en el modelo. La figura A del oleaje proveniente del Noroeste, muestra un rompimiento de olas con una altura de 3.4 m (área de estudio); en el oleaje sur seas (Fig. 31-B), las olas rompen con rangos de altura 1 – 1.5 m; y en el sur swell (Fig. 31-C) las olas pueden llegar a romper con una altura de 3 m. Tener en cuenta que la costa ubicada al sur del área de estudio (entre los 6090 a 6100 km N) también es una zona de rompimiento para el oleaje proveniente del sur (seas y swell). Esta zona no impide la propagación de oleaje hacia el área de estudio, ya que no afecta el sentido de propagación hacia la zona de interés, y además que está lejana a ella (30 kilómetros). En el anexo se encuentran todas las figuras de las condiciones de oleaje para cada mes para la grilla grande y mediana.

#### 4.5 Calibración y validación del modelo.

Para la calibración y validación del modelo se compararon resultados de la ADCP y a una boya virtual generada en la misma posición en el modelo. Los resultados de la boya virtual son datos espectrales generados a partir de las condiciones de aguas profundas.

Se comparó el error relativo porcentual de los parámetros alturas significativas (Hs), Periodo peak (Tp) y direcciones de aproximación de la ola. Adicionalmente se compararon las formas de los espectros 1D y 2D obtenidos con el modelo.

$$\text{Error Relativo} = \frac{|\text{valor medido} - \text{valor calculado}|}{|\text{valor medido}|} * 100 \quad [\%] \quad (\text{ec. 28})$$

Las fechas de comparación correspondieron desde el 2 de diciembre del 2012 hasta el 10 del mismo mes y año. Se realizaron comparaciones de datos cada 3 horas, es decir, se realizaron 80 simulaciones con y sin viento.

Para las condiciones con viento se consideró una velocidad promedio de 5.58 m/s y una dirección de 252° (base de datos de aguas profundas), ya que no hay información detallada entre las condiciones de aguas profundas y la ADCP. Las siguientes tablas muestran el error porcentual de los parámetros en el día, que muestra la ADCP con los generados de la boya virtual. Los valores de cada hora se muestran en los anexos.

**Tabla N°12:** Error porcentual de los parámetros sin viento.

Sin viento	Error porcentual (%)		
Días	Hs	Tp	Dirección
02-12-2012	17.9	20.7	3.6
03-12-2012	40.2	20.6	0.7
04-12-2012	12.6	26.3	1.8
05-12-2012	22.9	7.5	2.7
06-12-2012	14.0	11.8	1.2
07-12-2012	10.4	15.8	1.7
08-12-2012	8.2	12.6	1.9
09-12-2012	6.5	23.0	6.0
10-12-2012	24.6	18.3	8.0
Promedio	17.5	17.4	3.1

**Tabla N°13:** Error porcentual de los parámetros con viento.

Con viento	Error porcentual (%)			
	Días	Hs	Tp	Dirección
	02-12-2012	19.3	20.4	4.0
	03-12-2012	41.0	20.7	0.7
	04-12-2012	12.5	27.2	1.8
	05-12-2012	22.4	7.5	2.7
	06-12-2012	13.3	11.9	1.1
	07-12-2012	10.3	13.6	1.7
	08-12-2012	7.5	14.7	2.4
	09-12-2012	6.1	22.2	6.0
	10-12-2012	24.5	18.3	8.0
	<b>Promedio</b>	<b>17.4</b>	<b>17.4</b>	<b>3.2</b>

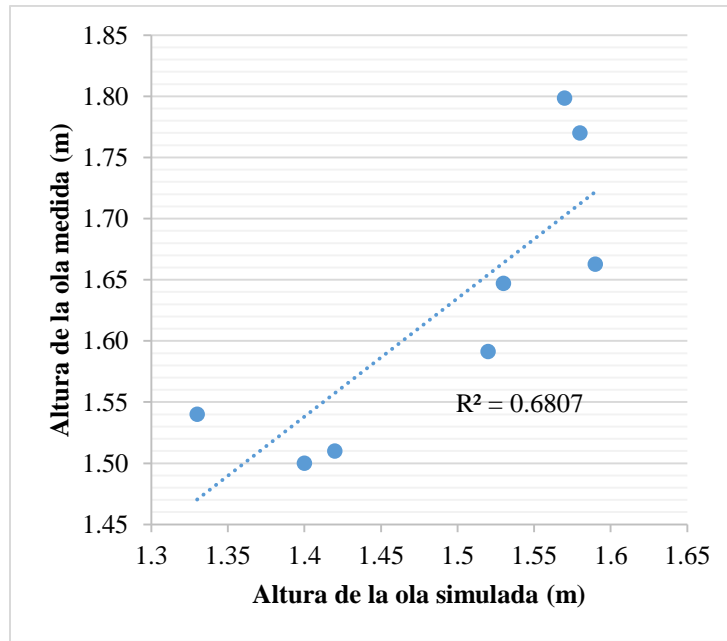
No se presentan grandes diferencias entre los datos con o sin viento, ya que la velocidad promedio del viento con respecto a una dirección no altera significativamente la propagación del oleaje.

Los resultados muestran un error promedio de todos los días de un 17 % para el parámetro de Hs, esto es debido a que existen condiciones locales que no son cuantificables en el modelo como vientos locales que soplan en otras direcciones dentro de la gran área de estudio.

En torno al periodo, el promedio de los errores de todos los días es aproximado a un 17%. Esto es debido solamente a las diferencias entre el periodo peak ingresado en el modelo y en el medido en la boya ADCP, ya que el periodo se mantiene constante tanto en aguas profundas como en someras y solo se modifica cuando la ola rompe. Además, las diferencias entre datos medidos y simulados puede deberse a la gran área de estudio, o a que los datos fueron tomados con diferentes niveles de marea.

En la dirección, los errores son mínimos, debido a que los valores son grandes y las diferencias pequeñas, teniendo la misma diferencia decimal que la Hs y Tp.

También se realizaron regresiones lineales de los parámetros dentro del día, mostrando resultados irregulares tanto en los valores entre horas o días. La figura N°32 y las tablas N°14, N°15 y N°16 muestran la mejor relación de los días considerados.



**Figura N°32:** Relación de alturas significativas del día 8 de diciembre de 2012.

**Tabla N°14:** Comparación de la altura significativa medidos de la ADCP y de los ingresados y generados por el modelo para el 8 de diciembre de 2012.

hora	Hs (m)		
	Wavewacht III (ingresados)	Salidas del software Delft 3D (generados)	ADCP (medidos)
0:00:00	1.71	1.57	1.80
3:00:00	1.68	1.53	1.65
6:00:00	1.72	1.58	1.77
9:00:00	1.72	1.59	1.66
12:00:00	1.64	1.52	1.59
15:00:00	1.53	1.42	1.51
18:00:00	1.50	1.33	1.54
21:00:00	1.58	1.40	1.50

**Tabla N°15:** Comparación del periodo peak medidos del ADCP y de los ingresados y generados por el modelo para el 8 de diciembre de 2012.

Hora	Tp (seg.)		
	Wavewach III (ingresados)	Salidas del software Delft 3D (generados)	ADCP (medidos)
00:00	11.9	11.9	13.0
03:00	11.9	11.9	12.4
06:00	11.9	11.9	12.1
09:00	11.8	11.8	13.7
12:00	11.7	11.8	13.9
15:00	11.6	11.6	14.3
18:00	11.4	11.3	14.1
21:00	11.3	11.3	14.1

**Tabla N°16:** Comparación de la direcciones medidas del ADCP y de los ingresados y generados por el modelo para el 8 de diciembre de 2012.

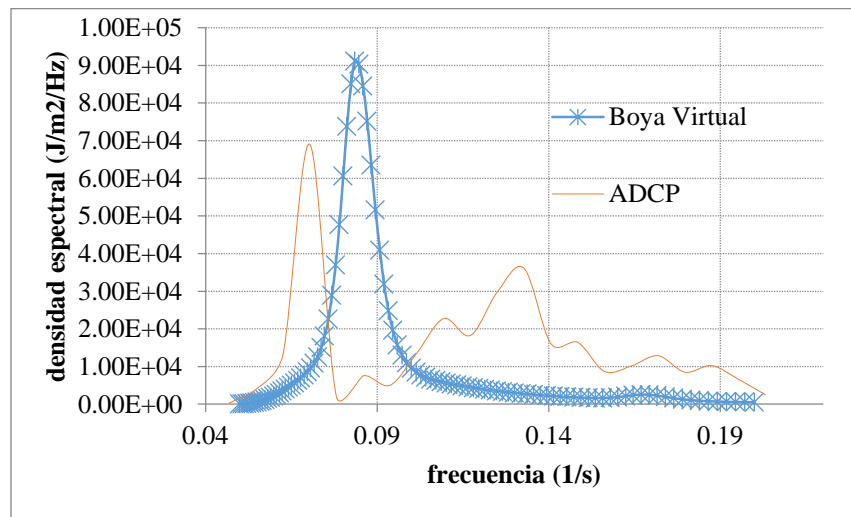
Hora	Dirección (°)		
	Wavewach III (ingresados)	Salidas del software Delft 3D (generados)	ADCP (medidos)
00:00	242.1	249.5	255.4
03:00	242.1	249.1	255.5
06:00	242.5	249.8	255.6
09:00	243.5	256.2	255.7
12:00	244.6	256.8	255.9
15:00	245.1	258.8	256.1
18:00	238.4	263.0	251.6
21:00	239.0	257.0	251.6

La figura N°32 muestra un R cuadrado aceptable, pero graficando con respecto a los 80 datos solo se muestra una nube de puntos sin forma alguna. Esto también es debido a los diferentes procesos físicos que ocurren a diferentes horas en el día, alterando las condiciones de oleaje.

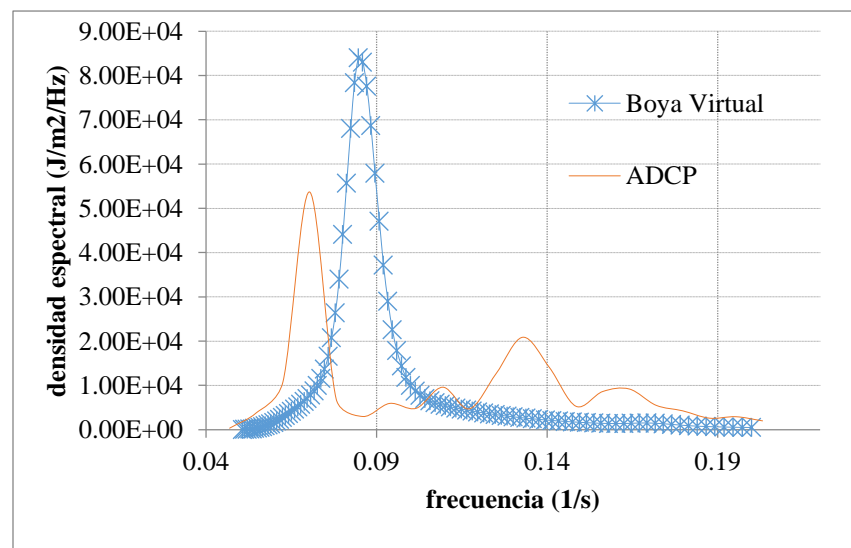
Se puede apreciar que en las tablas N°14, N°15 y N°16 hay diferencias entre los datos ingresados (o simulados) del modelo con los medidos en la ADCP. Esto demuestra que pueden existir otros factores en la propagación del oleaje que puedan alterar los resultados, ya sea vientos locales y/u otras condiciones de oleaje. Tener en cuenta que el error (entre

los datos de la ADCP y la boya virtual) está muy ligado a problemas en la estimación del oleaje en aguas profundas, es decir, del modelo de reanálisis.

Para un mayor estudio del modelo, se muestran en la figura N°33 y N°34 las comparaciones entre los espectros 1D generados por el modelo y los medidos de la boya real a las 12:00 y 06:00 hrs respectivamente del día 8 de diciembre de 2012.



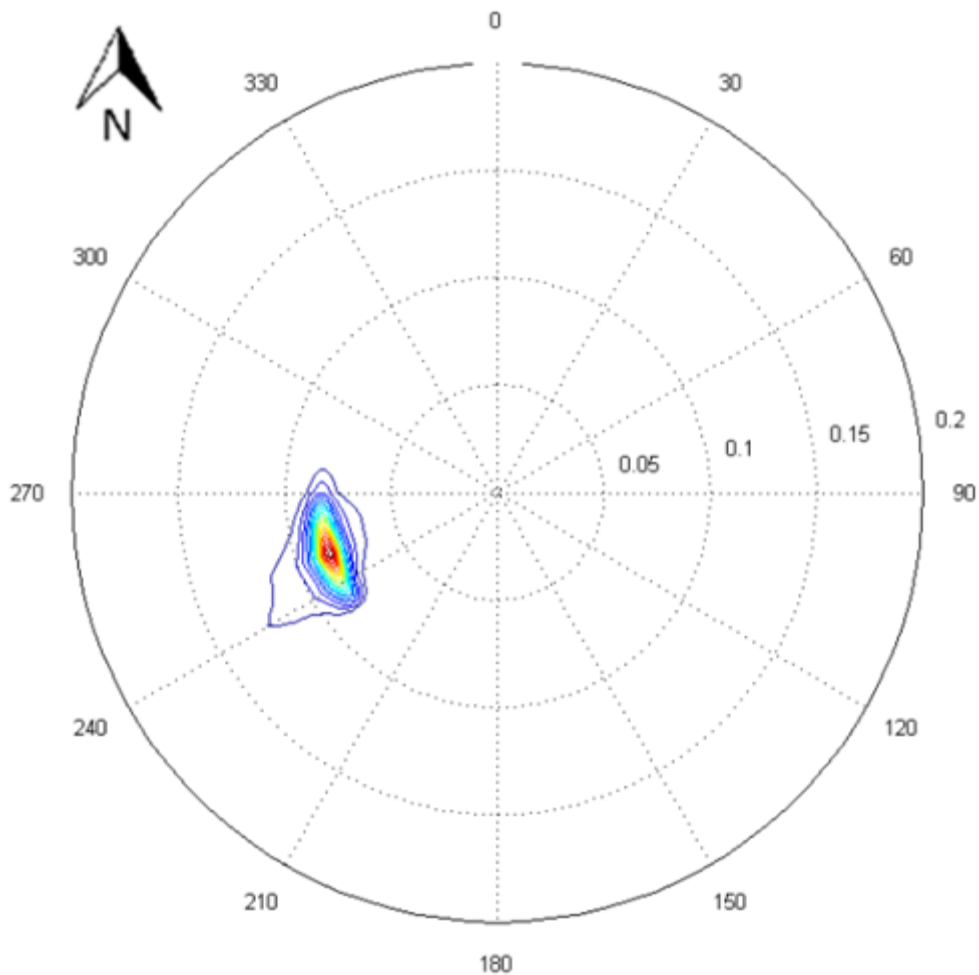
**Figura N°33:** Comparación entre el espectro medido en la boya ADCP y el generado por el programa SWAN. Datos tomados y creados para las 06:00 hrs.



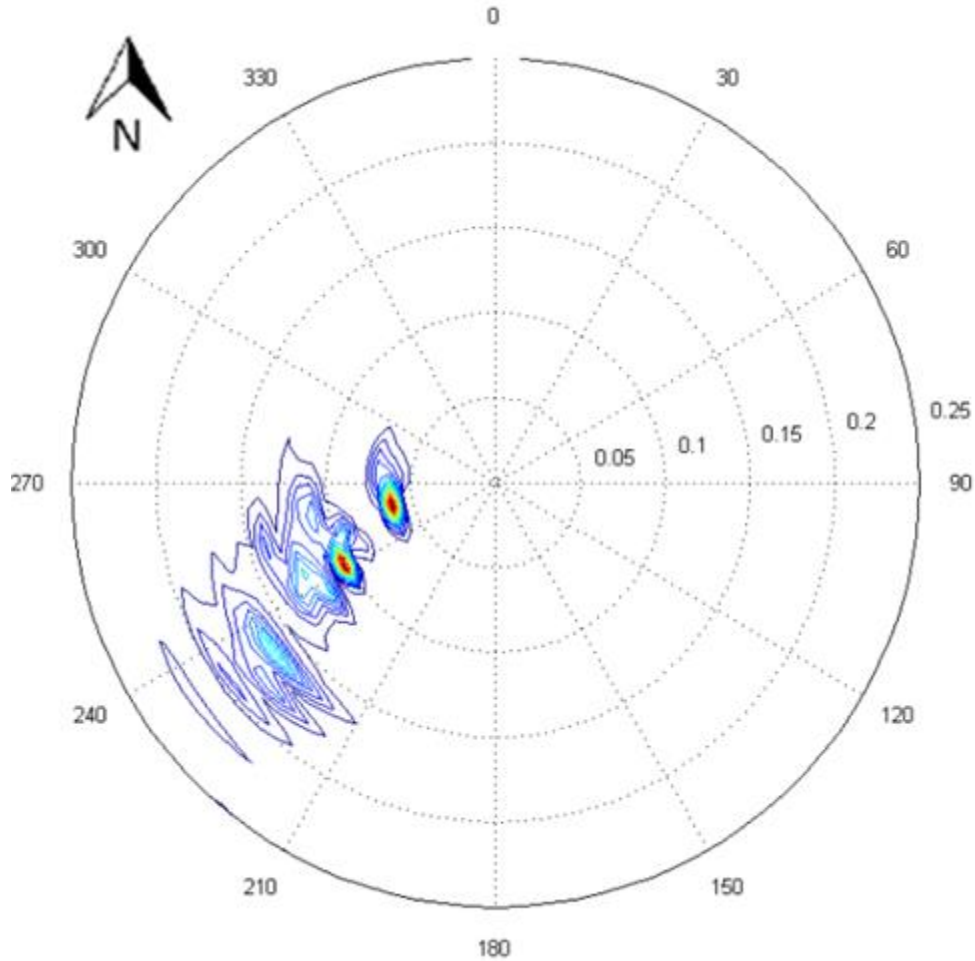
**Figura N°34:** Comparación entre el espectro medido en la boya ADCP y el generado por el programa SWAN. Datos tomados y creados para las 12:00 hrs.

La figura N°33 con N°34 muestra la total diferencia de la toma de datos. La boya virtual considera los mismos valores de entrada en las condiciones de borde, por lo que se muestra solo un peak en cada figura, que tiene frecuencias de 0.0835 Hz (periodo 11.9 seg.) para las 06:00 hrs. y 0.0847 Hz (periodo 11.8 seg.) para las 12:00 hrs, por tanto solo se considera una condición de oleaje para los dos espectros. En cambio, los datos tomados por la ADCP muestran zonas peak de densidades espectrales, en que hay diferentes tipos de oleajes con periodos comprendidos entre los 16 y 10 segundos.

En la figura N°35 y N°36 se muestran los espectros de oleaje en 2D en que se aprecia de mejor forma esta diferencia.



**Figura N°35:** Resultados del espectro bidimensional del Modelo SWAN.



**Figura N°36:** Espectro bidimensional medido de la boya ADCP.

En las figuras vistas anteriormente, se puede apreciar la diferencia entre las formas de las densidades espectrales. La figura N°35 se observa un espectro con solo una condición de borde, en que la frecuencia peak muestra un valor de 0.08 Hz. En cambio, en la figura N°36 se aprecia un espectro más disperso, en que se muestran peaks de diferentes frecuencias. Estas diferencias entre estos espectros es por la falta de información entre las condiciones de borde y el punto de interés, ya que como se ha dicho anteriormente, pueden ocurrir procesos físicos como vientos locales y otras manifestaciones que no han sido posible de modelar.

Cabe decir que se generó un modelo aceptable para estimar la propagación del oleaje durante todo el año, ya que aun con limitaciones, se puede representar las condiciones reales con errores promedios de 10 a 15 %.

## 5. Resultados.

### 5.1 Modelación desde aguas profundas hasta la zona de rompiente.

Dado que no se cuenta con estadística del viento para los 16 años de datos, se supuso que no existe aporte de energía por el efecto de vientos entre el nodo 35 y la costa, y que las condiciones de borde llegan exclusivamente por las estimaciones del modelo de reanálisis.

Dado que no se cuenta con estadística del viento para los 16 años de datos, se supuso que no existe aporte de energía por el efecto de vientos entre el nodo 35 y la costa, y que las condiciones de borde llegan exclusivamente por las estimaciones del modelo de reanálisis.

Ya que se cuenta con una batimetría de detalle en la boca del estuario, se generaron boyas virtuales colocadas en líneas como se muestra en la figura N°37, para localizar la zona de rompiente en la playa. Como no es posible saber con certeza donde va a romper la ola, se consideraron las boyas que cumplieran el rango de coeficiente de rompiente entre 0.6 a 0.7, para luego considerar una de ellas que estuviera cercano al valor de los 0.6 para una mayor altura de la ola.



**Figura N°37:** Boyas ubicadas en la zona de rompiente. Se considera un ancho de 200 m y largo de 2000 metros.

La razón de que las boyas se colocaran en líneas horizontales, es debido a que la posición del rompiente cambia en función de los parámetros de oleaje, mas es el caso de la altura significativa ya que tiene directa relación con el coeficiente de rompiente.

**Tabla N°17:** Parámetros de rompiente para cada tipo de oleaje en el mes.

Mes	Tipo de Oleaje	$H_b$ (m)	$h_b$ (m)	$\gamma_b$	$\theta_b$ (°)
<b>Enero</b>	Sur-Swell	1.67	2.7	0.61	259.3
	Sur-Seas	0.96	1.54	0.62	248.0
	Norte	2.46	3.85	0.63	279.8
<b>Febrero</b>	Sur-Swell	1.64	2.15	0.76	259.8
	Sur-Seas	0.84	1.29	0.65	258.4
	Norte	2.22	3.40	0.65	280.7
<b>Marzo</b>	Sur-Swell	1.69	2.70	0.62	260.5
	Sur-Seas	0.93	1.53	0.60	248.8
	Norte	2.45	3.84	0.63	282.2
<b>Abril</b>	Sur-Swell	1.68	2.69	0.62	261.2
	Sur-Seas	0.60	0.85	0.70	257.2
	Norte	2.12	3.43	0.61	295.0
<b>Mayo</b>	Sur	1.68	2.7	0.62	261.2
	Norte	2.36	3.74	0.63	283.4
<b>Junio</b>	Sur	1.73	2.71	0.63	261.0
	Norte	1.74	2.77	0.62	296.5
<b>Julio</b>	Sur	2.04	3.38	0.60	259.4
	Norte	2.05	3.31	0.61	275.8
<b>Agosto</b>	Sur	1.71	2.71	0.63	260.7
	Norte	1.98	3.27	0.60	293.1
<b>Septiembre</b>	Sur-Swell	1.61	2.71	0.63	261.2
	Sur-Seas	0.50	0.84	0.60	252.1
	Norte	1.34	2.14	0.62	294.6
<b>Octubre</b>	Sur-Swell	1.73	2.71	0.63	261.5
	Sur-Seas	0.64	1.07	0.60	253.4
	Norte	3.95	6.11	0.64	295.8
<b>Noviembre</b>	Sur-Swell	1.69	2.69	0.62	262.8
	Sur-Seas	0.93	1.54	0.60	249.5
	Norte	2.69	4.38	0.61	292.1
<b>Diciembre</b>	Sur-Swell	1.40	2.15	0.65	259.6
	Sur-Seas	0.94	1.54	0.61	249.5
	Norte	2.53	4.14	0.61	286.6

En la tabla N°17, se muestran los resultados de los 32 estados de mar modelados, estos incluyen  $H_b$ ,  $h_b$ ,  $\gamma_b$  y  $\theta_b$ , todos los necesarios para estimar el transporte de sedimentos.

## 5.2 Cálculo y resultados del transporte total de sedimentos.

Para el cálculo del transporte de sedimentos, se utilizaron las ecuaciones de CERC y Kamphuis, para comparar sus resultados.

La ecuación de CERC presenta magnitudes mayores en los resultados debido a que solo relaciona la altura de la ola, profundidad y aproximación. En cambio, la ecuación de Kamphuis considera además los parámetros físicos de la playa y diámetro medio de la partícula de suelo a transportar.

Para la ecuación de CERC, se consideró el parámetro adimensional  $K=0.77$  ya que se considera la tasa de transporte dinámico de sedimento total y se ajusta al gráfico de (Inman y Komar 1970)

En el sedimento se consideró una porosidad de 0.4 con un diámetro medio de 0.3 mm, obtenido en ensayos granulométricos. La densidad es de  $2650 \text{ kg/m}^3$  para el sedimento y  $1000 \text{ kg/m}^3$  para el agua. En la playa, se obtuvo una pendiente de  $1.3^\circ$ .

En la tabla N°17 y N°18 se muestran las tablas de transporte de sedimentos para cada mes, en donde se puede diferenciar la magnitud de transporte entre una ecuación y otra. Tener en cuenta que el total neto es el resultado de la diferencia entre el sur y el norte.

**Tabla N°18:** Trasporte de sedimentos calculado con la ecuación de CERC.

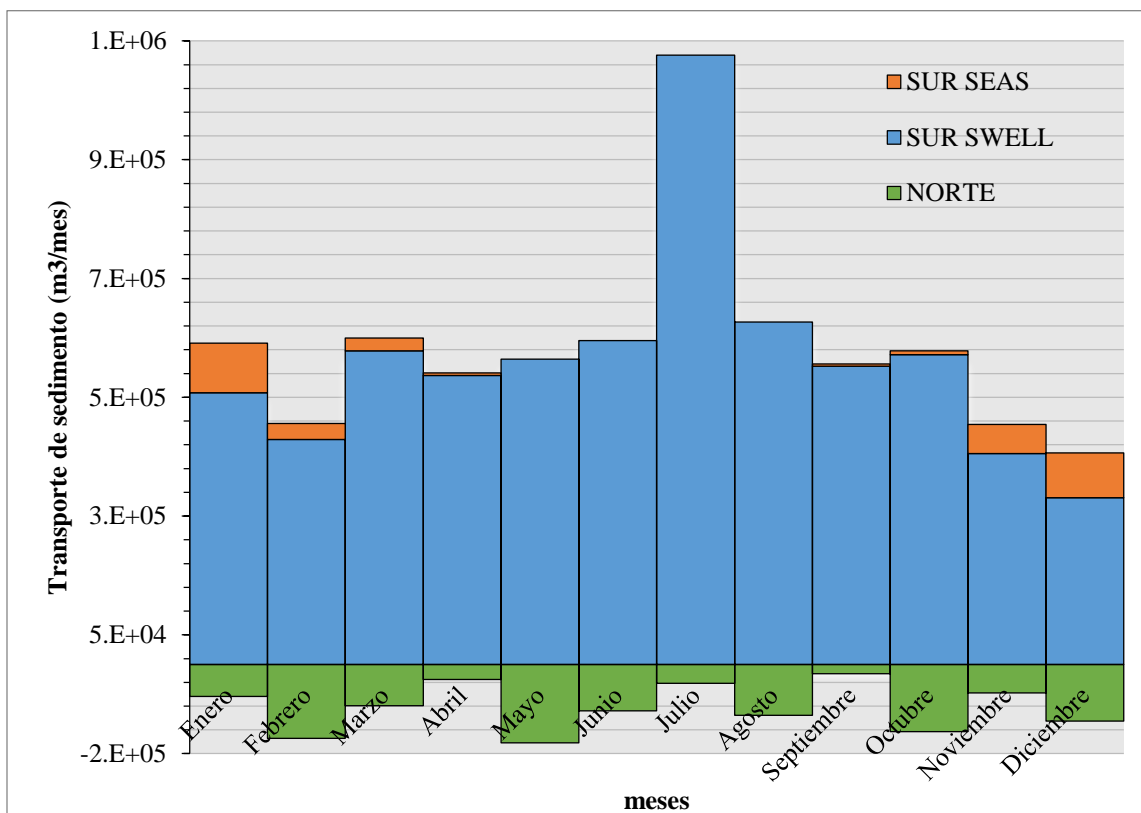
Meses	SUR (Ton/mes)		NORTE (Ton/mes)	Total neto (Ton/mes)
	Swell	Seas		
<b>Enero</b>	457.742	83.152	53.590	487.305
<b>Febrero</b>	378.699	26.800	124.220	281.278
<b>Marzo</b>	527.944	21.825	69.328	480.440
<b>Abril</b>	486.669	4.006	25.327	465.348
<b>Mayo</b>	513.809		132.170	381.639
<b>Junio</b>	545.422		78.049	467.373
<b>Julio</b>	1.025.896		31.816	994.079
<b>Agosto</b>	576.496		85.446	491.050
<b>Septiembre</b>	502.380	3.807	15.774	490.413
<b>Octubre</b>	521.574	6.336	113.126	414.784
<b>Noviembre</b>	355.309	48.662	47.837	356.134
<b>Diciembre</b>	280.603	75.700	95.394	260.909
<b>Total</b>	5.746.731	270.288	872.078	5.144.941
<b>Promedio Mensual</b>	478.894	33.786	72.673	428.745

**Tabla N°19:** Trasporte de sedimentos calculado con la ecuación de Kamphuis.

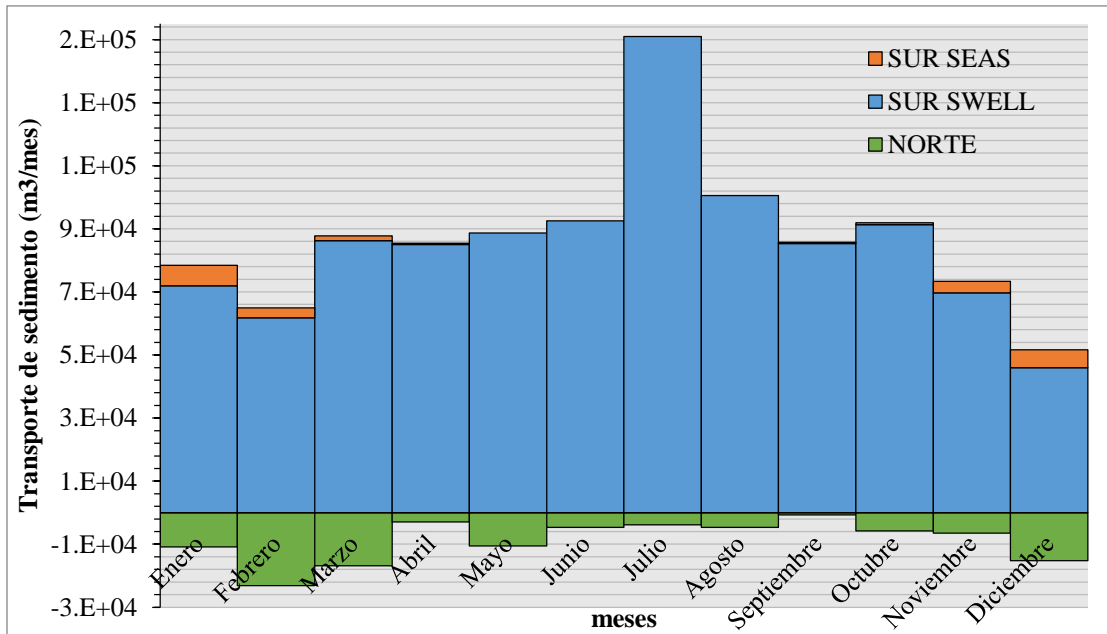
Meses	SUR (Ton/mes)		NORTE (Ton/mes)	Total neto (Ton/mes)
	Swell	Seas		
<b>Enero</b>	71.902	6.547	10.845	67.605
<b>Febrero</b>	61.785	3.124	23.121	41.787
<b>Marzo</b>	86.247	1.507	16.870	70.884
<b>Abril</b>	84.987	433	2.963	82.457
<b>Mayo</b>	88.657		10.535	78.122
<b>Junio</b>	92.551		4.676	87.875
<b>Julio</b>	151.017		3.911	147.105
<b>Agosto</b>	100.540		4.707	95.833
<b>Septiembre</b>	85.372	331	757	84.946
<b>Octubre</b>	91.306	581	5.747	86.139
<b>Noviembre</b>	69.709	3.606	6.538	66.776
<b>Diciembre</b>	459.26	5.725	15.194	36.457
<b>Total</b>	948.769	21.854	105.865	864.758
<b>Promedio Mensual</b>	79.064	2.731	8.822	72.063

Con respecto a las tablas anteriores, se consideró la probabilidad de ocurrencia para los diferentes tipos de oleajes en cada mes (tabla N°10), dando un mayor transporte de sedimentos en el mes de julio. Además se muestra una diferencia significativa de una ecuación con respecto a la otra, ya que Kamphuis considera los parámetros de la playa y CERC solo la energía, por lo tanto los resultados de la segunda tabla parecen ser más reales.

Con respecto a los tipos de oleajes, las siguientes figuras muestran las diferencias de un oleaje con respecto al otro para el transporte de sedimentos.



**Figura N°38:** Transporte de sedimentos proveniente del sur y norte con la ecuación de CERC por cada mes.



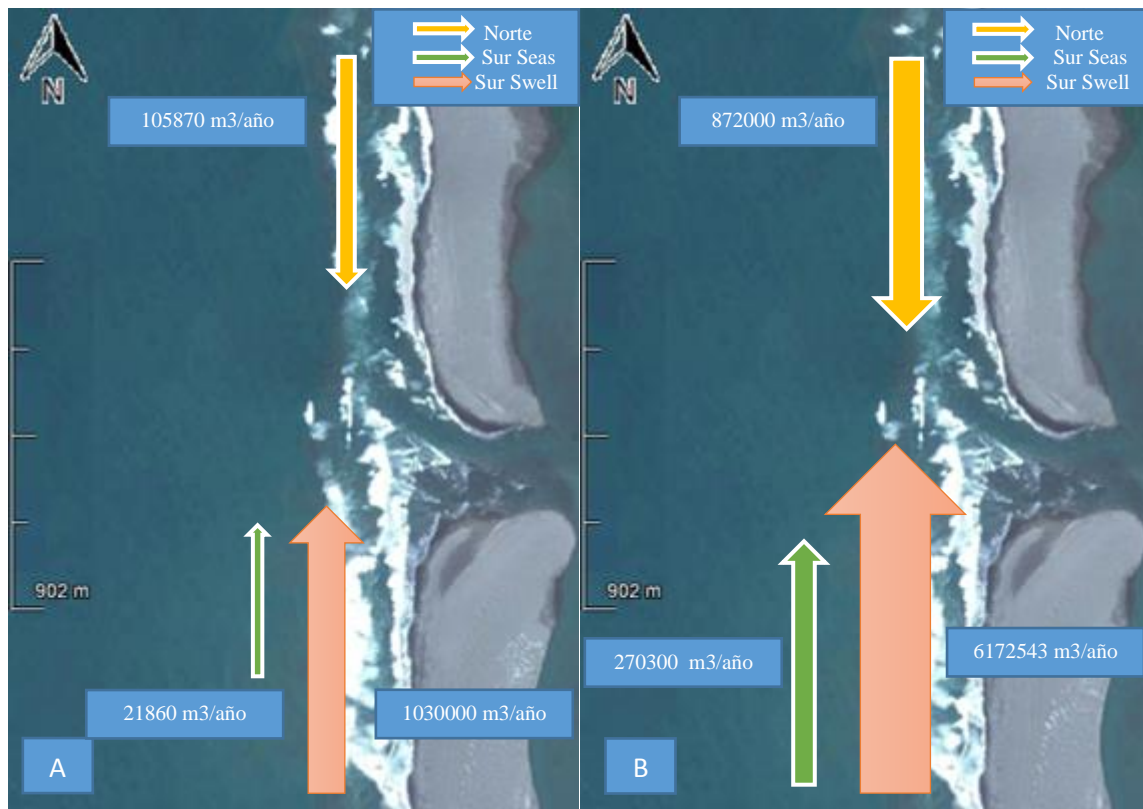
**Figura N°39:** Transporte de sedimentos proveniente del sur y norte con la ecuación de Kamphuis por cada mes.

En las figuras N°38 y N°39 se puede apreciar la diferencia del tipo de oleaje, destacando que el swell transporta más sedimento que el seas y el norte. Se debe tener en cuenta que solo los meses de Mayo a Agosto se consideró oleaje total (seas mas swell) debido a que era muy difícil separar el oleaje (figura N°16 y N°17). Se puede apreciar también que el mayor transporte de sedimentos para el tipo de oleaje seas es en Enero y Diciembre, que corresponde a un 18% y 9% aproximado del transporte del sur en las ecuaciones de CERC y Kamphuis respectivamente.

Para el oleaje del norte, con la ecuación de CERC se aprecia que el mayor transporte de sedimentos es en Mayo, en comparación a Kamphuis, que es en Febrero. Cabe decir que esto ocurre por la diferencia de expresiones entre una y la otra, ya que CERC considera más la energía de la onda pero no las características del terreno como la expresión de Kamphuis.

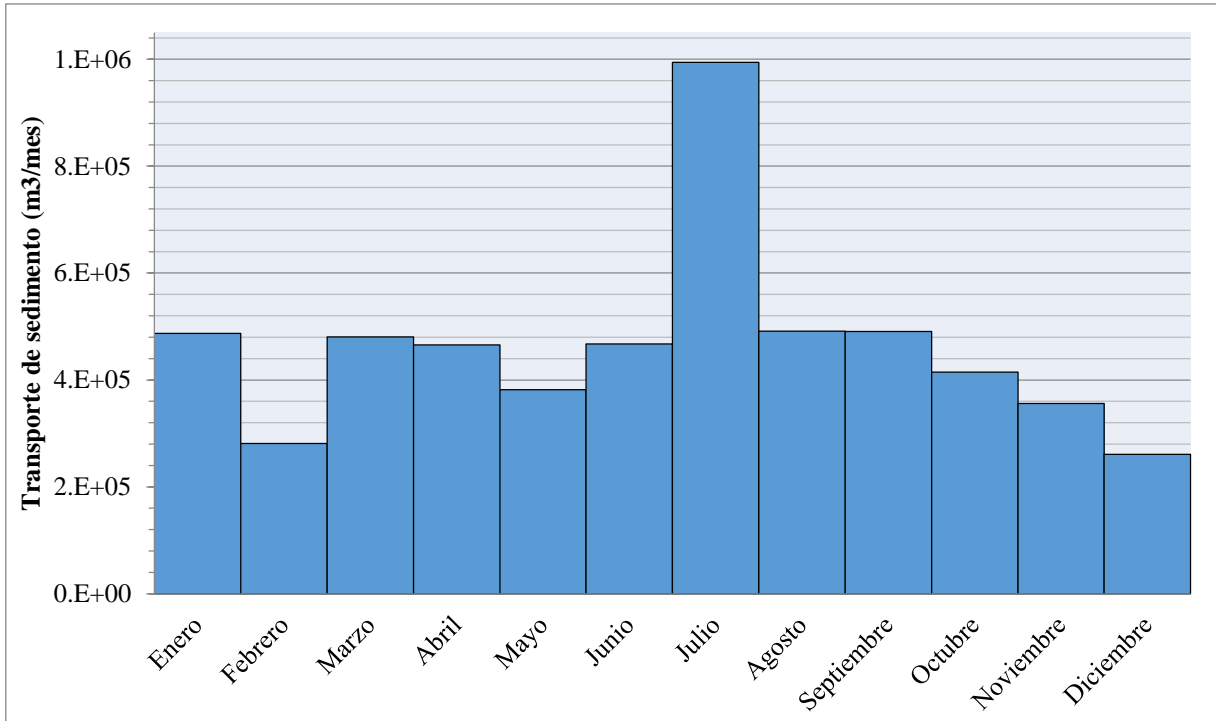
En las figuras N°38 y N°39, es notorio observar la estacionalidad en el transporte de sedimentos, destacando el mes de Julio, debido a que se considera no solo una gran magnitud de los parámetros de salida del modelo ( $H_s, \theta_p$ ), sí no por la mayor probabilidad de ocurrencia en el oleaje.

En la figura N°38, el transporte de sedimento es variable en el año, dando un transporte total de 872.000 m<sup>3</sup> para el norte, 270.000 m<sup>3</sup> para el sur seas y 5.746.000 m<sup>3</sup> para el sur swell. En la figura N°39, no se presentan diferencias significativas de forma con respecto a la figura anterior, dando un transporte total al año de 105.000 m<sup>3</sup> para el norte, 21.000 m<sup>3</sup> para el sur seas y 948.000 m<sup>3</sup> para el sur swell. En la figura N°39 se muestra el transporte de sedimentos de la playa.

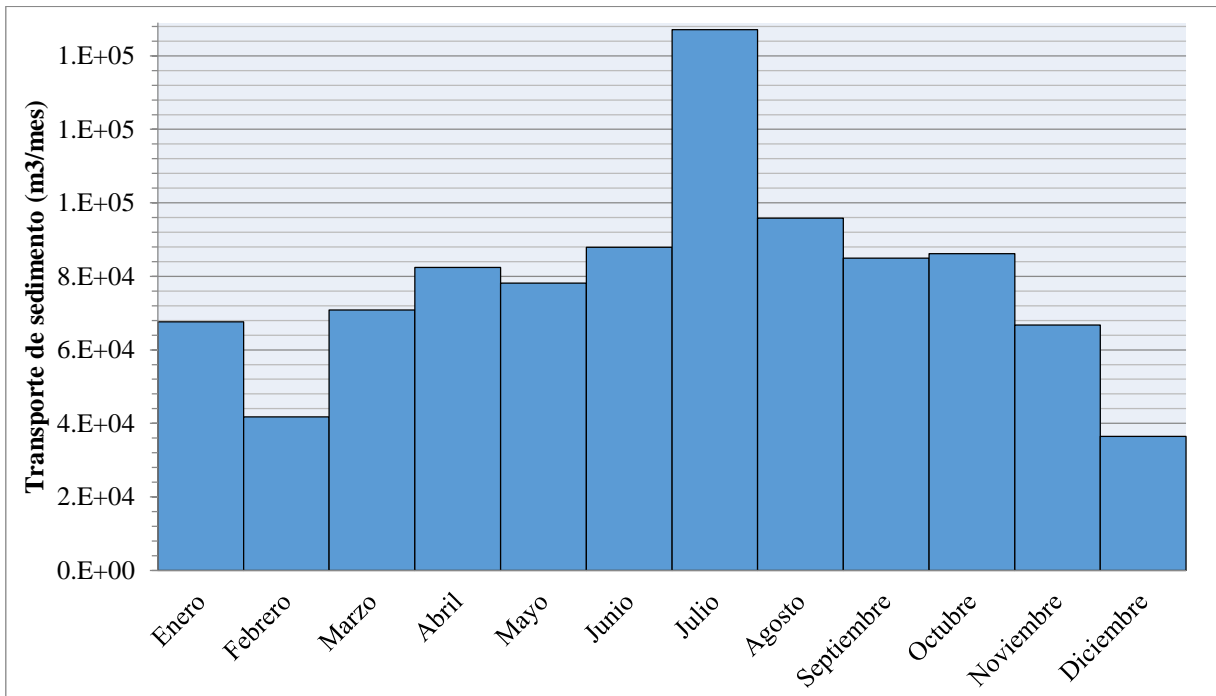


**Figura N°40:** A) Transporte de sedimentos con la ecuación de Kamphuis, B) Transporte de sedimentos con la ecuación de CERC.

Como el transporte de sedimentos neto da una resultante que se dirige hacia el norte, es lógico pensar que la migración de la barra de sedimentos va a seguir esa tendencia. En las figuras N°41 y N°42, se muestran los gráficos de transporte neto para todo el año, para la ecuación de CERC y Kamphuis.



**Figura N°41:** Transporte de sedimento neto para todo el año. Gráfico creado utilizando la ecuación de CERC.



**Figura N°42:** Transporte de sedimento neto para todo el año. Gráfico creado utilizando la ecuación de Kamphuis.

Los gráficos muestran bajas de los meses de Febrero y Diciembre, esto se debe a que las alturas de rompiente en el modelo (para el tipo de oleaje swell) son inferiores comparados con los otros meses, destacando la altura significativa. Además hay que tener en cuenta el transporte de sedimentos proveniente del noroeste, ya que es mayor comparada con los otros meses.

Para finalizar, las siguientes tablas muestran el transporte de sedimento total neto en el año, y los promedios de los parámetros representativos para cada tipo de oleaje.

**Tabla N°20:** Transporte de sedimento en el año para cada tipo de oleaje.

Tipo de oleaje	Transporte de sedimento (m <sup>3</sup> /año)	
	CERC	Kamphuis
<b>Sur Swell</b>	6.172.543	1.209.998
<b>Sur Seas</b>	270.288	21.854
<b>Norte</b>	872.000	106.000
<b>Total</b>	6.442.831	1.231.852

**Tabla N°21:** Promedios anuales de cada parámetro según el tipo de oleaje.

Tipo de oleaje	H <sub>s</sub> promedio (m)	T <sub>p</sub> promedio (s)	θ <sub>p</sub> promedio (°)	Probabilidad de ocurrencia (%)	Meses que se presentan
<b>Sur Swell</b>	2.83	12.16	225.61	84.26	Enero – Diciembre
<b>Sur Seas</b>	2.87	7.00	203.22	15.15	Septiembre – Abril
<b>Norte</b>	2.76	11.81	299.75	3.74	Enero – Diciembre

## 6. Conclusiones.

El modelo SWAN es una excelente herramienta capaz de generar propagaciones de oleajes en grandes extensiones. En el modelo, el oleaje se propaga de la forma que se esperaba, dando resultados cercanos a los datos medidos de la ADCP, con errores porcentuales promedio de  $H_s=17.5\%$ ,  $T_p=17.4\%$  y  $\theta_p=3.1\%$ . Por lo tanto, se cumplió el objetivo principal del estudio, de obtener parámetros con valores aceptables del modelo, para saber la tasa de sedimentación total neta en el año.

El tipo de oleaje se distingue en ciertas estaciones del año, cambiando sus parámetros significativamente en verano e invierno. Cabe destacar que el tipo de oleaje Sur Swell es el que más se manifiesta durante todo el año, debido al tener una mayor probabilidad de ocurrencia y que sus parámetros son de gran escala.

Grandes diferencias se pueden apreciar entre las ecuaciones de transporte de sedimentos, valorando la expresión de Kamphuis, debido a que considera la topografía y parámetros del sedimento, transportando un total neto de  $1.233.852\text{ m}^3$  hacia el norte. Con respecto a la expresión CERC, no es recomendada utilizarla, ya que sólo considera la energía de la ola y no morfología de la región a estudiar, transportando un total neto de  $6.442.831\text{ m}^3$  hacia el norte.

En el programa, se debe tener en cuenta ciertas variables o procesos que pueden sensibilizar el modelo, como el caso de la dispersión direccional, que puede cambiar bruscamente la dirección del oleaje; con los coeficientes del espectro JONSWAP, que puede cambiar la altura significativa; en la ortogonalidad de la malla, que puede alterar los parámetros ( $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta_p$ ) en la refracción del oleaje. Por ello, se debe tener en cuenta los valores de entrada para la correcta modelación.

Tener en cuenta que los estudios de tasa de sedimentación, son aplicables a temas constructivos que pueden provocar pérdidas millonarias, como el caso de puertos (atraco de barcos), o estructuras como espigones (barra de sedimentación).

## 7. Bibliografías.

*Jose Rafael Campino, 2011. Estudio de Estuarios y Lagunas Costeras en Chile centro-sur: Casos Rio Mataquito y Estero Nilanhue.*

*Jose Beya, Ariel Gallardo, Felipe Lucero, Patricio Catalan y Andres Puelma. Marzo 2016. Incertidumbre en la estimación de la altura significativa espectral y el periodo energético en el modelado de propagacion de oleaje – caso región de Valparaiso.*

*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.*

*Debora Idier, Bruno Castelle, Elodie Charles, Cyril Mallet, 2013. Longshore sediment flux hindcast: spatio-temporal variability along the SW Atlantic coast of France. Journal of Coastal Research.*

*Paul D. Komar and Douglas L. Inman. Octubre 1970. Longshore Sand Transport on Beaches.*

*William Kamphuis, Member, ASCE, 1991. Alongshore Sediment Transport Rate.*

*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, 2008.*

*Deltares, 4.00 ed. Delft3D-wave User Manual, 2011.*

*Leo H. Holthuijisen, 2007. Waves in oceanic and Coastal Waters. Cambridge.*

*Joao Mil-Homens, Roshanka Ranasinghe, J.S.M. van Thiel de Vries, M.J.F. Stive. 2013. Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas.*

## 8. Anexos.

### Tablas de incidencia altura significativa (m).

Enero

DIRECCION	1 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.50	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NW	0	4	0	0	0	0	0	0	4	0.12
WNW	2	73	82	73	23	7	1	0	261	8.02
W	0	10	20	6	1	0	0	0	37	1.14
WSW	11	37	76	33	14	4	0	0	175	5.38
SW	12	158	406	482	421	263	53	4	1799	55.30
SSW	5	51	123	218	316	176	59	17	965	29.66
S	0	1	1	10	0	0	0	0	12	0.37
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	30	334	708	822	775	450	113	21	3253	100.00
<b>A (%)</b>	0.92	10.27	21.76	25.27	23.82	13.83	3.47	0.65	100.00	

Febrero

DIRECCION	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	5 - 5.5	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NW	0	5	3	7	5	0	0	0	0	20	0.63
WNW	16	7	87	50	18	11	0	0	0	189	5.95
W	9	19	25	20	5	0	0	0	0	78	2.46
WSW	12	60	91	92	20	18	15	0	0	308	9.70
SW	16	200	457	546	279	145	51	4	2	1700	53.56
SSW	9	33	169	235	239	139	42	7	0	873	27.50
S	0	0	0	5	1	0	0	0	0	6	0.19
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	62	324	832	955	567	313	108	11	2	3174	100.00
<b>A (%)</b>	1.95	10.21	26.21	30.09	17.86	9.86	3.40	0.35	0.06	100.00	

## Marzo

DIRECCION	1 a 1.5	1.5 a 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	5 - 5.5	5.5 - 6	6 - 6.5	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0.09
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.03
N	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0.09
NNW	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	5	0.14
NW	0	0	8	4	1	0	0	0	0	0	0	13	0.37
WNW	14	33	48	19	3	0	0	0	0	0	0	117	3.35
W	5	25	19	8	1	0	0	0	0	0	0	58	1.66
WSW	7	97	113	82	49	25	10	0	0	0	0	383	10.96
SW	25	190	433	640	596	366	104	26	13	5	2	2400	68.67
SSW	0	47	121	123	108	57	27	7	0	0	0	490	14.02
S	0	0	2	6	10	2	1	0	0	0	0	21	0.60
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.03
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	51	392	747	892	768	450	142	33	13	5	2	3495	100
<b>A (%)</b>	1.46	11.22	21.37	25.52	21.97	12.88	4.06	0.94	0.37	0.14	0.06	100.00	

## Abril

DIRECCION	0 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	5 - 5.5	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNW	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.03
NW	0	0	0	2	1	6	1	0	0	0	0	10	0.30
WNW	0	0	0	6	7	5	0	0	0	0	0	18	0.53
W	0	0	0	9	4	1	6	0	0	0	0	20	0.59
WSW	0	5	20	91	124	59	50	30	15	7	4	405	12.04
SW	5	1	42	172	433	518	458	264	136	100	22	2151	63.92
SSW	0	0	14	46	126	212	165	120	41	20	8	752	22.35
S	0	0	0	0	0	2	4	2	0	0	0	8	0.24
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	5	6	76	326	696	803	684	416	192	127	34	3365	100.00
<b>A (%)</b>	0.15	0.18	2.26	9.69	20.68	23.86	20.33	12.36	5.71	3.77	1.01	100.000	

Mayo

DIRECCION	0 a 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	1	2	1	1	0	0	5	0.14
NNW	0	2	3	14	5	4	0	28	0.80
NW	0	1	5	19	13	0	0	38	1.09
WNW	0	0	8	20	30	4	0	62	1.78
W	3	26	99	51	20	0	0	199	5.71
WSW	0	86	286	184	24	19	4	603	17.30
SW	3	237	907	783	162	29	12	2133	61.19
SSW	0	50	154	157	42	0	0	403	11.56
S	0	4	11	0	0	0	0	15	0.43
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>407</b>	<b>1475</b>	<b>1229</b>	<b>297</b>	<b>56</b>	<b>16</b>	<b>3486</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>0.17</b>	<b>11.68</b>	<b>42.31</b>	<b>35.26</b>	<b>8.52</b>	<b>1.61</b>	<b>0.46</b>	<b>100.000</b>	

Junio

DIRECCION	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8	Total	A (%)
E	1	0	0	0	0	0	0	1	0.03
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	1	0	0	0	0	0	1	0.03
NNE	0	2	0	0	0	0	0	2	0.06
N	1	10	3	0	1	0	0	15	0.44
NNW	0	16	12	8	1	0	0	37	1.10
NW	0	5	18	8	3	0	0	34	1.01
WNW	4	16	16	13	3	0	0	52	1.54
W	8	35	9	12	3	4	0	71	2.10
WSW	74	284	283	198	66	15	5	925	27.42
SW	102	660	590	329	52	5	0	1738	51.51
SSW	30	201	148	76	11	0	0	466	13.81
S	0	14	5	0	0	0	0	19	0.56
SSE	1	4	1	0	0	0	0	6	0.18
SE	0	1	1	0	0	0	0	2	0.06
ESE	0	4	1	0	0	0	0	5	0.15
<b>Total</b>	<b>221</b>	<b>1253</b>	<b>1087</b>	<b>644</b>	<b>140</b>	<b>24</b>	<b>5</b>	<b>3374</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>6.55</b>	<b>37.14</b>	<b>32.22</b>	<b>19.09</b>	<b>4.15</b>	<b>0.71</b>	<b>0.15</b>	<b>100.000</b>	

## Julio

DIRECCION	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8	Total	A (%)
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	1	0	0	0	0	1	0.03
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
E	0	3	4	1	0	0	0	8	0.23
ESE	2	4	7	4	0	0	0	17	0.49
SE	1	3	9	5	0	0	0	18	0.52
SSE	0	8	21	12	0	0	0	41	1.18
S	26	76	68	26	0	0	0	196	5.62
SSW	124	301	328	121	29	6	3	912	26.16
SW	205	600	677	271	65	5	1	1824	52.32
WSW	74	206	118	43	9	0	0	450	12.91
W	8	8	0	0	0	0	0	16	0.46
WNW	1	0	0	0	0	0	0	1	0.03
WN	0	1	0	0	0	0	0	1	0.03
NNW	0	0	1	0	0	0	0	1	0.03
<b>Total</b>	441	1210	1234	483	103	11	4	3486	100.00
<b>A (%)</b>	12.65	34.71	35.40	13.86	2.95	0.32	0.11	100.000	

## Agosto

DIRECCION	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8	Total	A (%)
E	0	1	0	0	0	0	0	1	0.03
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	4	8	5	0	0	0	17	0.49
NNW	3	10	18	4	0	0	0	35	1.00
NW	0	1	21	5	2	0	0	29	0.83
WNW	0	10	9	2	4	0	0	25	0.72
W	23	77	40	15	11	0	0	166	4.76
WSW	132	389	262	107	42	8	4	944	27.08
SW	132	588	602	274	54	0	0	1650	47.33
SSW	102	263	185	42	10	0	0	602	17.27
S	5	7	1	0	0	0	0	13	0.37
SSE	0	1	0	0	0	0	0	1	0.03
SE	0	1	0	0	0	0	0	1	0.03
ESE	0	2	0	0	0	0	0	2	0.06
<b>Total</b>	397	1354	1146	454	123	8	4	3486	100.00
<b>A (%)</b>	11.39	38.84	32.87	13.02	3.53	0.23	0.11	100.000	

## Septiembre

DIRECCION	0 a 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	1	0	0	0	0	1	0.03
NNW	0	7	2	7	0	0	0	16	0.47
NW	0	0	8	11	2	0	0	21	0.62
WNW	0	1	1	10	5	3	3	23	0.68
W	0	10	10	28	11	2	0	61	1.81
WSW	6	124	369	190	56	11	2	758	22.47
SW	3	198	792	616	228	22	3	1862	55.19
SSW	0	55	289	189	60	6	0	599	17.75
S	0	2	17	7	0	0	0	26	0.77
SSE	0	1	0	0	0	0	0	1	0.03
SE	0	2	0	0	0	0	0	2	0.06
ESE	0	4	0	0	0	0	0	4	0.12
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>404</b>	<b>1489</b>	<b>1058</b>	<b>362</b>	<b>44</b>	<b>8</b>	<b>3374</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>0.27</b>	<b>11.97</b>	<b>44.13</b>	<b>31.36</b>	<b>10.73</b>	<b>1.30</b>	<b>0.24</b>	<b>100.000</b>	

## Octubre

DIRECCION	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	5 - 5.5	5.5 a 6	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0.03
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	3	0.09
NNW	0	0	0	1	2	2	5	0	0	0	10	0.29
NW	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	4	0.11
WNW	0	5	2	2	1	0	0	0	0	0	10	0.29
W	5	0	14	12	0	0	0	0	0	0	31	0.89
WSW	7	70	101	123	120	63	46	4	4	0	538	15.43
SW	23	148	435	576	633	313	189	70	26	5	2418	69.36
SSW	2	70	97	134	100	25	11	6	11	3	459	13.17
S	0	3	6	0	1	2	0	0	0	0	12	0.34
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>296</b>	<b>657</b>	<b>849</b>	<b>861</b>	<b>406</b>	<b>251</b>	<b>80</b>	<b>41</b>	<b>8</b>	<b>3486</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>1.06</b>	<b>8.49</b>	<b>18.85</b>	<b>24.35</b>	<b>24.70</b>	<b>11.65</b>	<b>7.20</b>	<b>2.29</b>	<b>1.18</b>	<b>0.23</b>	<b>100.000</b>	

## Noviembre

DIRECCION	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	5 - 5.5	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNW	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.03
NW	2	7	5	1	0	0	0	0	0	15	0.44
WNW	0	7	2	0	2	0	0	0	0	11	0.33
W	4	16	6	14	3	0	0	0	0	43	1.27
WSW	15	95	54	68	45	33	1	0	0	311	9.22
SW	25	207	531	667	393	208	83	31	3	2148	63.66
SSW	8	62	181	189	178	149	57	9	4	837	24.81
S	0	0	3	5	0	0	0	0	0	8	0.24
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	<b>54</b>	<b>394</b>	<b>783</b>	<b>944</b>	<b>621</b>	<b>390</b>	<b>141</b>	<b>40</b>	<b>7</b>	<b>3374</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>1.60</b>	<b>11.68</b>	<b>23.21</b>	<b>27.98</b>	<b>18.41</b>	<b>11.56</b>	<b>4.18</b>	<b>1.19</b>	<b>0.21</b>	<b>100.000</b>	

## Diciembre

DIRECCION	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	4.5 - 5	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NW	0	0	6	2	0	0	0	0	8	0.23
WNW	4	43	43	13	0	0	0	0	103	2.95
W	0	3	12	4	0	0	0	0	19	0.55
WSW	4	48	55	37	19	11	2	0	176	5.05
SW	25	194	546	663	433	169	74	8	2112	60.59
SSW	8	44	257	333	258	130	31	1	1062	30.46
S	0	0	1	4	0	0	0	0	5	0.14
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.03
<b>Total</b>	<b>41</b>	<b>333</b>	<b>920</b>	<b>1056</b>	<b>710</b>	<b>310</b>	<b>107</b>	<b>9</b>	<b>3486</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>1.18</b>	<b>9.55</b>	<b>26.39</b>	<b>30.29</b>	<b>20.37</b>	<b>8.89</b>	<b>3.07</b>	<b>0.26</b>	<b>100.000</b>	

## Tablas de incidencia periodo peak (s).

Enero

DIRECCION	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NW	0	0	0	0	0	4	0	0	4	0.12
WNW	0	0	0	0	6	108	137	10	261	8.02
W	0	0	0	0	13	23	1	0	37	1.14
WSW	0	0	15	36	91	33	0	0	175	5.38
SW	5	23	207	872	627	60	5	0	1799	55.30
SSW	84	622	181	57	21	0	0	0	965	29.66
S	3	9	0	0	0	0	0	0	12	0.37
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	92	654	403	965	758	228	143	10	3253	100.00
<b>A (%)</b>	2.83	20.10	12.39	29.66	23.30	7.01	4.40	0.31	100.00	

Febrero

DIRECCION	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NW	0	0	0	0	0	9	11	0	20	0.63
WNW	0	0	0	0	24	52	102	11	189	5.95
W	0	0	0	0	29	42	7	0	78	2.46
WSW	0	0	4	57	163	81	3	0	308	9.70
SW	1	16	149	796	658	70	10	0	1700	53.56
SSW	54	381	280	102	45	10	1	0	873	27.50
S	2	4	0	0	0	0	0	0	6	0.19
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	57	401	433	955	919	264	134	11	3174	100.00
<b>A (%)</b>	1.80	12.63	13.64	30.09	28.95	8.32	4.22	0.35	100.00	

## Marzo

DIRECCION	2 -- 4	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ENE	0	2	1	0	0	0	0	0	0	3.00	0.09
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NNE	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
N	0	2	1	0	0	0	0	0	0	3.00	0.09
NNW	0	2	3	0	0	0	0	0	0	5.00	0.14
NW	0	0	3	0	0	0	0	7	3	13.00	0.37
WNW	0	0	2	0	0	4	59	49	3	117.00	3.35
W	0	0	3	2	0	11	35	7	0	58.00	1.66
WSW	0	0	6	44	123	142	57	11	0	383.00	10.96
SW	1	0	8	98	908	1059	282	37	7	2400.00	68.67
SSW	0	36	139	92	127	84	11	1	0	490.00	14.02
S	0	4	17	0	0	0	0	0	0	21.00	0.60
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
SE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>47</b>	<b>184</b>	<b>236</b>	<b>1158</b>	<b>1300</b>	<b>444</b>	<b>112</b>	<b>13</b>	<b>3495.00</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>0.03</b>	<b>1.34</b>	<b>5.26</b>	<b>6.75</b>	<b>33.13</b>	<b>37.20</b>	<b>12.70</b>	<b>3.20</b>	<b>0.37</b>	<b>100.00</b>	

## Abril

DIRECCION	2 -- 4	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NNW	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
NW	0	8	0	0	0	0	2	0	3	13.00	0.38
WNW	0	2	5	0	0	4	7	0	3	21.00	0.62
W	0	0	3	9	2	3	3	0	0	20.00	0.59
WSW	0	0	17	157	174	41	15	1	0	405.00	11.99
SW	0	4	50	583	1089	342	73	10	7	2158.00	63.88
SSW	20	139	71	183	277	60	2	0	0	752.00	22.26
S	1	7	0	0	0	0	0	0	0	8.00	0.24
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>160</b>	<b>146</b>	<b>932</b>	<b>1542</b>	<b>450</b>	<b>102</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>3378.00</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>0.65</b>	<b>4.74</b>	<b>4.32</b>	<b>27.59</b>	<b>45.65</b>	<b>13.32</b>	<b>3.02</b>	<b>0.33</b>	<b>0.38</b>	<b>100.00</b>	

## Mayo

DIRECCION	2 -- 4	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
N	0	2	3	0	0	0	0	0	0	5.00	0.14
NNW	0	5	15	8	0	0	0	0	0	28.00	0.80
NW	0	4	11	23	0	0	0	0	0	38.00	1.09
WNW	0	0	2	22	38	0	0	0	0	62.00	1.78
W	0	2	7	83	98	9	0	0	0	199.00	5.71
WSW	0	2	1	61	285	205	35	12	2	603.00	17.30
SW	0	5	0	33	554	1014	427	95	5	2133.00	61.19
SSW	2	15	30	27	69	206	50	4	0	403.00	11.56
S	0	8	7	0	0	0	0	0	0	15.00	0.43
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>43</b>	<b>76</b>	<b>257</b>	<b>1044</b>	<b>1434</b>	<b>512</b>	<b>111</b>	<b>7</b>	<b>3486.00</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>0.06</b>	<b>1.23</b>	<b>2.18</b>	<b>7.37</b>	<b>29.95</b>	<b>41.14</b>	<b>14.69</b>	<b>3.18</b>	<b>0.20</b>	<b>100.00</b>	

## Junio

DIRECCION	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NE	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
NNE	2	0	0	0	0	0	0	0	2.00	0.06
N	8	6	1	0	0	0	0	0	15.00	0.44
NNW	11	24	2	0	0	0	0	0	37.00	1.10
NW	2	18	14	0	0	0	0	0	34.00	1.01
WNW	2	18	28	4	0	0	0	0	52.00	1.54
W	1	3	46	15	6	0	0	0	71.00	2.10
WSW	1	0	49	353	381	113	27	1	925.00	27.42
SW	3	5	73	410	900	295	47	5	1738.00	51.51
SSW	7	39	38	139	182	58	3	0	466.00	13.81
S	8	11	0	0	0	0	0	0	19.00	0.56
SSE	4	2	0	0	0	0	0	0	6.00	0.18
SE	1	1	0	0	0	0	0	0	2.00	0.06
ESE	4	1	0	0	0	0	0	0	5.00	0.15
<b>Total</b>	<b>56</b>	<b>128</b>	<b>251</b>	<b>921</b>	<b>1469</b>	<b>466</b>	<b>77</b>	<b>6</b>	<b>3374.00</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>1.66</b>	<b>3.79</b>	<b>7.44</b>	<b>27.30</b>	<b>43.54</b>	<b>13.81</b>	<b>2.28</b>	<b>0.18</b>	<b>100.00</b>	

## Julio

DIRECCION	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NE	0	1	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
N	2	6	0	0	0	0	0	0	8.00	0.23
NNW	5	12	0	0	0	0	0	0	17.00	0.49
NW	2	12	4	0	0	0	0	0	18.00	0.52
WNW	1	2	30	8	0	0	0	0	41.00	1.18
W	2	3	85	94	12	0	0	0	196.00	5.62
WSW	1	3	116	372	344	54	22	0	912.00	26.16
SW	0	3	63	519	937	247	50	5	1824.00	52.32
SSW	8	51	59	112	157	55	8	0	450.00	12.91
S	14	2	0	0	0	0	0	0	16.00	0.46
SSE	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
SE	0	1	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
ESE	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>96</b>	<b>357</b>	<b>1105</b>	<b>1450</b>	<b>356</b>	<b>80</b>	<b>5</b>	<b>3486.00</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>1.06</b>	<b>2.75</b>	<b>10.24</b>	<b>31.70</b>	<b>41.59</b>	<b>10.21</b>	<b>2.29</b>	<b>0.14</b>	<b>100.00</b>	

## Agosto

DIRECCION	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
N	5	12	0	0	0	0	0	0	17.00	0.49
NNW	9	23	3	0	0	0	0	0	35.00	1.00
NW	0	25	4	0	0	0	0	0	29.00	0.83
WNW	0	5	14	6	0	0	0	0	25.00	0.72
W	0	5	60	96	5	0	0	0	166.00	4.76
WSW	0	0	84	471	325	56	8	0	944.00	27.08
SW	2	1	67	400	790	339	50	1	1650.00	47.33
SSW	16	49	50	143	241	80	23	0	602.00	17.27
S	12	1	0	0	0	0	0	0	13.00	0.37
SSE	0	1	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
SE	0	1	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
ESE	2	0	0	0	0	0	0	0	2.00	0.06
<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>123</b>	<b>282</b>	<b>1116</b>	<b>1361</b>	<b>475</b>	<b>81</b>	<b>1</b>	<b>3486.00</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>1.35</b>	<b>3.53</b>	<b>8.09</b>	<b>32.01</b>	<b>39.04</b>	<b>13.63</b>	<b>2.32</b>	<b>0.03</b>	<b>100.00</b>	

## Septiembre

DIRECCION	2 -- 4	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
N	0	1	0	0	0	0	0	0	0.00	1.00	0.03
NNW	1	9	6	0	0	0	0	0	0.00	16.00	0.47
NW	0	6	13	2	0	0	0	0	0.00	21.00	0.62
WNW	0	1	6	10	5	1	0	0	0.00	23.00	0.68
W	0	2	2	31	22	4	0	0	0.00	61.00	1.81
WSW	0	1	1	115	340	239	49	13	0.00	758.00	22.47
SW	0	0	12	91	428	931	328	67	5.00	1862.00	55.19
SSW	0	16	118	46	172	167	79	1	0.00	599.00	17.75
S	0	18	8	0	0	0	0	0	0.00	26.00	0.77
SSE	0	1	0	0	0	0	0	0	0.00	1.00	0.03
SE	0	2	0	0	0	0	0	0	0.00	2.00	0.06
ESE	0	4	0	0	0	0	0	0	0.00	4.00	0.12
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>61</b>	<b>166</b>	<b>295</b>	<b>967</b>	<b>1342</b>	<b>456</b>	<b>81</b>	<b>5.00</b>	<b>3374.00</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>0.03</b>	<b>1.81</b>	<b>4.92</b>	<b>8.74</b>	<b>28.66</b>	<b>39.77</b>	<b>13.52</b>	<b>2.40</b>	<b>0.15</b>	<b>100.00</b>	

## Octubre

DIRECCION	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ENE	0	1	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
N	0	2	1	0	0	0	0	0	3.00	0.09
NNW	0	0	10	0	0	0	0	0	10.00	0.29
NW	0	2	2	0	0	0	0	0	4.00	0.11
WNW	0	2	0	0	0	0	3	5	10.00	0.29
W	0	2	5	13	9	2	0	0	31.00	0.89
WSW	0	0	45	276	172	38	7	0	538.00	15.43
SW	0	0	75	665	1263	359	56	0	2418.00	69.36
SSW	42	136	32	102	108	35	4	0	459.00	13.17
S	8	4	0	0	0	0	0	0	12.00	0.34
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>50</b>	<b>149</b>	<b>170</b>	<b>1056</b>	<b>1552</b>	<b>434</b>	<b>70</b>	<b>5</b>	<b>3486.00</b>	<b>100.00</b>
<b>A (%)</b>	<b>1.43</b>	<b>4.27</b>	<b>4.88</b>	<b>30.29</b>	<b>44.52</b>	<b>12.45</b>	<b>2.01</b>	<b>0.14</b>	<b>100.00</b>	

## Noviembre

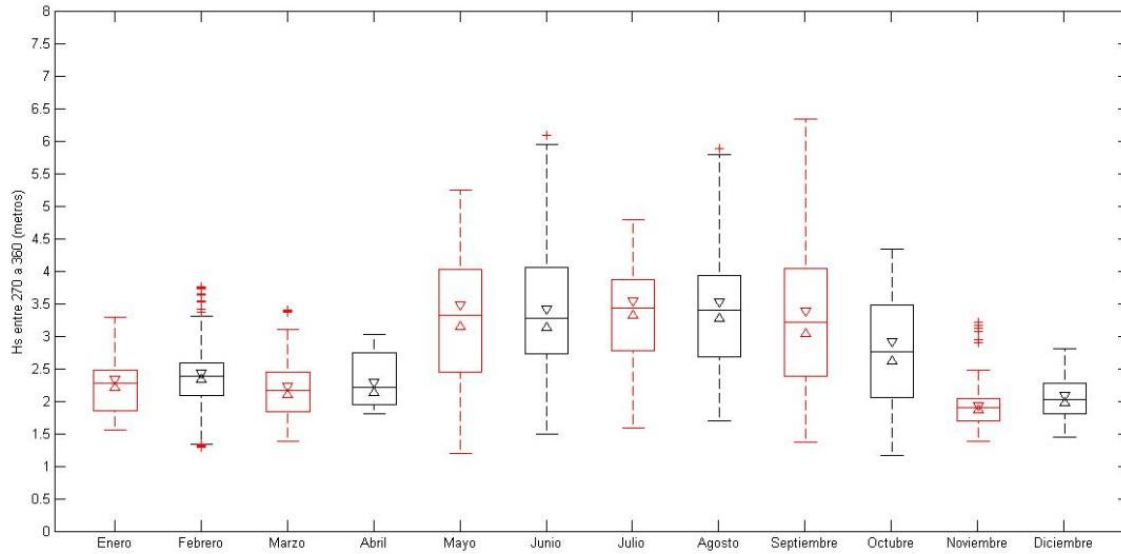
DIRECCION	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
NNW	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00	0.03
NW	1	0	0	0	0	0	13	1	15.00	0.44
WNW	0	2	0	0	0	6	3	0	11.00	0.33
W	0	3	15	12	1	10	2	0	43.00	1.27
WSW	0	0	43	158	87	16	7	0	311.00	9.22
SW	0	1	160	992	865	126	4	0	2148.00	63.66
SSW	64	350	150	151	103	18	1	0	837.00	24.81
S	6	2	0	0	0	0	0	0	8.00	0.24
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
<b>Total</b>	72	358	368	1313	1056	176	30	1	3374.00	100.00
<b>A (%)</b>	2.13	10.61	10.91	38.92	31.30	5.22	0.89	0.03	100.00	

## Diciembre

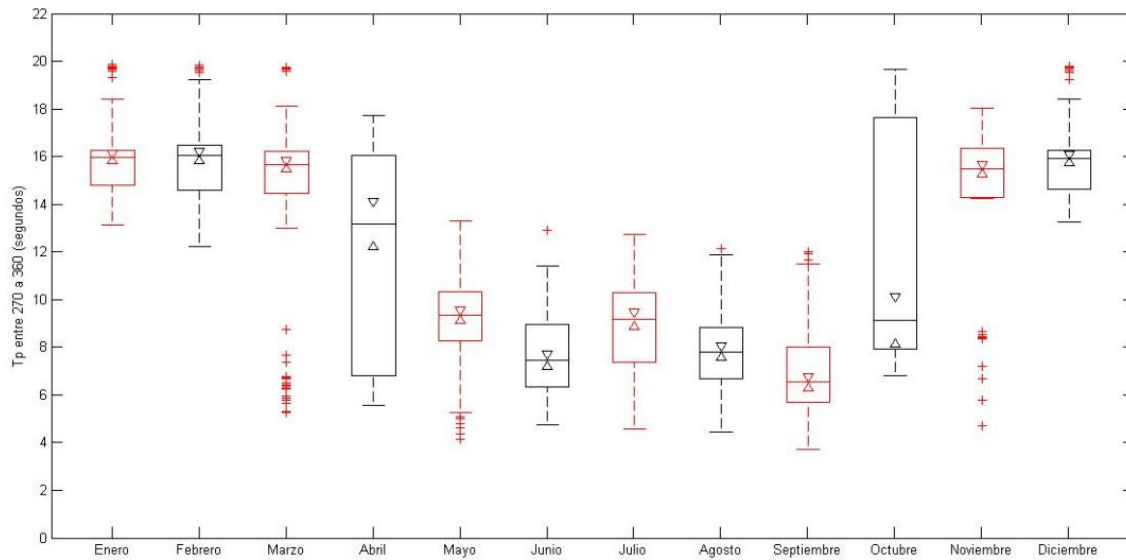
DIRECCION	2 -- 4	4 -- 6	6 --8	8 -- 10	10 -- 12	12 -- 14	14 -- 16	16 -- 18	18 -- 20	Total	A (%)
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
NW	0	0	0	0	0	4	0	0	4	0	0.00
WNW	0	0	0	0	6	108	137	10	38	0	0.00
W	0	0	0	0	13	23	1	0	0	0	0.00
WSW	0	0	15	36	91	33	0	0	4	0	0.00
SW	5	23	207	872	627	60	5	0	38	1	0.03
SSW	84	622	181	57	21	0	0	0	0	0	0.00
S	3	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<b>Total</b>	92	654	403	965	758	228	143	10	84	3337.00	100.00
<b>A (%)</b>	2.76	19.60	12.08	28.92	22.72	6.83	4.29	0.30	2.52	100.00	

## Diagrama de caja del oleaje proveniente del Norte.

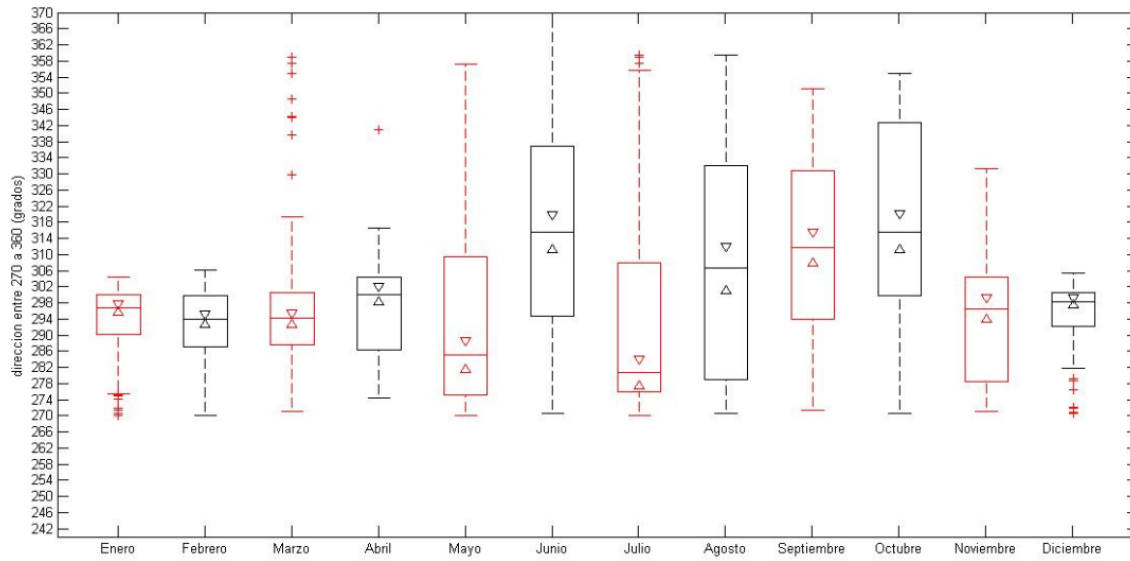
### Altura significativa (m).



### Periodo Peak (s).

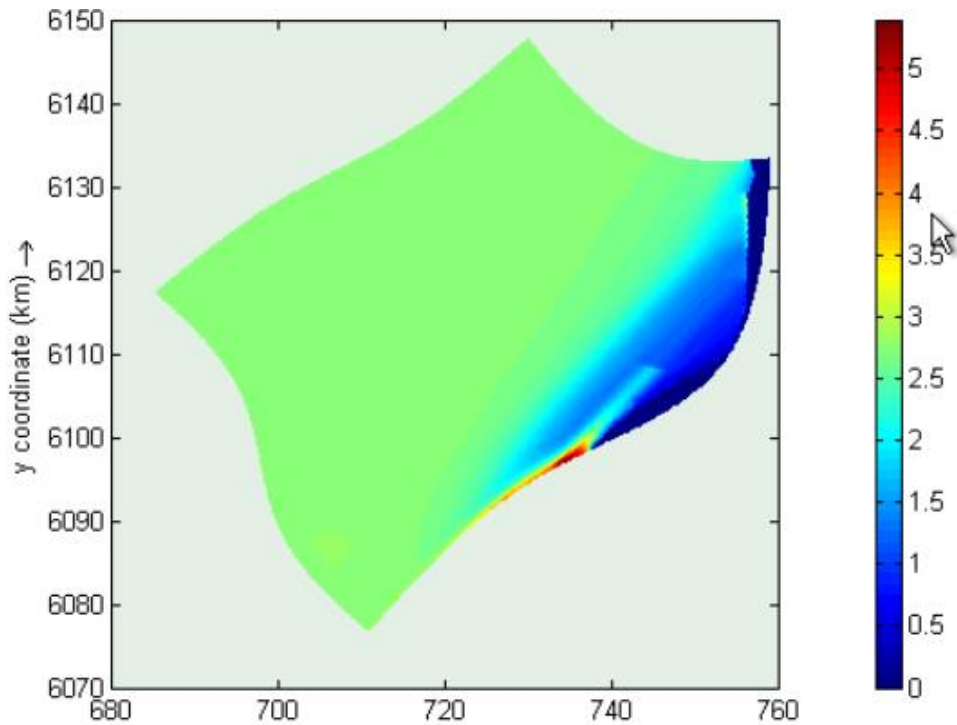


## Dirección (°).

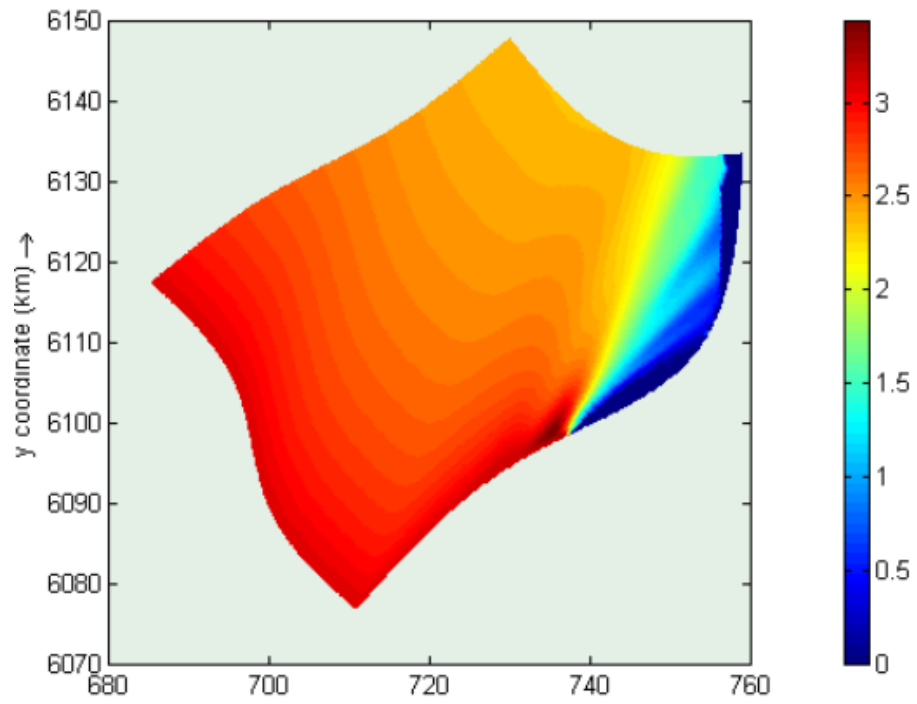


## Escenarios de modelación para cada mes.

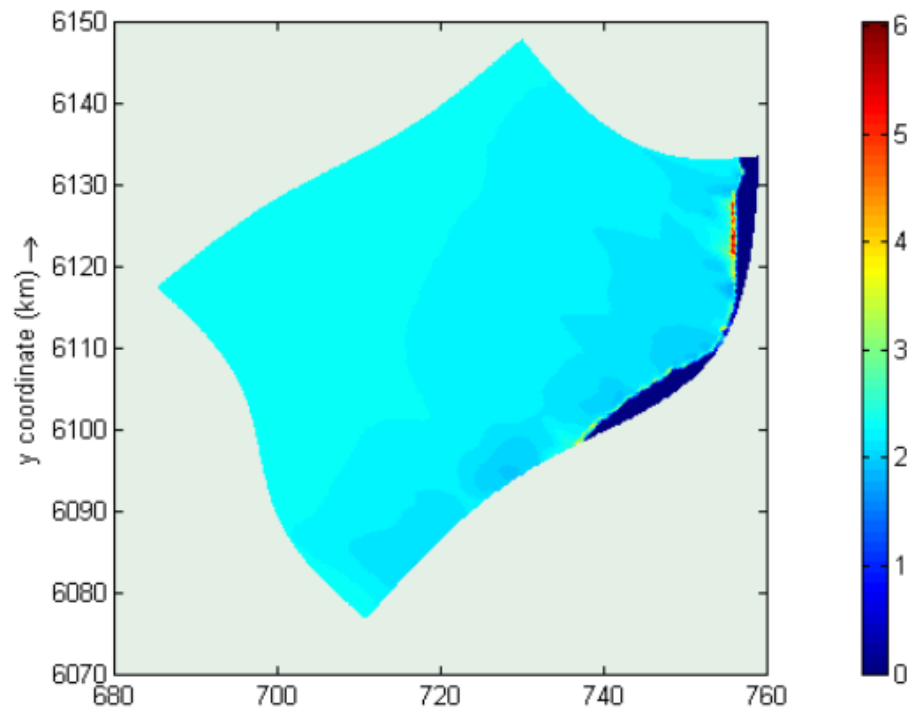
Enero sur swell.



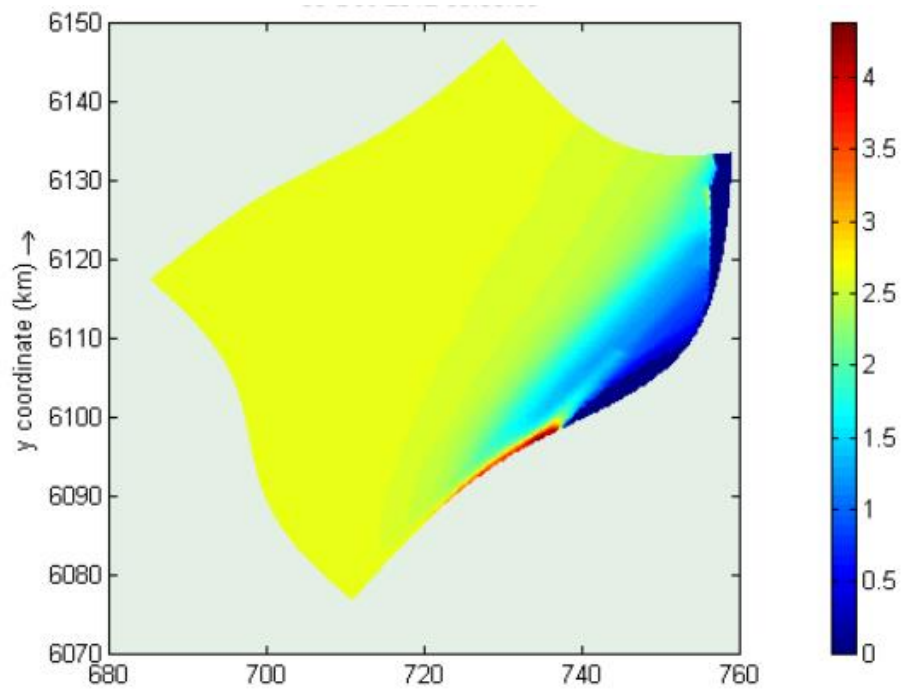
Enero sur seas.



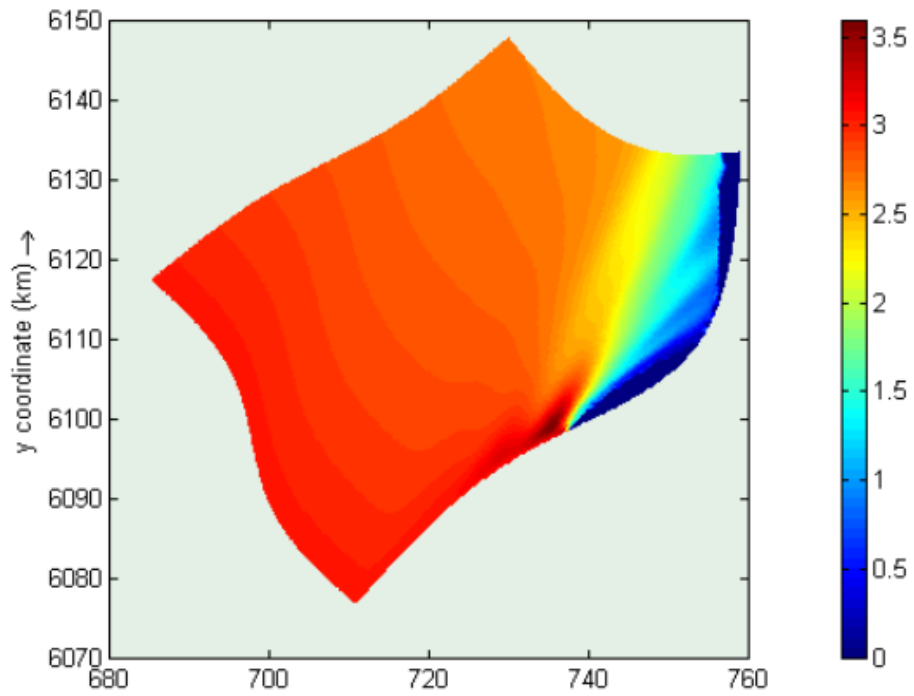
Enero Norte.



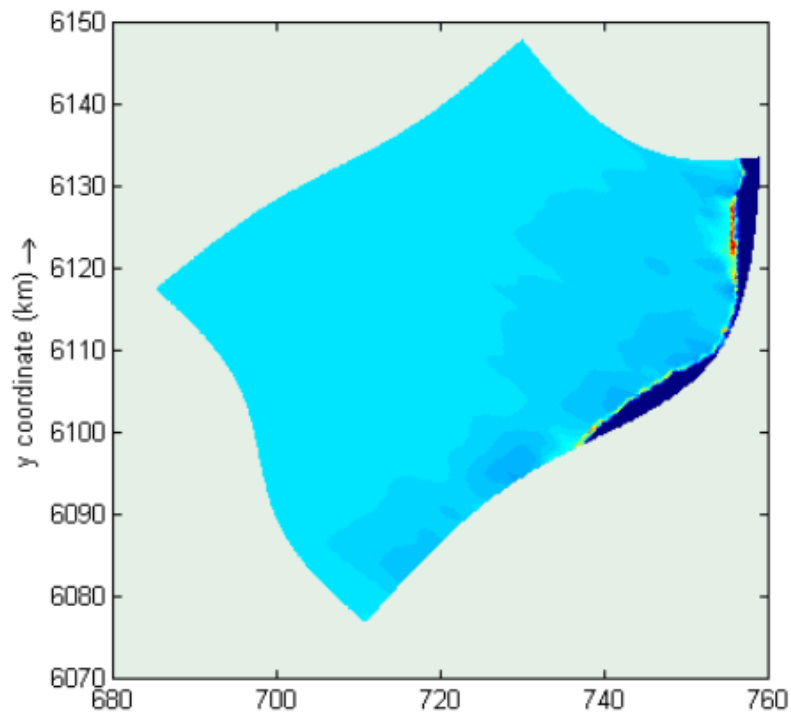
Febrero sur swell.



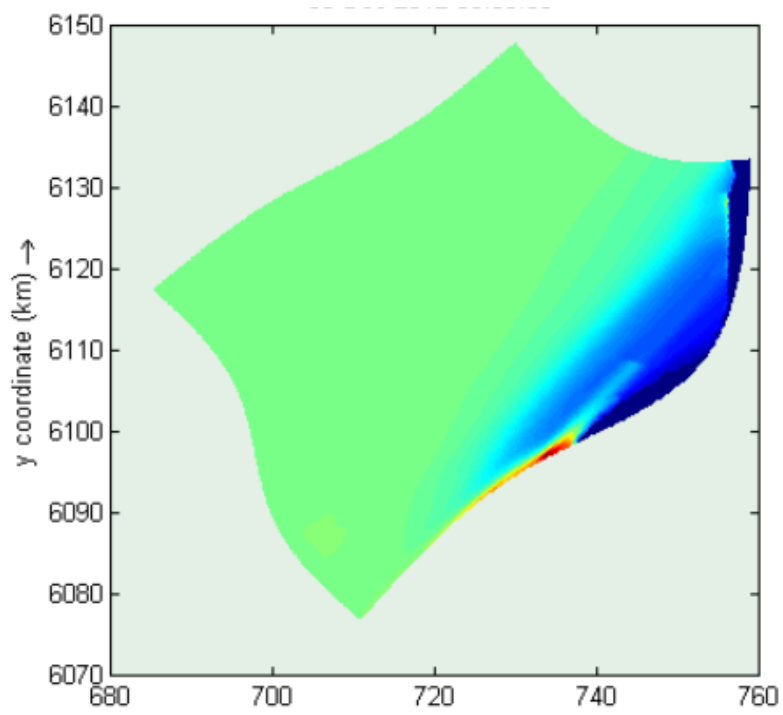
Febrero sur seas.



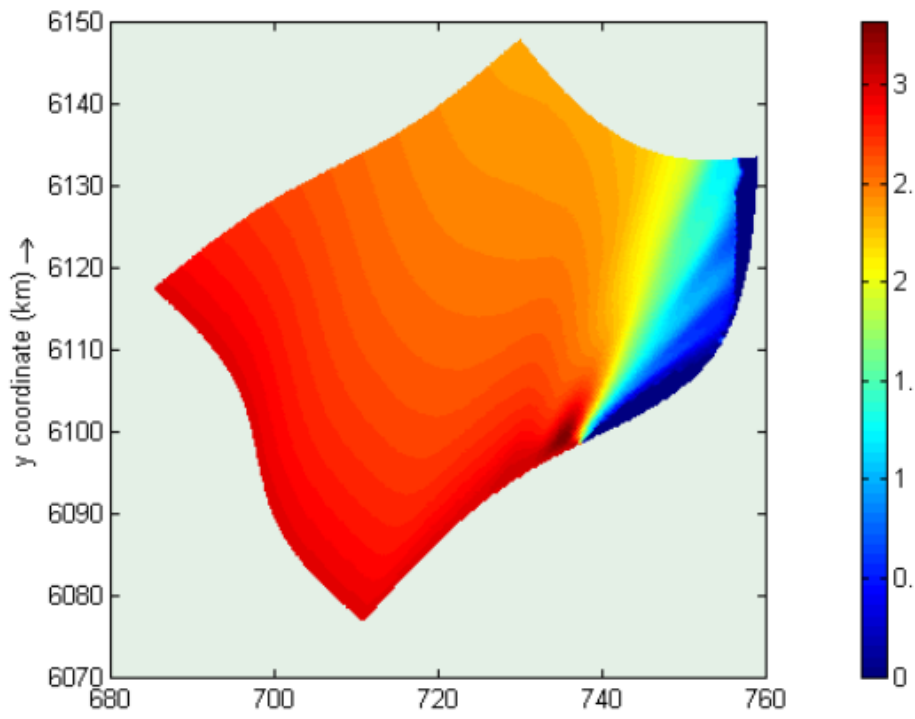
Febrero norte.



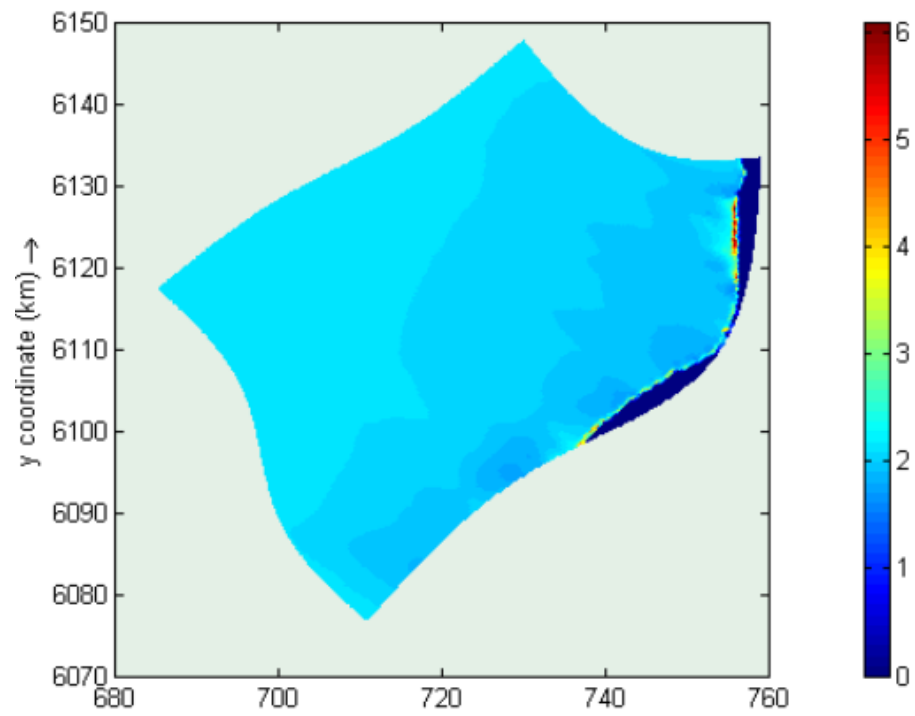
Marzo sur swell



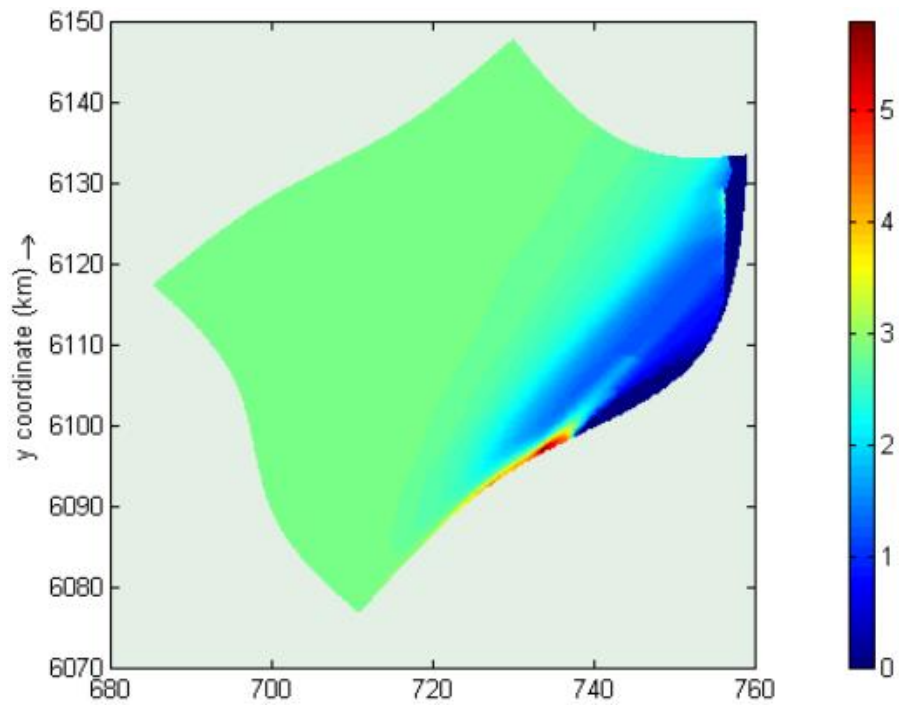
Marzo sur seas



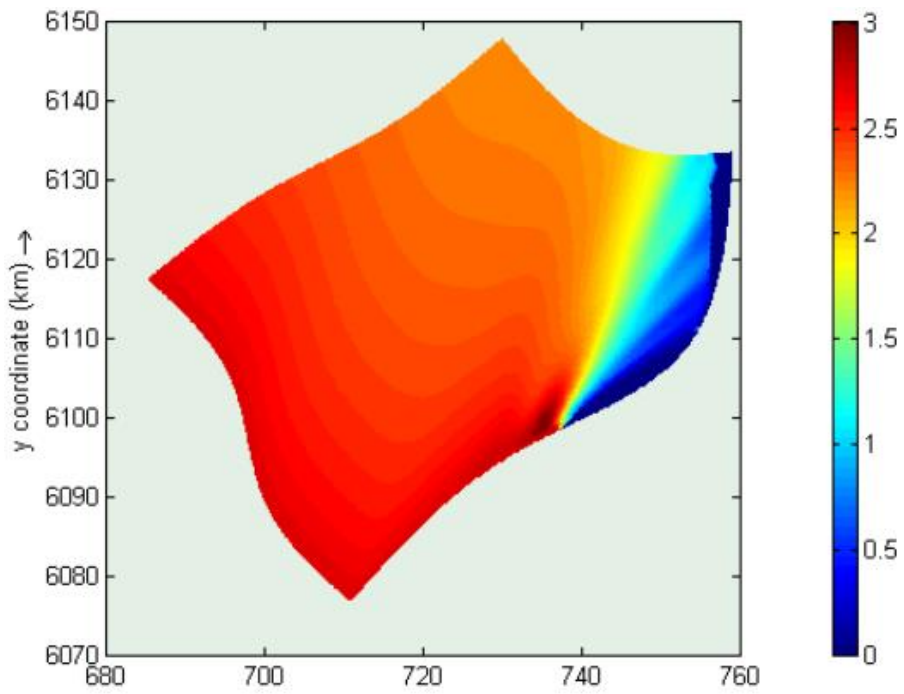
Marzo norte



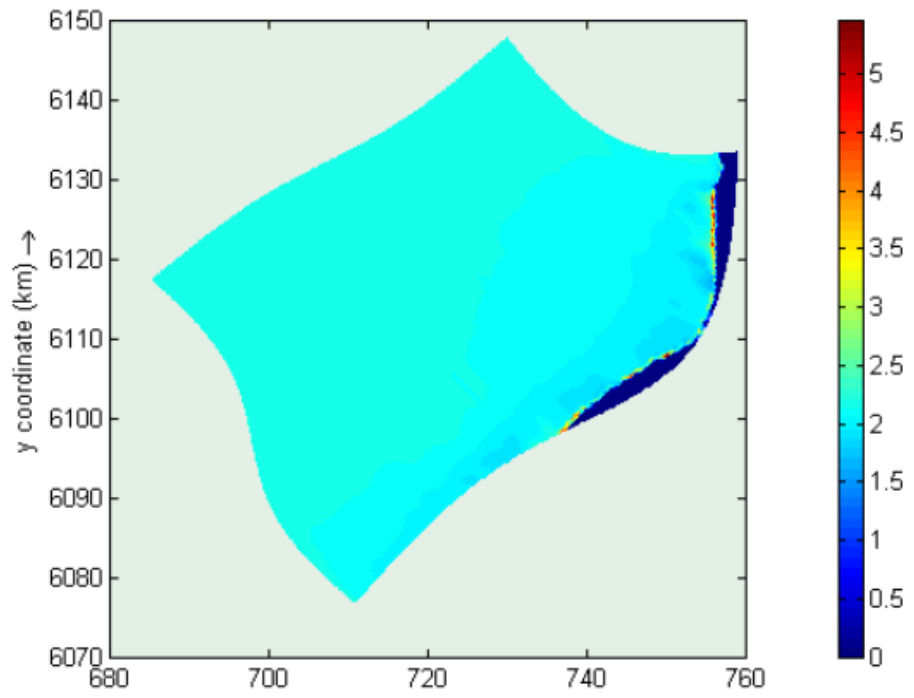
Abril sur swell



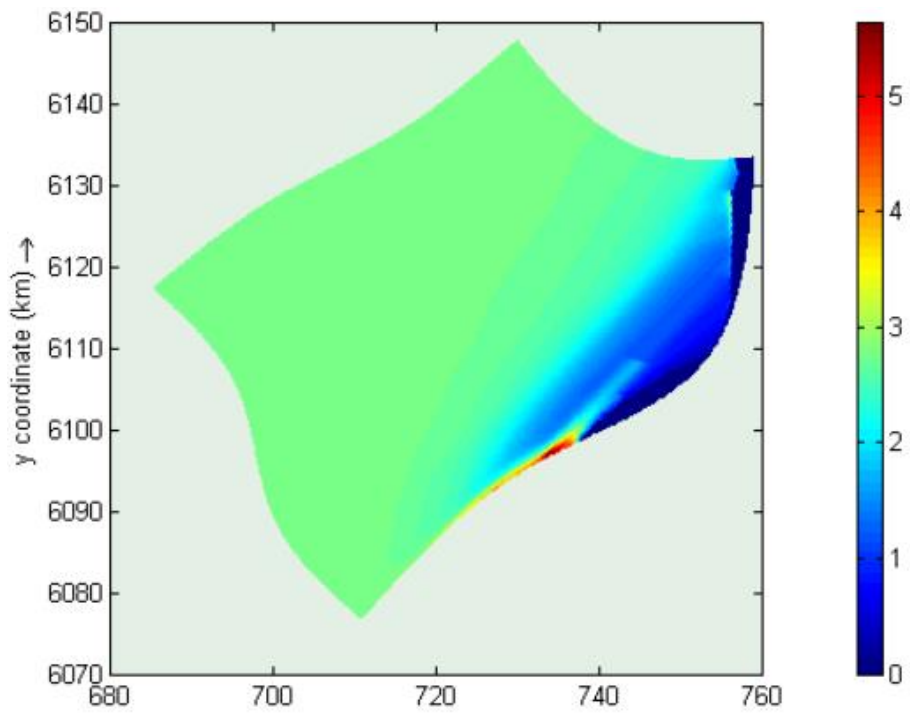
Abril sur seas



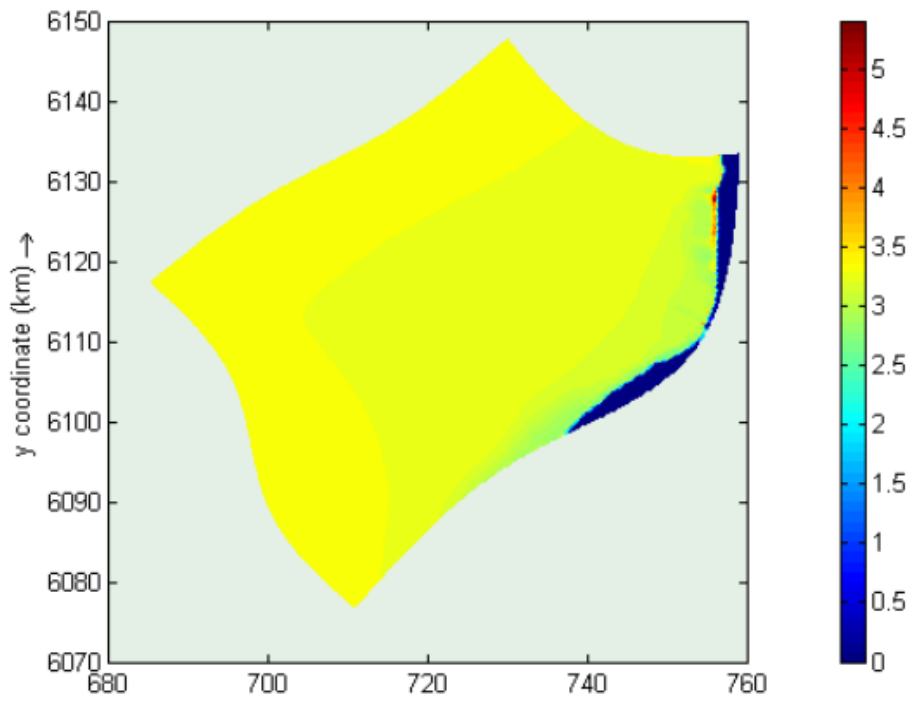
Abril Norte



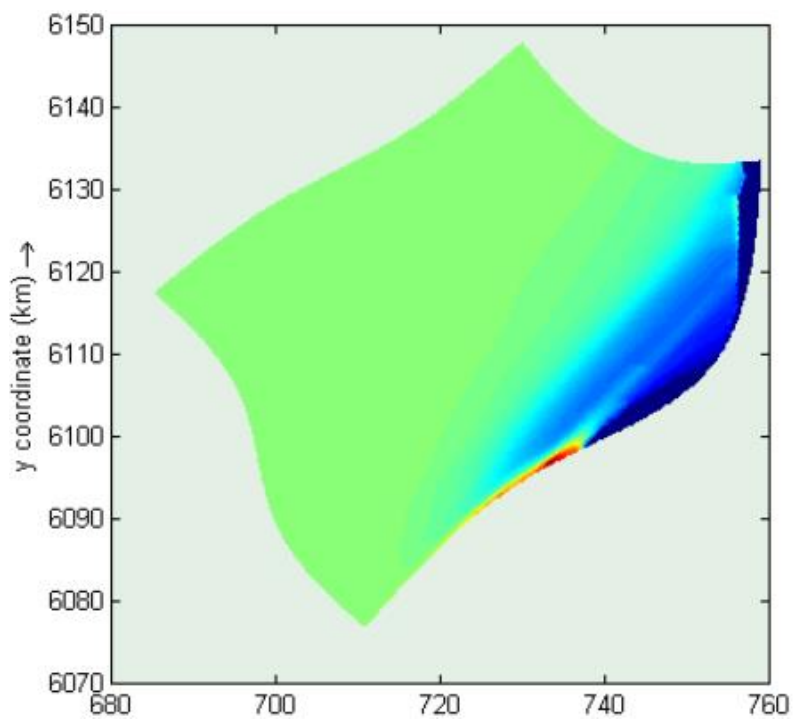
Mayo sur



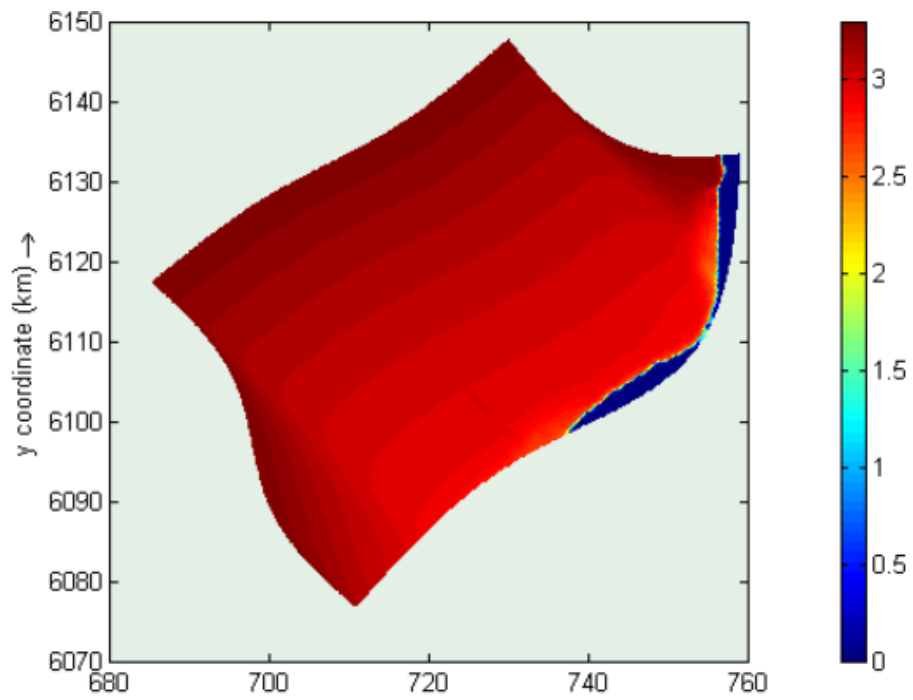
Mayo norte



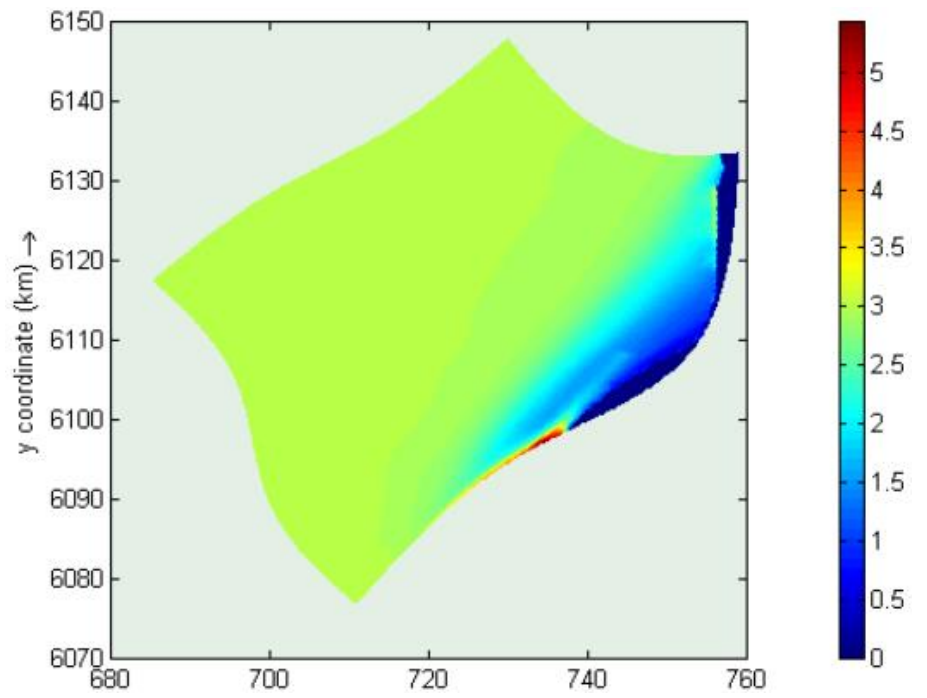
Junio sur



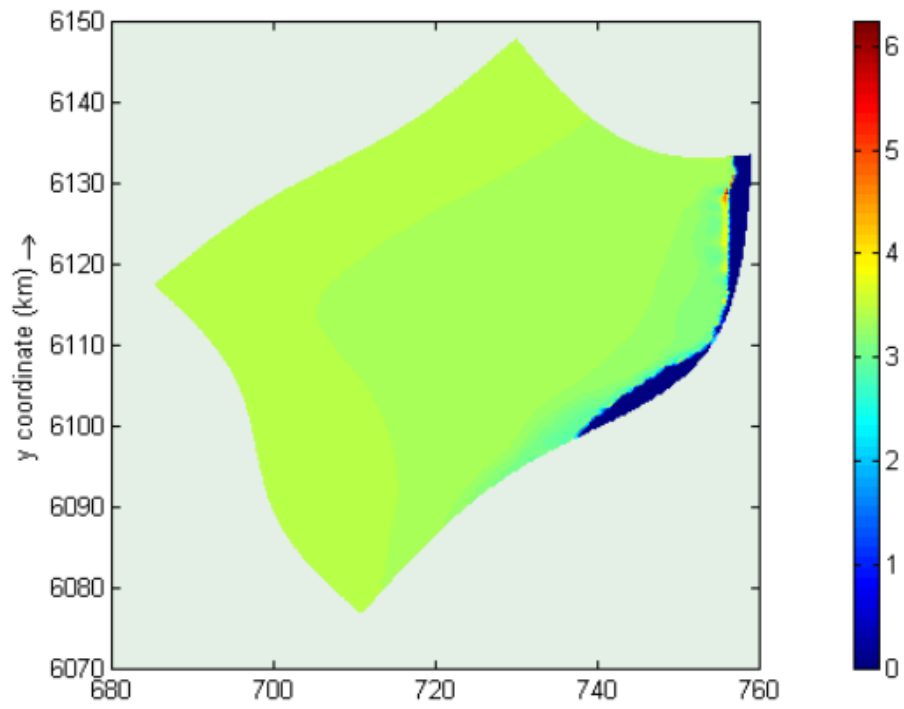
Junio Norte



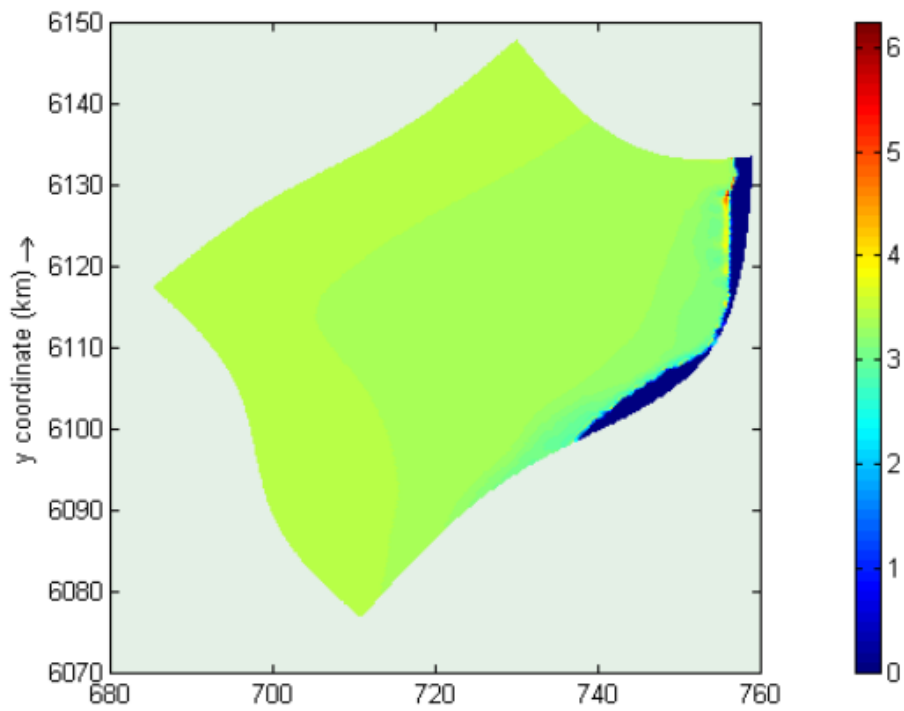
Julio sur



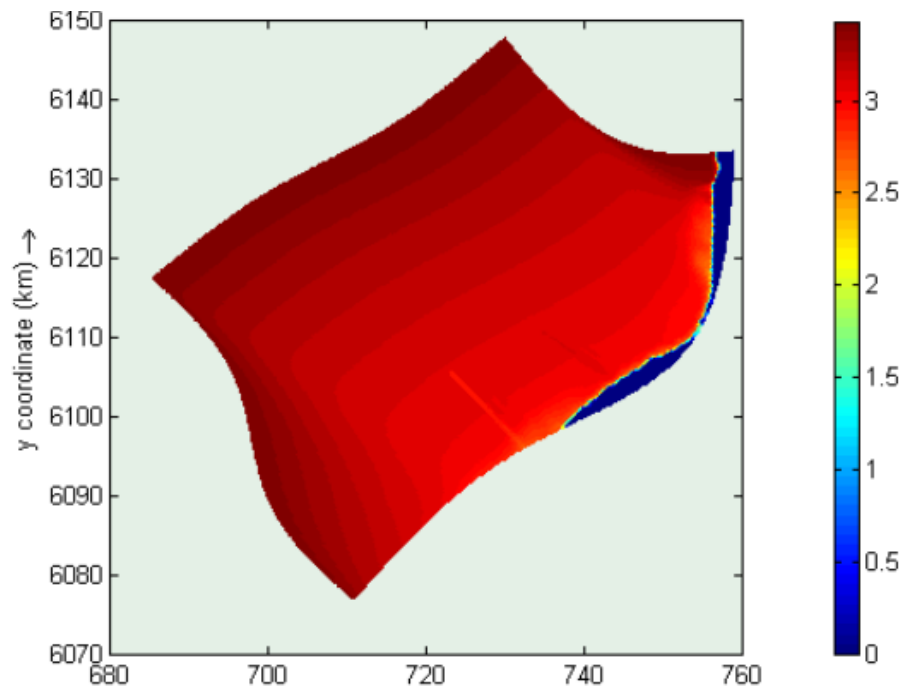
Julio norte



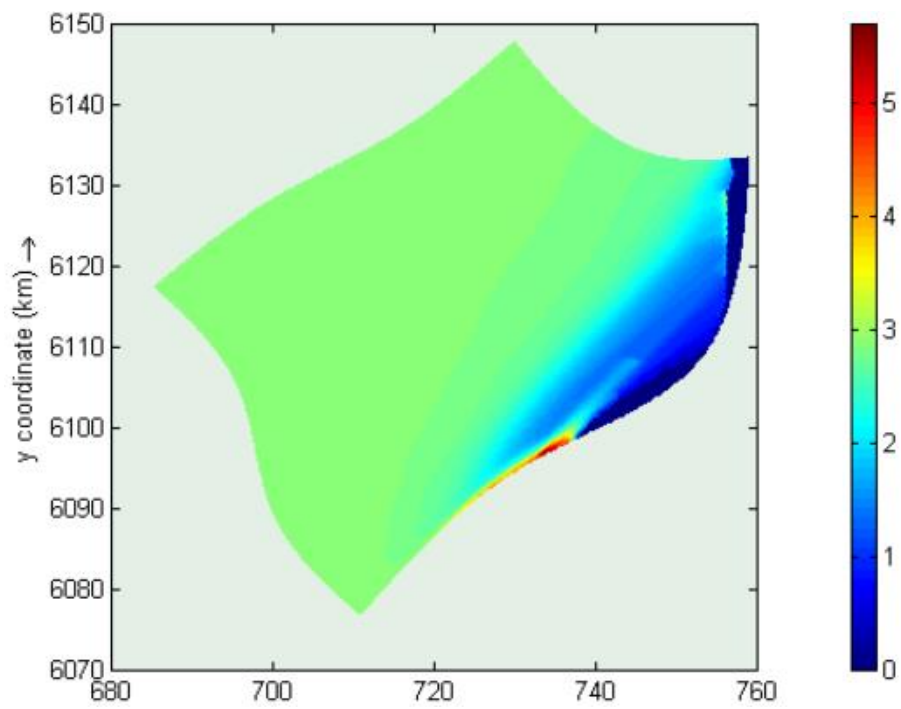
Agosto sur



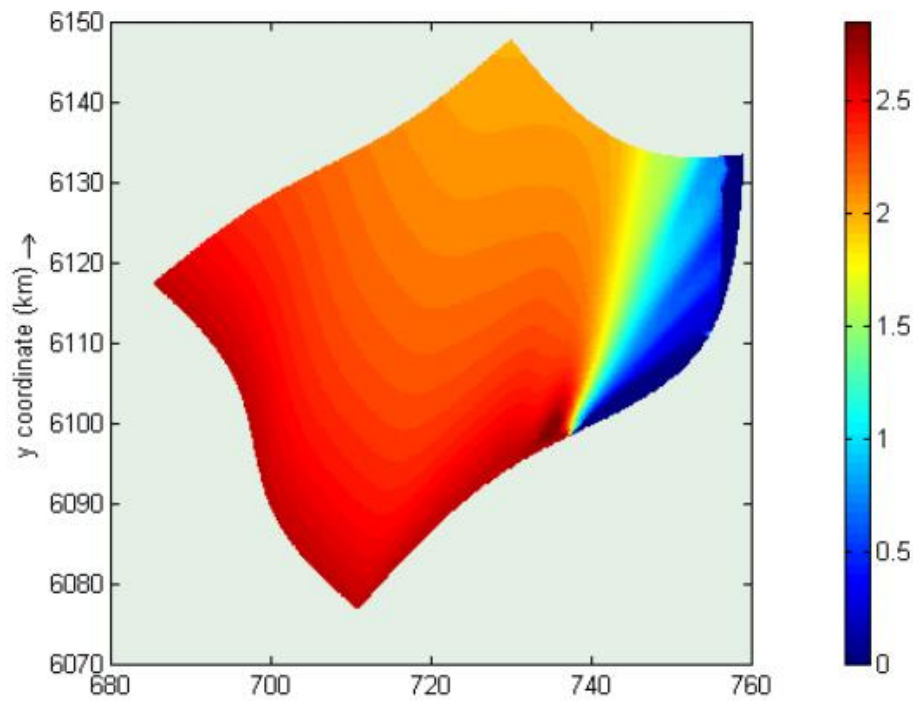
Agosto norte



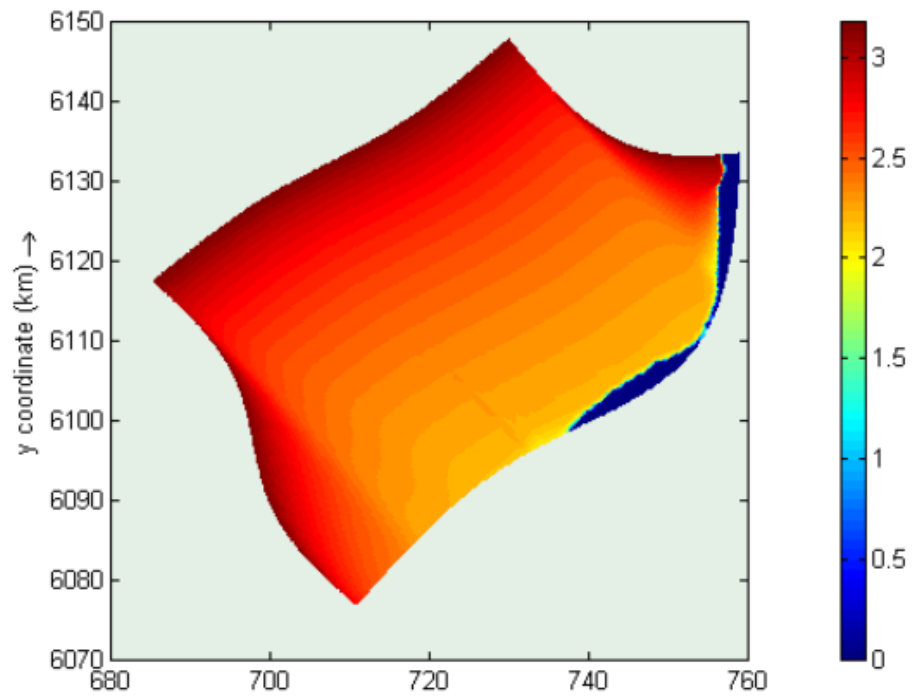
Septiembre sur swell



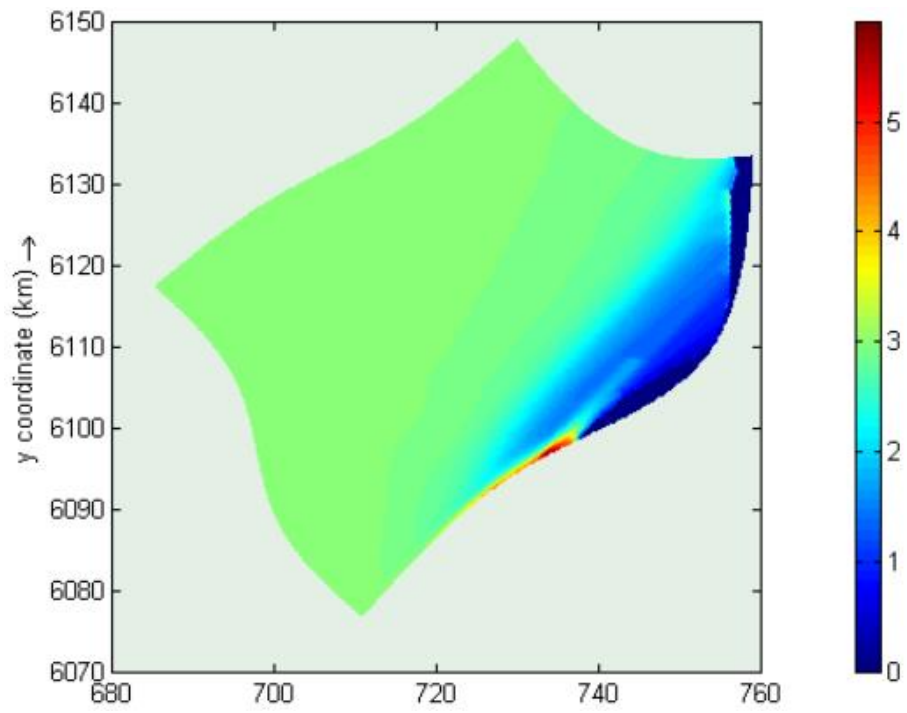
Septiembre sur seas



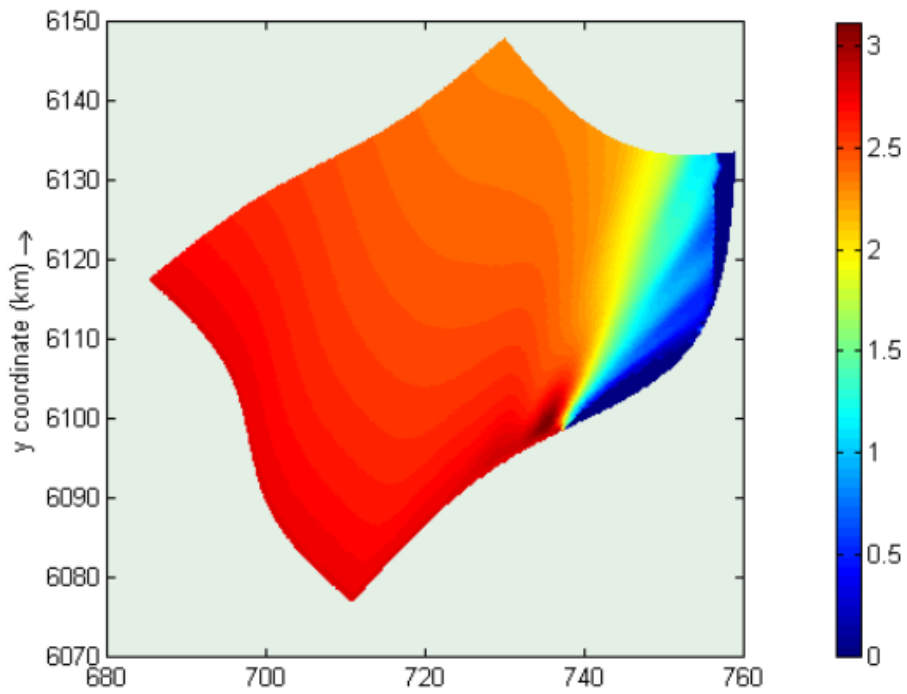
Septiembre norte



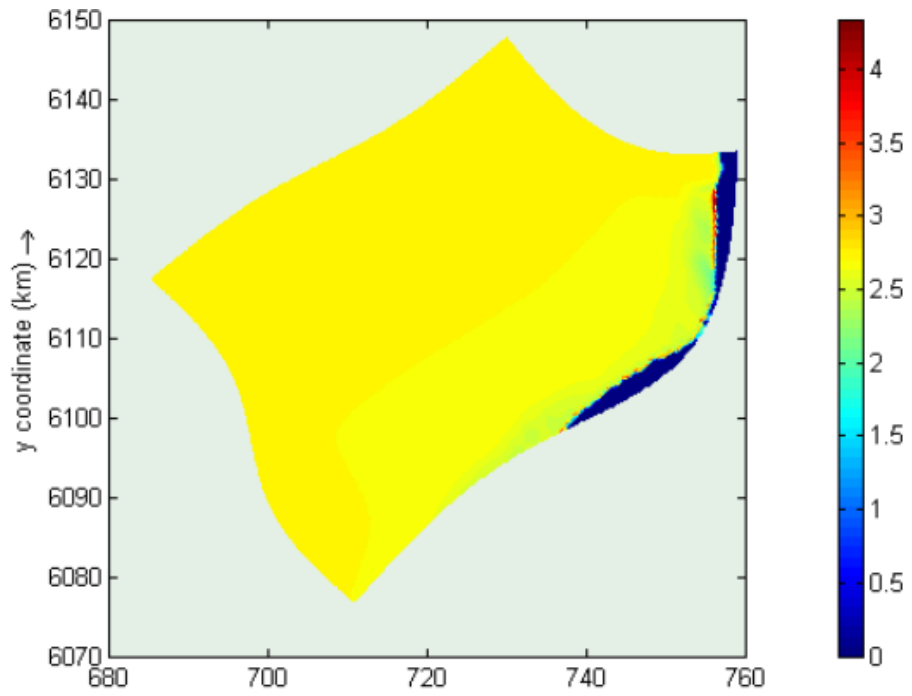
Octubre sur swell



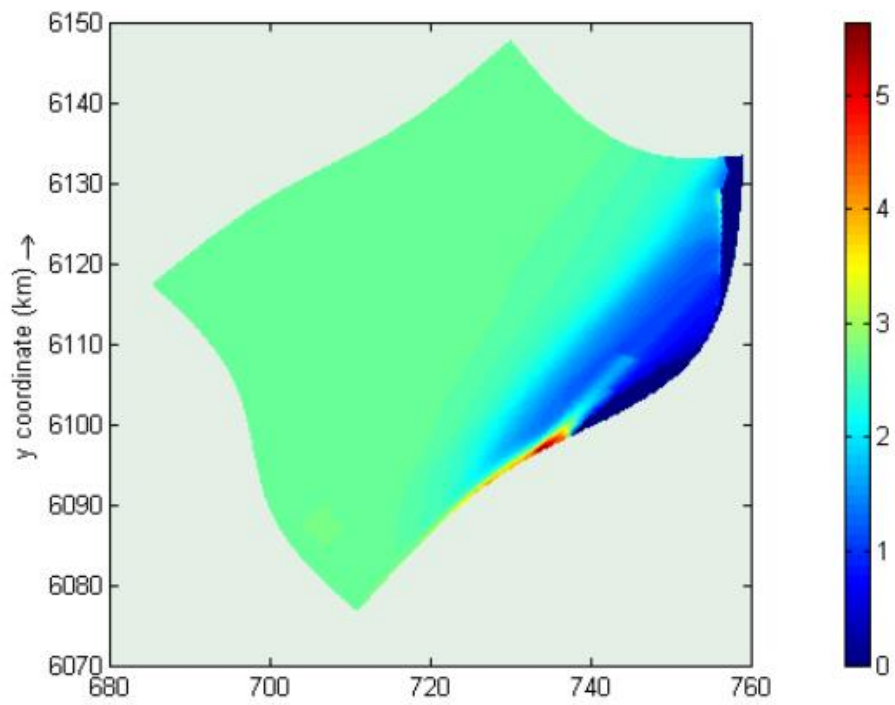
Octubre sur seas



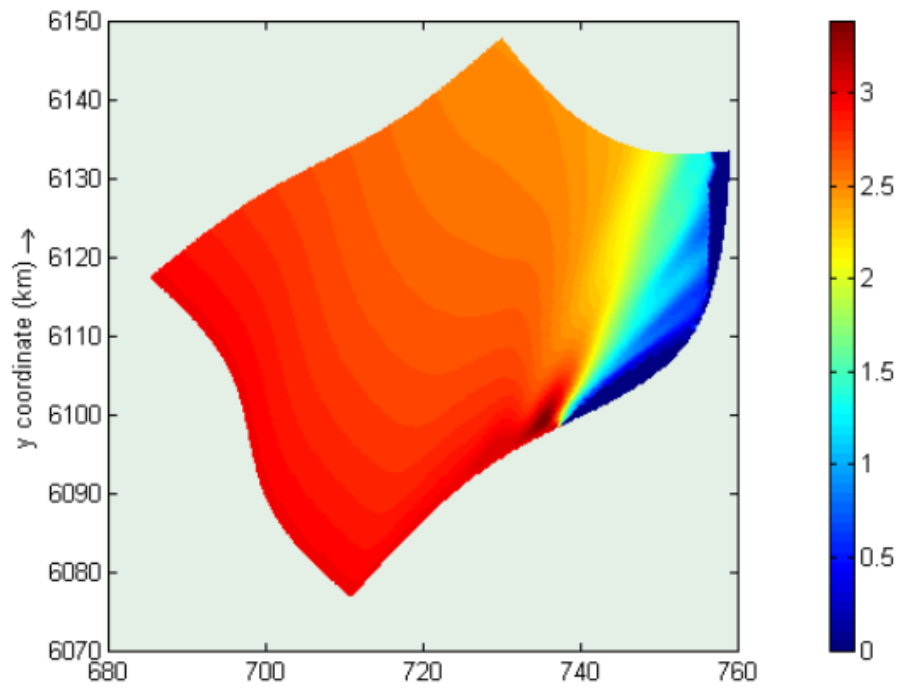
Octubre norte



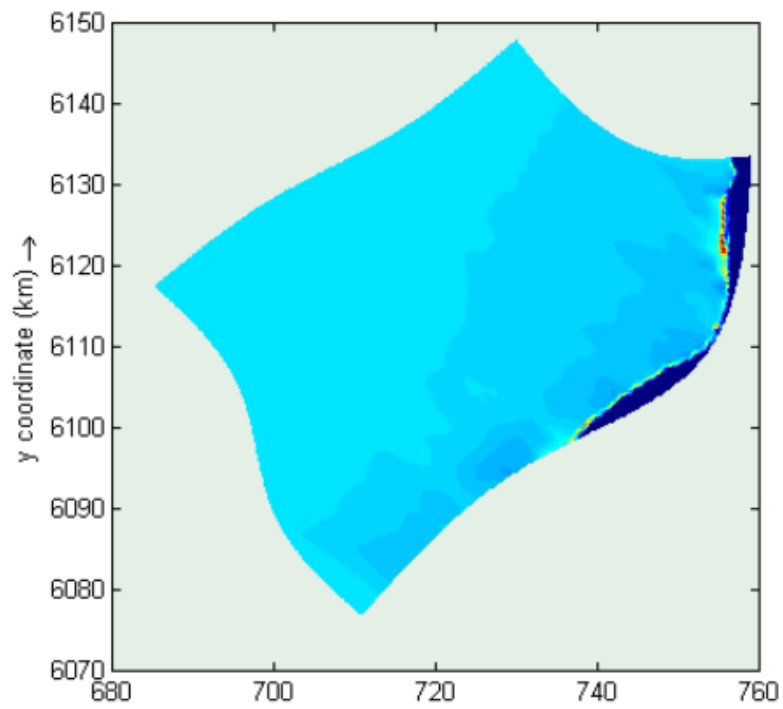
Noviembre sur swell



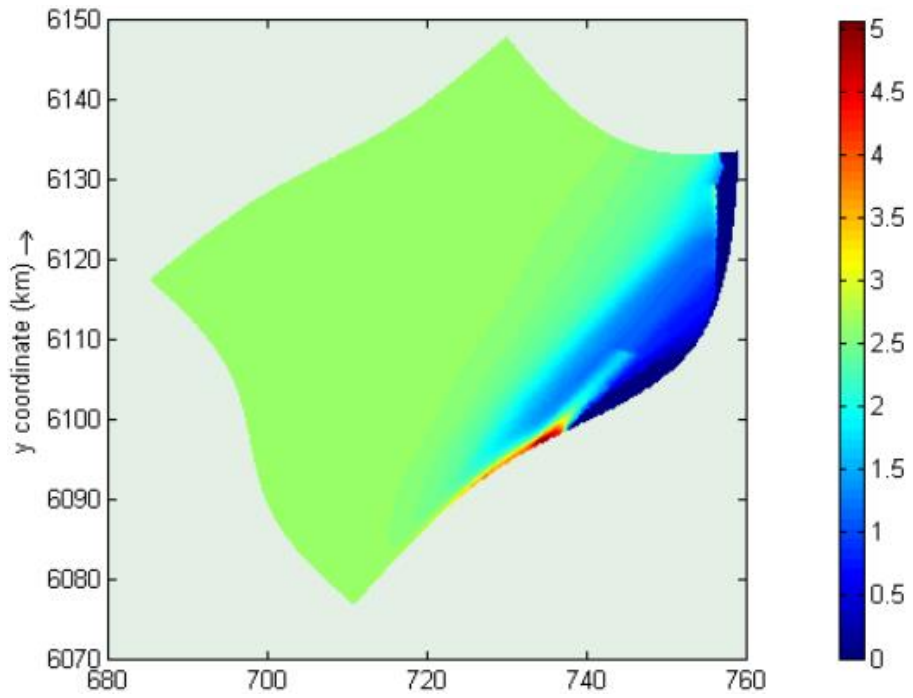
Noviembre sur seas



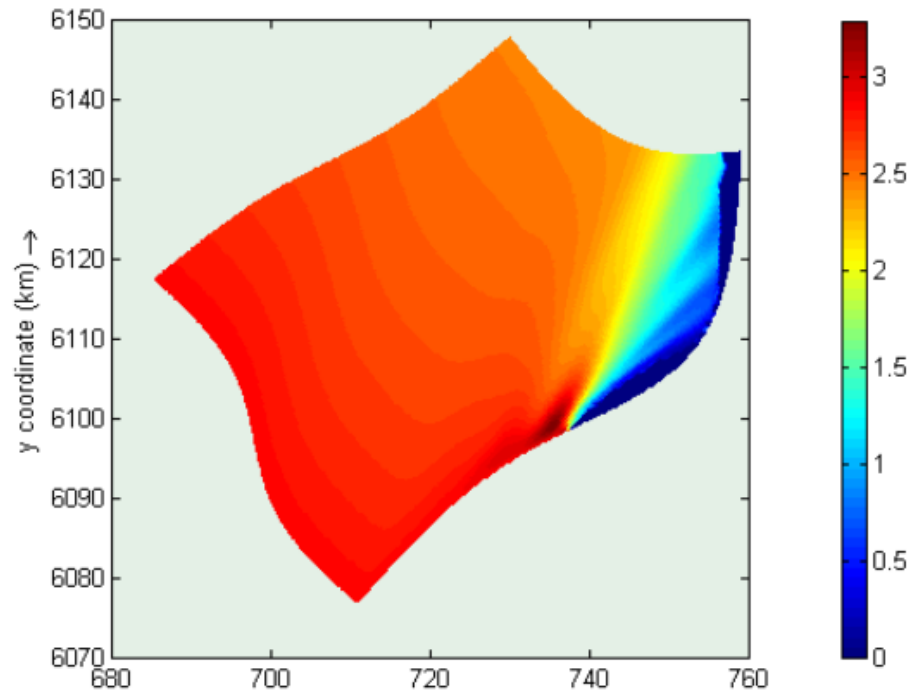
Noviembre norte



Diciembre sur swell



Diciembre sur seas



Diciembre norte

