



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO XBEACH PARA EL PRONÓSTICO DE
OLEAJE EN LA BAHÍA DE CARTAGENA, V REGIÓN, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

GABRIELA DENISSE MONTECINOS DÍAZ

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO CIENFUEGOS CARRASCO

PROFESOR CO-GUÍA:
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEANDRO SUAREZ ATIAS
LUIS ZAMORANO RIQUELME

Este trabajo ha sido en colaboración con el centro MERIC

SANTIAGO DE CHILE
2021

Resumen Ejecutivo

Con el objetivo de obtener un pronóstico del comportamiento hidrodinámico de la bahía de Cartagena, se implementa el modelo XBeach que tiene la potencialidad de representar la evolución del oleaje en aguas someras, sus componentes de onda larga (surfbeat), variaciones de nivel medio del mar y corrientes residuales.

Para lograrlo se acondiciona el modelo usando datos batimétricos y de oleaje obtenidos en trabajos de modelado y campo previamente realizados; la verificación del modelo se realiza comparando las salidas de las simulaciones con mediciones de oleaje realizadas en dos puntos de la bahía mediante un correntómetro perfilador acústico doppler (ADCP). Antes de modelar el período de tiempo utilizado para verificar la confiabilidad del modelo, se modelan climas de oleaje por períodos más cortos de tiempo con el fin de conocer el tiempo de *warming up* del modelo y la afectación de la resolución espacial de la grilla en el resultado de éste.

Luego de la validación, se analiza el clima de oleaje histórico y se seleccionan condiciones representativas utilizando algoritmos de agrupamiento o clustering. Los algoritmos utilizados corresponden al método k-mean y al de máxima disimilaridad, que permiten identificar por un lado condiciones de oleaje que son muy recurrentes en la zona y, por otro lado, climas de oleaje que son inusuales dentro de los datos históricos que se analizan.

El modelo XBeach validado previamente permite entonces analizar la respuesta hidrodinámica de la bahía frente a los climas de oleaje seleccionados y cuantificar el recurso energético en términos de su potencia. Finalmente se incorporan fenómenos de interacción oleaje-corriente y se repite el análisis para examinar los efectos de las corrientes en la propagación de oleajes.

Se concluye tras la realización del trabajo que XBeach tiene la capacidad de representar correctamente las tendencias del oleaje en los puntos de observación, por lo que puede ser utilizado para pronosticar el comportamiento hidrodinámico de la bahía; sin embargo, se identificaron algunos sesgos (sobre estimación de altura de oleaje) que podrían corregirse utilizando mayor resolución en la topobatimetría, o bien técnicas de reanálisis o redes neuronales que escapan a los objetivos de este trabajo. Finalmente, se explora el modelado de corrientes residuales generados por oleaje y ondas largas (surfbeat), obteniéndose resultados prometedores que permiten su uso para el presente estudio, pero que requieren de datos de validación de los que no se dispone.

Agradecimientos

Las dificultades académicas que supone el desarrollo del trabajo de título, esta vez fueron acompañadas por dificultades ajenas a este aspecto tanto a nivel nacional, con el estallido social de fines del año 2019, que llenó de emociones y cambios a Chile; a nivel mundial debimos enfrentarnos a una pandemia que, hasta el día de hoy, más de un año después, sigue acompañándonos y dictando un ritmo de vida al que adaptarse; y finalmente, aspectos personales que terminaron por invitarme a trabajar en mi misma y en los objetivos que me propongo.

En este muy largo camino de arduo trabajo, hubo gente que se volvió indispensable y que, gracias a su apoyo, cariño, palabras o simples gestos, lograban impulsarme a continuar trabajando.

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia por creer en mí y apoyarme siempre, sin condiciones. En particular quiero dar las gracias a mi hermana que siempre estuvo dispuesta a ayudarme cuando el estrés me cegaba y a mi mamá que me inspira cada día.

Gracias también a mis amigos y amigas cuyas palabras de aliento y compañía virtual a lo largo de la cuarentena siempre me llenaron el corazón. No permitieron que me sintiera sola en este proceso y muchas veces me enseñaron a confiar en mi misma.

Por último, estoy tremendamente agradecida del equipo de oleaje de MERIC por darme la oportunidad de ser parte de un proyecto tan increíble, además de la disposición a ayudarme y responder mis consultas. No solo me enseñaron sobre cuestiones académicas, sino que pude aprender valores que espero poder aplicar en mi vida personal y profesional en un futuro cercano. Agradezco también a los miembros de mi comisión por acompañarme en esta última etapa universitaria y al equipo del NLHPC por facilitar el proceso de modelación.

Tabla de Contenido

RESUMEN EJECUTIVO	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
TABLA DE CONTENIDOS	III
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	1
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	1
1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME.....	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 INTERÉS DEL PROBLEMA.....	3
2.2 MODELO NUMÉRICO	9
2.3 BAHÍA DE CARTAGENA	11
3. ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA	13
3.1 MODELO XBEACH.....	13
3.2 ANTECEDENTES	16
3.2.1 <i>Topobatimetría Bahía de Cartagena</i>	16
3.2.2 <i>Información ADCPs (2018)</i>	17
3.2.3 <i>Espectros de oleaje (1990-2017)</i>	19
3.3 METODOLOGÍA.....	21
3.3.1 <i>Acondicionamiento modelo</i>	22
3.3.2 <i>Verificación resultados</i>	24
3.3.3 <i>Métodos de agrupamiento para la selección de climas de oleaje</i>	27
3.3.4 <i>Modelación de climas de oleaje</i>	30
4. RESULTADOS	32
4.1 VERIFICACIÓN.....	32
4.2 CLIMAS DE OLAJE.....	38
4.3 MODELACIÓN CLIMAS DE OLAJE.....	39
5. DISCUSIÓN	49
6. CONCLUSIONES	53
7. BIBLIOGRAFÍA	54

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1 Diagrama esquemático de un tren de olas y los parámetros que lo definen (Dean & Dalrymple, 1991).</i>	3
<i>Figura 2.2 Estacionalidad neta del potencial energético de oleaje anual a nivel mundial. Razón entre el potencial energético mínimo mensual y el potencial anual (Mofk G., 2010).</i>	4
<i>Figura 2.3 Variación energética mensual media. Panel superior: Nodos de aguas profundas de FRUGO Oceanor AS. Panel inferior: Nodos de aguas medias a someras propagado a 20 metros de profundidad usando el modelo SWAN (Mazzaretto et al., 2020).</i>	5
<i>Figura 2.4 Localización de nodos de aguas profundas y someras, donde F: hindcast, B: boya, A: ADCP'S y N: nodo sintético de aguas someras (Mazzaretto et al., 2020).</i>	6
<i>Figura 2.5 Índice de variabilidad para la zona centro y sur de Chile (Lucero et al., 2017).</i>	7
<i>Figura 2.6 Ejemplo interacción oleaje-corriente (Cartes, 2005).</i>	8
<i>Figura 2.7 Ejemplos tipos de modelado incluidos en XBeach (Deltares, 2017).</i>	10
<i>Figura 2.8 Bahía de Cartagena, Región de Valparaíso (Ugalde, 2018).</i>	12
<i>Figura 3.1 Zona de Estudio y cuadrante donde se dispone de una batimetría de detalle.</i>	16
<i>Figura 3.2 Topobatimetría Las Cruces para una resolución de grilla de 20 metros. Incluye curvas de nivel....</i>	17
<i>Figura 3.3 Ubicación de los instrumentos de medición de oleaje ADCP en la Bahía de Cartagena.</i>	18
<i>Figura 3.4 Mediciones de altura significativa (H_m0), período medio (T_m) y dirección media del oleaje (MWD) en los ADCP Norte (rojo) y Sur (azul) para el período de marzo-abril 2018.</i>	19
<i>Figura 3.5 Punto de extracción de datos de oleaje desde el modelo global WAVEWATCH III.</i>	20
<i>Figura 3.6 Topobatimetría de la bahía Cartagena-Las Cruces.</i>	22
<i>Figura 3.7 Punto de obtención de las condiciones de borde para verificación del modelo XBeach.</i>	24
<i>Figura 3.8 Topobatimetría de la zona de estudio mallada a distintas resoluciones. En la parte superior la resolución es de 10 metros, en el centro de 20 metros y en el cuadrante inferior es de 50 metros.</i>	26
<i>Figura 3.9 Agrupamiento KMA: inicio $\{v_{10}, \dots, v_{m0}\}$ y posterior desarrollo a centroide final $\{v_1, \dots, v_m\}$ (Camus et al., 2011). Cada eje representa un criterio de selección.</i>	29
<i>Figura 3.10 Representación del algoritmo por máxima disimilaridad (Camus et al., 2011). Cada eje representa un criterio de selección.</i>	30
<i>Figura 3.11 Comparación del período energético y medio para el ADCP Norte (izquierda) y ADCP Sur (derecha). Los gráficos de la parte superior presentan el comportamiento de ambos períodos en el tiempo, mientras que en la parte inferior se presenta el comportamiento del período energético respecto al período medio.</i>	31
<i>Figura 4.1 Información de altura de ola significativa (H_m0), el periodo promedio (T_m) y dirección promedio del oleaje (MWD) disponible de los ADCP. Encerrado en amarillo se presenta el período de tiempo con el que se trabaja para la verificación.</i>	32
<i>Figura 4.2 Ubicación de puntos de extracción de resultados para modelo XBeach. El punto 0 representa el ADCP Norte, el punto 1 el ADCP Sur, y los demás representan el desarrollo hacia la costa de manera perpendicular a esta.</i>	33
<i>Figura 4.3 Verificación warming up. Evolución temporal de los parámetros para una condición de oleaje constante para cada punto de extracción de resultados del modelo a lo largo de la bahía.</i>	34
<i>Figura 4.4 Resolución Espacial modelos. Presentación de los resultados para la misma condición de oleaje modelada a distintas resoluciones de grilla y su comparación con las mediciones del ADCP Norte y ADCP Sur.</i>	35
<i>Figura 4.5 Verificación 19/03/2018 a 20/04/2018. Comparación resultados modelo (azul), mediciones ADCP (negro) y condiciones de borde (celeste) tras incluir consideraciones temporales de warming up y espaciales.</i>	37
<i>Figura 4.6 Resultados modelación algoritmo KMA- Clima 1. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	41

<i>Figura 4.7 Resultados modelación algoritmo KMA- Clima 2. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	42
<i>Figura 4.8 Resultados modelación algoritmo KMA- Clima 3. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	43
<i>Figura 4.9 Resultados modelación algoritmo KMA- Clima 4. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	44
<i>Figura 4.10 Resultados modelación algoritmo MDA- Clima 1. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	45
<i>Figura 4.11 Resultados modelación algoritmo MDA- Clima 2. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	46
<i>Figura 4.12 Resultados modelación algoritmo MDA- Clima 3. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	47
<i>Figura 4.13 Resultados modelación algoritmo MDA-Clima 4. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	48
<i>Figura 5.1 Campo de velocidades promedio algoritmo MDA-Clima 3. El largo de la flecha indica la magnitud de la velocidad. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	50
<i>Figura 5.2 Campo de velocidades promedio algoritmo MDA-Clima 1. El largo de la flecha indica la magnitud de la velocidad. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	51
<i>Figura 5.3 Campo de velocidades promedio algoritmo MDA-Clima 4. El largo de la flecha indica la magnitud de la velocidad. La barra representa la potencia de oleaje.</i>	52

Índice de Tablas

<i>Tabla 2.1 Efectos medioambientales energía extracción energía del oleaje. (Thorpe TW, 1992).</i>	4
<i>Tabla 3.1 Coordenadas de ubicación de los instrumentos de medición de oleaje.</i>	18
<i>Tabla 3.2 Histograma de frecuencias para climas de oleaje según clases de altura significativa y periodo energético (Hm0-Tm10).</i>	21
<i>Tabla 3.3 Histograma de frecuencias para climas de oleaje según clases de altura significativa y dirección media (Hm0-MWD).</i>	21
<i>Tabla 3.4 Parámetros XBeach para caso de estudio. Resolución 20 metros en x e y.</i>	23
<i>Tabla 4.1 Tiempo de cómputo y tamaño de archivo resultante para cada resolución de grilla. Objetivación de capacidad computacional requerida.</i>	35
<i>Tabla 4.2 Error RMS período verificación parámetros Hm0, Tm y MWD.</i>	38
<i>Tabla 4.3 Climas de oleaje resultantes del algoritmo KMA.</i>	38
<i>Tabla 4.4 Climas de oleaje resultantes del algoritmo MDA.</i>	39
<i>Tabla 4.5 Potencial de oleaje climas de oleaje resultantes de algoritmos de agrupamiento en puntos ADCP Norte y Sur.</i>	39
<i>Tabla 4.6 Potencia media a lo largo de la bahía para casos modelados.</i>	40

1. Introducción

1.1 Motivación

Chile es un país que presenta más de 6.000 kilómetros de costa, enfrentándose al océano más grande del planeta, por lo que su zona costera se podría considerar un recurso primordial. En particular, la energía del oleaje podría aprovecharse a condición de conocer y pronosticar su comportamiento y variabilidad espacio-temporal. El programa de atracción de centros de excelencia internacionales de Corfo posibilitó la instalación en Chile desde hace cinco años al *Marine Energy Research and Innovation Center* (MERIC), que ha estado posibilitando la realización de estudios e investigación sobre el potencial uso del oleaje como fuente de energía renovable. El presente trabajo ha sido apoyado por este centro, que tiene como misión impulsar el desarrollo sustentable y sostenible de la Energía Marina.

A la hora de pensar en el aprovechamiento del recurso marítimo se vuelve necesario conocer las condiciones de oleaje en las zonas costeras para poder prever situaciones de riesgo e implementar de manera segura la utilización del recurso, cualquiera sea el uso. Es por esto que propagar el oleaje desde aguas profundas, que es donde suele haber información proveniente de modelos globales, se vuelve un paso ineludible para lograr representar las condiciones de oleaje en un punto de interés en la costa.

En el presente trabajo, se estudia la bahía de Cartagena en la Región de Valparaíso, puesto que es un sitio que ha sido priorizado en las investigaciones impulsadas por el centro MERIC, que ha puesto a disposición de este estudio una serie de datos de campo (oleaje, batimetría). Con estos antecedentes a mano, se procede a la implementación del modelo XBeach que tiene la potencialidad de representar la evolución del oleaje en aguas someras, sus componentes de onda larga (surfbeat), variaciones de nivel medio del mar y corrientes residuales.

Para entender el comportamiento de la bahía y obtener un correcto pronóstico, además de estudiar la propagación del oleaje por sí solo, un tema de interés es determinar la interacción oleaje-corriente, ya que según varios autores como Liang & Li (2008) y Rusu et al. (2011), al incorporar el efecto de la corriente sobre el oleaje el resultado posee mayor concordancia con mediciones.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

La investigación tiene como objetivo principal implementar el modelo hidrodinámico XBeach a la escala de la bahía de Cartagena con el propósito de conocer el comportamiento del oleaje, y evaluar la potencia energética para casos estadísticamente representativos.

1.2.2 Objetivos Específicos

El estudio propuesto posee 5 objetivos específicos, los cuales serán desarrollados en el orden que se presenta a continuación:

- i. Acondicionar el modelo para que represente las características de la bahía de Cartagena. Es necesario incorporar información topo-batimétrica, además de las características de oleaje del lugar.
- ii. Analizar confiabilidad del modelo. Aplicar el modelo para condiciones de oleaje en las que se cuenta con mediciones de campo, y cuantificar la bondad de ajuste de parámetros relevantes del oleaje modelado.
- iii. Seleccionar climas de oleaje estadísticamente representativos de las condiciones presentes en la bahía.
- iv. Obtener las características del oleaje en la zona costera utilizando el modelo XBeach para los climas de oleaje seleccionados. Caracterizar el comportamiento energético del recurso de oleaje en la zona de estudio para los casos seleccionados.
- v. Incorporar al análisis anterior la interacción oleaje-corriente e identificar su efecto energético en la bahía tras la propagación.

1.3 Organización del informe

El contenido del presente documento se distribuye de la siguiente manera:

- **Capítulo 2: Revisión Bibliográfica.** Se contextualiza el trabajo y se presenta el modelo en base a bibliografía ya existente del tema. Se describe la zona de estudio y su interés.
- **Capítulo 3: Antecedentes y metodología.** Se presenta la información utilizada para acondicionar el modelo a las características de la bahía de Cartagena, para comparar mediciones en la etapa de verificación de los resultados y para seleccionar y modelar espectros de oleaje representativos de la zona de estudio. Se describe en profundidad la metodología utilizada para llevar a cabo el trabajo de acuerdo a los objetivos planteados.
- **Capítulo 4: Resultados.** Incluye los resultados de cada etapa de implementación junto a una breve descripción de lo que se quiere identificar en cada caso.
- **Capítulo 5: Discusión.** Se reiteran los resultados más relevantes y se analizan en base al cumplimiento de los objetivos, con el fin de aportar a las conclusiones.
- **Capítulo 6: Conclusiones.** Se enuncian las conclusiones que derivan de la discusión y se determina si los objetivos se cumplen.

2. Revisión Bibliográfica

2.1 Interés del problema

El oleaje es uno de los aspectos más importantes para la ingeniería de costas e ingeniería oceánica (Thomas & Dwarakish, 2015), y el correcto pronóstico de este es significativo para la construcción y gestión de estructuras costeras, desarrollo de obras portuarias, operaciones navales, generación de energía, entre otros.

Al igual que las ondas de sonido, las olas son descritas por su amplitud (a), altura de ola (H), longitud de onda (L) y la dirección en que se propagan, tal como se muestra en la Figura 2.1, donde además se identifica la cresta de la onda (*crest*) y el punto más bajo (*trough*).

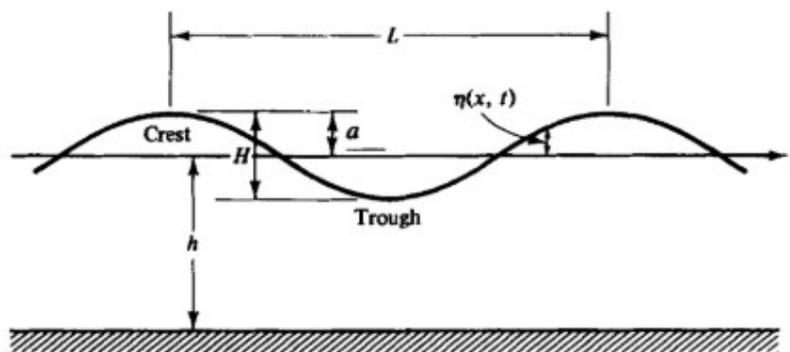


Figura 2.1 Diagrama esquemático de un tren de olas y los parámetros que lo definen (Dean & Dalrymple, 1991).

Para avanzar en la evaluación del recurso, es necesario analizar el sistema natural oceánico en un amplio rango de escala espacial y temporal (MERIC, 2019).

Bajo el contexto de energía marina undimotriz, por ejemplo, Falnes (2007) estima que la cantidad de energía de oleaje disponible a nivel mundial es comparable con la energía consumida. Una vez creadas por tormentas de viento, las olas pueden viajar miles de kilómetros con poca pérdida de energía hasta llegar a las costas de todos los continentes (Clément et al., 2002).

Según el análisis de Mørk et al. (2010), las costas de Chile tienen una estacionalidad del potencial energético neto favorable, resultados presentados en la Figura 2.2, ya que la capacidad de producción permanecería estable a lo largo del año.

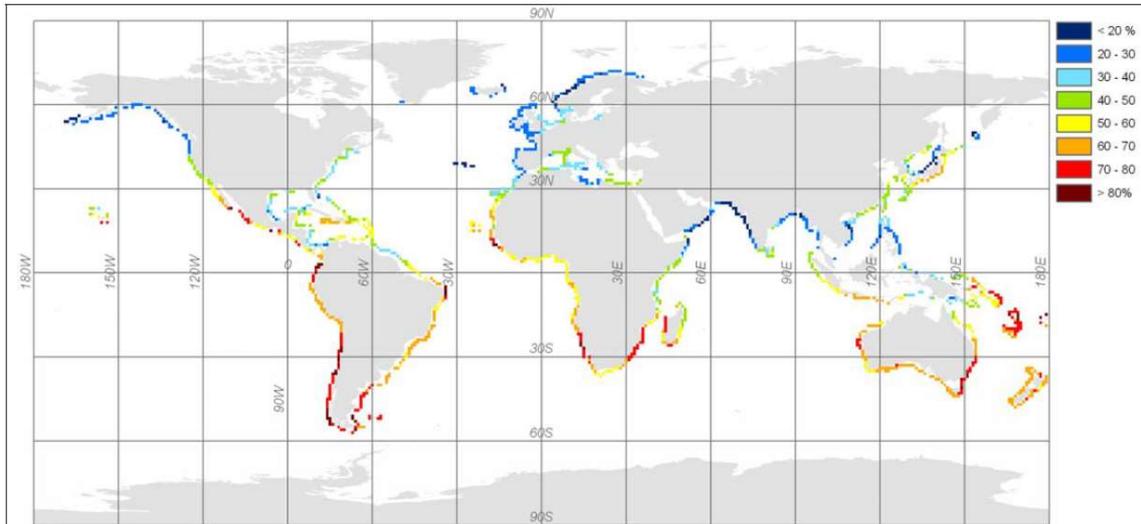


Figura 2.2 Estacionalidad neta del potencial energético de oleaje anual a nivel mundial. Razón entre el potencial energético mínimo mensual y el potencial anual (Mørk G., 2010).

Generalmente se considera que la energía del oleaje corresponde a una fuente de energía renovable limpia con impactos medioambientales negativos limitados (Clément et al., 2002). La poca experiencia con la energía del oleaje no permite conocer en su totalidad los efectos causados por los equipos de generación, aun así, Thorpe (1992) resume los efectos esperados en la Tabla 2.1, a continuación.

Tabla 2.1 Efectos medioambientales energía extracción energía del oleaje. (Thorpe TW, 1992).

Environmental Effects	Shoreline	Nearshore	Offshore
Land use/sterilization	W		
Construction/maintenance sites	W		
Recreation	W	W	
Coastal erosion	W	W-M	W-M
Sedimentary flow patterns		W	W
Navigation hazard		W	W
Fish & marine biota	W	W	W
Acoustic noise	W		
Working fluid losses		W	W
Endangered species	W	W	
Device/mooring damage		W-M	W-M

W: Weak effect; M: Medium effect

Además de tener ventajas ambientales, debido a su presunto bajo impacto, se considera como ventaja la variabilidad estacional natural de la energía de las olas, ya que este tipo de energía puede complementar estacionalmente otras fuentes de energía renovable, como la solar, donde el mayor recurso disponible está en verano, debido a que la tendencia mundial indica que el invierno es la estación más energética y el verano la menos energética para la energía del oleaje (Clément et al., 2002. González et al., 2015).

Para Iglesias et al. (2009) otra de las ventajas significativas con respecto a otras fuentes de energía libres de CO₂, corresponde a la previsibilidad, el alto factor de carga y el bajo impacto visual que supondría la extracción energética de esta fuente.

Chile posee características de oleaje de carácter variable espacio-temporalmente, pero con un alto potencial energético, según los autores Monárdez et al. (2008) y el centro MERIC (2019). Para poder desarrollar proyectos undimotrices es indispensable que este recurso sea correctamente caracterizado para identificar y cuantificar el potencial en cada ubicación y eventualmente priorizar los mejores sitios bajos un análisis multi criterio.

Mazzaretto et al. (2020) evalúan las costas de Chile entre las latitudes 33°S y 40.5°S con el objetivo de cuantificar la capacidad energética y su posible aprovechamiento. Tras ese estudio, y como se muestra en la Figura 2.3, se puede identificar que, tanto para los nodos de aguas profundas como aquellos de aguas someras presentan sus máximos en el período de invierno, siendo el mes más energético junio y el menos energético diciembre. Estos peaks se condicen con lo descrito por el centro MERIC (2019), que en Chile los eventos más energéticos ocurren en el periodo invernal, al igual que la tendencia mundial.

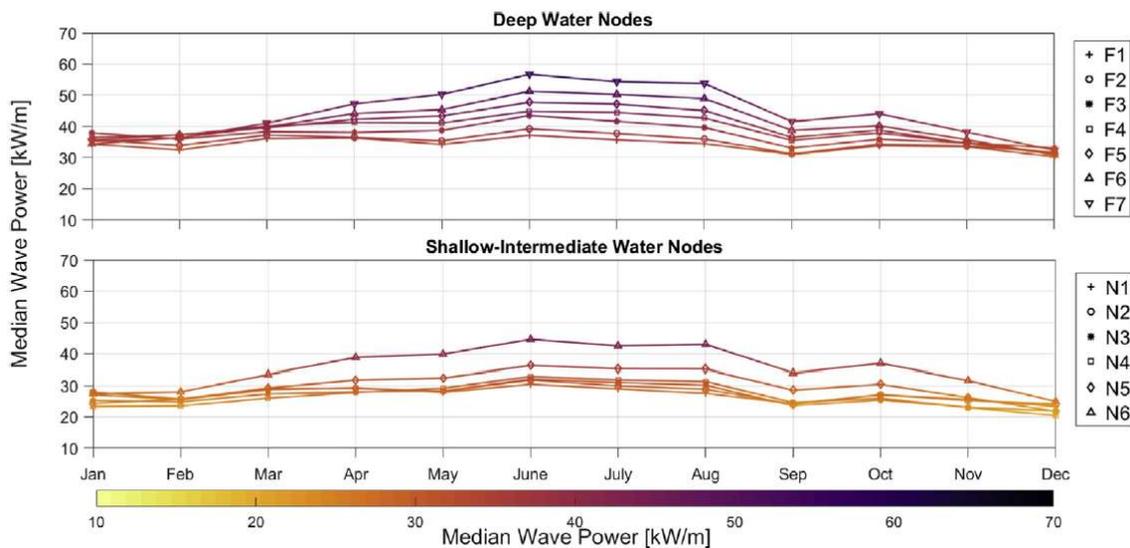


Figura 2.3 Variación energética mensual media. Panel superior: Nodos de aguas profundas de FRUGO Oceanor AS. Panel inferior: Nodos de aguas medias a someras propagado a 20 metros de profundidad usando el modelo SWAN (Mazzaretto et al., 2020).

Además, en la Figura 2.4 se muestra la ubicación de la que se extrae la información resultante para la figura anterior, y así Mazzaretto et al. (2020) concluye también que la energía del oleaje aumenta a medida que la ubicación del nodo es de mayor latitud, es decir, aumenta hacia el sur.

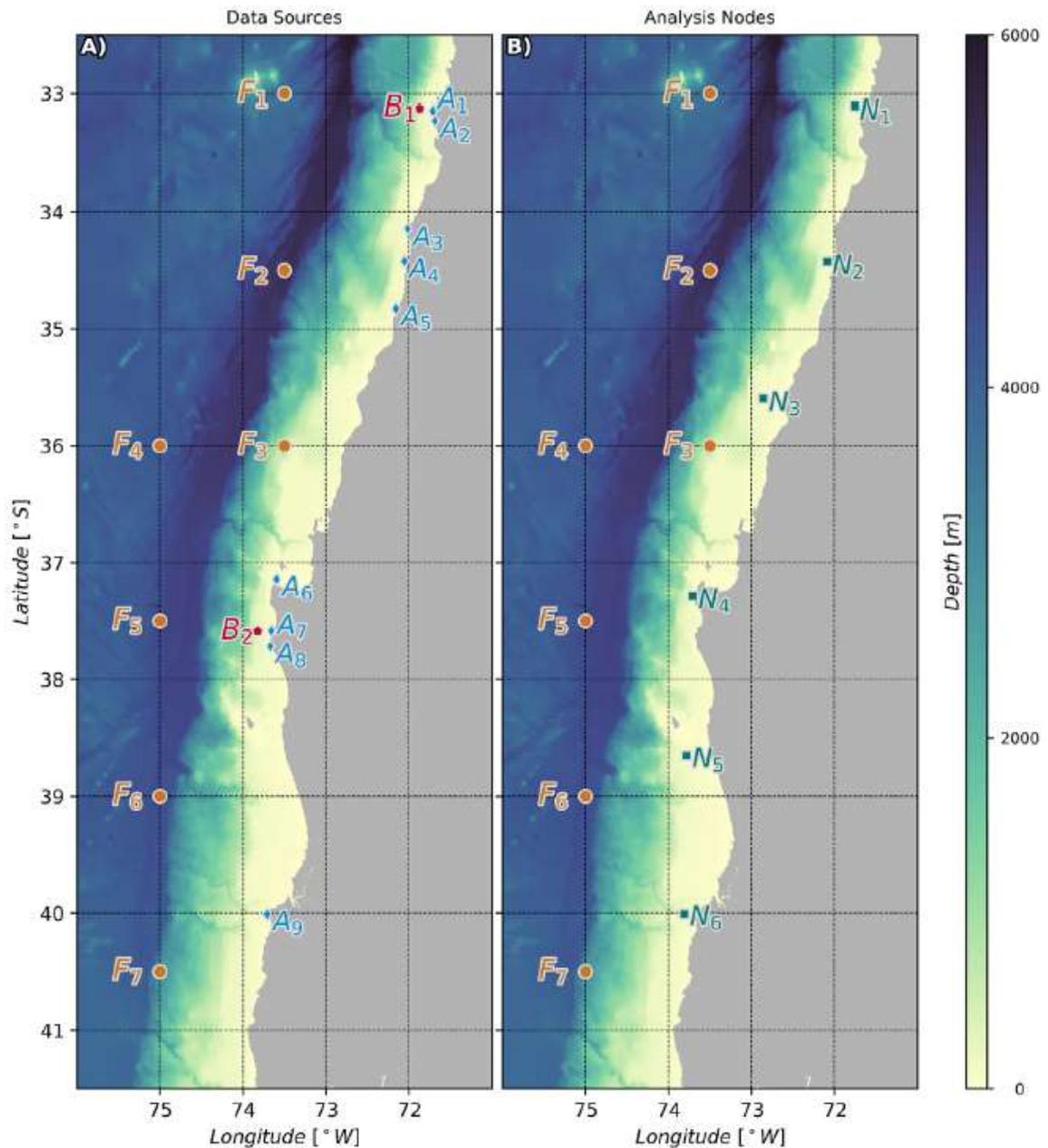


Figura 2.4 Localización de nodos de aguas profundas y someras, donde F: hindcast, B: boya, A: ADCP'S y N: nodo sintético de aguas someras (Mazzaretto et al, 2020).

Como se mencionó anteriormente, la energía de las olas aumenta progresivamente con la latitud, es decir, hacia el sur de Chile. Las latitudes al norte presentan menor variación estacional, lo que podría hacer que estos lugares sean más atractivos para el desarrollo de proyectos energéticos ya que tenderían a ser más consistentes a lo largo del año (Lucero et al, 2017).

La bahía de Cartagena, zona de estudio del presente documento, se encuentra aproximadamente en la latitud 33.5°S, por lo que presenta una variabilidad baja si tomamos en cuenta la información de la Figura 2.5, lo que parece atractivo para un proyecto de generación que trabaje a lo largo del año completo.

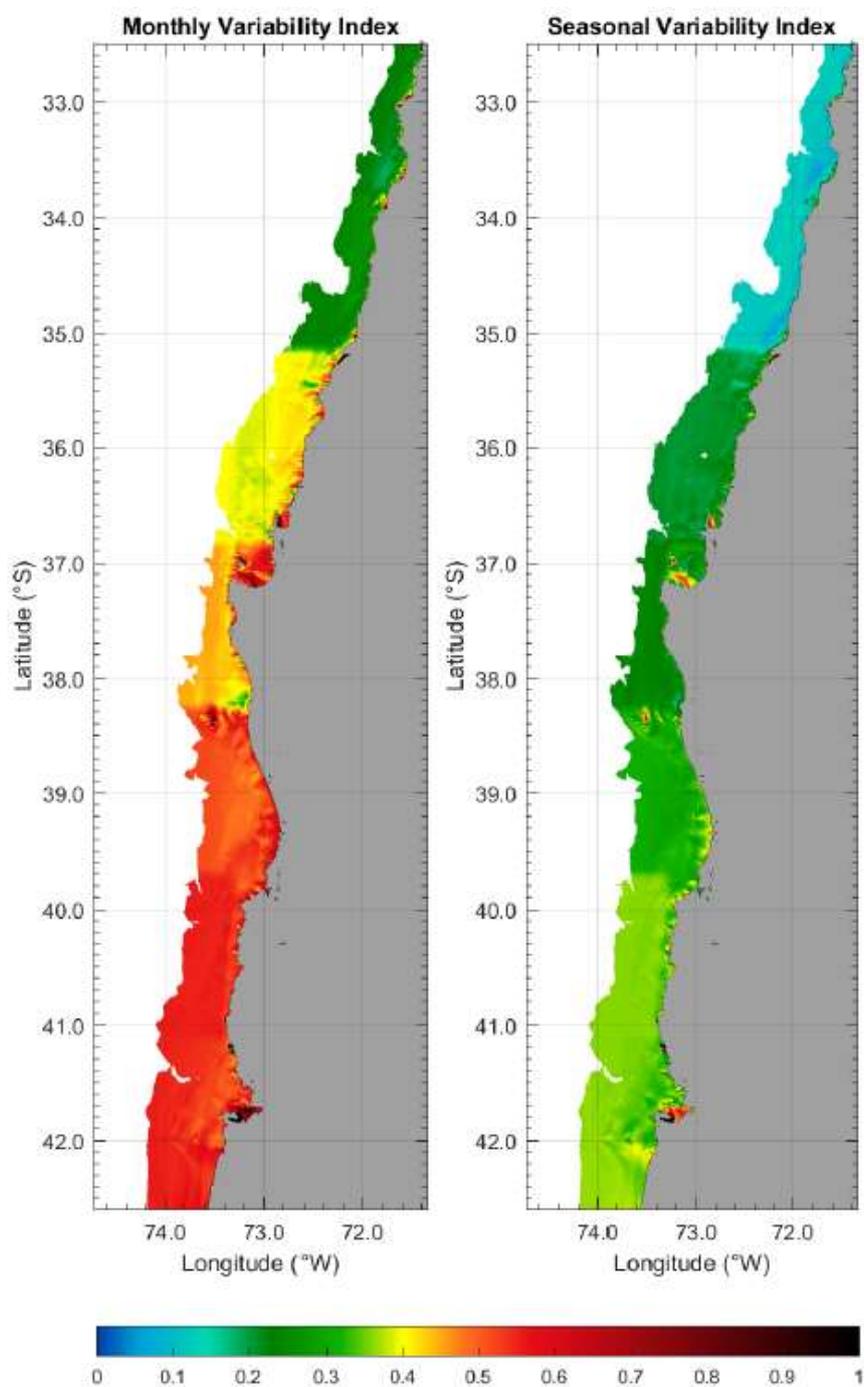


Figura 2.5 Índice de variabilidad para la zona centro y sur de Chile (Lucero et al., 2017).

El índice de variabilidad corresponde a una razón entre la diferencia de la potencia de oleaje media en el caso más energético y menos energético, y la potencia media anual en la zona de estudio.

Por otro lado, sobre la situación en Chile, Morales et al. (2019) indican que el oleaje es el principal agente modelador de los procesos litorales de Arica a la isla de Chiloé. Además, evidencian el impacto del cambio climático sobre los ecosistemas marinos y, por lo tanto, el aumento en la vulnerabilidad de los entornos marinos debido al aumento de eventos extremos. Esto aumenta el deterioro de las obras costeras y amenaza a las zonas litorales bajas.

Son condiciones como las anteriores las que refuerzan la necesidad de pronosticar las condiciones del oleaje en zonas costeras como la bahía de Cartagena. La selección de este sitio se ha realizado también en función de los datos de campo disponibles, puesto que el centro MERIC ha priorizado un trabajo de investigación interdisciplinario en esta bahía desde hace dos años.

Autores como Wang (2006) y Benetazzo (2013) indican que las olas y las corrientes suelen ser las principales fuerzas hidrodinámicas en las regiones costeras, mientras que la interacción entre ellas es una de las principales fuerzas impulsoras en aquellas zonas y mar adentro.

En la Figura 2.6 se presenta un ejemplo en que la corriente se presenta paralela a la costa, mientras que el oleaje llega a la costa con un ángulo α_b .

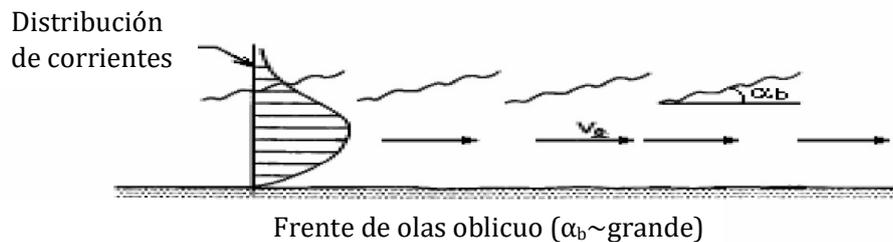


Figura 2.6 Ejemplo interacción oleaje-corriente (Cartes, 2005).

El estudio de la interacción oleaje corriente comenzó en la década de los sesenta con Longuet-Higgins and Stewart (1960), quienes describieron por primera vez la interacción entre oleaje y corriente. Presentaron la ecuación correcta de energía para introducir el concepto de esfuerzo de radiación y probaron la existencia de la transferencia de energía entre olas y corrientes.

Dentro de los efectos de la corriente sobre el oleaje que mencionan Wolf & Prandle (1999) se encuentra:

- 'Deslizamiento Doppler', que implica un aumento del número de olas en caso de una corriente opuesta, debido a una longitud de onda más corta, y al aumento de la altura de las olas debido a la conservación de la acción de las olas.
- Variación del factor de fricción efectivo en el fondo.
- Impactos en la propagación de olas dependiendo de la variación espacial de corrientes, ya que las olas tenderán a refractar en dirección al eje de la corriente.

Skamarock et al. (2005) demostraron que, en ciertas condiciones, la altura significativa de las olas aumenta hasta en un 20% cuando un sistema de olas encuentra una corriente opuesta.

Resultados similares fueron obtenidos por Fan et al. (2009b) quienes encontraron una reducción en la energía de las olas al incluir una corriente oceánica en sentido de las olas (Benerazzo, 2013).

Henderson et al. (2006) concluyen tras su estudio que corrientes de baja frecuencia en la zona de surf refractan el oleaje entrante generando fluctuaciones en el ángulo de dirección de las olas de baja frecuencia, lo que se condice con lo indicado por Wolf & Prandle (1999) sobre los impactos en la propagación del oleaje.

Otras conclusiones a las que se llega sobre la interacción entre oleaje y corriente corresponden a cuando las olas se superponen en la misma dirección que la corriente, hay una reducción significativa en la velocidad horizontal media cerca de la profundidad media, mientras que cuando las ondas se propagan en la dirección opuesta de la corriente, aumenta el corte vertical de la velocidad horizontal, esto a escala local (Teles, 2013).

De manera más general, Choi et al. (2007), Liang & Li (2008), Rusu et al. (2011), Choi & Yoon (2011), Van der Westhuysen (2017), entre otros, concluyen que existe una mayor concordancia entre los datos obtenidos gracias a la modelación predictiva y los datos obtenidos a través de mediciones. En los casos en que se consideran los efectos de la interacción entre oleaje y corriente, mejora en gran medida los pronósticos marinos.

En resumen, se concluye que podría ser interesante una evaluación de la interacción oleaje corriente, posterior a la propagación del oleaje para establecer si el comportamiento varía.

2.2 Modelo numérico

Existe una amplia gama de modelos numéricos que permiten simular el comportamiento del oleaje en base a diversas metodologías, como, por ejemplo: i) modelos de propagación de oleaje estacionarios a fase promediada (e.g. propagación de energía espectral); ii) modelos de propagación de tipo ola a ola, que resuelven la fase y describen la evaluación temporal de la superficie libre; y iii) una combinación de estos dos. Entre los distintos modelos se encuentra el modelo SWASH (Simulating WAVes till SHore, The SWASH team, 2020), WAVEWATCH III (WW3DG, 2016), SWAN (Simulating WAVes Nearshore, The SWAN team, 2020), XBeach (Deltares, 2015), entre otros.

En el presente estudio, se utiliza el modelo XBeach para representar la hidrodinámica asociada al fenómeno de propagación del oleaje en la bahía de Cartagena. Wong (2016) describe XBeach como un modelo capaz de reproducir la altura de oleaje, el período y las frecuencias resonantes, además de contar con la capacidad de resolver las ondas largas generadas por el oleaje (surfbeat). XBeach es desarrollado por Deltares, junto con UNESCO-IHE y Delft University of Technology.

Según el manual que describe el modelo (Deltares, 2015), entre cuyos autores se encuentra Dano Roelvink, las simulaciones se pueden realizar en un dominio espacial del orden de kilómetros y un dominio temporal del orden de una tormenta. El modelo es capaz de resolver ecuaciones 2D acopladas para la propagación de oleaje, flujo, transporte de sedimentos y cambios en el lecho marino, para variaciones espectrales de condiciones de borde de oleaje y flujo.

El modelo incluye procesos hidrodinámicos de transformación de onda corta (refracción, asomeramiento y rotura), transformación de onda larga (generación, propagación y disipación), infragravedad, condiciones inducidas por corrientes inestables, así como sobrepasos e inundaciones.

XBeach cuenta con un modo hidrostático, donde la variación de amplitud de onda corta se resuelve separadamente al resto del proceso, y un modo no-hidroestático, donde se resuelven todos los procesos a la par.

Luego, existen tres opciones hidrodinámicas dependiendo de la escala de tiempo a resolver:

1. Ola estacionaria: eficiente en la resolución de ecuaciones de ola promedio, pero no considera olas de infragravedad. Útil en condiciones en que las olas incidentes son relativamente cortas. No incluye crecimiento de la ola ni variación en el período.
2. Surfbeat: resuelve onda corta a escala de grupo de ondas y ondas largas asociadas. Se usa cuando el foco está en la 'swash zone'. Resuelve mediante ecuaciones de acción de onda.
3. No-Hidroestático: combinación de ecuaciones no lineales de aguas someras con un término de corrección de presión, permiten modelar propagación y decaimiento de olas individuales.

En la Figura 2.7 se presenta un ejemplo de las opciones recién descritas.

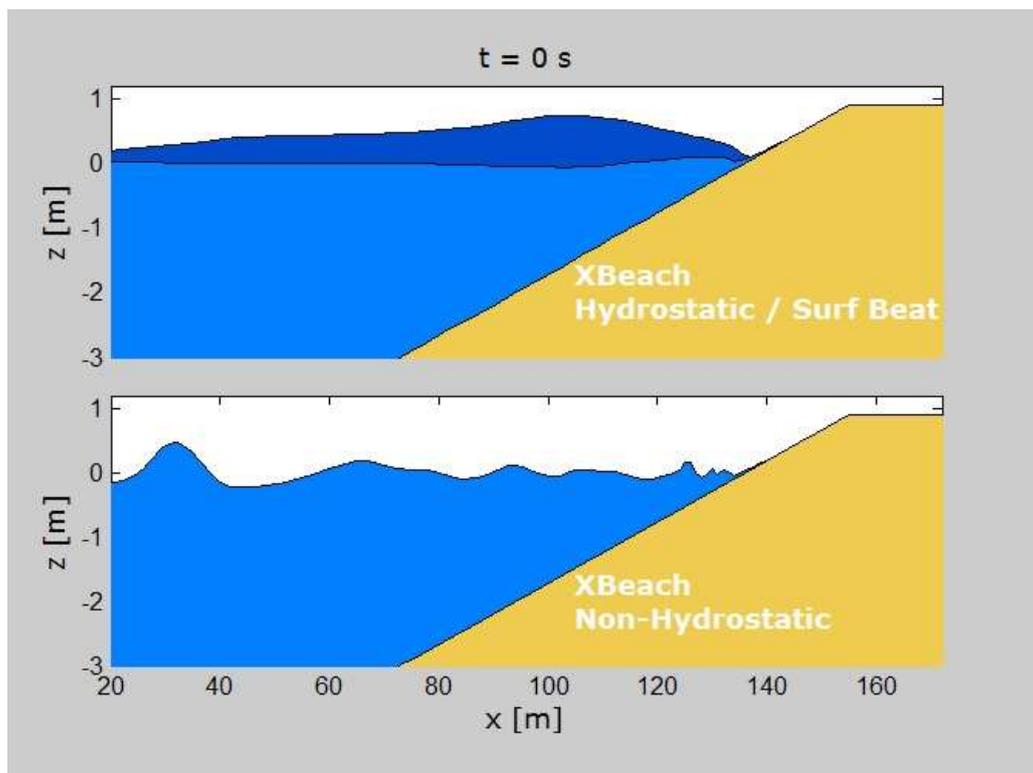


Figura 2.7 Ejemplos tipos de modelado incluidos en XBeach (Deltares, 2017).

El modelo no hidrostático está pensado para resolver estados de mar específicos durante periodos de tiempo limitados (horas-días) debido a la gran demanda de recursos computacionales que genera, mientras que el modelo hidrostático se basa en ecuaciones de acción de oleaje con ondas largas acopladas, por lo que puede ser aplicado en escalas temporales más largas (semanas-años).

Debido a los requerimientos y objetivos de este estudio (caracterización y pronóstico operacional del recurso energético), se implementa la opción hidrodinámica hidrostática con modelado de Surfbeat en el modelo XBeach. Esto por cuanto buscamos poder representar la evolución hidrodinámica espacio-temporal a la escala de la bahía y en estados de mar actuando durante días, meses o años.

El modo surfbeat, como se menciona anteriormente, resuelve la variación de altura onda corta a una escala de grupo, para esto emplea un modelo de disipación para los grupos de ola y un modelo 'roller' para representar el momentum almacenado en la superficie posterior al rompimiento de la ola. Estas variaciones ejercen una fuerza en la columna de agua y conllevan a mayores periodos de oleaje y corrientes inestables, debido a los gradientes de tensores de radiación, que son resueltos por el modelo con ecuaciones no lineales de aguas someras. Es por lo anterior que condiciones como corrientes producidas por oleaje o por vientos, u ondas largas están incluidas en la resolución del modelo (Deltares, 2015).

Para describir la bahía de Cartagena se busca poder representar correctamente tanto oleaje como corrientes, por lo que el modelo se ajusta a las necesidades.

2.3 Bahía de Cartagena

La bahía de Cartagena, zona de estudio del presente documento, se encuentra aproximadamente en la latitud 33.5°S, en la región de Valparaíso. En la Figura 2.8 se presenta la zona de estudio.

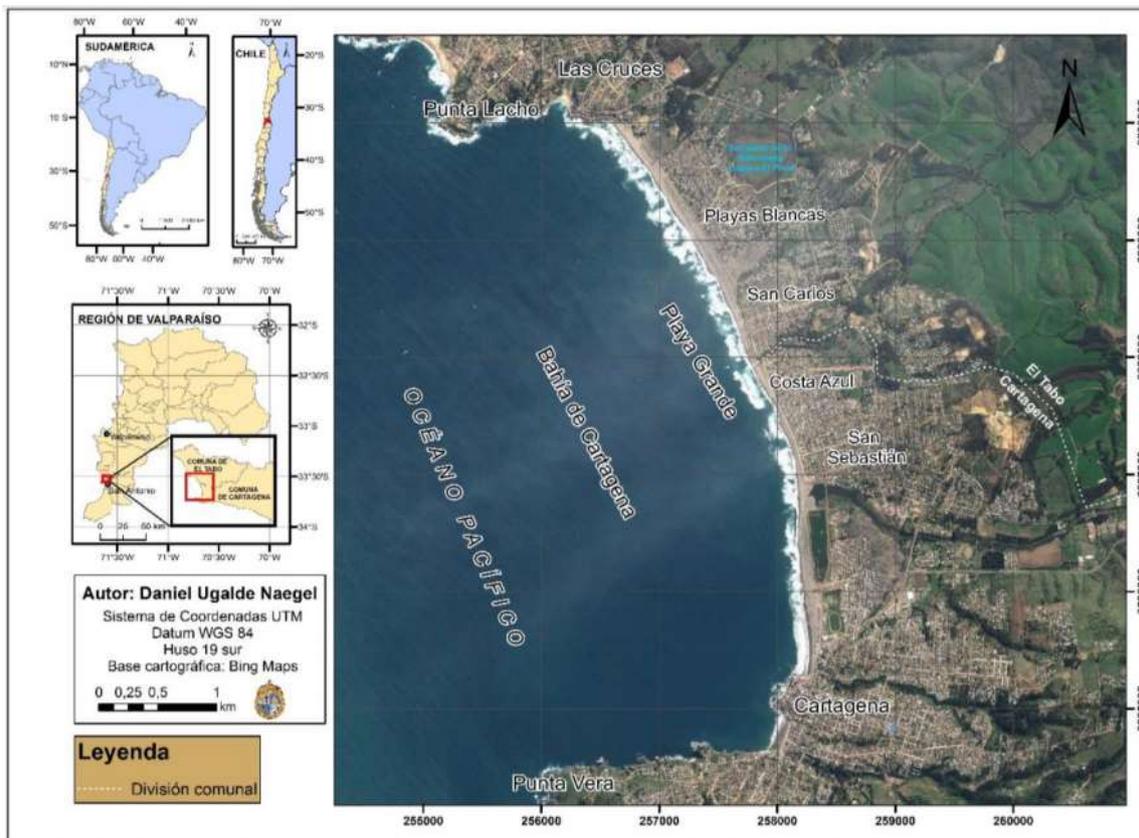


Figura 2.8 Bahía de Cartagena, Región de Valparaíso (Ugalde, 2018).

La Bahía de Cartagena comprende desde Punta Lacho, Las Cruces, en el cabo norte, hasta Punta Vera, Cartagena, en el cabo sur, constituida principalmente por sectores arenosos. La bahía tiene una orientación NNW-SSE, perpendicular al oleaje predominante, por lo que queda expuesta directamente a éste; pero algo protegida en su parte sur por la Punta Vera. (Ugalde, 2018). Es debido a la localidad del extremo norte de la bahía, que a esta también se le llama Bahía Las Cruces.

Martínez et al. (2019) indica que la bahía de Cartagena es una de las más grandes de Chile central y actualmente una de las que posee mayor antropización, cayendo en la categoría de las áreas con mayor crecimiento urbano durante la segunda mitad del siglo veinte.

Adicionalmente, existe actualmente un proyecto del centro MERIC denominado Open Sea Lab, cuyo objetivo es implementar un sistema de monitoreo de las condiciones reales del mar con fines energéticos, y la Estación Costera de Investigación Marina de la Pontificia Universidad Católica, que permite obtener información sobre las condiciones en la Bahía de Cartagena.

3. Antecedentes y metodología

3.1 Modelo XBeach

De acuerdo con Wong (2016), XBeach ha sido desarrollado con el fin de predecir el impacto de tormentas en áreas costeras, donde las ondas largas del oleaje (por ejemplo, surfbeat, olas de infragravedad) dominan el campo de oleaje, lo que es considerado válido ya que las olas de onda corta suelen ser disipadas, por efectos como el rompimiento o la fricción, al momento en que el oleaje se acerca a la línea de costa.

El modo surfbeat de XBeach es una combinación de modelos de resolución de fase y de fase promediada, es decir, una combinación entre un modelo basado en el balance de ecuaciones de energía y un modelo que requiere la información de cada fase a lo largo del campo de oleaje. Las ondas largas (de baja frecuencia) se desarrollan plenamente gracias a las ecuaciones no lineales de aguas someras, mientras que las ondas cortas son resueltas con las ecuaciones de equilibrio de la acción del oleaje. La propagación de onda corta es descrita considerando la energía del grupo de ondas distribuido direccionalmente, propagándose a la velocidad de grupo hacia una dirección media. Finalmente, la transferencia de energía desde el balance de energía del oleaje a las ecuaciones no lineales de aguas someras son las que inducen las ondas largas (Wong, 2016)

A continuación, se describe a grandes rasgos la implementación numérica dentro de la modelación con XBeach en su metodología surfbeat. Para más información se sugiere consultar con el manual (Deltares, 2015).

El balance de energía del oleaje se presenta en la ecuación 3.1 y resuelve la energía del grupo de olas.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = - \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde A representa la acción de oleaje, como se indica en la ecuación 3.2, c_x y c_y son las velocidades de grupo en la dirección x (perpendicular a la costa) e y (paralelo a la costa) según corresponda, c_θ es la velocidad de refracción y θ corresponde al ángulo de incidencia con respecto al eje x . Los términos D hacen referencia a los efectos de disipación de rompimiento de ola (D_w), fricción con el fondo (D_f) y vegetación (D_v), mientras que σ es la frecuencia intrínseca del oleaje.

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad \text{Ec. 3.2}$$

La ecuación 3.2 corresponde a la razón entre la densidad de la energía de oleaje (S_w) para cada dirección, y la frecuencia intrínseca ya mencionada.

XBeach cuenta con diferentes formulaciones para cada disipación mencionada, por lo que se recomienda acudir al manual.

Para las olas de baja frecuencia u onda larga, se utilizan ecuaciones no lineales de aguas someras, acopladas a las ecuaciones de balance de energía de las variaciones de grupo de olas. Los tensores de radiación obtenidos de la variación de energía de oleaje inducen una fuerza sobre las columnas de agua, lo que se incorpora como input para las ecuaciones no lineales de aguas someras, es decir, las ondas largas son forzadas por la energía del grupo de olas (Wong, 2016).

En las ecuaciones 3.3 y 3.4 se presentan las fuerzas de oleaje, responsables de la generación de ondas largas gracias a la ecuación no lineal de aguas someras, correspondiendo a las presentadas en las ecuaciones de momentum (3.5 y 3.6) y de continuidad (3.7), también conocidas como fórmulas *Generalized Lagrangian Mean* (Deltares, 2015).

$$F_x = - \left[\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right] \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$F_y = - \left[\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} \right] \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{wx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h} \\ = \frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{wy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h} \\ = \frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.6}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \quad \text{Ec. 3.7}$$

De las ecuaciones anteriores, u^L y v^L corresponden a las velocidades lagrangianas, definidas como la distancia que una partícula de agua viaja en un período, dividido por el valor del período; τ_{wx} , τ_{wy} corresponden a los tensores de corte del viento en las direcciones x e y , respectivamente; τ_{bx} , τ_{by} son tensores de corte del fondo en las direcciones x e y ; η corresponde a nivel de la superficie de agua; F_x , F_y son los esfuerzos inducidos por el oleaje; $F_{v,x}$, $F_{v,y}$ son los esfuerzos inducidos por la vegetación; v_h es el valor de la viscosidad turbulenta calculada usando el modelo de Smagorinski (1963); f corresponde al coeficiente de Coriolis y h corresponde a la profundidad local del agua. Notar que el tensor de corte del fondo es calculado con las velocidades eulerianas, relacionadas únicamente a onda larga.

Posteriormente, para la interacción de oleaje-corriente, se considera el intercambio de energía, por lo que el oleaje y el flujo se afectan mutuamente. Para XBeach esto se toma en cuenta al corregir el número de ondas (k) gracias al uso de ecuaciones Eikonal, que afecta la velocidad de propagación de ola y de grupo de olas.

Henye et al. (1983) indica que el enfoque Eikonal consiste en modelar una porción a pequeña escala como una superposición de paquetes de ondas, donde cada paquete se mueve a través de un flujo a gran escala.

En las ecuaciones 3.8 y 3.9 se presenta la definición del número de ondas en la dirección perpendicular (x) y paralelo (y) a la línea de costa.

$$k_x = k_x^{n-1} + k_x^- \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$k_y = k_y^{n-1} + k_y^- \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde $(n-1)$ se refiere al número de onda en el paso previo, k_x^- y k_y^- corresponde a las correcciones del número de onda para cada dirección y k_x, k_y es el valor corregido del número de onda para las direcciones x e y según corresponde.

Los términos de la corrección se determinan en base a las ecuaciones Eikonal, ecuaciones 3.10 y 3.11.

$$\frac{\partial k_x}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad \text{Ec. 3.11}$$

Luego, el número de onda es dado por la ecuación 3.12.

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Con la ecuación 3.13 se obtiene la frecuencia radial absoluta.

$$\omega = \sigma + k_x u^L + k_y v^L \quad \text{Ec. 3.13}$$

Donde se conserva la nomenclatura utilizada a lo largo del capítulo.

La velocidad de propagación de la energía de oleaje, incorporando los fenómenos de interacción oleaje-corriente se presentan en las ecuaciones 3.14 y 3.15 para las direcciones x e y , respectivamente, mientras que en la ecuación 3.16 se describe la propagación de velocidad en el espacio direccional, donde la refracción del fondo u de la corriente se consideran.

$$c_x(x, y, t, \theta) = c_g \cos \theta + u^L \quad \text{Ec. 3.14}$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c_g \sin \theta + v^L \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$\begin{aligned} c_\theta(x, y, t, \theta) = & \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right. \\ & + \cos \theta \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ & \left. + \sin \theta \left(\sin \theta \frac{\partial v}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) \quad \text{Ec. 3.16} \end{aligned}$$

Donde se mantiene la nomenclatura anterior y c_g corresponde a la velocidad de grupo obtenida de la relación de dispersión lineal.

Para modelar bajo este criterio, se vuelve a resolver el modelo surfbeat, pero considerando las velocidades corregidas para la interacción oleaje-corriente.

3.2 Antecedentes

La información con que se comienza el trabajo consta de la topobatimetría de la zona de estudio, mediciones para verificar validez del modelo y espectros de oleaje. A lo largo del documento se describe más ampliamente la utilización de cada uno.

3.2.1 Topobatimetría Bahía de Cartagena

Desde un comienzo se cuenta con la topobatimetría en la zona alrededor de la bahía de Cartagena. Con ella se puede caracterizar la zona y acondicionar el modelo a las condiciones físicas que presenta la bahía. La Figura 3.1 presenta el cuadrante a estudiar y bajo el cual se delimitará la topobatimetría inicial.



Figura 3.1 Zona de Estudio y cuadrante donde se dispone de una batimetría de detalle.

Como se ve en la Figura 3.1 el cuadrante alcanza a considerar parte de la zona seca, es decir, más allá de la línea de costa, por lo que se debe tener eso en cuenta al momento de incorporar la información al modelo.

La información de topobatimetría cuenta con información en formato 'xyz', por lo que se cuenta con las coordenadas y elevación en cada punto medido. Las elevaciones negativas indican profundidades en el mar. En la Figura 3.2 se presenta de manera gráfica la información topobatimétrica en la zona de estudio.

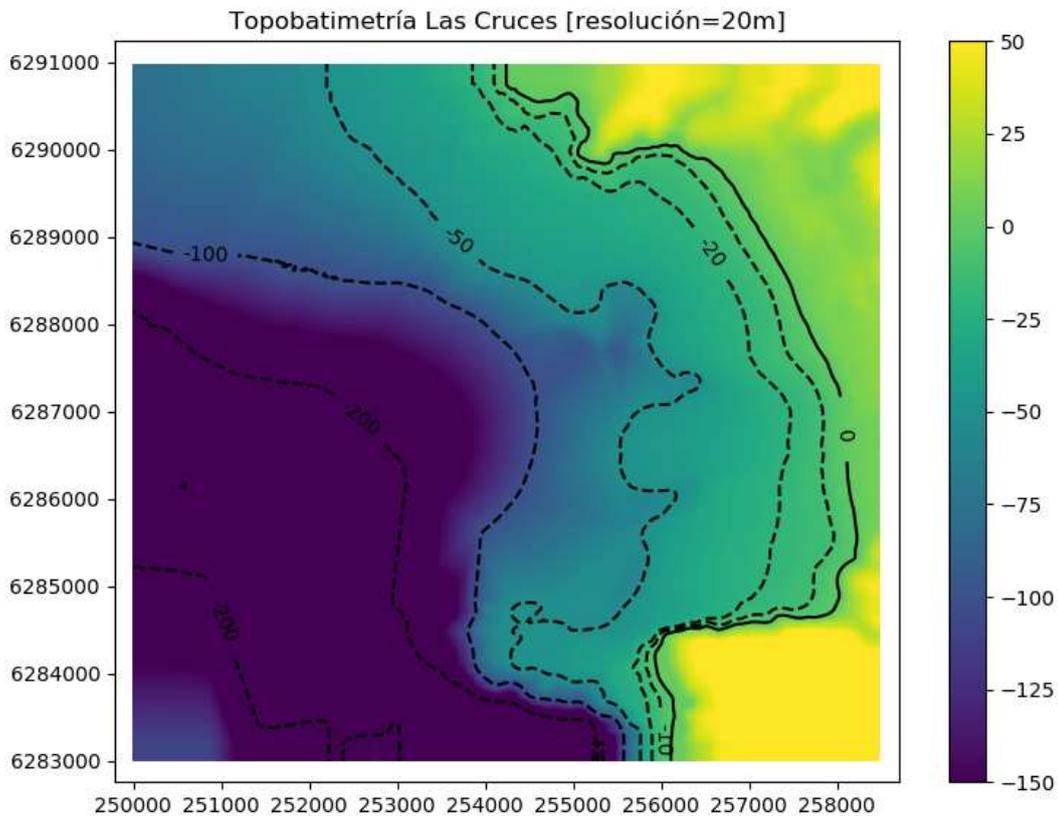


Figura 3.2 Topobatemetría Las Cruces para una resolución de grilla de 20 metros. Incluye curvas de nivel.

3.2.2 Información ADCPs (2018)

Se cuenta con información medida de los meses marzo y abril del mes 2018, obtenida por los dispositivos 'Acoustic Doppler Current Profiler' (ADCP) instalados en la bahía de Cartagena por el equipo de la Estación Costera de Investigaciones Marinas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (ECIM-UC). Los ADCP son instrumentos que se instalan en el fondo marino y mediante un sensor acústico miden la variación de la superficie libre, la dirección del oleaje y la corriente cada 1 hora, con duraciones de 20 minutos de medición y 0.5 segundos de período (Lucero, 2015).

En la Figura 3.3 se presenta la ubicación de estos equipos dentro de la zona en que se está trabajando, mientras que en la Tabla 3.1 se presentan las coordenadas en que se ubican los ADCP en coordenadas UTM, junto a su profundidad.



Figura 3.3 Ubicación de los instrumentos de medición de oleaje ADCP en la Bahía de Cartagena.

Tabla 3.1 Coordenadas de ubicación de los instrumentos de medición de oleaje.

ADCP	Coordenadas UTM (zona 19H)		Profundidad [m]
	Coordenada Este	Coordenada Norte	
Norte	255,227	6,289,618	24
Sur	257,096	6,285,559	20

En la Figura 3.4 se muestra parte de la información que es posible obtener gracias a los dispositivos ADCP. En el cuadrante superior de la figura se presentan las mediciones de altura de ola en rojo para el ADCP Norte y en azul para el ADCP Sur, en el centro el período medio del oleaje, y en el cuadrante inferior se encuentra la información de dirección media de incidencia de las olas. Las mediciones se representan entre los días 9 de marzo de 2018 al 25 de abril del mismo año.

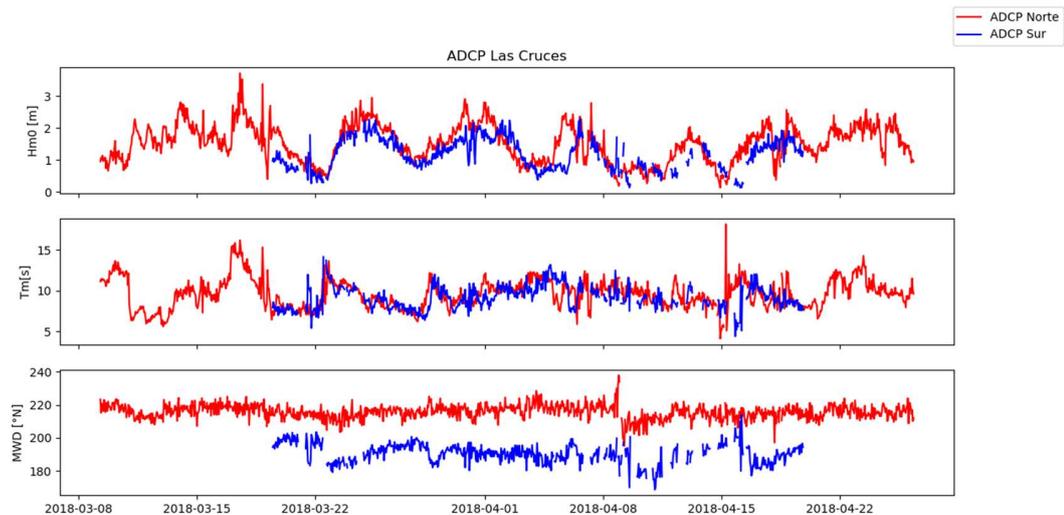


Figura 3.4 Mediciones de altura significativa (H_{m0}), período medio (T_m) y dirección media del oleaje (MWD) en los ADCP Norte (rojo) y Sur (azul) para el período de marzo-abril 2018.

El ADCP Sur no entregó datos de manera continua, por lo que existen ventanas de tiempo sin información que se explican con espacios vacíos a lo largo de la gráfica. La razón por la que esto ocurre es por el rango de medición del dispositivo, ya que el ADCP Sur corresponde a un workhorse sentinel 1200 kHz, llegando a su límite del rango de medición no pudiendo realizar algunas medidas, mientras el ADCP Norte es workhorse sentinel 600 kHz por lo que usualmente no presenta problemas de medición.

Con la información de los ADCP se logra obtener los espectros de oleaje completos, por lo que se utiliza dicha información para corroborar que los resultados obtenidos con el modelo sean coherentes.

A priori, a partir de la información de la imagen se entiende que el comportamiento de los parámetros es similar para ambas mediciones, difiriendo en algunos casos en magnitud. Se espera un desfase en las direcciones de alrededor de 30 grados, pero de comportamiento bastante similar. Las alturas de ola parecen ser levemente mayores en el ADCP Norte a lo largo de toda la muestra, en comparación con la información del ADCP Sur, para ambos casos oscilando en un promedio de entre 1.5 a 2 metros. El período de oleaje para ambos casos tiende a oscilar alrededor de los 10 segundos.

En el marco del presente trabajo y considerando la resolución a la que se modela, no se incorpora como variable las mareas. Aun así se estima un rango mareal aproximado de 1 metro para efectos del análisis.

3.2.3 Espectros de oleaje (1990-2017)

Lucero et al. (2013) indica que al realizar un estudio de climas de oleaje los datos reales o sintéticos evolucionan a ser series de tiempo de parámetros estadísticos que derivan de un espectro direccional. El Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2016) describe el espectro de direcciones como parámetro del oleaje que representa la distribución de la energía en un rango de

direcciones, lo que permite identificar desde qué dirección proviene el oleaje y qué tan amplia es la dispersión con respecto a la o las direcciones principales.

Para un estudio estadístico, se recomienda que la muestra contenga al menos 20 años de información para poder representar correctamente la variabilidad de estados de mar que inciden a la zona de estudio.

Se cuenta con información de espectros de oleaje desde el año 1990 al año 2017, sumando un total de casi 250,000 climas de oleaje a lo largo de ese periodo. Los datos se extraen desde un nodo a la altura de San Antonio de coordenadas 33.5°S de latitud y 73° de longitud, que se encuentra aproximadamente a 130 kilómetros hacia aguas adentro de la zona de estudio, como se presenta en la Figura 3.5. El modelo numérico que se utilizó para extraer dicha información es WAVEWATCH III.

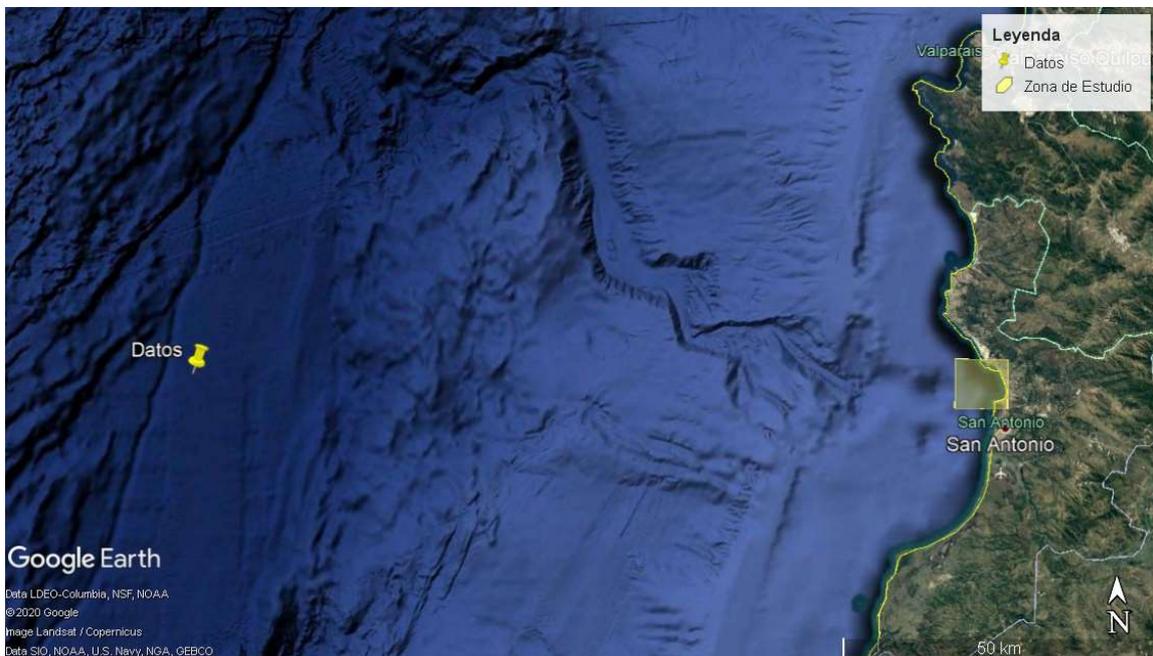


Figura 3.5 Punto de extracción de datos de oleaje desde el modelo global WAVEWATCH III.

En las Tablas 3.2 y 3.3 se presenta el histograma de frecuencias según clases de altura significativa, periodo energético y dirección media del oleaje. Esta información permite caracterizar los climas de oleaje de acuerdo a su frecuencia de ocurrencia en el periodo de observación. Los parámetros que se utilizaron para hacer esto fueron altura significativa (H_m0), periodo energético (T_m10) y dirección media del oleaje (MWD) ya que representan de mejor manera los climas de oleaje de mayor ancho espectral (Lucero et al. 2013).

Tabla 3.2 Histograma de frecuencias para climas de oleaje según clases de altura significativa y periodo energético (Hm0-Tm10).

Hm0\T10	<6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	>16
<1	-	-	0.04%	0.02%	0.01%	0.001%	-
1-2	0.004%	1.71%	7.47%	9.01%	3.25%	0.26%	-
2-3	-	4.19%	20.07%	18.90%	8.81%	1.15%	0.02%
3-4	-	0.78%	8.22%	7.11%	4.67%	0.98%	0.06%
4-5	-	0.01%	0.69%	0.83%	0.99%	0.42%	0.01%
5-6	-	0.0004%	0.05%	0.05%	0.07%	0.09%	0.01%
6-7	-	-	0.003%	0.004%	-	0.01%	0.003%
7-8	-	-	-	0.002%	-	-	-
>8	-	-	-	0.002%	-	-	-

Tabla 3.3 Histograma de frecuencias para climas de oleaje según clases de altura significativa y dirección media (Hm0-MWD).

Hm0\MWD	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360
<1	-	-	-	-	-	-	-	0.06%	0.02%	-	-	-
1-2	-	-	-	-	-	-	0.59%	16.19%	4.46%	0.43%	0.03%	0.001%
2-3	0.001%	-	-	-	-	0.01%	4.23%	41.98%	5.69%	1.00%	0.19%	0.04%
3-4	-	-	-	-	-	-	3.65%	15.68%	1.71%	0.52%	0.21%	0.06%
4-5	-	-	-	-	-	-	0.55%	1.76%	0.39%	0.12%	0.10%	0.03%
5-6	-	-	-	-	-	-	0.03%	0.12%	0.07%	0.02%	0.02%	0.01%
6-7	-	-	-	-	-	-	0.003%	0.004%	0.01%	0.002%	-	0.002%
7-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002%
>8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.002%

Se puede observar que el oleaje más frecuente es aquel de altura significativa de entre 2 y 3 metros, un periodo de alrededor de 10 segundos y dirección media proveniente del suroeste (210-240 grados).

3.3 Metodología

La metodología consta de cinco pasos relacionados directamente con los objetivos específicos que se mencionan al comienzo, es decir:

1. Acondicionamiento del modelo, en que se identifica la batimetría y parámetros necesarios para representar correctamente la zona de estudio con sus condiciones de oleaje y mareas en los bordes del dominio.
2. Validar y cuantificar la confiabilidad de los datos modelados comparando los parámetros modelados con las mediciones de terreno disponibles.
3. Selección de climas de oleaje estadísticamente representativos usando métodos de agrupamiento de datos.
4. Modelar los climas de oleaje para la bahía de Cartagena con el modelo XBeach.

5. Implementar interacción oleaje-corriente al análisis

3.3.1 Acondicionamiento modelo

Se generan archivos en el formato adecuado para XBeach con información de la bahía como batimetría, parámetros indicativos del modo de resolución y condiciones de borde del oleaje.

Es posible llevar al modelo las características físicas de la bahía gracias a datos topobatimétricos. Una vez que se determina espacialmente el cuadrante que comprende la zona de estudio, se determina la resolución a la que se hará la grilla y con dichos datos medidos en terreno se componen los archivos. Para el caso de XBeach es necesario generar tres archivos, uno para la componente x , uno para la componente y y otro para el nivel o cota del terreno. En la Figura 3.6 se presenta la grilla de la topobatimetría, representativa del presente caso de estudio, coincidente con el cuadrante presentado anteriormente en la Figura 3.3.

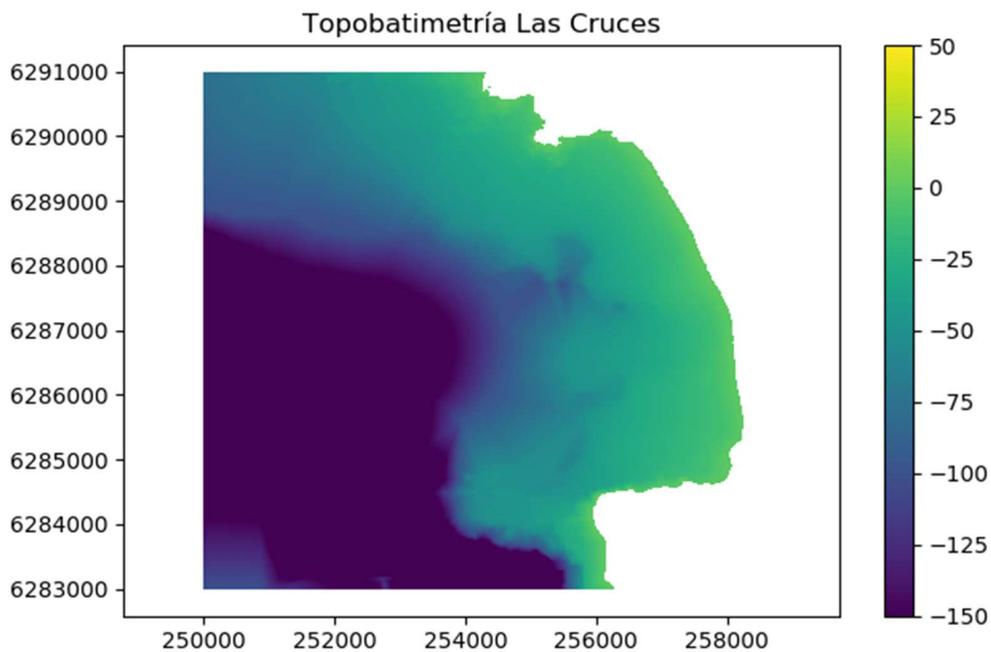


Figura 3.6 Topobatimetría de la bahía Cartagena-Las Cruces.

En la Tabla 3.4 se presentan algunos de los parámetros especificados para las corridas del modelo XBeach. Dentro de los parámetros que se indican en la tabla se encuentran condiciones para la lectura de los parámetros de oleaje y topografía y condiciones de borde que ayudan a la resolución del modelo, adaptándolo para simular el escenario de la bahía de Cartagena. Además, se incluyen las formulaciones para las disipaciones que utiliza el modelo en el balance de energía del oleaje que se va propagando con la velocidad de grupo (ecuación 3.1).

Tabla 3.4 Parámetros XBeach para caso de estudio. Resolución 20 metros en x e y.

Parámetro	Descripción	Valor
Procesos Físicos		
flow	Enciende el cálculo de flujo	1
vegetation	Enciende la interacción entre oleaje, flujo y vegetación	0
sedtrans	Enciende el transporte de sedimentos	0
Parámetros de grilla		
xori	Origen del eje para coordenada X	250,000
yori	Origen del eje para coordenada Y	6,283,000
nx	Número de celdas computacionales en la dirección X	424
ny	Número de celdas computacionales en la dirección Y	399
thetamin	Límite direccional inferior (ángulo con respecto al eje x computacional)	140
thetamax	Límite direccional superior (ángulo con respecto al eje x computacional)	320
dtheta	Resolución direccional	5
Parámetro de tiempo del modelo		
CFL	Máximo número de courant-friedrichs-lewy	0.7
Parámetro de ola de condición de borde		
wbctype	Tipo de ola de condición de borde	swan
Parámetro de rompimiento de ola		
break	Tipo de formulación del rompimiento	roelvink2
Parámetro de roller		
roller	Habilita el modelo roller	1
Parámetro de flujo		
bedfriction	Tipo de formulación de la fricción con el fondo	chezy

El acondicionamiento del modelo va a depender siempre de las características particulares de la zona en que se está trabajando. Incluso los valores nx y ny varían en función de la resolución de la grilla con la que se modela el caso actual, donde el cuadrante es de 8.5 kilómetros en el eje x y 8 kilómetros en el eje y. La condición de la tabla corresponde a una resolución de malla de 20 metros.

Como se indica en la tabla anterior, la información del oleaje se ingresa en formato SWAN. Este es extraído a partir de la información de antecedentes dependiendo del espectro que se deba modelar.

Para la resolución de las ecuaciones de aguas someras la fricción con el fondo es asociado a las corrientes medias y a las ondas largas mediante la formulación de la tensión de corte con el fondo. La formulación para determinar el coeficiente de fricción que se utiliza para el modelo, es la que XBeach posee por defecto, de formulación Chézy, con un número de Chézy de $55\text{m}^{1/2}/\text{s}$.

3.3.2 Verificación resultados

Para verificar la coherencia de las modelaciones, se busca hacer una comparación directa entre los resultados del modelo y las mediciones de los ADCP, ya que estos datos permiten caracterizar físicamente los fenómenos de oleaje dentro de la bahía y comprobar calidad de pronóstico.

Se debe obtener el espectro de oleaje en aguas profundas por el período de tiempo en que se tengan mediciones, o parte de él, de manera de poder propagar el oleaje hacia la bahía con el modelo XBeach. Una vez que se obtiene los resultados se comparan con las mediciones obtenidas por los ADCP dentro de ese mismo período de tiempo.

Para la modelación de esta etapa, se extrae la condición de borde a partir de condiciones propagadas con el modelo WaveWatch III en un punto cercano al límite oeste del cuadrante en estudio, con una profundidad de 206 metros.

En la Figura 3.7 se presenta la ubicación respecto a la zona de estudio del nodo de extracción de los espectros de oleaje incorporados a XBeach como condiciones de borde.

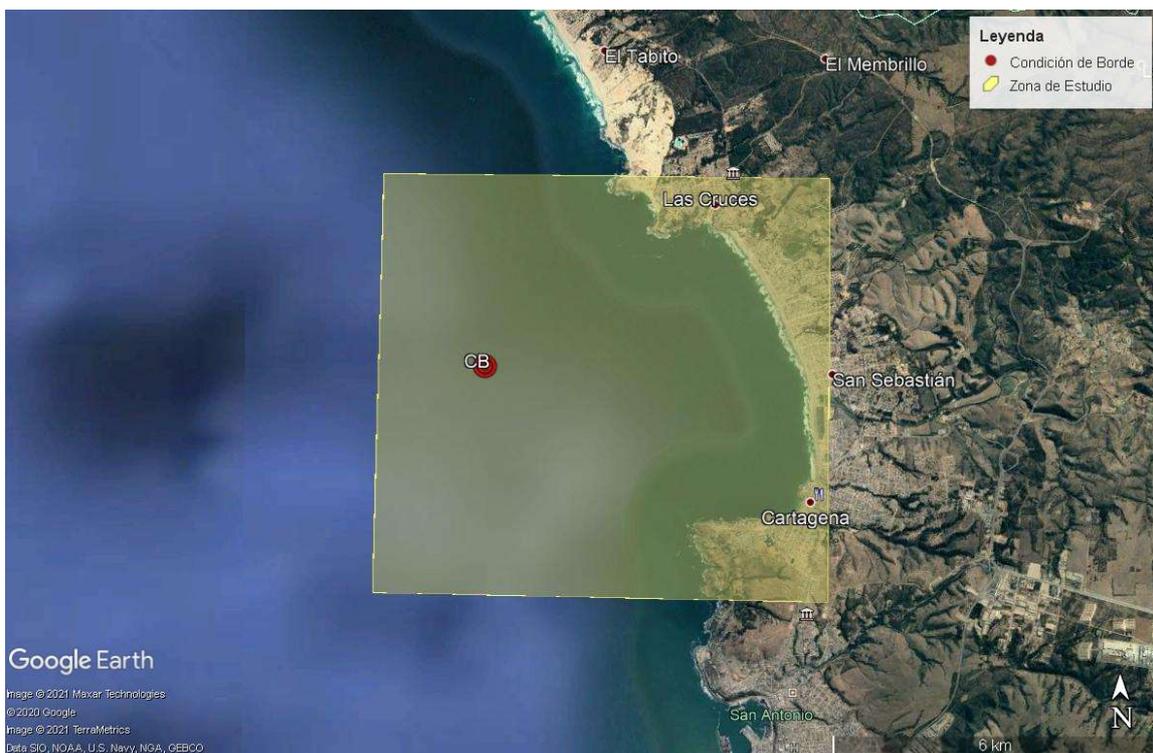


Figura 3.7 Punto de obtención de las condiciones de borde para verificación del modelo XBeach.

Considerando lo anterior, la etapa de verificación se divide en 3 etapas:

i. Estabilización del modelo

Se debe entender que, al comenzar a modelar, el escenario al que se incorporan las variables y condiciones de borde se encuentra en reposo, por lo que es necesario alcanzar un estado de

equilibrio compatible con el clima de oleaje inicial antes de continuar con el modelado (*warming up*).

Esto marcará una duración mínima que debe tener cada corrida del modelo con el fin de asegurar el desarrollo completo y compatibilidad de las condiciones de borde que se ingresan.

Para verificar cuando se alcanza esta condición, se extraen los parámetros modelados en distintos puntos del dominio haciendo un seguimiento temporal de su evolución.

ii. Resolución Espacial

Con el objetivo de optimizar el tiempo de cálculo y la convergencia de los parámetros modelados, se analizan las salidas del modelo para mallas de 10 m, 20m y 50m de resolución respectivamente.

La sensibilidad del modelo a la resolución espacial para este caso, determina el tamaño de la malla en la etapa final de verificación. Al disminuir el tamaño de resolución al que se elabora la grilla, se tiene acceso a mayor detalle del espacio en el que se trabaja, pero el procesamiento de la información se vuelve más lento, requiere una mayor capacidad computacional y el almacenamiento de los resultados también resulta más costoso. Por otro lado, al ser la resolución más espaciada, se pierde detalle del área en estudio, pero computacionalmente se vuelve un proceso más ligero, reflejado también cuánto tarda el modelo en resolverlo.

En la Figura 3.8 presenta la zona de la Bahía de Cartagena, Las Cruces, tras procesar la grilla para las resoluciones de 10, 20 y 50 metros, enumerándolo desde arriba hacia abajo. La imagen permite apreciar la pérdida de detalle de la configuración de la zona a medida que se aumenta el tamaño de la malla, notándose más claramente en los bordes de la bahía.

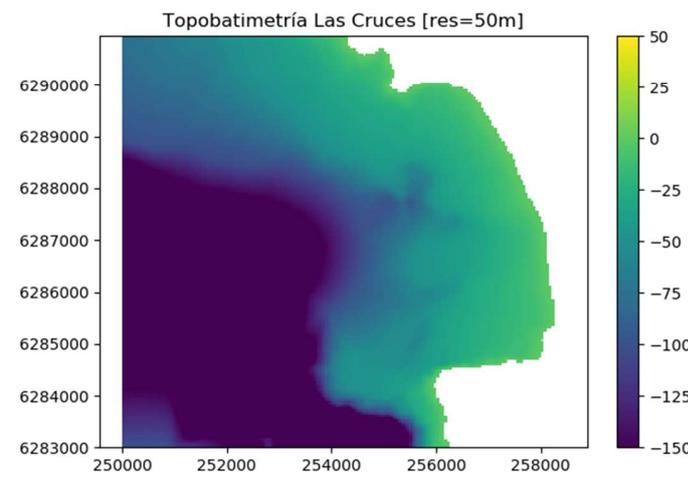
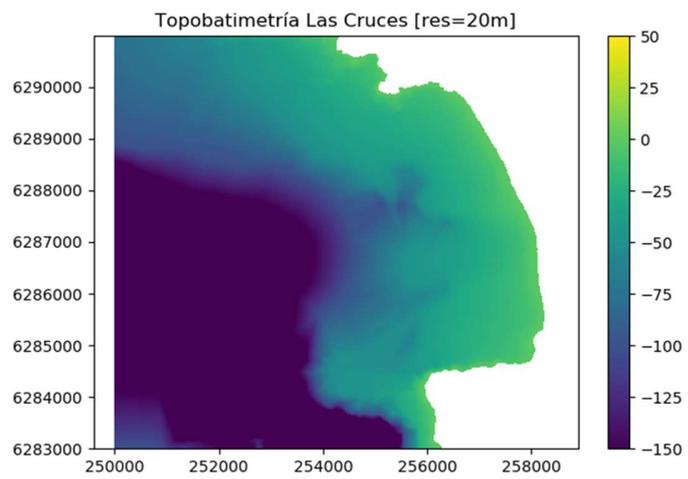
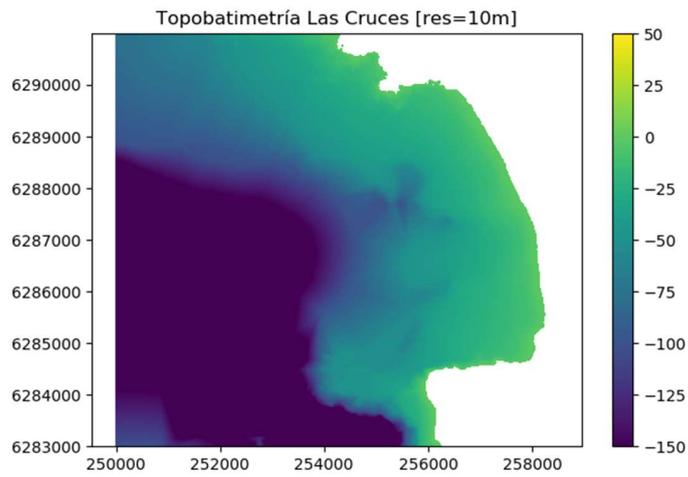


Figura 3.8 Topobatemetría de la zona de estudio mallada a distintas resoluciones. En la parte superior la resolución es de 10 metros, en el centro de 20 metros y en el cuadrante inferior es de 50 metros.

iii. Verificación

Determinando un período de tiempo dentro del que se tiene información, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se modela en XBeach a lo largo de todo el período y se comparan los resultados con los registros de los ADCP y posteriormente se calcula el error del modelo para las condiciones modeladas.

Es necesario tomar en cuenta que para comparar correctamente los resultados de altura obtenidos del modelo (H_{rms}) con la información rescatada de los ADCP (H_{m0}) se asume una distribución de Rayleigh para las series de oleaje por lo que es posible vincular los estadísticos asociados a altura cuadrática media con la altura significativa espectral:

$$H_{rms} = \frac{1}{2} \sqrt{2} H_{m0} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Finalmente, se utiliza la ecuación 3.18 para calcular el error RMS entre los parámetros de oleaje observados y modelados y así obtener un indicador sobre la calidad de los ajustes.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{mod})^2}{n}} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Donde X^{obs} corresponde a los valores medidos, en este caso los datos de los ADCP, y X^{mod} corresponden a los obtenidos a partir del modelo, y n es el número de datos.

3.3.3 Métodos de agrupamiento para la selección de climas de oleaje

Para la selección de climas de oleaje se consideran los métodos de agrupamiento *k-means algorithm* (KMA) y *maximum-dissimilarity algorithm* (MDA), métodos analizados por Camus et al. (2011). Como indica Lucero et al. (2013) el método KMA consiste en agrupar los datos en subgrupos que serán representados por su centroide, lo que lo lleva a ser representativo de climas de oleaje operacionales, mientras que el método MDA tiene por objetivo representar la diversidad de la totalidad de los datos, por lo que representa valores extremos y/o la mayor disimilitud de la muestra.

Ambas metodologías sirven para un análisis multidimensional, permitiendo agrupar los datos en base a varios parámetros según corresponda en cada caso (Camus et al., 2011). Para el caso del estudio se utiliza como parámetros de selección la altura significativa (H_{m0}), período medio de momento (T_{m10}) y la dirección media del oleaje (MDW).

Lucero et al. (2013) explica que para que los algoritmos consideren cada parámetro de selección con la misma importancia, es necesaria la normalización de estos últimos, luego la medición de las distancias entre elementos de la base de datos para identificar los subgrupos y, finalmente, volver los valores a los originales revertiendo la normalización. La metodología se explica a continuación siguiendo las directrices del autor antes mencionado.

i. Normalización:

Este proceso se lleva a cabo utilizando la transformación que sigue,

$$\hat{H}_i = \frac{H_i - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}; \hat{T}_i = \frac{T_i - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}; \quad \text{Ec. 3.19}$$

$$\theta_i = \begin{cases} (\theta_{max} - \theta_{min}) \geq \pi \rightarrow \frac{\theta_i}{\pi} \\ (\theta_{max} - \theta_{min}) < \pi \rightarrow \frac{\theta_i}{(\theta_{max} - \theta_{min})} \end{cases}$$

Donde los parámetros X_i son los valores de la variable sin normalizar, \hat{X}_i son los valores normalizados y X_{max}/X_{min} son los valores extremos, siendo X los parámetros H, T, θ .

ii. Distancia:

Para determinar la distancia entre cada par de datos de la muestra, se utiliza la ecuación siguiente,

$$\|X_i - X_j\| = \sqrt{(\hat{H}_i - \hat{H}_j)^2 + (\hat{T}_i - \hat{T}_j)^2 + (\min\{|\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j|, 2 - |\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j|\})^2} \quad \text{Ec. 3.20}$$

Donde X_i es la componente i del grupo de m vectores y X_j es la componente j del grupo de n datos.

iii. Des-normalización:

Finalmente, es necesario devolver los datos a su estado original para identificar el punto en la muestra que es representativo del grupo, para esto se utiliza:

$$\begin{aligned} H_i &= \hat{H}_i \cdot (H_{max} - H_{min}) + H_{min}; \\ T_i &= \hat{T}_i \cdot (T_{max} - T_{min}) + T_{min}; \\ \theta_i &= \begin{cases} (\theta_{max} - \theta_{min}) \geq \pi \rightarrow \hat{\theta}_i \cdot \pi \\ (\theta_{max} - \theta_{min}) < \pi \rightarrow \hat{\theta}_i \cdot (\theta_{max} - \theta_{min}) \end{cases} \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.21}$$

Donde se respeta la nomenclatura asignada en el proceso de normalización.

A continuación, se describen los métodos de agrupamiento que se utilizan.

i. K-Means Algorithm

EL primer paso para dar inicio al método, es determinar la cantidad M de vectores, es decir, la cantidad de grupos en que se quiere dividir la muestra. El proceso de clasificación comienza con centroides elegidos de manera aleatoria para cada uno de los grupos $\{\{v_1^0 \dots v_M^0\}\}$, desde donde comienza un proceso iterativo en que se mide la distancia de cada punto de la muestra a los centroides y se reagrupan los datos bajo el criterio de la mínima distancia.

La reagrupación de los datos llevará a la aparición de un nuevo centroide en cada uno de los grupos, dado que el promedio de los componentes del grupo cambiará, por lo que será necesario repetir el proceso hasta que el centroide se mantenga en su lugar o se respete alguna tolerancia determinada por el usuario. En la Figura 3.9 se muestra una representación de este proceso.

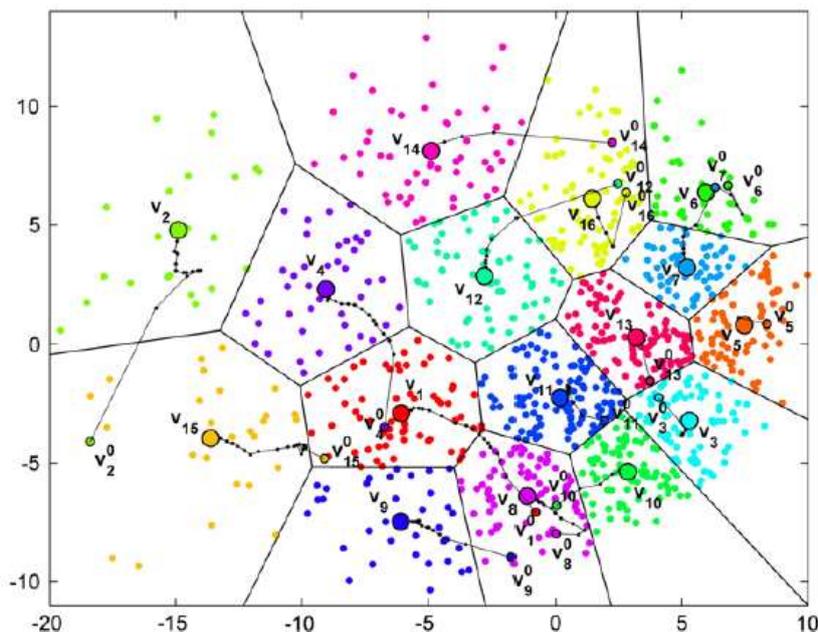


Figura 3.9 Agrupamiento KMA: inicio $\{v_1^0, \dots, v_m^0\}$ y posterior desarrollo a centroide final $\{v_1, \dots, v_m\}$ (Camus et al., 2011). Cada eje representa un criterio de selección.

La Figura 3.9 busca representar una muestra de datos, donde cada uno de los ejes corresponde a un criterio de selección. En base a la ubicación de los puntos en cuanto al criterio elegido, se miden las distancias necesarias para el desarrollo del algoritmo.

Es importante destacar que el resultado de este algoritmo no necesariamente entrega un punto existente en la base de datos, ya que se trabaja con promedios. Una vez que se tienen los centroides de cada grupo se vuelve a utilizar la mínima distancia para encontrar el espectro de oleaje más representativo del grupo.

ii. Maximum-Dissimilarity Algorithm

A diferencia del método anterior, esta vez se utiliza las distancias entre cada punto para buscar el elemento más disímil.

Nuevamente es necesario determinar la cantidad M de puntos que se quiere obtener de la muestra. Posteriormente se mide la distancia entre cada par de puntos y se elige aquel que tiene una mayor distancia con todos los demás, el cual de manera inmediata se vuelve un resultado para el algoritmo. A partir de ahí comienza un proceso iterativo, en el cual en cada iteración se busca encontrar el elemento más disímil de los puntos de la muestra y del o los vectores elegidos en las iteraciones anteriores.

Una vez que se completan las M iteraciones y, por lo tanto, se obtienen los M puntos que se buscan para el agrupamiento, se vuelve a medir las distancias, pero esta vez se busca la distancia mínima a cada punto para asociar cada punto a uno de los determinados por el algoritmo. La Figura 3.10 representa el agrupamiento por este algoritmo, nuevamente considerando cada eje como un criterio de selección.

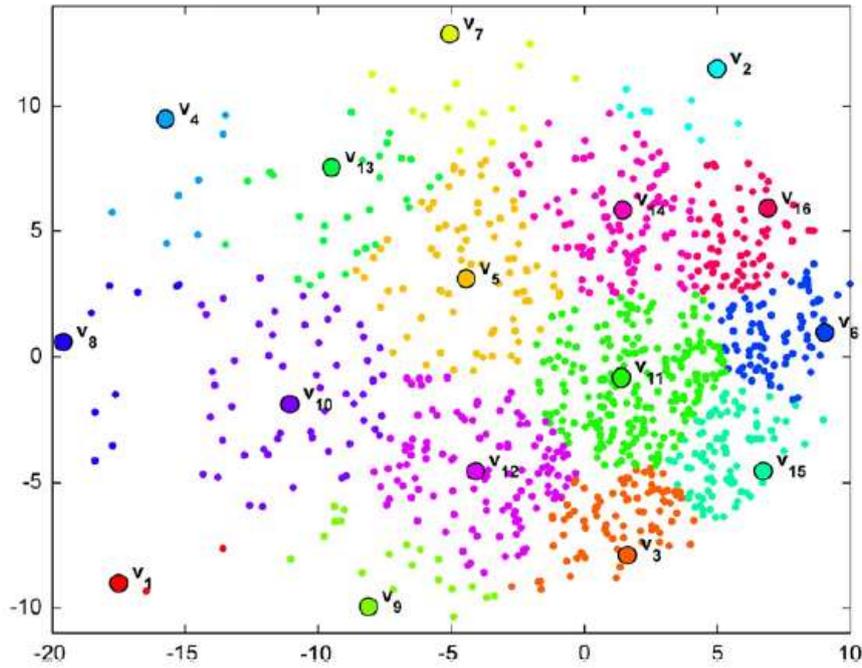


Figura 3.10 Representación del algoritmo por máxima disimilaridad (Camus et al., 2011). Cada eje representa un criterio de selección.

Como esta vez el algoritmo rescata los elementos directamente desde la medición de distancias, los resultados corresponderán directamente a puntos pertenecientes a la muestra.

La razón de elegir estos dos algoritmos es porque permite representar por un lado climas de oleaje recurrentes, que son los obtenidos por el algoritmo KMA, junto a climas de oleaje extremos o poco frecuentes, que los entrega el método MDA.

3.3.4 Modelación de climas de oleaje

Una vez que se obtienen los climas de oleaje mediante los métodos de agrupamiento, se extraen los espectros de oleaje respectivos para definir las condiciones de borde de las modelaciones. Cada estado de mar se modela de manera de obtener al menos 3 horas de datos, además del tiempo requerido para la estabilización inicial.

Para el post procesamiento y la facilitación del análisis en esta etapa del trabajo, se estima la potencia del oleaje a lo largo del cuadrante en estudio, asumiendo que todas las frecuencias están en aguas profundas, utilizando la ecuación 3.22.

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_{10} \quad \text{Ec. 3.22}$$

Donde los parámetros H_{m0} y T_{10} son mismos utilizados anteriormente, g es la constante de gravedad, ρ es la densidad del agua de mar y P es la potencia en unidades de W/m para el sistema internacional. La potencia del oleaje permite estimar la capacidad del recurso, ya que se trata del flujo de energía a través de una sección de área unitaria ubicada en el punto de interés.

Dado que XBeach no entrega como resultado la información espectral, sino que parámetros determinados, se estudia la variación entre el período energético y el período medio en puntos de la zona donde hay información, con el objetivo de identificar la diferencia entre los valores que toman ambos parámetros en la zona de estudio, de manera de reemplazar más adelante el período energético por el período medio en la ecuación 3.22.

En la Figura 3.11 se presenta en la parte superior una comparación del desarrollo de los períodos en el tiempo, mostrando en azul el período energético y en naranja el período medio, mientras que en la parte inferior una comparación entre ambos períodos con la línea de tendencia para identificar la diferencia entre ambos parámetros. Esta información se desarrolló en base a la lectura de los dispositivos ADCP.

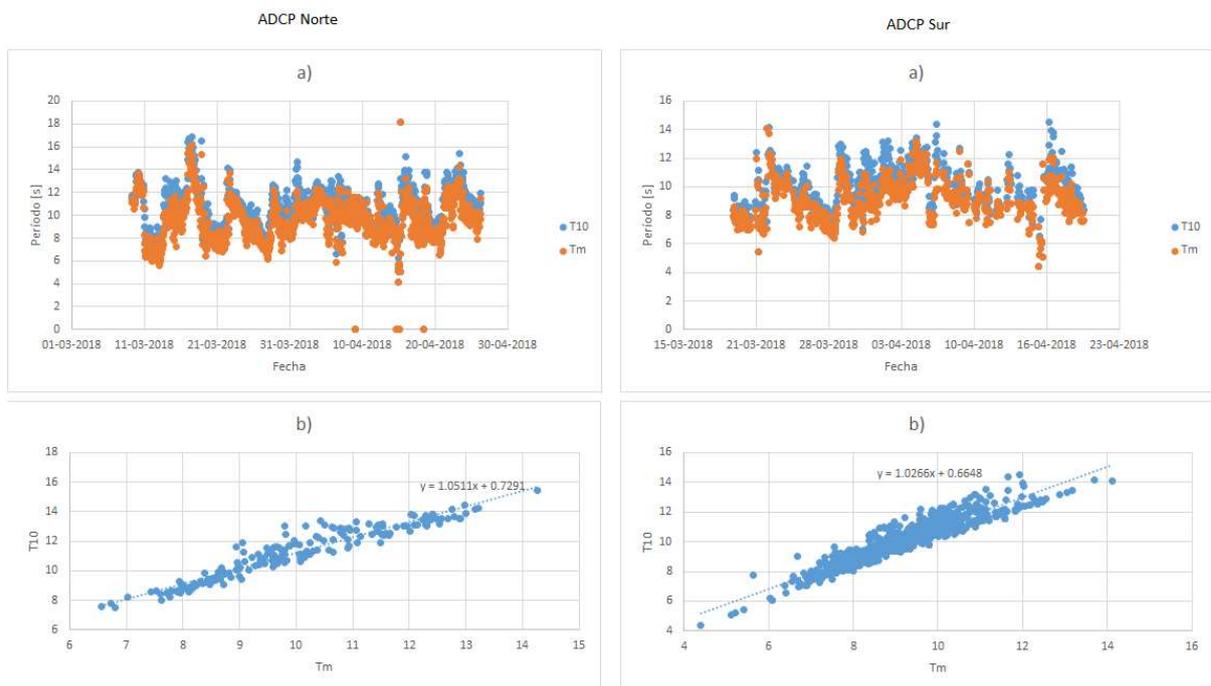


Figura 3.11 Comparación del período energético y medio para el ADCP Norte (izquierda) y ADCP Sur (derecha). Los gráficos de la parte superior presentan el comportamiento de ambos períodos en el tiempo, mientras que en la parte inferior se presenta el comportamiento del período energético respecto al período medio.

La variación entre un parámetro y otro se estima entre un 2% a 5%, siendo mayor el valor del período energético. Los valores de ambos parámetros se asemejan, por lo que se aplica la ecuación 3.22 con el período medio, y se considera válido el resultado.

4. Resultados

Los resultados más destacables del trabajo se presentan a continuación. En primer lugar, la etapa de verificación que permite cuantificar la bondad de ajuste entre los datos observados y modelados, luego los climas de oleaje obtenidos gracias a los algoritmos de agrupamiento y ,por último, los resultados del modelo XBeach para la situación sin y con interacción oleaje-corriente.

4.1 Verificación

Como se describió en la metodología, se realiza la verificación del modelo en etapas de manera de analizar todas las variables que pueden afectar sus resultados.

Para poder comparar los resultados, la verificación de los modelos se realizará con los parámetros de altura de ola significativa H_m0 , el periodo promedio T_m , y la dirección promedio del oleaje (Mean Wave Direction o MWD).

El período de tiempo en que se tiene información que se utiliza para comprobar la confiabilidad de los resultados del modelo XBeach es entre los días 19 de marzo y 20 de abril de 2018, representado en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Información de altura de ola significativa (H_m0), el periodo promedio (T_m) y dirección promedio del oleaje (MWD) disponible de los ADCP. Encerrado en amarillo se presenta el período de tiempo con el que se trabaja para la verificación.

Los resultados del modelo, además de ser extraídos de manera global y promedio, se extraen en algunos puntos de interés con el fin de enriquecer el análisis. En la Figura 4.2 se muestran distribuidos espacialmente los puntos de salida de resultados, donde se identifica el punto 0 como el ADCP Norte y el punto 1 como el ADCP Sur. Los demás puntos se distribuyen con el fin de identificar el avance de las condiciones de oleaje hacia la costa.

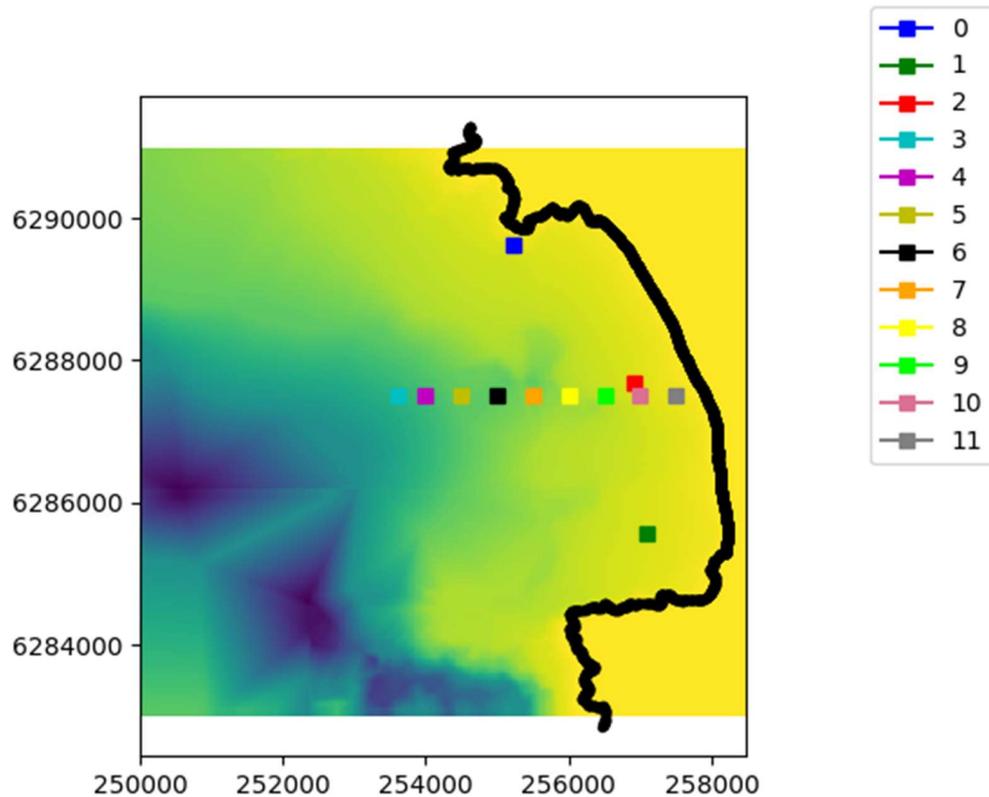


Figura 4.2 Ubicación de puntos de extracción de resultados para modelo XBeach. El punto 0 representa el ADCP Norte, el punto 1 el ADCP Sur, y los demás representan el desarrollo hacia la costa de manera perpendicular a esta.

Al tener puntos donde extraer los resultados, se puede hacer un seguimiento del desarrollo de los parámetros para todos los puntos de la imagen, como se hace con los datos 0 y 1, asociados a los ADCP norte y sur, ya que existen mediciones en dichos puntos.

Estos puntos son utilizados además para establecer la duración del proceso de *warming up*, ya que para determinar que se dejó el estado de reposo y se alcanzó una cierta estabilidad, es necesario que esto se cumpla a lo largo de toda la bahía.

En la Figura 4.3 se presenta el resultado de la modelación de un caso de ejemplo con el fin de identificar el tiempo que demora el modelo en alcanzar estabilidad luego de iniciada la simulación, esto ayuda a decidir la duración mínima requerida de cada corrida. Para esto, se utiliza un modelo con resolución de malla $dx=dy=20$ m, con una condición de borde constante con los parámetros siguientes: $H_{m0} = 2.12$ m; $T_m = 9.84$ s; $MWD = 213.85$ °N y se observa cuánto se demora el modelo en llegar a una solución cuasi estacionaria para los puntos presentados en la Figura 4.2, siguiendo la misma numeración.

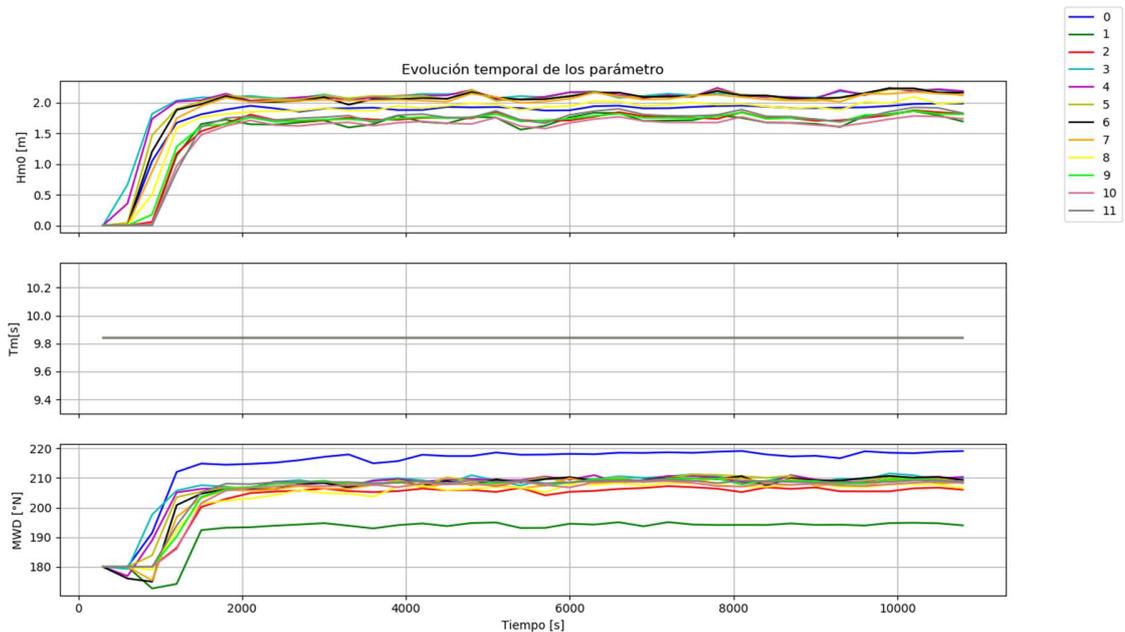


Figura 4.3 Verificación *warming up*. Evolución temporal de los parámetros para una condición de oleaje constante para cada punto de extracción de resultados del modelo a lo largo de la bahía.

Se puede identificar a partir de la figura anterior que alrededor de los 1,500 segundos, es decir, pasado los 25 minutos, el modelo ya se encuentra fuera del reposo para todos los puntos. Esto significa que los modelos que se procesan con XBeach deben procesar condiciones de oleaje de una duración mayor al valor obtenido de *warming up* de manera de asegurar que los resultados no están siendo subestimados.

El modelo XBeach en su modalidad surfbeat, que es la que se usa en el presente estudio, no varía el período del oleaje al propagarlo, es por esto que el resultado que arroja es una línea recta, sólo está representando la condición de borde.

Junto con aspirar a resultados confiables, se busca optimizar la necesidad de recursos computacionales, por lo que se somete una condición de oleaje a resoluciones de grilla de 10, 20 y 50 metros, cuyos resultados se presentan en la Figura 4.4, a continuación. La condición entrante fue un espectro constante de características correspondientes al día 01/04/2018 al igual que para conocer la estabilización, es decir, parámetros $H_{m0} = 2.12$ metros, $T_m = 9.84$ segundos y $MWD = 213.85$ °N.

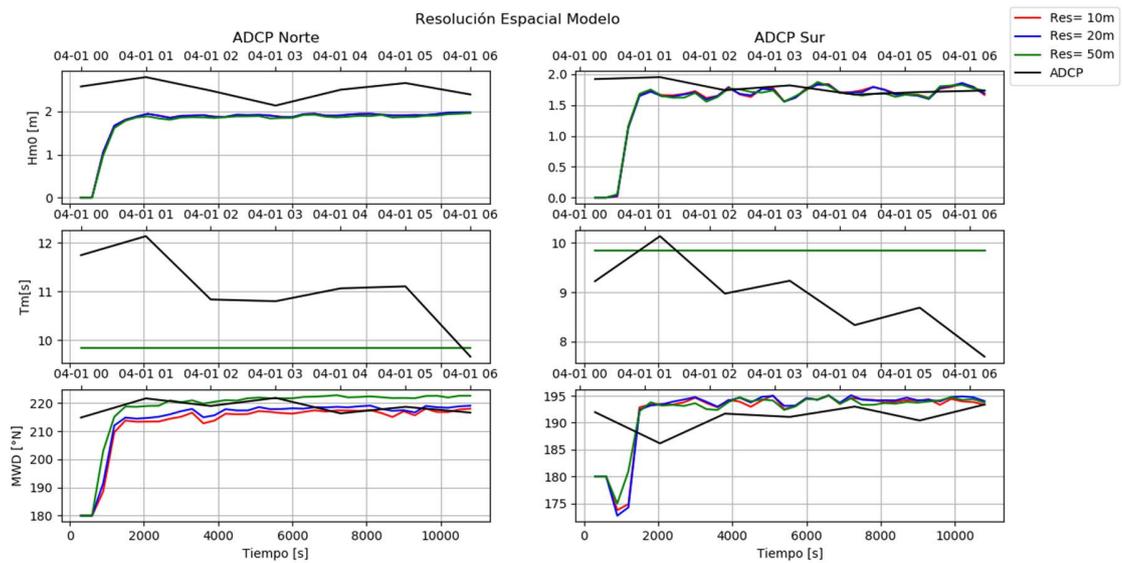


Figura 4.4 Resolución Espacial modelos. Presentación de los resultados para la misma condición de oleaje modelada a distintas resoluciones de grilla y su comparación con las mediciones del ADCP Norte y ADCP Sur.

En general no se ven grandes variaciones en los resultados debido a la resolución de modelación, el equilibrio en el que oscila en cada caso no es significativo. La mayor diferencia se nota en el cambio de dirección de oleaje, que se ajusta mejor a las mediciones para el ADCP norte cuando la malla se vuelve más fina.

Al comparar los resultados obtenidos para ADCP Norte y Sur, se puede notar que las discrepancias son mayores al comparar con el dispositivo instalado al norte de la bahía ya que es el más expuesto al oleaje incidente. Como es usual en Chile, y se refleja en la condición de borde, el oleaje viene desde la dirección suroeste y por la forma de la bahía esto tiende a abrigar la zona sur.

En la Tabla 4.1 se presenta el tiempo que tarda en correr el modelo para cada resolución espacial, además del tamaño de almacenamiento requerido para el archivo resultante de la modelación. Para cada resolución espacial se modelan las mismas condiciones de borde de oleaje y los mismos recursos computacionales, considerando 20 núcleos y 20 tareas por núcleo.

Tabla 4.1 Tiempo de cómputo y tamaño de archivo resultante para cada resolución de grilla. Objetivación de capacidad computacional requerida.

Resolución Espacial	Tiempo Corrida	Tamaño Archivo Resultante
[m]	[hrs]	[Gb]
50	0.42	0.8
20	5.12	5
10	15.09	21

Una vez que se obtienen los resultados para las consideraciones anteriores, se determina la ventana de tiempo en la que se tiene información y que se utiliza para verificar finalmente la confiabilidad del modelo respecto a las mediciones reales.

Para facilitar la carga computacional en términos de tiempo y almacenamiento, se utiliza una grilla de 50 metros uniforme a lo largo de la zona de estudio para el proceso de verificación de la confiabilidad del modelo XBeach.

En la Figura 4.5 se presenta la verificación para los días 19 de marzo al 20 de abril del año 2018, incorporando los resultados del modelo, las mediciones de los ADCP y la condición de borde de oleaje que se ingresa.

Verificación 19/03/2018 al 20/04/2018

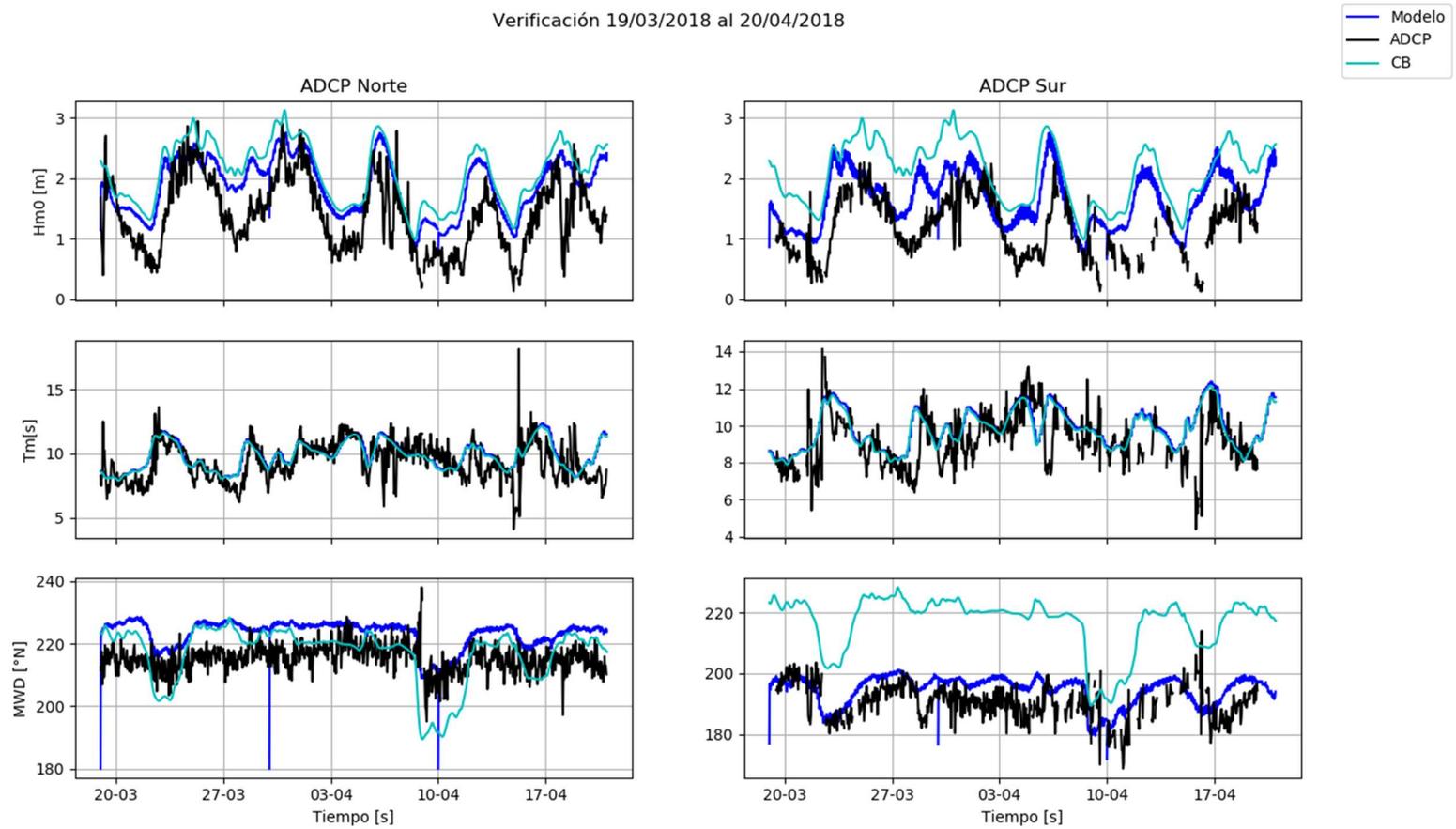


Figura 4.5 Verificación 19/03/2018 a 20/04/2018. Comparación resultados modelo (azul), mediciones ADCP (negro) y condiciones de borde (celeste) tras incluir consideraciones temporales de warming up y espaciales.

Visualmente, se identifica que en el caso de las alturas significativas H_{m0} , tanto para el ADCP Norte como Sur, el modelo es capaz de seguir la tendencia de lo que ocurre en la realidad, aunque hay tramos en que se puede encontrar una diferencia de hasta 1 metro en altura de ola. Luego, para las direcciones ocurre lo mismo, el modelo representa correctamente la forma en que oscilan los valores, pero hay tramos en que la diferencia puede ser de alrededor de 5 a 10 grados. Finalmente, el modelo XBeach en su versión surfbeat no varía el período al propagar el oleaje por lo que no se espera una reproducción exacta a lo que indican las mediciones, pero de todas maneras se ve que los valores de período medio si se condicen con lo medido por los ADCP en su tendencia, lo que indica que las condiciones de borde obtenidas con el modelo WAVEWATCH III, también se corresponden con los datos medidos.

Finalmente, en la Tabla 4.2 se presenta el error *Root Mean Square* de los parámetros para el caso de verificación, en cada uno de los puntos ADCP. Se observa que se condice con lo que se puede indicar con una inspección visual.

Tabla 4.2 Error RMS período verificación parámetros H_{m0} , T_m y MWD.

Punto	H_{m0} [m]	T_m [s]	MWD [°N]
ADCP Norte	0.61	1.38	9.40
ADCP Sur	0.65	1.46	7.29

El modelo presenta errores elevados para todos los parámetros. El error asociado a la altura de oleaje es alto para ambos casos, siendo superior al comparar las mediciones del ADCP Sur. Por otro lado, el error en las direcciones es mayor al evaluar el modelo con la información del ADCP Norte, presentando en ambos casos valores superiores a lo esperado ya que la resolución direccional que se le otorgó al modelo durante el desarrollo fue de 5 grados. Finalmente, el error asociado a los períodos depende mayoritariamente de la condición de borde que se ingresa al modelo, en este caso quedando para ambos puntos en un error admisible.

4.2 Climas de oleaje

Para la selección de climas de oleaje se determina la obtención de cuatro espectros de oleaje por cada uno de los algoritmos. En las Tablas 4.3 y 4.4 se presentan los resultados para cada algoritmo.

Tabla 4.3 Climas de oleaje resultantes del algoritmo KMA.

Clima de oleaje	H [m]	T [s]	Dir [deg]	N de datos	Porcentaje	Fecha Representativa
C1	2.095	10.36	241.62	64962	26.47	26.07.1994 9:00
C2	2.391	8.47	214.72	61947	25.24	19.12.1996 16:00
C3	3.108	10.14	216.67	52582	21.42	14.11.2010 1:00
C4	2.767	12.77	230.12	65957	26.87	29.03.1997 11:00

Como es de esperarse dada la descripción del método, la distribución de los puntos obtenidos con el método de agrupamiento k-mean es uniforme a lo largo de los 4 centroides resultantes.

Además, si comparamos con la información de las Tablas 3.2 y 3.3, se observa que todos los puntos resultantes se encuentran en los tramos más recurrentes de los parámetros.

Tabla 4.4 Climas de oleaje resultantes del algoritmo MDA.

Clima de oleaje	H [m]	T [s]	Dir [deg]	Nº de datos	Porcentaje	Fecha
C1	8.256	11.07	346.70	151	0.06	08.08.2015 16:00
C2	2.181	6.28	180.07	171885	70.03	16.07.1995 11:00
C3	3.700	17.68	234.31	64165	26.14	16.06.2006 8:00
C4	2.088	6.70	344.40	9247	3.77	05.08.1996 06:00

Los resultados del algoritmo MDA demuestran lo contrario, la distribución de la información es dispar y al posicionar cada caso en base a la información de las Tablas 3.2 y 3.3 se nota que corresponden a casos que tienen un porcentaje de ocurrencia pequeño.

Otra diferencia entre los resultados de los métodos de agrupamiento, corresponde a la variabilidad de cada uno de los parámetros para cada caso. En el caso del algoritmo KMA la altura oscila para todos los casos entre 2 y 3 metros, los períodos son siempre cercanos a 10 segundos y las direcciones corresponden siempre a oleajes provenientes del suroeste, mientras que para el algoritmo MDA no existe una tendencia en los casos, sino que cada uno busca diferenciarse del anterior.

4.3 Modelación climas de oleaje

Tras la obtención de los puntos a modelar con ambos métodos de agrupamiento, se modela cada uno de los casos. La modelación de esta etapa se desarrolló utilizando una resolución de malla de 50 metros y modelando cada condición de oleaje por 3 horas.

Posteriormente se calculó la potencia para cada clima de oleaje modelado, obteniéndose los resultados de la Tabla 4.5. La razón por la que se obtienen los valores de potencia en los puntos de ADCP, es porque es donde se verificó el modelo.

Tabla 4.5 Potencial de oleaje climas de oleaje resultantes de algoritmos de agrupamiento en puntos ADCP Norte y Sur.

Algoritmo	Caso	Potencia [kW/m]	
	Clima de oleaje	ADCP Norte	ADCP Sur
KMA	1	19.31	15.27
	2	16.17	6.12
	3	38.00	23.79
	4	50.74	56.93
MDA	1	49.87	44.92
	2	5.89	1.49
	3	132.15	326.64
	4	2.57	3.69

Se ve que lo usual es que la potencia en la parte norte de la bahía sea mayor a la potencia en la parte sur, a excepción de 3 casos, que corresponden al clima de oleajes 4 del algoritmo KMA y los climas 3 y 4 del algoritmo MDA. Al revisar las características de dichos climas de oleaje se ve que uno de ellos corresponde a un oleaje proveniente del norte, mientras que los otros dos corresponden a oleajes del suroeste.

Para incorporar el análisis de la interacción oleaje-corriente en el estudio, se modelan los mismos climas de oleaje obtenidos tras los algoritmos de agrupamiento, pero esta vez activando la condición de interacción *Wave-Current Interaction* (WCI=1). Para comenzar con un primer acercamiento a los resultados de esta parte, en la Tabla 4.6 se presenta la potencia promedio en la Bahía para cada caso modelado.

Tabla 4.6 Potencia media a lo largo de la bahía para casos modelados.

Caso		Potencia Promedio [kW/m]	
Algoritmo	Punto	WCI=0	WCI=1
KMA	1	17.95	16.69
	2	15.23	15.33
	3	34.33	31.76
	4	40.02	38.47
MDA	1	63.54	30.10
	2	5.56	5.32
	3	116.48	107.45
	4	3.72	3.64

Se ve que la tendencia es que la potencia sea mayor para los casos en que se modela el oleaje por sí solo (WCI=0), ya que esto se cumple para todos los casos menos en uno en que la diferencia es mínima.

Otro caso que llama la atención es el primer clima de oleaje del algoritmo MDA, la tormenta del 8 de agosto de 2015, ya que al no incorporar la interacción oleaje-corriente, el potencial se duplica.

A continuación, desde la Figura 4.6 a la Figura 4.13 se presentarán gráficamente los resultados obtenidos para cada caso de los métodos de agrupamiento que fueron modelados.

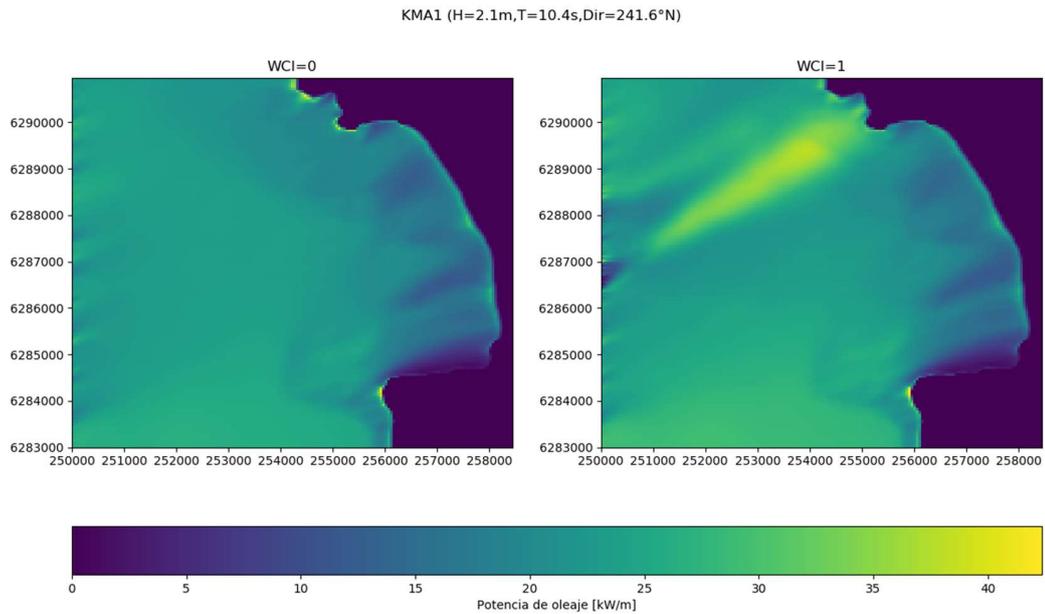


Figura 4.6 Resultados modelación algoritmo KMA- Clima 1. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.

La Figura 4.6 muestra los resultados para el primer clima del algoritmo k-mean. De acuerdo con la información de la Tabla 4.6 se cuenta con un mayor potencial al utilizar WCI=0, aun así, al ver la imagen se aprecia una línea peak casi en la misma dirección del oleaje para el caso WCI=1 hacia el extremo norte de la bahía.

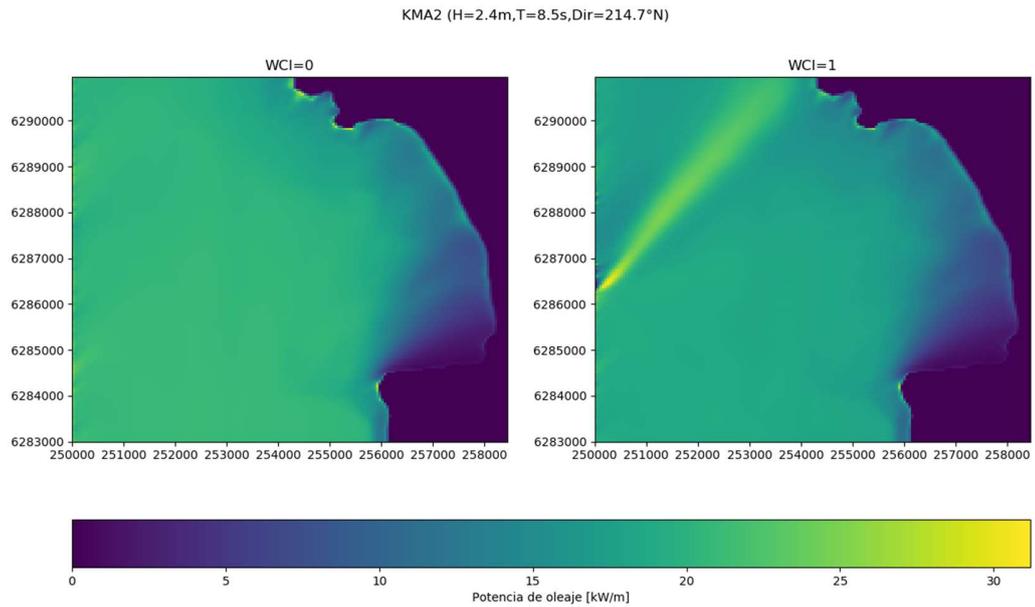


Figura 4.7 Resultados modelación algoritmo KMA- Clima 2. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.

Al igual que en el caso anterior, en la Figura 4.7 se evidencia un peak en la dirección del oleaje para la condición WCI=1. Por otro lado, esta vez la dirección del oleaje se inclina levemente hacia el sur, lo que genera ensombrecimiento en la parte sur interna de la bahía, que es a su vez la zona más abrigada para este tipo de oleajes.

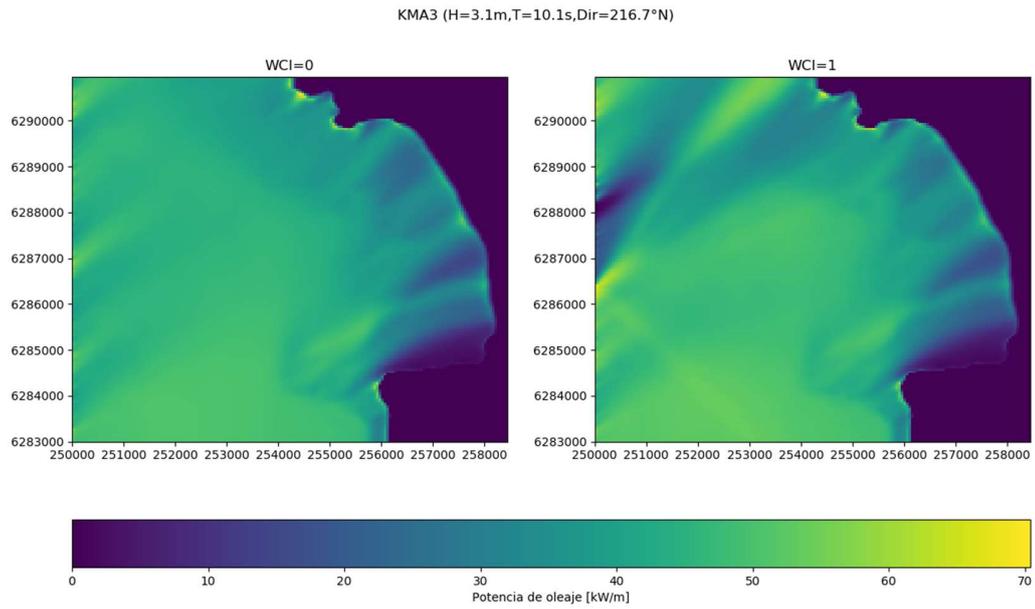


Figura 4.8 Resultados modelación algoritmo KMA- Clima 3. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.

Siguiendo con la tendencia de los casos anteriores, en la Figura 4.8 se presenta la potencia de oleaje de una condición de borde de dirección cercana a los 215°N, lo que genera una zona de abrigo en la parte sur de la bahía.

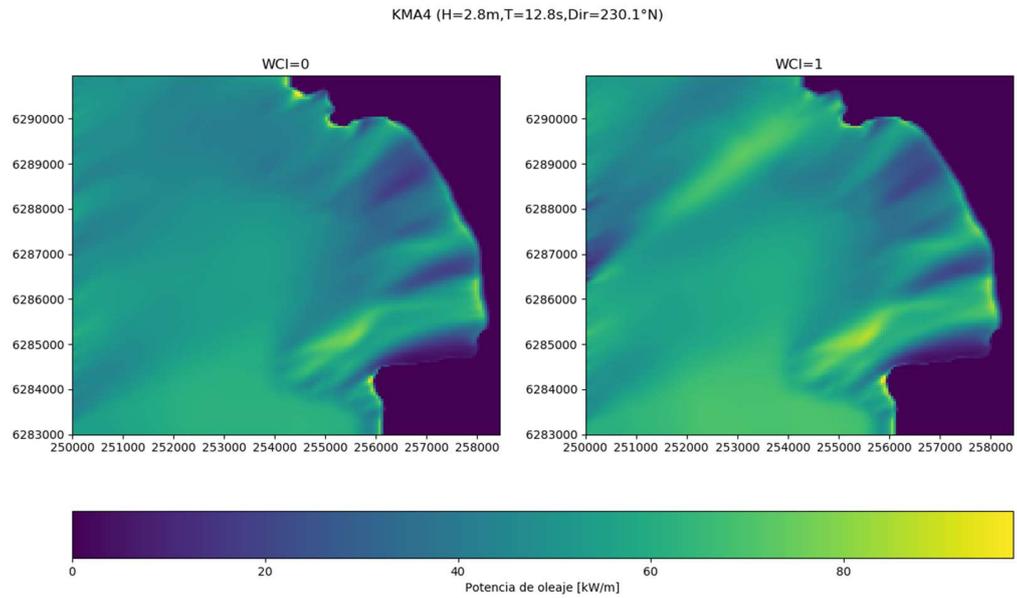


Figura 4.9 Resultados modelación algoritmo KMA- Clima 4. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.

Para el cuarto clima de oleaje del algoritmo KMA, Figura 4.9, muy similar al clima de oleaje 1 del mismo algoritmo, se ve una potencia de oleaje bastante similar para ambos casos, a diferencia de irregularidades en la entrada de la condición de borde para el caso WCI=1. Esta irregularidad se repite a lo largo de los resultados.

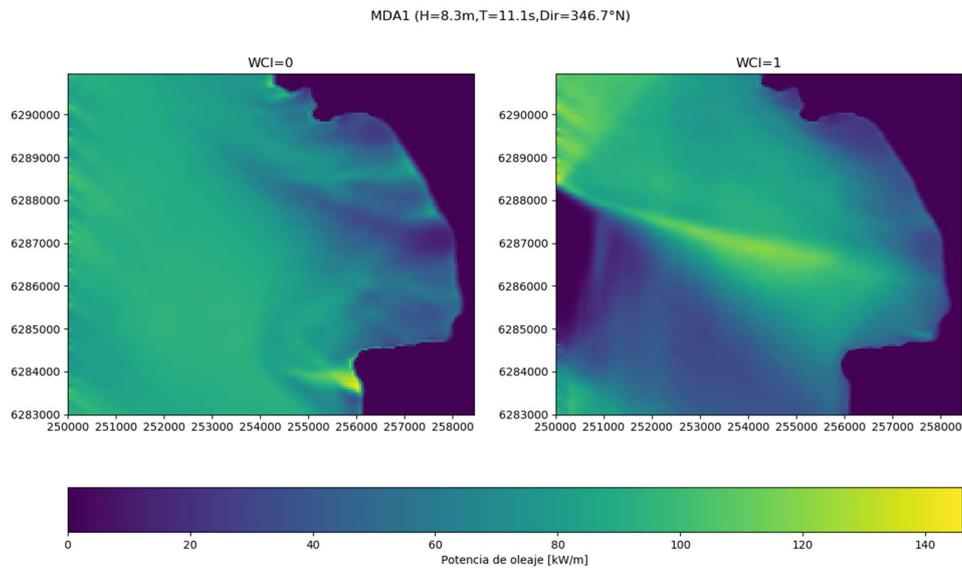


Figura 4.10 Resultados modelación algoritmo MDA- Clima 1. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.

El primer clima del algoritmo de máxima disimilaridad es bastante energético a lo largo de toda la bahía para ambos casos, pero muy diferentes en distribución. Bajo la condición WCI=0 se presenta un comportamiento casi uniforme de la potencia hacia el exterior de la bahía, en zona de agua más profunda, mientras que esta zona donde se comienza a propagar la condición de borde presenta grandes variaciones de potencia al implementar la interacción oleaje-corriente.

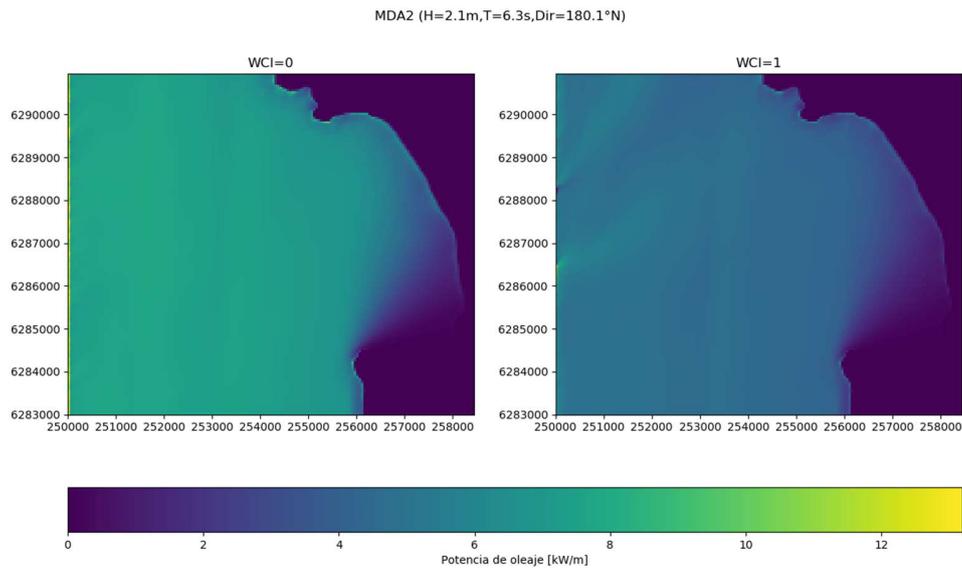


Figura 4.11 Resultados modelación algoritmo MDA- Clima 2. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.

En la Figura 4.11 presenta el segundo caso menos energético de entre aquellos modelados. Como se trata de un oleaje proveniente del sur, para ambas condiciones la bahía presenta una zona de abrigo en el sur donde la potencia alcanza a tener una potencia menor a 1,5 kW/m para el caso WCI=0, este calculado en la ubicación del ADCP Sur para dicha condición.

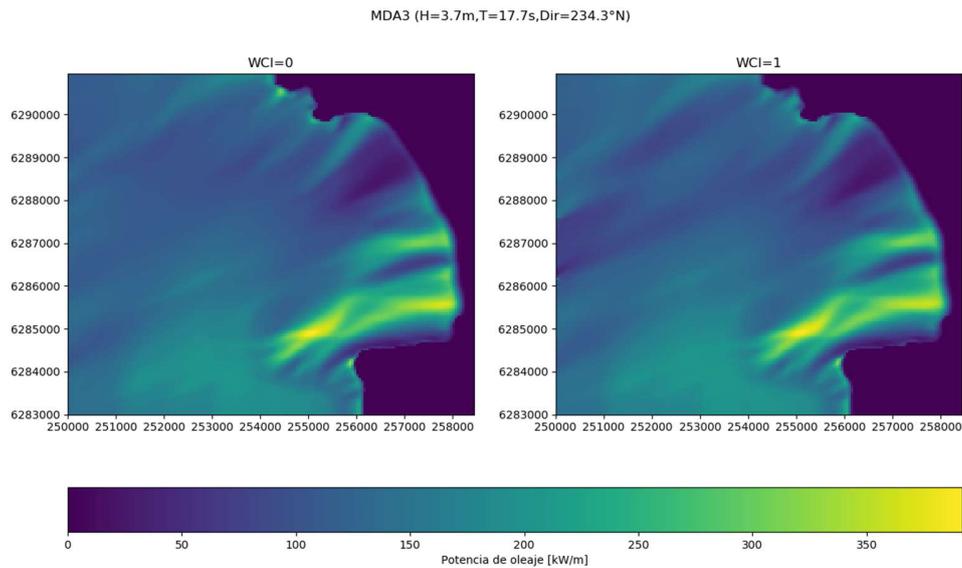


Figura 4.12 Resultados modelación algoritmo MDA- Clima 3. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.

El clima de oleaje número 3 del algoritmo MDA (Figura 4.12) es el caso que mayor potencia de oleaje presenta, concentrándose en la zona sur de la bahía. Para este caso, ambas condiciones modeladas se comportan de manera similar. La diferencia más identificable a partir de la imagen es la mayor irregularidad en la potencia que presenta la condición WCI=1 hacia el oeste, es decir, hacia aguas profundas.

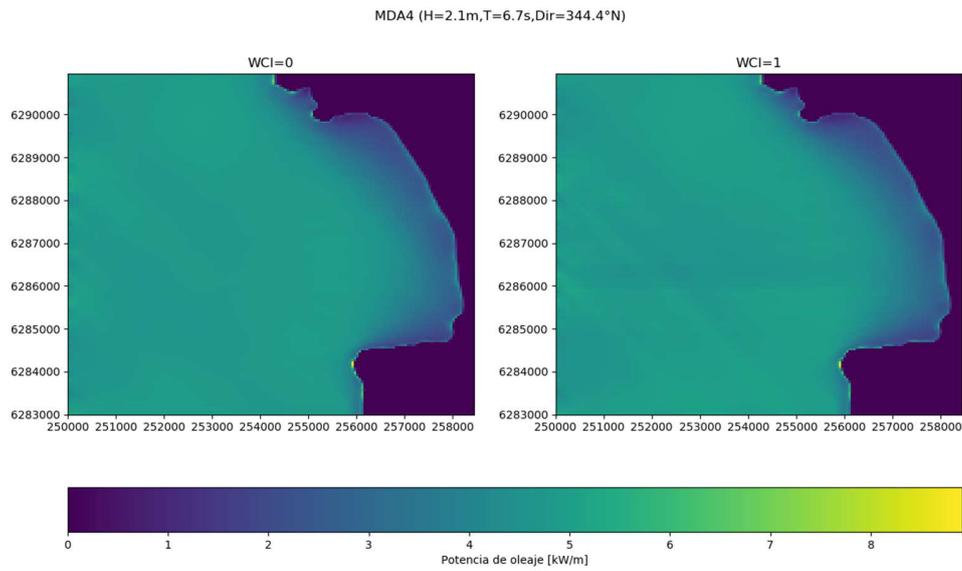


Figura 4.13 Resultados modelación algoritmo MDA-Clima 4. Modelo de oleaje a la izquierda e interacción oleaje-corriente a la derecha. La barra representa la potencia de oleaje.

El caso de la Figura 4.13 corresponde a la condición modelada que resulta ser menos energética para ambos casos. Al corresponder a un oleaje proveniente desde el noroeste, para este caso la zona más protegida corresponde al norte de la bahía, mientras que el sur recibe el oleaje.

5. Discusión

Habiendo presentado todos los resultados, se busca discutir aquellos que resulten más relevantes para ayudar a las conclusiones.

Como se mencionó en la metodología, para el proceso de verificación las condiciones de borde de oleaje se extraían desde un nodo cercano al borde más profundo de la grilla. Al correr el modelo con dicha información se evidencia que XBeach al propagar el oleaje es capaz de procesar la información y emular el comportamiento real del oleaje, siguiendo su tendencia y alcanzando valores cercanos. Esto es particularmente visible al analizar los resultados de dirección media del oleaje para el ADCP Sur en la Figura 4.5, ya que la condición de borde alcanza valores mucho mayores y el modelo logra apegarse a las mediciones del dispositivo. Lo mismo alcanza a ocurrir para las alturas de oleaje en ambos puntos de medición.

Con respecto a los errores RMS de la Tabla 4.2, el análisis se desglosa en las tres variables:

- Altura de ola, H_{m0} : Para ambos puntos en que se tiene mediciones, ADCP Norte y Sur, el error obtenido supera los 0.5 metros, por lo que el modelo podría resultar no ser tan confiable.
- Período medio del oleaje, T_m : Un error admisible para el período ronda en los 2 segundos, por lo que el error obtenido para ambos casos se encuentra dentro del rango.
- Dirección media de oleaje, MWD: La resolución direccional que se le dio al modelo como *input* fue de 5 grados, por lo que un error de 9° para el ADCP Norte y de 7° para el ADCP Sur está por sobre lo que se esperaría del resultado.

Mayores errores direccionales para el punto ADCP Norte se pueden deber a que corresponde usualmente al sector de la bahía que recibe más fuertemente el oleaje, ya que las condiciones comunes en Chile corresponden a oleajes provenientes del suroeste. Por otro lado, si volvemos a la Figura 3.3, nos damos cuenta que el ADCP Norte está instalado muy cercano al borde norte de la bahía, por lo que también hay posibilidades de que fenómenos de reflexión estén alterando los resultados.

Debido a las dimensiones con que se trabaja, es muy importante tener en cuenta el error sobre todo en las alturas, ya que un error de más de medio metro, para las alturas que se contemplan en el caso de estudio, corresponde a casi un 25% de la altura de ola de error que puede llegar a ser fatal.

Los algoritmos de agrupamiento dieron como resultado espectros de oleaje esperables, ya que el algoritmo KMA presenta como resultado 4 casos cuyas variables se sitúan entre aquellas más recurrentes de acuerdo con la información de las Tablas 3.2 y 3.3, mientras que ocurre todo lo contrario con los resultados de aplicar el método MDA, donde se obtienen estados de mar inusuales para el comportamiento histórico analizado en la zona de estudio.

Un elemento que tienen en común los 4 estados de mar resultantes del algoritmo MDA, es que todos corresponden a condiciones de mar obtenidas durante épocas de invierno en Chile, lo que se puede deber a los escenarios climáticos más extremos de la fecha.

La potencia de oleaje resultante de la modelación de cada clima de oleaje obtenido a través de los algoritmos de clustering, indica que para la mayoría de los casos el norte de la bahía, en

particular el punto donde se encuentra el ADCP Norte, que es donde se extrajo la información para el análisis, será mucho más energética que la sección sur. Esto se puede explicar por la dirección usual del oleaje en Chile, como se mencionó anteriormente.

Dentro de los casos analizados, hay tres que no cumplen con este orden, siendo uno de los casos debido a un oleaje inusual proveniente del norte. El caso que mayor diferencia presenta entre la potencia energética del punto norte y el sur, es además el caso que presenta las mayores potencias dentro de aquellos estudiados, es decir, el punto 3 del algoritmo MDA.

En la Figura 5.1 se presenta el campo de velocidades promedio para el caso más energético, con el fin de analizar el hecho de tener una zona sur más energética, considerando que tiene un oleaje del suroeste como condición de borde.

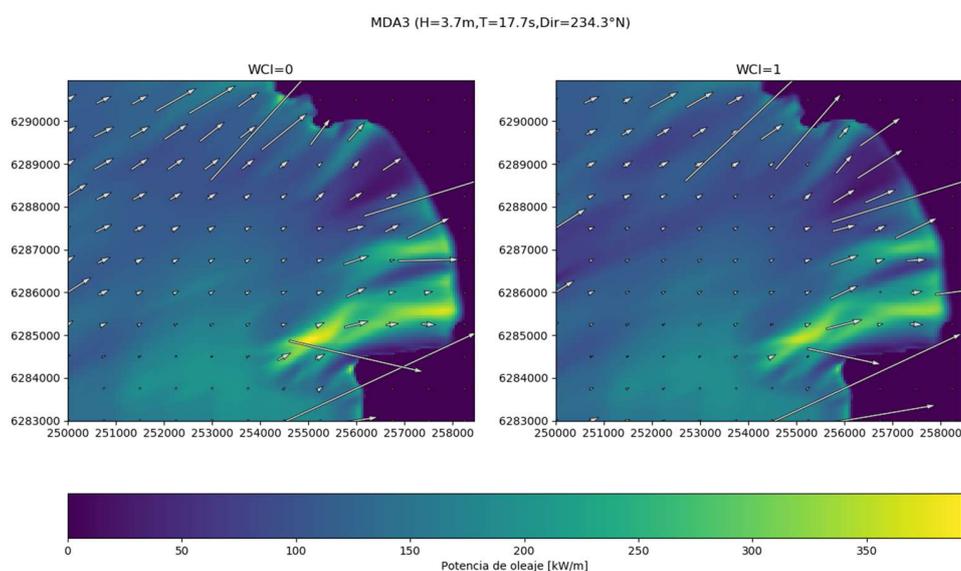


Figura 5.1 Campo de velocidades promedio algoritmo MDA-Clima 3. El largo de la flecha indica la magnitud de la velocidad. La barra representa la potencia de oleaje.

Según se presenta en la imagen, a lo largo de la zona de aguas profundas se tiende a una uniformidad que alcanza la bahía en la dirección del oleaje, donde las velocidades comienzan a aumentar tal vez debido al fenómeno de *shoaling* y refracción. Lo mismo debe ocurrir para la parte sur de la bahía, por lo que considerando el resultado del campo de velocidades y la topografía de la Figura 3.2, es posible que se genere este peak en la potencia de oleaje debido a que la pendiente del fondo en la parte sur de la bahía y el ángulo con que llega el oleaje a esa zona genera que el oleaje deba desarrollar estos mismos fenómenos antes mencionados, pero a lo largo de una superficie mucho más estrecha.

Al comparar las potencias de oleaje entre la condición sin interacción de oleaje-corriente y con dicha interacción, se encuentra con que para todos los casos la potencia energética es mayor o igual para el caso WCI=0. La diferencia más drástica se da para la tormenta del 8 de agosto del 2015, el primer punto del algoritmo MDA, cuyo campo de velocidades se muestra en la Figura 5.2.

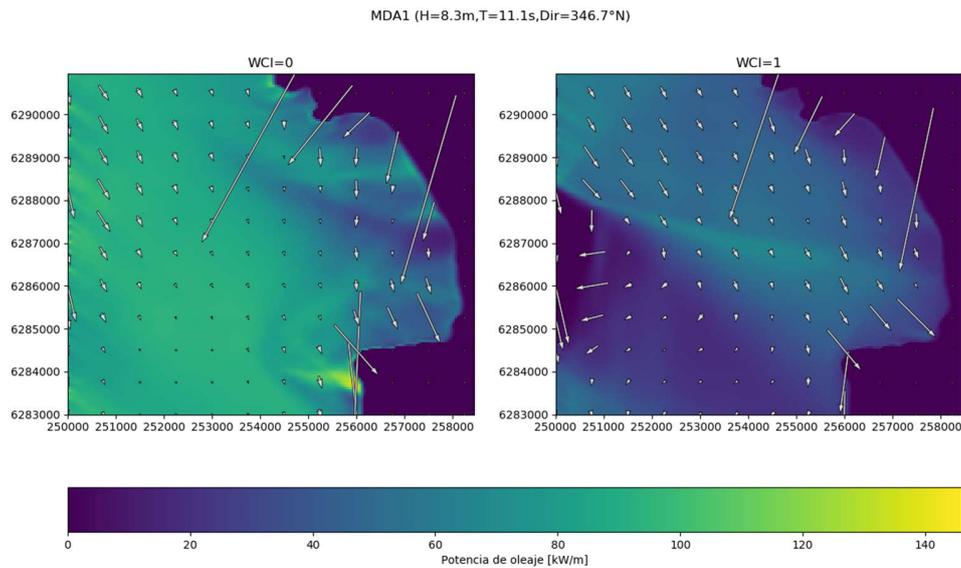


Figura 5.2 Campo de velocidades promedio algoritmo MDA-Clima 1. El largo de la flecha indica la magnitud de la velocidad. La barra representa la potencia de oleaje.

Este oleaje corresponde a una tormenta de gran altura y proveniente del norte. Al analizar el campo de velocidades se evidencia que para el caso en que no se contempla la interacción oleaje-corriente, el oleaje, a pesar de no entrar completamente en la bahía, se desarrolla limpiamente a lo largo de la zona estudiada. Por otro lado, al incorporar WCI=1, el oleaje tiende a abandonar la zona de la costa, yéndose en dirección a aguas profundas, lo que explicaría la razón de tan bajas potencias en el cuadrante que se analiza.

En caso menos energético dentro de todos corresponde al cuarto punto obtenido con el algoritmo MDA, correspondiente a un oleaje proveniente del norte, como se presenta en la Figura 5.3, junto con su campo de velocidades promedio.

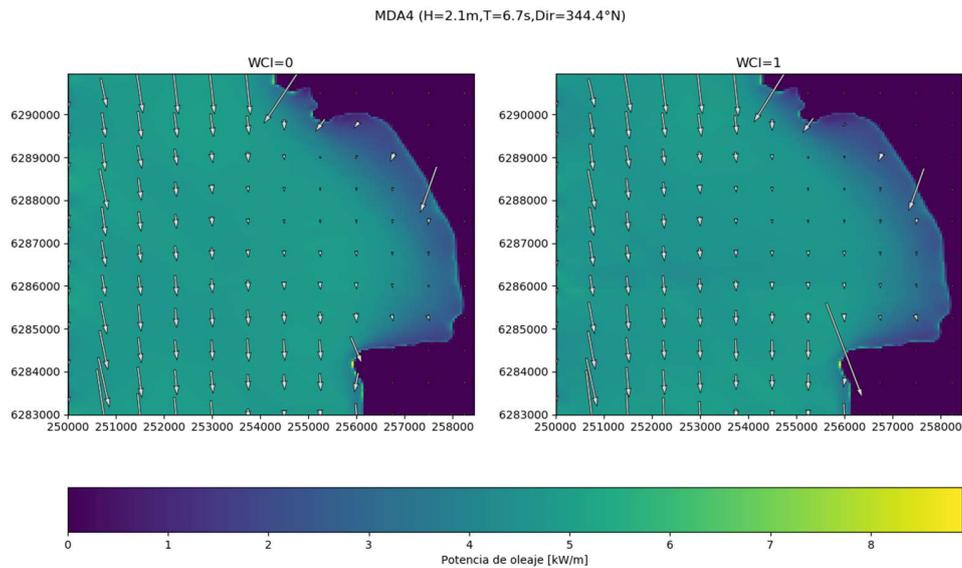


Figura 5.3 Campo de velocidades promedio algoritmo MDA-Clima 4. El largo de la flecha indica la magnitud de la velocidad. La barra representa la potencia de oleaje.

Según se aprecia en la imagen, el oleaje no penetra en la bahía y continúa su camino hacia el sur casi sin variaciones, lo que puede influenciar la baja potencia de oleaje obtenida.

Respecto a los casos obtenidos a partir del algoritmo KMA, ninguno presenta mayores diferencias al incorporar los fenómenos de interacción oleaje-corriente.

6. Conclusiones

Se acondicionó el modelo numérico XBeach a partir de la información geográfica y de oleaje de la bahía de Cartagena y el modelo fue sometido a distintas condiciones que permiten validar su confiabilidad para distintos parámetros.

Los resultados obtenidos al verificar la confiabilidad del modelo alcanzaron errores mayores a los que se consideran admisibles, pero se encuentra que el modelo es capaz de representar la tendencia con que se desarrolla el oleaje real, según las mediciones de los dispositivos ADCP. Los errores pueden ser reducidos al ejecutar el modelo con una grilla de mejor resolución, lo que no se alcanzó a hacer en el presente estudio debido al tiempo que significa.

El algoritmo de clustering K-Mean permitió obtener casos más recurrentes o usuales de la bahía de Cartagena para modelar, lo que se identifica además como una potencia de oleaje uniformemente distribuida a lo largo de la bahía (Figura 4.6-4.9). Los resultados fueron similares para el caso en que se incorpora el fenómeno de interacción oleaje-corriente, como para cuando no se considera.

Por otro lado, el algoritmo de Máxima Disimilaridad entrega puntos en la muestra que corresponden a climas de oleaje extremos que no tiene una ocurrencia ordinaria en la zona (Figura 4.10-4.13). Al ser casos inusuales, corresponden muchas veces a condiciones extremas de oleaje, lo que lleva a resultados interesantes de analizar y que difieren en caso de incorporar o no la interacción oleaje-corriente.

El desarrollo de los modelos bajo la condición de interacción oleaje-corriente aún presenta inestabilidades al ingreso de la condición de borde, lo que se propone estudiar a fondo más adelante, pero permite identificar el comportamiento del resultado a lo largo de la bahía y su comparación con el modelo sin considerar dicha interacción.

En conclusión, el modelo XBeach se logra implementar correctamente a lo largo de la bahía de Cartagena, generando resultados aplicables en términos del análisis del comportamiento del oleaje en la zona. La potencia energética también logra desarrollarse y analizarse a lo largo de la bahía, en este caso para la propagación de oleaje y éste al incorporar la interacción oleaje-corriente, por lo que se cumple el objetivo general del estudio para la fase sufbeat del modelo XBeach.

7. Bibliografía

- Benetazzo, A., Carniel, S., Sclavo, M., & Bergamasco, A. (2013). Wave-current interaction: Effect on the wave field in a semi-enclosed basin. *Ocean Modelling*, 70, 152–165. doi:10.1016/j.ocemod.2012.12.009
- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Cofiño, A. S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), 453–462. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.02.003
- Cartes, O. A. (2005). Análisis espacial y temporal de la dinámica de las corrientes de la Bahía de Valparaíso. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería. Programa de gestión y ordenamiento ambiental (PROGOA)
- Choi, J., & Yoon, S. B. (2011). Numerical simulation of nearshore circulation on field topography under random wave environment. *Coastal Engineering*, 58(5), 395–408. doi:10.1016/j.coastaleng.2010.12.002
- Choi, J., Lim, C.-H., Jeon, Y.-J. & Yoon, S. B., 2007. Numerical simulation of irregular wave transformation due to wave-induced current. *Journal of Hydro-environment Research*, Volumen 19, pp. 133-142. DOI: 10.1016/j.jher.2007.08.001
- Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., ... Thorpe, T. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(5), 405–431. doi:10.1016/s1364-0321(02)00009-6
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists* (Vol. 2). NJ, USA: World Scientific Publishing Co.
- Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 20(4), 185–201. doi:10.1016/j.marstruc.2007.09.001
- Henderson, S. M., Guza, R. T., Elgar, S., & Herbers, T. H. C. (2006). Refraction of Surface Gravity Waves by Shear Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 36(4), 629–635. doi:10.1175/jpo2890.1
- Henyey, F. S., Wright, J., & Flatté, S. M. (1986). Energy and action flow through the internal wave field: An eikonal approach. *Journal of Geophysical Research*, 91(C7), 8487. doi:10.1029/jc091ic07p08487
- Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fraguera, J. A., & Frigaard, P. (2009). Wave energy potential in Galicia (NW Spain). *Renewable Energy*, 34(11), 2323–2333. doi:10.1016/j.renene.2009.03.030
- Liang, B., Li, H., & Lee, D. (2008). Bottom Shear Stress Under Wave-Current Interaction. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 20(1), 88–95. doi:10.1016/s1001-6058(08)60032-3

- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1960). Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 8(04), 565. doi:10.1017/s0022112060000803
- Lucero, F., Catalán, P. A., Ossandón, Á. (2013). Selección de Climas de Oleaje Mediante Métodos de Agrupamiento. XXI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Lucero, F., Catalán, P. A., Ossandón, Á., Beyá, J., Puelma, A., & Zamorano, L. (2017). Wave energy assessment in the central-south coast of Chile. *Renewable Energy*, 114, 120–131. doi:10.1016/j.renene.2017.03.076
- Martínez, C., Cienfuegos, R., Inzunza, S., Urrutia, A., & Guerrero, N. (2019). Worst-case tsunami scenario in Cartagena Bay, central Chile: Challenges for coastal risk management. *Ocean & Coastal Management*, 105060. doi:10.1016/j.ocecoaman.2019.105060
- Mazzaretto, O. M., Lucero, F., Besio, G., & Cienfuegos, R. (2020). Perspectives for harnessing the energetic persistent high swells reaching the coast of Chile. *Renewable Energy*. doi:10.1016/j.renene.2020.05.031
- MERIC – Lucero, F., Cienfuegos, R., Suárez, L., Navarrete, S., Finke, R., Bonicelli, J., Catalán, P. (2018, noviembre 9) ¿Es posible realizar pronósticos operacionales de oleaje desde la escala global hasta el borde costero con un solo modelo? Validación de modelo WaveWatch III v5.16 en aguas someras, sector piloto Bahía de Cartagena. [Diapositiva de PowerPoint]. SIOP 2018.
- MERIC (Marine Energy Research & Innovation Center). *Energía Marina SpA* (2019). Three Years Promoting the Development of Marine Renewable Energy in Chile: 2015 – 2018. First Edition. Santiago, Chile. MERIC, Cámara Chilena del Libro.
- Monárdez, P., Acuña, H., & Scott, D. (2008). Evaluation of the Potential of Wave Energy in Chile. Volume 6: Nick Newman Symposium on Marine Hydrodynamics; Yoshida and Maeda Special Symposium on Ocean Space Utilization; Special Symposium on Offshore Renewable Energy. doi:10.1115/omae2008-57887
- Morales, E., Winckler, P., Herrera, M. (2019). *Costas de Chile: Medio Natural, Cambio Climático, Ingeniería Oceánica y Gestión Costera*. SHOA.
- Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Pontes, M. T. (2010). Assessing the Global Wave Energy Potential. 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 3. doi:10.1115/omae2010-20473
- Roelvink, D., Van Dongeren, A., McCall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van Geer, P., De Vet, L., Nederhoff, K. (2015). *XBeach Manual*. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Romero, L., Lenain, L., & Melville, W. K. (2017). Observations of Surface Wave–Current Interaction. *Journal of Physical Oceanography*, 47(3), 615–632. doi:10.1175/jpo-d-16-0108.1
- Rusu, L., Bernardino, M., & Guedes Soares, C. (2011). Modelling the influence of currents on wave propagation at the entrance of the Tagus estuary. *Ocean Engineering*, 38(10), 1174–1183. doi:10.1016/j.oceaneng.2011.05.016

Teles, M. J., Pires-Silva, A. A., & Benoit, M. (2013). Numerical modelling of wave current interactions at a local scale. *Ocean Modelling*, 68, 72–87. doi:10.1016/j.ocemod.2013.04.006

The SWAN team. (1993-2020). SWAN USER MANUAL. Delft University of Technology. Sitio web: <http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swanuse.pdf>

The SWASH team. (2010-2020). SWASH USER MANUAL. -, de Delft University of Technology Sitio web: <http://swash.sourceforge.net/download/zip/swashuse.pdf>

The WAVEWATCH III R Development Group (WW3DG), 2016: User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices.

Thomas, T. J., & Dwarakish, G. S. (2015). Numerical Wave Modelling – A Review. *Aquatic Procedia*, 4, 443–448. doi:10.1016/j.aqpro.2015.02.059

Van der Westhuysen, A. J. (2017). Wave-Current Interaction. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, 1–18. doi:10.1002/9781118476406.emoe085

Wang, C., Wai, W., Onyx, Li, Y., & Chen, Y. (2006). Modelling of the wave-current interaction in the Pearl River Estuary. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 18(3), 159–165. doi:10.1016/s1001-6058(06)60047-4

Wolf, J., & Prandle, D. (1999). Some observations of wave–current interaction. *Coastal Engineering*, 37(3-4), 471–485. doi:10.1016/s0378-3839(99)00039-3