



**Determinación de los procesos de difracción y refracción del oleaje en la zona de Puerto
Rey (Arboletes)**

Francisco Javier Gambin Carrasquilla

Trabajo de grado presentado para optar al título de Oceanógrafo

Director

Vladimir G. Toro Valencia, Doctor (PhD) en Oceanografía Física

Asesores

Victor J. Saavedra Mejía, Doctor (PhD) (C) en Ingeniería de Recursos Hidráulicos

Giner A. Jiménez Ruiz, Profesional en Ingeniería Oceanográfica

Universidad de Antioquia
Corporación Académica Ambiental
Oceanografía
Turbo, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Gambin Carrasquilla, 2024)
Referencia	Gambin Carrasquilla, F. J., (2024). <i>Determinación de los procesos de difracción y refracción del oleaje en la zona de Puerto Rey (Arboletes)</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Corporación Académica Ambiental (CAA).



Biblioteca Sede Ciencias del Mar (Turbo)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Al culminar este arduo camino, desde el momento que ingresé a la universidad hasta hoy, finalizando mi trabajo de grado, me tomo un momento para expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido a este gran logro. Con su apoyo, paciencia y aliento, este proyecto profesional y de vida ha llegado a buen puerto.

A Mi Familia: A mi madre Lourdes, a mi padre Francisco y a mi hermano Sebastián, quienes han sido mi roca durante toda mi vida. Su amor incondicional y confianza me han impulsado a seguir adelante incluso cuando las dificultades parecían insuperables. Gracias por creer en mí y por ser mi mayor fuente de inspiración.

A Mi Pareja: A mi novia Paula, gracias por el amor y el apoyo que constantemente he recibido de ti. Tu paciencia, tolerancia, comprensión y aliento han sido mi guía en momentos que pensé derrumbarme. Tu amor incondicional ha sido mi motivación para superar cada obstáculo y poder llegar a esta meta.

A Mis Profesores: Agradezco a mis profesores y profesoras de la universidad por su dedicación y pasión por la enseñanza. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para mi formación académica y personal. Especialmente, quiero mencionar al Profesor Vladimir Toro, quien me guio en la elección del tema de mi trabajo de grado y me brindó orientación y apoyo constante, de igual forma, hacerle una mención especial al profesor Víctor Saavedra por su guía, apoyo y dedicación constante en este trabajo.

A Mis Compañeros de Clase: A mis compañeros de clase, con quienes compartí risas, desafíos y momentos inolvidables. Con muchos enfrentamos largas noches de estudio, presentaciones nerviosas y proyectos en equipo.

En resumen, este trabajo de grado no es solo mío, sino de todos aquellos que han dejado una huella en mi vida. A cada uno de ustedes, ¡mil gracias! Este logro es también suyo.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
1. Introducción	13
2. Objetivos	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3. Área de Estudio y Metodología	18
3.1 Área de estudio.....	18
3.2 Métodos.....	19
3.2.1 Mallas computacionales	20
3.2.1.1 Malla computacional 1	20
3.2.1.2 Malla computacional 2	21
3.2.1.3 Malla computacional 3	23
3.2.2 Batimetría	24
3.2.2.1 Batimetría real	24
3.2.3 Condiciones de Frontera.....	27
3.2.4 Modelos numéricos	29
3.2.4.1 WaveWatch III	29
3.2.4.2 SWAN	30
3.2.5 Procesamiento de Datos	32
3.2.6 Calibración y Validación.....	33
3.2.6.1 Calibración	33
3.2.6.1.1 Whitecapping	33
3.2.6.1.2 Fricción del fondo	34

3.2.6.2	Validación	35
3.2.7	Casos	35
3.2.7.1	Caso 1- Comparación entre malla 3 sin refinamiento y malla 3 refinada en forma de T	35
3.2.7.2	Caso 2 – Ejecución con valores paramétricos sugeridos por SWAN	36
3.2.7.3	Caso 3 - Valores paramétricos ajustados.....	36
3.2.7.4	Caso 4 – Validación del modelo	36
3.2.7.5	Caso 5 – Casos estacionarios	36
4.	Resultados y Discusión	38
4.1	Procesamiento de datos	38
4.1.1	Altura significativa del oleaje (Hs)	38
4.1.2	Período del oleaje	43
4.2	Casos simulados	43
4.2.1	Caso 1- Comparación entre malla 3 sin refinamiento y malla 3 refinada en forma de T	43
4.2.1.1	Malla 3 sin refinamiento	43
4.2.1.2	Malla 3 con refinamiento en forma de T.....	46
4.2.2	Caso 2 – Calibración	49
4.2.3	Caso 3 – Validación	52
4.2.4	Casos estacionarios	55
4.2.4.1	Caso estacionario 1.....	55
4.2.4.2	Caso estacionario 2 – Época húmeda	58
5.	Conclusiones	61
6.	Recomendaciones	62
7.	Referencias.....	63

Lista de tablas

Tabla 1 Características de la malla computacional 1. Malla 200 m x 200 m.....	20
Tabla 2 Características de la malla computacional 2. Malla 60 m x 60 m.....	22
Tabla 3 Características de la malla computacional 3. Malla 25 m x 25 m, refinamiento en T con resolución espacial de 5 m x 5 m	23
Tabla 4 Especificaciones de las áreas y resolución de las mallas de cálculo para las simulaciones con el modelo WWIII.....	27
Tabla 5 Parámetros físicos constantes para cada uno de los casos ejecutados en SWAN.....	33
Tabla 6 Parámetros utilizados en la ejecución del caso 1 con valores sugeridos por SWAN.....	34
Tabla 7 Parámetros utilizados en la ejecución del caso 1 con valores ajustados	35
Tabla 8 Casos estacionarios modelados	37

Lista de figuras

Figura 1 Esquema de difracción del oleaje por un obstáculo.....	9
Figura 2 Esquema de refracción de un tren de olas.	10
Figura 3 Área de estudio. Comprendida entre el municipio de Arboletes y el corregimiento de Puerto Rey.	18
Figura 4 Malla computacional 1 con resolución 200 m x 200 m.....	21
Figura 5 Malla computacional 2 con resolución 60 m x 60 m	22
Figura 6 Malla computacional 3 con resolución 25 m x 25 m, refinamiento en T con resolución espacial de 5 m x 5 m.....	23
Figura 7 Esquema de anidamiento de mallas computacionales. Malla 1: 200m x 200m. Malla 2: 60m x 60m. Malla 3: 25m x 25m con refinamiento en T de 5m x 5m en zona de obstáculo topobatimétrico.....	24
Figura 8 Batimetría de la malla 1 utilizada en la ejecución del dominio más amplio, donde se ingresan las condiciones de frontera para la propagación de las condiciones del oleaje. Profundidad máxima 50 m.....	25
Figura 9 Batimetría de la malla 2 utilizada en la ejecución del dominio intermedio para la propagación de las condiciones del oleaje. Profundidad máxima 20 m.....	26
Figura 10 Batimetría de la malla 3 utilizada en la ejecución del dominio más fino. Profundidad máxima 9 m.....	26
Figura 11 Esquema de anidamiento de doble vía empleado en la modelación WWIII a escala regional.....	28
Figura 12 Malla computacional 1 con resolución 200 m x 200 m. Puntos espectrales fronteras abiertas, norte y oeste	28
Figura 13 Serie temporal de la altura significativa del oleaje con datos medidos in situ Período de agosto de 2021 a enero de 2023. La línea roja y azul indican el inicio de la época seca y húmeda respectivamente.....	39
Figura 14 Histograma de probabilidad y función de densidad de probabilidad de la altura significativa del oleaje en Puerto Rey, Arboletes. Época seca y época húmeda.....	40

Figura 15 Probabilidad de la altura significativa del oleaje en Puerto Rey, Arboletes. Serie de datos completa (línea sólida), época seca (línea con cuadros) y época húmeda (línea con triángulos) ..	41
Figura 16 Serie temporal del período del oleaje con datos medidos in situ Período de agosto de 2021 a enero de 2023. La línea roja y azul indican el inicio de la época seca y húmeda respectivamente	42
Figura 17 Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje cerca al obstáculo topobatimétrico para el día 5 de noviembre de 2021	44
Figura 18 Representación gráfica de la dirección (izquierda) y de la altura significativa del oleaje (derecha) para el día 10 de noviembre de 2021	44
Figura 19 Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje para el día 15 de noviembre de 2021	45
Figura 20 Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 5 de noviembre de 2021	46
Figura 21 Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 10 de noviembre de 2021	46
Figura 22 Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 15 de noviembre de 2021	47
Figura 23 Proceso de difracción y refracción del oleaje generado por obstáculo topobatimétrico en Puerto Rey, Arboletes. Captado mediante Figura satelital.....	48
Figura 24 Calibración datos simulados (línea roja) con datos in situ (línea negra). Simulación realizada con coeficientes de disipación ajustados	50
Figura 25 Diagrama de dispersión. Correlación de los datos de altura significativa de la ola medidos in situ y los datos de altura significativa de ola simulados.....	51
Figura 26 Validación datos simulados con calibración (línea roja) con datos in situ (línea negra). Simulación realizada con coeficientes de disipación por whitecapping y fricción del fondo ajustados	53
Figura 27 Diagrama de dispersión. Correlación de los datos de altura significativa de la ola medidos in situ y los datos de altura significativa de ola simulados con calibración	54
Figura 28 Caso estacionario 1. Vectores de difracción y refracción de la ola época seca.....	56
Figura 29 Caso estacionario 1. Difracción y refracción de la ola época seca.....	57
Figura 30 Caso estacionario 2. Vectores de difracción y refracción de la ola época húmeda	58
Figura 31 Caso estacionario 2. Difracción y refracción de la ola época seca	59

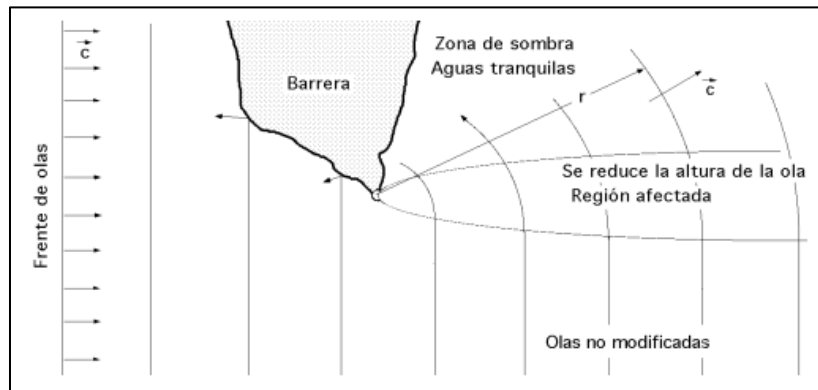
Glosario

Delft3D: es una suite de modelado integrada, esta simula el plano bidimensional y tridimensional, el transporte y la morfología de sedimentos, las olas, la calidad del agua y la ecología, además de trabajar interacciones entre los diferentes procesos (Deltares, s.f.).

Difracción: dispersión de la energía del oleaje a sotavento de una barrera, permitiendo la generación de pequeños sistemas de olas en aguas que están protegidas por un obstáculo. Cuando la ola pasa posterior a la barrera adoptan una forma circular, disminuyendo su altura, pero su celeridad y longitud no se modifican (Ver **Figura 1**).

Figura 1

Esquema de difracción del oleaje por un obstáculo.



Nota. Fuente: www.ingenieroambiental.com

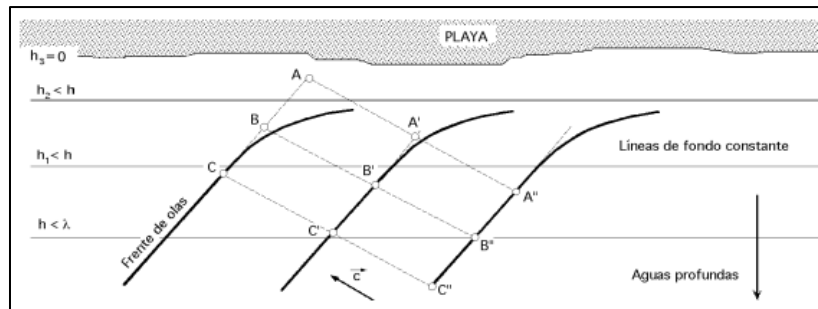
Modelo numérico: herramienta de gran importancia y utilidad para estudiar el comportamiento de cuerpos o masas de agua sometidos a forzadores ambientales externos. Representa de forma teórica los fenómenos naturales de forma matemática, lo que permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento.

Oleaje: representación de movimientos ondulatorios periódicos que se presentan en la superficie del mar, formadas por crestas y valles que realizan un desplazamiento horizontal, estas se caracterizan por su longitud, período, pendiente, altura, amplitud y velocidad de propagación (Avila & Porres, 2021).

Refacción: cambio de dirección que se presenta en el desplazamiento de la ola cuando se acerca a una zona más somera; es decir, el frente de olas disminuye su velocidad por la fricción, su altura disminuye y su dirección se modifica (Ver **Figura 2**).

Figura 2

Esquema de refracción de un tren de olas.



Nota. Fuente: www.ingenieroambiental.com

Simulating Waves Nearshore (SWAN): modelo de oleaje de tercera generación desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft. Genera estimaciones realistas de los parámetros de oleaje en zonas costeras, lagos y estuarios a partir de unas condiciones dadas de viento, fondo y corriente. Se basa en la ecuación de balance de acción del oleaje con fuentes y sumideros (The SWAN team, 2019).

Resumen

Los procesos de refracción y difracción del oleaje debido a obstáculos emergidos/sumergidos modulan las condiciones de energía del oleaje cerca de la franja costera. La caracterización adecuada de los procesos de refracción y difracción son fundamentales para entender los procesos de erosión litoral. En Puerto Rey (Arboletes) existen obstáculos topobatimétricos que modifican el oleaje incidente y probablemente la franja costera. Es de gran importancia entender el comportamiento del oleaje y la influencia que estos obstáculos pueden tener en el transporte de sedimentos. Por su alcance espacial y temporal la mayoría de estos trabajos usan modelos numéricos. Este estudio busca evaluar la capacidad que tienen un modelo para representar adecuadamente los procesos de difracción y refracción del oleaje a escala fina en la zona de Puerto Rey. Con este propósito se utilizó un set de datos de oleaje medidos *in situ* cerca de la franja costera Puerto Rey proporcionado por el programa PIMECLA. Así como mediciones batimétricas de detalle complementadas con cartas náuticas para realizar simulaciones numéricas. Se empleó el modelo Simulating Waves Nearshore (SWAN), forzado en la frontera con espectros direccionales obtenidos de simulaciones numéricas del Caribe Colombiano con el modelo WaveWatch III. Los resultados sugieren que en la zona existen tres direcciones predominantes del oleaje, norte, noreste y noroeste, sin embargo, en cercanías de la franja costera también se presentan direcciones oeste y oeste-noroeste debido probablemente a procesos de refracción, y difracción al chocar con el obstáculo topobatimétrico. Los resultados muestran una influencia débil del obstáculo de Puerto Rey para alturas significantes menores a 1 m., por consiguiente, existe una mayor influencia de los fenómenos de difracción y refracción en la época seca, siendo más leve pero no menos importante en la época húmeda.

Palabras clave: calibración SWAN, erosión costera, oleaje, validación SWAN, Puerto Rey

Abstract

The processes of wave refraction and diffraction due to emerged/submerged obstacles modulate wave energy conditions near the coastal zone. Proper characterization of these refraction and diffraction processes is essential for understanding coastal erosion. In Puerto Rey, there are topobathymetric obstacles that modify incident waves and likely impact the coastal zone. Understanding wave behavior and the influence of these obstacles on sediment transport is crucial. Most studies in this area rely on numerical models due to their spatial and temporal scope. This study aims to evaluate the model's ability to accurately represent wave diffraction and refraction processes at a fine scale in the Puerto Rey zone. We used in-situ wave data collected near the coastal fringe of Puerto Rey, provided by the PIMECLA program, along with detailed bathymetric measurements and nautical charts for numerical simulations. The Simulating Waves Nearshore (SWAN) model was forced at the boundary with directional spectra obtained from numerical simulations of the Colombian Caribbean using the WaveWatch III model. The results suggest three predominant wave directions in the area: north, northeast, and northwest. However, near the coastal fringe, west and west-northwest directions also occur, likely due to refraction and diffraction processes when encountering the topobathymetric obstacle. The findings indicate a weak influence of the Puerto Rey obstacle for significant wave heights less than 1 meter. Consequently, refraction and diffraction phenomena have a greater impact during the dry season, albeit less pronounced but still significant during the wet season.

Keywords: SWAN calibration, coastal erosion, wave, SWAN validation, Puerto Rey

1. Introducción

Los procesos de refracción y difracción del oleaje debido a obstáculos cerca de la franja costera modulan las condiciones de energía de ese sitio. La caracterización adecuada de estos procesos es fundamental para comprender los procesos erosivos litorales y la distribución espectral del oleaje. En este contexto, este trabajo se enfoca en analizar la franja costera de Puerto Rey (Arboletes, Colombia), lugar en el que existen obstáculos topobatimétricos naturales que modifican de forma importante el oleaje incidente, y, en consecuencia, se afecta la línea de costa y los procesos de transporte litoral.

Es fundamental entender la interacción entre el oleaje y obstáculos, y la repercusión en la franja costera. Dicha interacción no solo afecta la altura y dirección de las olas, sino también el transporte de sedimentos y estabilidad de las estructuras costeras. Además, se debe considerar su impacto en los ecosistemas marino-costeros. Donde, en este contexto, es relevante destacar que los impactos pueden ser variados. Por un lado, la mezcla de nutriente en la columna de agua es un efecto positivo. Por otro lado, la erosión costera y la afectación de hábitats como los arrecifes de coral y las praderas de algas representan consecuencias negativas. Estos últimos además generan afectación a las especies que dependen de estos ecosistemas. En ese mismo sentido, su impacto se extiende al desarrollo socioeconómico. Lo que es especialmente relevante para las comunidades costeras, la industria offshore, las rutas de navegación y la seguridad marítima.

Por otro lado, no se debe subestimar la importancia del oleaje en la zona litoral, ya que el buen entendimiento de este fenómeno natural es esencial para lograr un equilibrio adecuado entre los aspectos ambientales y socioeconómicos, así como para una planificación y gestión costera efectiva.

Sin embargo, la información medida in situ del oleaje en la cuenca Caribe colombiana es poca debido a que actualmente el país no cuenta con una red de boyas de oleaje bien distribuidas con períodos de registro significativos que permitan sugerir tanto regímenes de oleaje como la variabilidad espacio/temporal de éste (Mesa, 2009), lo cual representa una gran limitación para estudios de este tipo. En la mayoría de estos estudios son empleados modelos numéricos con el fin de entender los diferentes procesos naturales y humanos que se presentan en la franja costera, como, por ejemplo, la erosión costera, la conservación de ecosistemas, el desarrollo territorial y el

aprovechamiento de las zonas de esparcimiento y recreación, etc.; lo que implica conocer en escalas espaciales y temporales las características del oleaje en la franja costera.

Con las ventajas computacionales que existen en la actualidad, los modelos numéricos para la propagación del oleaje tanto en zonas oceánicas como en zonas costeras se han convertido en una herramienta de gran utilidad a la hora de estudiar como varía espacial y temporalmente el oleaje, principalmente en regiones como el Caribe colombiano, donde no se tienen registros suficientes para llevar a cabo tal estudio. La relevancia de tener una buena representación y comprensión de los parámetros integrales del oleaje en la costa radica en que estos juegan un papel determinante tanto en el entendimiento de los procesos de propagación del oleaje en zonas someras como también en intervenciones que se practiquen sobre la franja litoral.

El oleaje, consecuencia de la fricción del viento y permanente intercambio de energía con la superficie libre del mar es objeto de estudio y simulación desde hace décadas (Galende, 2009). Por esto, es importante saber que un modelo numérico es una representación simplificada de la complejidad del mundo natural desde un estado inicial hacia un estado futuro, es decir, es una representación teórica de fenómenos o procesos, expresados en forma matemática, lo que permite un mejor estudio y comprensión del comportamiento de estos, el cual se rige por un sistema de ecuaciones y procesos físicos asociados (Fuentes, 2017).

La modelación numérica se ha utilizado para llevar a cabo múltiples investigaciones con el fin de estudiar el oleaje en el Caribe colombiano. Dentro de estos, Parra & Lonin, (2007) observaron una variación significativa tanto temporal como espacial en el comportamiento del oleaje en el Caribe, resultado de la búsqueda de los valores de las constantes del espectro JONSWAP utilizando información de dos boyas de oleaje instaladas en el Caribe colombiano.

Por su parte, Montoya & Osorio (2007) realizaron una caracterización y evolución de modelos comúnmente utilizados para pronosticar el oleaje generado por viento, lo que es relevante debido a que durante el siglo XX las teorías del oleaje estaban basadas en leyes de la física, especialmente las del movimiento ondulatorio describiendo las olas como ondas de amplitud pequeña, y la interacción entre estas considerada lineal. Por consiguiente, para lograr una buena aproximación de las variables en estudio mediante la implementación de modelos numéricos, es necesario contar con una buena calidad y temporalidad de datos, por lo que Osorio y otros (2009) luego de mejorar la información de nivel del mar y comportamiento del oleaje en el Caribe colombiano utilizando 40 años de datos de viento del proyecto global Reanalysis 1 del

NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction y el National Center for Atmospheric Research), con $1.8^\circ \times 1.9.5^\circ$ y 4 datos diarios de escala espacial y temporal respectivamente. Este set de datos lo usaron para forzar el modelo de oleaje WaveWacth III con el fin de generar series de dos de los parámetros integrales del oleaje (Altura de ola Significativa y período). Además, en pro de mejorar los resultados del modelo, se corrigieron utilizando datos de otras fuentes (boyas 41018 y 42058 de la NOAA, información satelital de TOPEX/POSEIDON y JASON 1, además de datos suministrados por barcos), obteniendo como resultado que el ciclo anual del oleaje en el Caribe colombiano tiene un patrón bimodal, directamente relacionado con el comportamiento de los vientos alisios del noreste.

Como se mencionó anteriormente, la disposición y acceso a los datos oceanográficos suele ser un poco compleja, por lo que se crea la necesidad de implementar modelos numéricos. Dicho esto, Paz y otros (2013) calibraron el modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore, versión 40.51) mediante la parametrización física de whitecapping, utilizando el método de la inclinación. Sugiriendo así resultados adecuados con un índice de correlación mínimo de 0.69 y un máximo de 0.87.

Jaramillo (2019) observó mediante su simulación en el modelo Delft3D que, en el sur del Caribe el oleaje se propaga en función de los vientos alisios del noreste (de noreste a suroeste), reafirmando de esta manera lo sugerido por Paz y otros (2013).

Esto demuestra y refuerza la importancia que tiene la modelación numérica hoy en día para analizar y predecir múltiples procesos y fenómenos, como es el caso de la erosión costera en el Caribe colombiano, fenómeno que gracias a la gran capacidad de predicción que tienen los modelos numéricos, el control se facilita (Lonin & Escobar). Debido a esto, Orejuela (2020) entendiendo la problemática que se ha venido presentando en las últimas décadas en los aproximadamente 5.5 km de línea de costa de Puerto Rey – Arboletes (Correa & Paniagua-Arroyave, 2015), donde se han registrado retrocesos de la línea de costa de hasta 1.6 km y tasas máximas de erosión de hasta 40m/año (Correa & Vernet, 2004), implementó el modelo WaveWatch III (versión 6.07) con resolución espacial gruesa en comparación con la empleada en el presente trabajo, con valores mínimos de cuadrícula de 90 m y 5 m respectivamente, con el fin de estudiar la modulación del oleaje causado por la construcción de obras de protección costera para determinar el porcentaje de disipación de la energía del oleaje, concluyendo que la implementación de una obra de protección provoca disminución tanto de su altura como de su energía.

Por otra parte, entendiendo que los procesos de difracción y refracción se presentan en escalas finas y que se dispone con un set de datos medidos in situ por el Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueña (PIMECLA), el cual es un proyecto entre el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia (Dagran) y la Universidad de Antioquia (UdeA) que busca mitigar y proponer soluciones frente al fenómeno de la erosión costera mediante diferentes acciones experimentales en los municipios de San Juan de Urabá, Arboletes, Necoclí y Turbo (Gobernación de Antioquia, 2022), en ese contexto la presente investigación se llevará a cabo en la franja costera Arboletes-Puerto Rey, zona determinada como área de estudio, donde se presenta un drástico proceso de erosión, lo que ha causado la pérdida de áreas significativas de terreno. Según Correa (2007), se evidencia que la península desapareció totalmente en un período aproximado de 12 años, por lo que la velocidad de la erosión es de ~100m/año.

Para realizar este trabajo, se utilizará el modelo numérico SWAN (Simulating WAVes Nearshore) en conjunto con el modelo Delft3D, con el primero en mención se realizará un proceso de calibración y validación en el área de estudio, con el segundo se generarán previamente la batimetría, mallas computacionales y demás insumos para la correcta ejecución de los casos.

Es relevante preguntarse, ¿Cuáles son los escenarios en los que se presentan los dos procesos refracción y difracción del oleaje y sus posibles afectaciones a la franja costera de Puerto Rey? Se parte de la siguiente hipótesis, en la época seca (diciembre a abril) se presentan procesos de difracción y refracción del oleaje que podrían ser más intensos que en la época húmeda (mayo a noviembre). Con base en lo anterior, mediante este estudio se buscan determinar estos dos procesos en la franja costera Puerto Rey (Arboletes) mediante modelación numérica con resolución espacial fina.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Caracterizar los procesos de refracción y difracción del oleaje mediante el uso de un modelo numérico en la zona de Puerto Rey Arboletes.

2.2 Objetivos específicos

Analizar la influencia de la batimetría local y obstáculos topobatimétricos en los procesos de refracción y difracción del oleaje en Puerto Rey Arboletes, usando un modelo numérico de alta resolución calibrado y validado.

Analizar la variación en los patrones de refracción y difracción del oleaje en Puerto Rey Arboletes en condiciones océano-atmosféricas características de la época seca y época húmeda empleando modelaciones estacionarias.

Proponer los mecanismos que puedan estar influyendo en los procesos físicos de la franja costera.

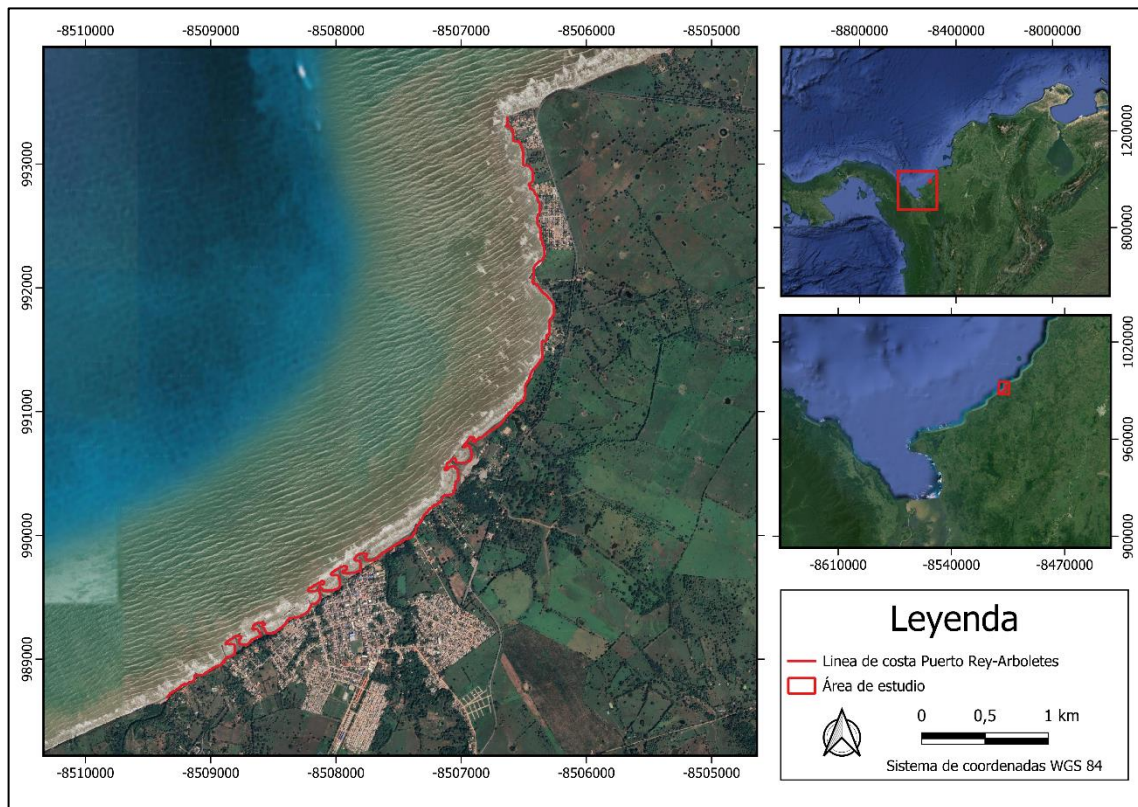
3. Área de Estudio y Metodología

3.1 Área de estudio.

El presente estudio se realizó en el sur del litoral caribe colombiano, específicamente en el tramo comprendido entre el municipio de Arboletes (Latitud $8^{\circ}51'N$, Longitud $76^{\circ}26'O$) perteneciente al departamento de Antioquia y el corregimiento de Puerto de Rey (Latitud $8^{\circ}53'29''N$, Longitud $76^{\circ}29'41''O$), Córdoba, con una longitud de aproximadamente 5.5 kilómetros (Paniagua & Correa) (**Figura 3**).

Figura 3

Área de estudio. Comprendida entre el municipio de Arboletes y el corregimiento de Puerto Rey.



El clima en esta región del Caribe se ve modulado principalmente por el desplazamiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), determinando así un patrón bimodal estacional, es decir, define una época denominada seca y otra denominada húmeda, con períodos entre diciembre-abril y mayo-noviembre respectivamente (Paniagua & Correa).

La época seca se caracteriza por el incremento de los vientos alisios provenientes del norte y noreste con velocidades entre 4 m/s y 9.4 m/s. Estos vientos generan oleaje con períodos de entre 6 s y 9 s, con alturas de ola significativa de hasta 2 m, generando fuertes corrientes costeras o de deriva hacia el suroeste al encontrarse con las rompientes (Paniagua & Correa). Además, presenta precipitaciones medias de 40 mm/mes (Correa & Vernet, 2004).

Cabe resaltar que, en el inicio de esta época, se presenta un fenómeno significativo sobre el litoral caribe colombiano, especialmente en la región del Urabá. La presencia casi permanente de la baja presión del Darién genera incremento en la nubosidad y lluvias aisladas (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, s.f.).

Por otra parte, durante la época húmeda, caracterizada por alcanzar los 200 mm/mes en precipitaciones, los vientos alisios presentan una disminución en sus magnitudes y cambios en su dirección, registrando velocidades medias de 2 m/s y máximas de 4 m/s con direcciones provenientes del sur y suroeste (Paniagua & Correa).

El régimen de mareas en el sur del Caribe colombiano es semidiurno mixto, es decir, dos máximos y dos mínimos con amplitudes diferentes en el día mareal, estas tienen oscilaciones del orden de los 30 – 40 cm (Correa & Vernet, 2004).

Por su parte, la erosión costera en el área de estudio se ve afectada por diferentes factores, pero antes de que esta iniciara de forma generalizada, en la década de los 30's, el tramo de estudio estaba definido por una forma de bahía Z con su cola hacia el suroeste, de igual forma, es relevante mencionar que esta es una configuración característica de las costas con principal influencia de procesos de difracción y refracción de las olas. Por lo tanto, la pérdida de la espiga de Punta Rey modificó significativamente las condiciones en el área, una de ellas, el arribo de las olas a la costa, desapareciendo paulatinamente la configuración de la bahía Z (Correa & Paniagua-Arroyave, 2015).

3.2 Métodos

A continuación, se explica de manera detallada la metodología implementada para cumplir con el objetivo principal del presente estudio.

Se definieron una serie de escenarios para realizar las simulaciones numéricas utilizando los modelos numéricos Delft3D y SWAN, se emplearon mediciones batimétricas de detalle

complementadas con cartas náuticas, mediciones de oleaje *in situ* y datos de reanálisis de viento, los cuales fueron utilizados para condicionar el modelo y las fronteras de la malla computacional.

Enseguida se describen las características necesarias para la ejecución de los casos.

3.2.1 Mallas computacionales

En SWAN, las mallas o grillas computacionales son empleadas con el objeto de resolver la ecuación de balance de acción del oleaje. En el mismo orden de ideas, las ecuaciones son resueltas mediante el método de diferencias finitas y su discretización, la cual es una técnica para aproximar derivadas que permite conseguir soluciones numéricas tanto a ecuaciones diferenciales como a las parciales (De la Cruz, 2019-2021). Conjuntamente, permitir entender y visualizar la propagación del oleaje junto con los procesos de difracción y refracción en el área de estudio.

Se generaron tres mallas computacionales rectangulares estructuradas. Estas cumplieron la función de mallas anidadas, lo que nos permitió una mejor precisión y resolución al momento de resolver las ecuaciones. Para esto, se utilizó la técnica de discretización de mallas, lo que permitió la simulación de la propagación del oleaje en diferentes resoluciones. Se utilizó una malla con resolución espacial gruesa con una resolución de 200 m x 200 m (**Figura 4**), en esta se encuentra anidada una malla con resolución de 60 m x 60 m (**Figura 5**) y por último se anida la malla más fina con resolución de 25 m x 25 m (**Figura 6**).

3.2.1.1 Malla computacional 1

En la **Tabla 1** se muestran las principales características de la malla computacional 1. Es de notar que esta malla tiene un tamaño de 200 m x 200 m.

Tabla 1

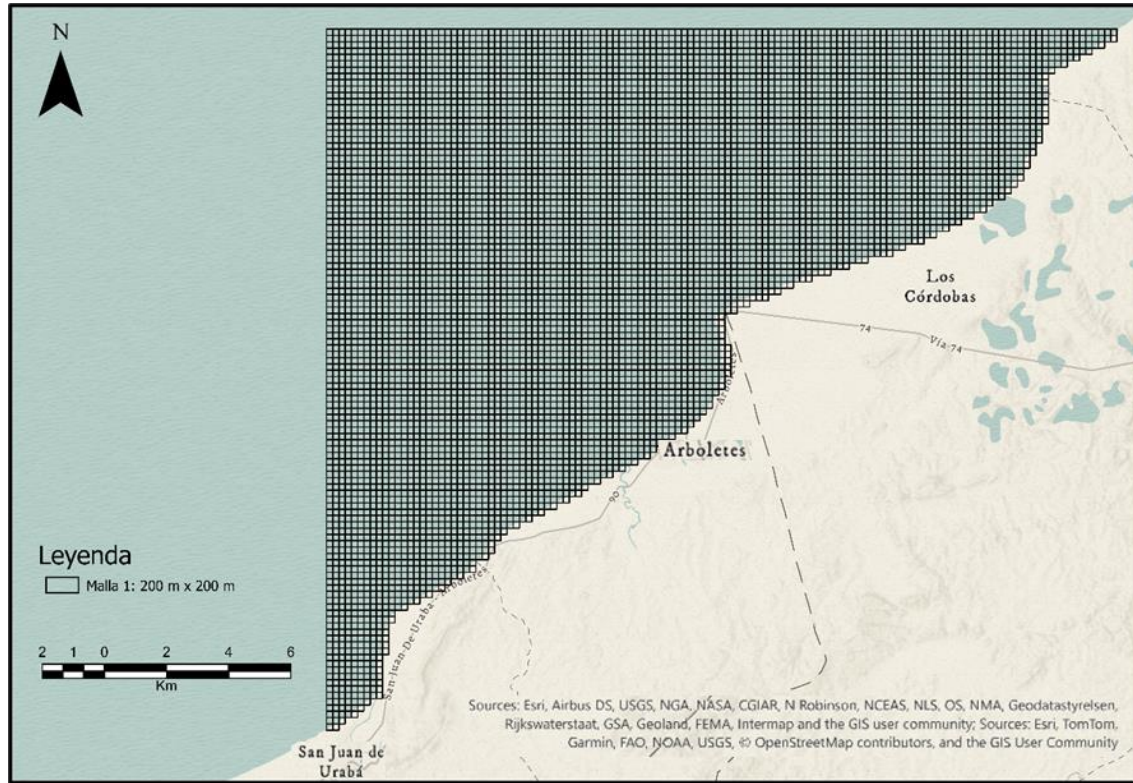
Características de la malla computacional 1. Malla 200 m x 200 m.

Características Malla 1

<i>Número de celdas de la grilla en dirección M</i>	127
<i>Número de celdas de la grilla en dirección N</i>	111
<i>Elementos de la grilla</i>	7029
<i>Extensión horizontal: Mínimo valor de x (longitud)</i>	-76.559076°
<i>Extensión horizontal: Mínimo valor de y (latitud)</i>	8.760072°
<i>Extensión horizontal: Máximo valor de x (longitud)</i>	-76.270300°
<i>Extensión horizontal: Máximo valor de y (latitud)</i>	8.980970°

Figura 4

Malla computacional 1 con resolución 200 m x 200 m.



Lo anterior nos permite una mejor detección de los detalles finos de la propagación del oleaje sobre el área de estudio, además de que se reduce el costo computacional en las regiones de menos interés. A esta última malla computacional, se le realizó un refinamiento en forma de T con una resolución de 5 m x 5 m sobre el obstáculo topobatiométrico, con el objetivo de que el proceso de difracción se resolviera de forma más precisa y representando así mejor la realidad, esto se llevó a cabo teniendo en cuenta que varios estudios han demostrado que el tamaño de la malla deber ser $L/10$ (siendo L la longitud de onda), de lo contrario, si la malla es más gruesa los cálculos y resultados pueden ser no fiables (Deltares, 2020).

3.2.1.2 Malla computacional 2

Las mallas computacionales fueron ortogonalizadas con un valor menor a 0.020 ya que este determina en gran medida la calidad de la cuadrícula (Deltares , 2020). Además, se utilizó la línea de costa Puerto Rey – Arboletes generada en el programa PIMECLA fase 2 en el año 2021 por medio de la calibración de índices o combinaciones de bandas de imágenes de satélite (Gutierrez, Rey , & Gambin-Carrasquilla, 2021), lo anterior con la finalidad de obtener una buena

representación de los cálculos realizados en borde costero. En la **Tabla 2** se muestran las principales características de la malla computacional 2 con una resolución de 60 m x 60 m.

Figura 5

Malla computacional 2 con resolución 60 m x 60 m.



Tabla 2

Características de la malla computacional 2. Malla 60 m x 60 m.

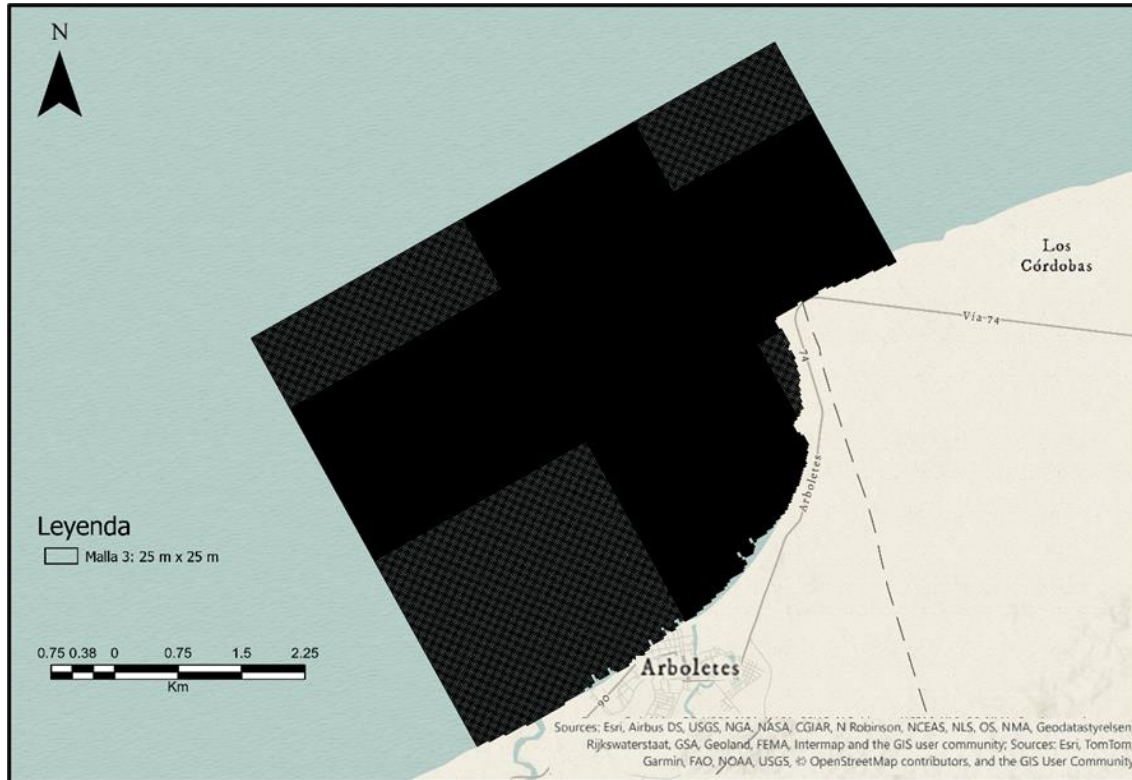
Características Malla 2

<i>Número de celdas de la grilla en dirección M</i>	321
<i>Número de celdas de la grilla en dirección N</i>	237
<i>Elementos de la grilla</i>	38297
<i>Extensión horizontal: Mínimo valor de x (longitud)</i>	-76.495996°
<i>Extensión horizontal: Mínimo valor de y (latitud)</i>	8.811596°
<i>Extensión horizontal: Máximo valor de x (longitud)</i>	-76.321496°
<i>Extensión horizontal: Máximo valor de y (latitud)</i>	8.940161°

3.2.1.3 Malla computacional 3

Figura 6

Malla computacional 3 con resolución $25\text{ m} \times 25\text{ m}$, refinamiento en T con resolución espacial de $5\text{ m} \times 5\text{ m}$.



En la **Tabla 3** se muestran las principales características de la malla computacional 3. Es de notar que esta malla tiene un tamaño de $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ y un refinamiento en T de $5\text{ m} \times 5\text{ m}$.

Tabla 3

Características de la malla computacional 3. Malla $25\text{ m} \times 25\text{ m}$, refinamiento en T con resolución espacial de $5\text{ m} \times 5\text{ m}$.

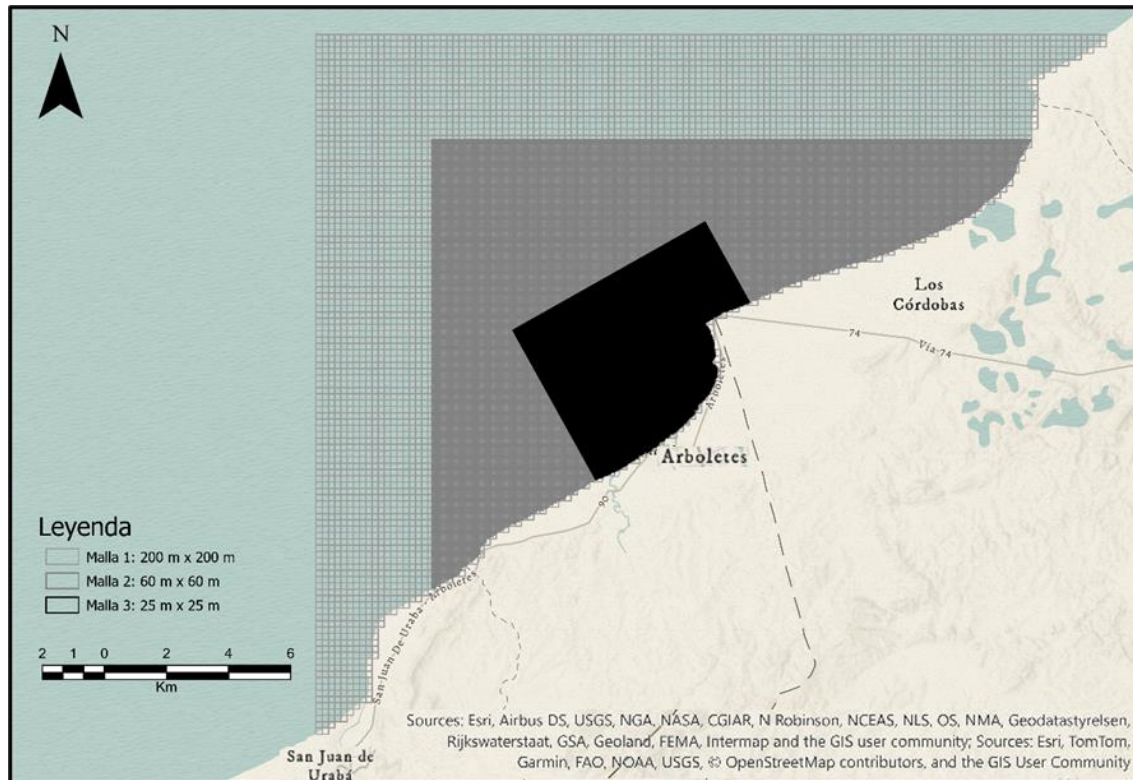
Características Malla 3

Número de celdas de la grilla en dirección M	543
Número de celdas de la grilla en dirección N	744
Elementos de la grilla	374421
Extensión horizontal: Mínimo valor de x (longitud)	-76.449562°
Extensión horizontal: Mínimo valor de y (latitud)	8.842034°
Extensión horizontal: Máximo valor de x (longitud)	-76.402475°
Extensión horizontal: Máximo valor de y (latitud)	8.894109°

Finalmente, en la **Figura 7** se muestran el esquema de anidamiento de mallas computacionales. Malla 1: 200m x 200m. Malla 2: 60m x 60m. Malla 3: 25m x 25m con refinamiento en T de 5m x 5m en zona de obstáculo topobatimétrico.

Figura 7

Esquema de anidamiento de mallas computacionales. Malla 1: 200m x 200m. Malla 2: 60m x 60m. Malla 3: 25m x 25m con refinamiento en T de 5m x 5m en zona de obstáculo topobatimétrico.



3.2.2 Batimetría

3.2.2.1 Batimetría real

Se empleó una batimetría proporcionada por el proyecto PIMECLA que data del año 2021, con resolución espacial fina de 20 x 20 metros interpolada con el método de Natural Neighbor. Esta se efectuó cumpliendo con los estándares exigidos por la International Hydrographic Organization. En este mismo sentido, el levantamiento se efectuó por medio de un equipo sondeador hidrográfico de alta frecuencia (200 Hz) y un GPS de doble frecuencia. Además, se empleó el software Hypack Max versión 2018, donde se almacenó la información obtenida en campo de las líneas planteadas con una separación en zonas de mayor interés de 25, 50 y 75 m, donde por último se aplicaron las correcciones pertinentes.

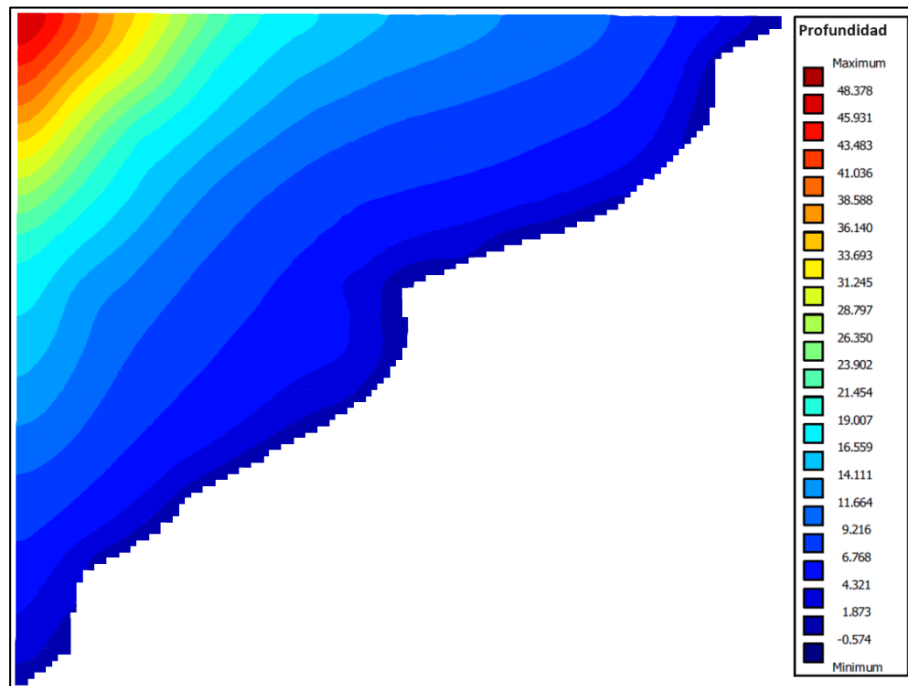
Posteriormente, se procesó en ArcGIS para obtenerla en el formato “.xyz” y así poder ser cargada y trabajada en la plataforma de Delft3D. Esta batimetría se complementó con otras obtenidas a partir de cartas náuticas de la zona de estudio con la finalidad de extender el área de trabajo hacia aguas más profundas.

En la interfaz de Delft3D se llevaron a cabo los procesos de edición y corrección, además de complementar de forma correcta la batimetría proporcionada por PIMECLA con la información sustraída de las cartas náuticas. Posteriormente, se realizó una interpolación triangular y suavizado. Finalmente, se obtienen profundidades de 0 m haciendo referencia a la línea de costa, hasta 50 m siendo la profundidad máxima del área de estudio.

En la **Figura 8** se presenta la batimetría de la malla 1 utilizada en la ejecución del dominio más amplio. En esta malla se ingresaron las condiciones de frontera para la propagación de las condiciones del oleaje. Profundidad máxima 50 m.

Figura 8

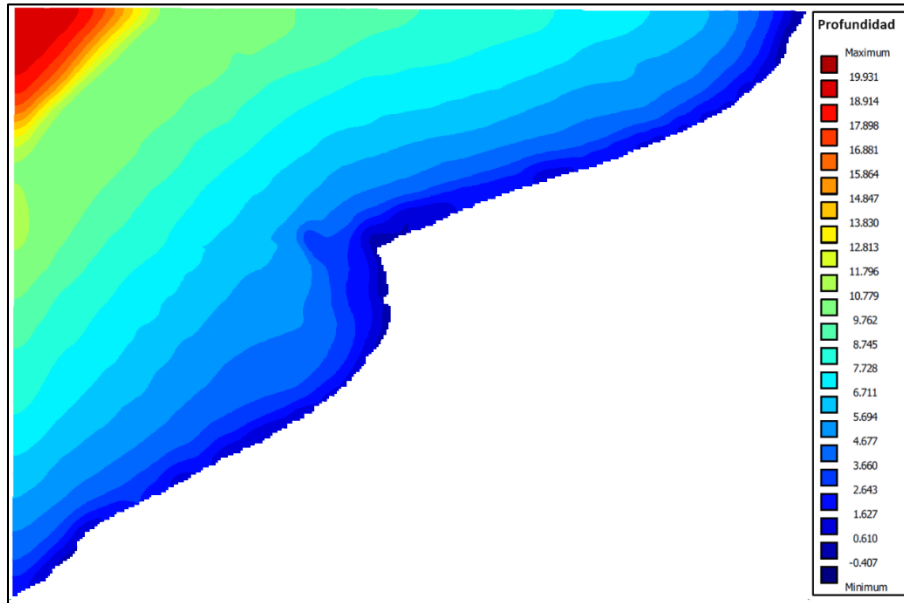
Batimetría de la malla 1 utilizada en la ejecución del dominio más amplio, donde se ingresan las condiciones de frontera para la propagación de las condiciones del oleaje. Profundidad máxima 50 m.



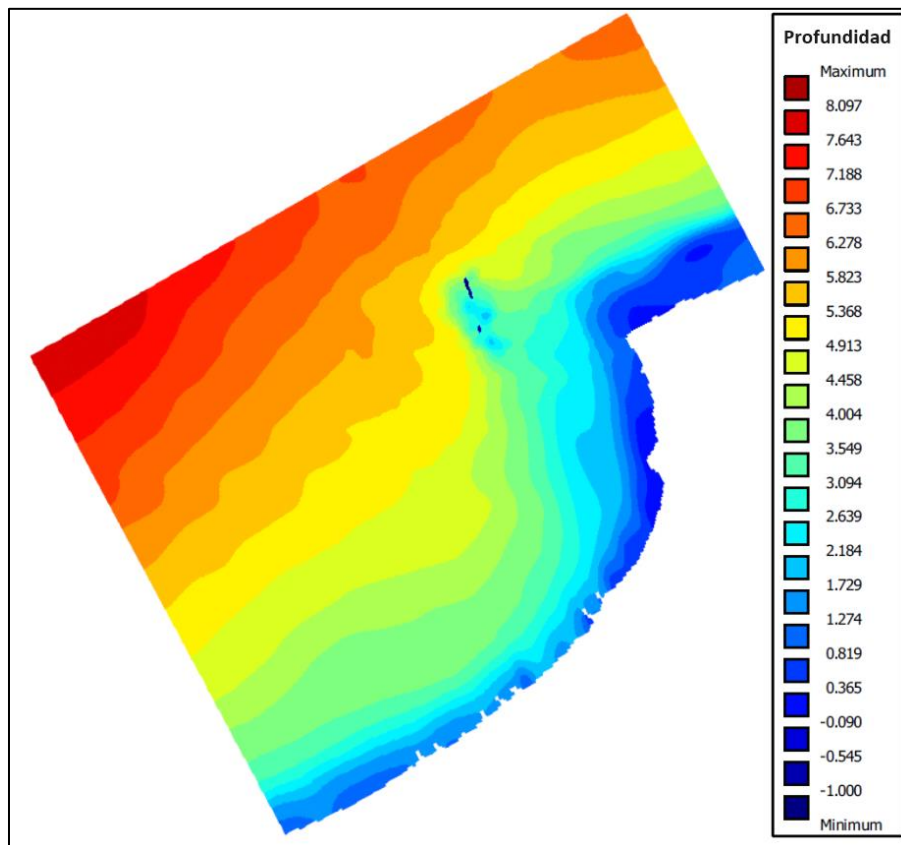
En la **Figura 9** se presenta la batimetría de la malla 2 utilizada en la ejecución del dominio intermedio para la propagación de las condiciones del oleaje. Esta tiene una profundidad máxima 20 m.

Figura 9

Batimetría de la malla 2 utilizada en la ejecución del dominio intermedio para la propagación de las condiciones del oleaje. Profundidad máxima 20 m.

**Figura 10**

Batimetría de la malla 3 utilizada en la ejecución del dominio más fino. Profundidad máxima 9 m.



Finalmente, en la **Figura 10** se muestra la batimetría de la malla 3 utilizada en la ejecución del dominio más fino. Esta tiene una profundidad máxima 9 m.

3.2.3 Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera establecen las condiciones de ingreso y salida de los dominios de estudio, estas tienen gran importancia ya que influyen directamente en los resultados de la modelación; en otras palabras, son los datos que usará el modelo para resolver las ecuaciones.

Las condiciones de frontera o de borde del presente estudio fueron generadas a partir del modelo numérico WaveWatch III, alimentado con datos de reanálisis de viento de ERA5 en un lapso desde octubre de 2021 a noviembre de 2022, utilizando como dominio el mar Caribe, disponibles en: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>, desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio ECMWF, con una resolución espacial de $\frac{1}{4}$ de grados (28 km) y una resolución temporal horaria.

Por otra parte, para la definición de la malla batimétrica se empleó la base de datos ETOPO 1, este es un modelo de relieve que integra la topografía terrestre y la batimetría oceánica, además, tiene cobertura global y resolución espacial de 1 minuto de longitud de arco de la superficie de la tierra, equivalente a 1852 m (Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte, 2021). En la **Tabla 4** se presentan las especificaciones de las áreas y resolución de las mallas de cálculo para las simulaciones con el modelo WWIII.

Tabla 4

Especificaciones de las áreas y resolución de las mallas de cálculo para las simulaciones con el modelo WWIII.

ID	Latitud	Longitud min- máx.	Resolución espacial (grados)	Resolución (Km)
Malla 1	7° - 24°	270° - 303°	1/6	18.5
Malla 2	7.5° - 11°	281° - 285°	1/12	9.25
Malla 3	7.5° - 10°	282° - 284°	1/60	1.85

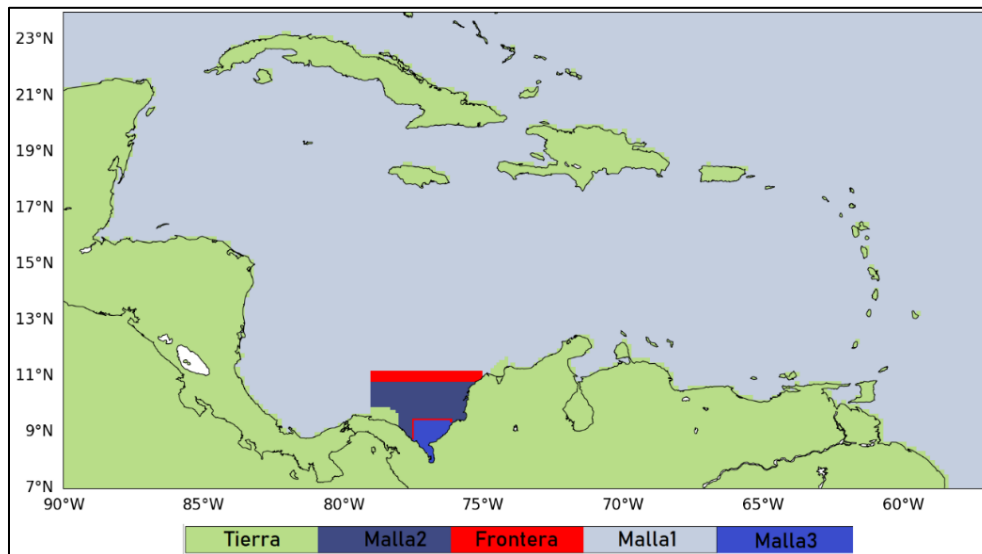
Fuente. (Saavedra, 2022)

En términos de configuración, para la modelación a escala regional se implementó un esquema de anidamiento telescópico de doble vía denominado “multigrad”, el cual permite aumentar la resolución espacial de la malla computacional en nuestra región de interés, en este caso al golfo de Urabá (**Figura 11**).

A partir de los resultados obtenidos de esta modelación se generaron los puntos espectrales de SWAN, los cuales se utilizaron para forzar las condiciones iniciales en la malla 1 (más gruesa), posteriormente estas condiciones se propagaron a las mallas anidadas. Cabe resaltar que la malla 1 es la única malla que recibió en sus fronteras las condiciones iniciales a partir de los puntos espectrales con una resolución temporal de 1 hora.

Figura 11

Esquema de anidamiento de doble vía empleado en la modelación WWII a escala regional.

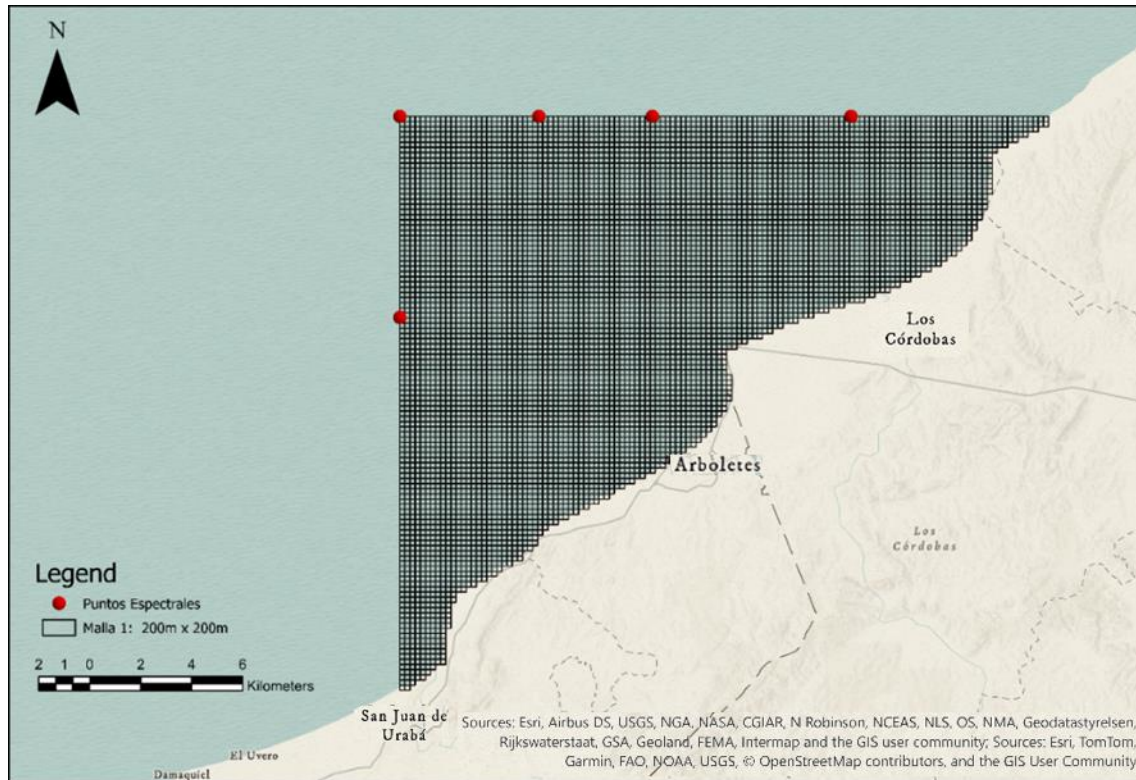


Nota. Fuente Saavedra, 2022

Se generaron un total de 6 puntos espectrales en las fronteras abiertas, 4 en la frontera norte y 2 en la frontera oeste. El punto espectral ubicado en el vértice de la frontera norte con la frontera oeste se utiliza como condición para las dos fronteras (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 12

Malla computacional 1 con resolución 200 m x 200 m. Puntos espectrales fronteras abiertas, norte y oeste.



3.2.4 Modelos numéricos

3.2.4.1 WaveWatch III

WaveWatch III es un modelo de ondas oceánicas superficiales de tercera generación que incluye grandes avances científicos en el campo de la modelación y la dinámica del oleaje generado por viento. Este modelo fue desarrollado en los centros nacionales de predicción ambiental de EE. UU. (NOAA/NCEP), basándose en el modelo WAN (Komen et al., 1994).

WaveWatch III obtiene a partir de la densidad de energía $E(\sigma, \theta)$ la información de los parámetros escalares de los espectros de energía del oleaje. Esto en función de σ y θ utilizando como variable fundamental la densidad de acción de onda $N(\sigma, \theta)$ (Tolman & The WAVEWATCH III Development Group) (**Ecuación 1**).

Ecuación 1

Densidad de acción de onda.

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

La variación de la densidad de acción de onda está determinada por la ecuación de balance de acción de onda (**Ecuación 2**), el lado izquierdo representa la parte cinemática (1er término:

variación temporal de la acción de la onda, 2do término: advección del espectro en el espacio geográfico bidimensional (x, y) , donde \dot{x} es la velocidad de propagación del espectro en el espacio (Cx, Cy) . En la parte derecha de la ecuación, S describe el efecto neto de los términos fuente y sumidero, determinados en la ecuación 3, siendo el primer término la fuente no lineal de la interacción entre ondas, el segundo término representa la interacción de las ondas con el fondo marino (**Ecuación 3**) (Saavedra, 2022).

Ecuación 2

Balace de acción de onda.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma}$$

Ecuación 3

Efecto neto de los términos fuente y sumidero.

$$S = S_{nl} + S_{bot} + S_{in} + S_{ds}$$

3.2.4.2 SWAN

Los casos de estudio fueron ejecutados usando SWAN, por lo que, para una batimetría y malla computacional ingresada permite calcular la generación y propagación del oleaje desde aguas profundas hacia la costa, así como también disipación, refracción, difracción, asomeramiento, entre otros.

En SWAN, el oleaje se describe con el espectro bidimensional de densidad de acción de las olas $N(\sigma, \theta)$ en lugar del espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$ ya que, en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva, mientras que la densidad de energía no. Las variables independientes son la frecuencia relativa σ y la dirección de la onda θ . La acción de densidad es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa (**Ecuación 4**) (Deltares, 2020).

Ecuación 4

Acción de densidad de onda.

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$$

Por otra parte, la ecuación de balance de acción espectral describe la evolución del espectro de ondas, que para coordenadas cartesianas está dada por la **Ecuación 5**:

Ecuación 5*Balance de acción espectral.*

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

De izquierda a derecha:

Primer término: representa la tasa local de cambio de la densidad de acción del tiempo.

Segundo término: representa la propagación de acción en el espacio geográfico x con velocidad de propagación c_x .

Tercer término: representa la propagación de acción en el espacio geográfico y con velocidad de propagación c_y .

Cuarto término: representa el desplazamiento de la frecuencia relativa debido a las variaciones de las profundidades y corrientes en el espacio σ con velocidad de propagación c_σ .

Quinto término: representa la refracción inducida por la profundidad y la corriente en el espacio θ con velocidad de propagación c_θ .

Por último, el término $S(= S(\sigma, \theta))$ al lado derecho de la ecuación es el término fuente en términos de densidad de energía que representa los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales onda-onda (Deltares, 2020).

En cuanto a la difracción en SWAN, se sugiere una aproximación de refracción-difracción desacoplada de fase, se expresa en términos de la velocidad de los componentes de onda individuales en el espectro de onda 2D. La aproximación se basa en la ecuación de pendiente suave para la refracción y la difracción (Deltares, 2020).

En un caso sencillo, si suponemos que no hay corrientes, significa que $c_\sigma = 0$. Denotemos que las velocidades de propagación en los espacios tanto geográficos como espectrales para una situación sin difracción como: $c_{x,0}$; $c_{y,0}$ y $c_{\theta,0}$, estas vienen dadas por la **Ecuación 6**:

Ecuación 6*Velocidad de propagación en espacios geográficos y espectrales.*

$$c_{x,0} = \frac{\partial w}{\partial k} \cos(\theta) \quad c_{y,0} = \frac{\partial w}{\partial k} \sin(\theta) \quad c_{\theta,0} = -\frac{1}{k} \frac{\partial w}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial n}$$

Donde, k es el número de onda y n es perpendicular al rayo de onda. Por lo que se considera la siguiente ecuación eikonal mediante la **Ecuación 7** (Deltares, 2020).

Ecuación 7*Ecuación eikonal.*

$$K^2 = k^2(1 + \delta)$$

Denotando con δ el parámetro de difracción dado por:

$$\delta = \frac{\nabla(CC_g \nabla H_s)}{CC_g H_s}$$

Debido a la difracción, las velocidades de propagación vienen dadas por la **Ecuación 8** (Deltares, 2020).

Ecuación 8*Velocidades de propagación debido a la difracción.*

$$c_x = c_{x,0} \bar{\delta} \quad c_y = c_{y,0} \bar{\delta} \quad c_\theta = c_{\theta,0} \bar{\delta} - \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial x} c_{y,0} + \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial y} c_{x,0}$$

$$\text{donde, } \bar{\delta} = \sqrt{1 + \delta}$$

3.2.5 Procesamiento de Datos

Para la calibración y validación del modelo se utilizó una serie de datos medidos *in situ* y proporcionados por el programa PIMECLA. Fue instalado en el área de estudio, específicamente en las coordenadas latitud: 8°53'40.90" y longitud: 76°25'50.90", un sensor de presión BlueLog a una profundidad de 7 metros y expuesto a las condiciones variables del oleaje, este fue desarrollado por la universidad Nacional. Los datos fueron recolectados entre agosto de 2021 y enero de 2023.

Posteriormente, el set de datos fue procesado en MatLab con la finalidad de extraer los parámetros integrales del oleaje, de los cuales, un rango de estos correspondientes al mes de noviembre de 2021 se utilizó para calibrar y validar el modelo, precisando que debido al gasto computacional que demandan las ejecuciones y a la capacidad limitada del servidor, solo se utilizaron estos datos.

Además, a dos de los parámetros integrales del oleaje (altura significativa y período) ya extraídos mediante la función “*wavesp*” en MatLab, se les realizó un análisis estadístico con el fin de comprender de manera más detallada como fue el comportamiento de estos durante el tiempo muestreado, especialmente en el patrón climático bimodal característico de la zona.

3.2.6 Calibración y Validación

Para los casos ejecutados se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

3.2.6.1 Calibración

Para el proceso de calibración del modelo se utilizó la escala temporal de 4 días, del 01 al 04 de noviembre de 2021. Se seleccionó este rango temporal debido a que se presentaron variaciones significativas en la altura significativa del oleaje, y se buscó evidenciar que el modelo representara de forma precisa esas oscilaciones.

Se realizó una simulación empleando la serie de vientos de ERA5 con los parámetros que sugiere SWAN por defecto, posteriormente se compararon los resultados con mediciones *in situ* de la altura significativa de la ola y poder conocer que tanto se debió ajustar el modelo.

En la parametrización del modelo se establecieron valores sugeridos por SWAN a ciertos parámetros físicos para las diferentes ejecuciones. Además, es importante mencionar que en estas ejecuciones no se incluyeron corrientes, ni variaciones del nivel mar. En la **Tabla 5** se presentan los parámetros físicos constantes para cada uno de los casos ejecutados en SWAN.

Tabla 5

Parámetros físicos constantes para cada uno de los casos ejecutados en SWAN.

<i>Parámetros físicos</i>	<i>Constantes</i>
<i>Gravedad</i>	<i>9.81 m/s²</i>
<i>Densidad del agua</i>	<i>1025 kg/m³</i>
<i>Rotura inducida por la profundidad (Alpha)</i>	<i>1</i>
<i>Rotura inducida por la profundidad (Gamma)</i>	<i>0.73</i>
<i>Difracción - coeficiente de suavizado</i>	<i>0.2</i>
<i>Difracción - pasos de suavizado</i>	<i>5</i>
<i>Difracción – propagación adaptada</i>	<i>ok</i>
<i>Crecimiento del viento</i>	<i>ok</i>
<i>Refracción</i>	<i>ok</i>

3.2.6.1.1 Whitecapping

Se ajustó el $C_{ds} = 4.5$, que figura como valor por defecto del coeficiente de disipación por rompimiento de las crestas de la ola según la teoría de Janssen.

Para obtener la tendencia, así como también la variabilidad y alturas de ola simuladas más acordes a la realidad, se encontró que un valor óptimo es $C_{ds} = 2.0$. Generando que disipe en menor cantidad la energía de la ola en su propagación hacia la línea de costa y simule las características de la serie esperadas.

3.2.6.1.2 Fricción del fondo

Según la teoría de Jonswap el valor por defecto del coeficiente de fricción para fondos arenosos típicos es de $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$. Para obtener una mejor calibración del modelo, fue necesario bajar este coeficiente un 20%, tomando así un valor de $0.0304 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$.

En la **Tabla 6** se presentan los parámetros utilizados en la ejecución del caso 1 con valores sugeridos por SWAN.

Tabla 6

Parámetros utilizados en la ejecución del caso 1 con valores sugeridos por SWAN.

Elemento	Observación
<i>Malla 1.</i>	200 m x 200 m
<i>Viento Malla 1</i>	ERA5
<i>Malla 2.</i>	60 m x 60 m
<i>Viento Malla 2</i>	Propagado de Malla 1
<i>Malla 3.</i>	25 m x 25 m
<i>Viento Malla 3</i>	Propagado de Malla 2
<i>Malla 3 – refinamiento en T</i>	5 m x 5 m
<i>Tiempo modelado</i>	01 nov/21 - 04 Nov/21
<i>Condiciones de frontera norte</i>	4
<i>Condiciones de frontera oeste</i>	2
<i>Modo de cálculo</i>	No estacionario
<i>Intervalo de tiempo</i>	60 min
<i>Paso de tiempo</i>	30 min
<i>Whitecapping - Janssen</i>	$C_{ds} = 4.5$
<i>Fricción del fondo - Jonswap</i>	$0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$.

En la **Tabla 6** se presentan los parámetros utilizados en la ejecución del caso 1 con valores ajustados.

Tabla 7

Parámetros utilizados en la ejecución del caso 1 con valores ajustados.

Elemento	Observación
<i>Malla 1.</i>	200 m x 200 m
<i>Viento Malla 1</i>	ERA5
<i>Malla 2.</i>	60 m x 60 m
<i>Viento Malla 2</i>	Propagado de Malla 1
<i>Malla 3.</i>	25 m x 25 m
<i>Viento Malla 3</i>	Propagado de Malla 2
<i>Malla 3 – refinamiento en T</i>	5 m x 5 m
<i>Tiempo modelado</i>	01 nov/21 - 04 Nov/21
<i>Condiciones de frontera norte</i>	4
<i>Condiciones de frontera oeste</i>	2
<i>Modo de cálculo</i>	No estacionario
<i>Intervalo de tiempo</i>	60 min
<i>Paso de tiempo</i>	30 min
<i>Whitecapping - Janssen</i>	$C_{ds} = 2.0$
<i>Fricción del fondo - Jonswap</i>	$0.0304 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$.

3.2.6.2 Validación

En el proceso de validación del modelo se seleccionó un rango entre el 18 y el 26 de noviembre de 2021, en el que posteriormente se generó la simulación para poder compararon los datos simulados con los datos medidos *in situ* proporcionados por el programa PIMECLA y así saber si el modelo reproduce de manera adecuada las condiciones reales de la zona.

3.2.7 Casos

3.2.7.1 Caso 1- Comparación entre malla 3 sin refinamiento y malla 3 refinada en forma de T

Este caso se ejecutó para evidenciar las diferencias entre la malla 3 con resolución de 25 m x 25 m y la malla 3 con el refinamiento en T de 5 m x 5 m sobre el obstáculo topobatimétrico. Para este caso se seleccionaron 3 días del mes de noviembre de 2021, el 5, el 10 y el 15. Esta ejecución se realizó con los valores paramétricos sugeridos por SWAN (**Tabla 6**).

3.2.7.2 Caso 2 – Ejecución con valores paramétricos sugeridos por SWAN

Este caso se ejecutó con los valores paramétricos sugeridos por SWAN (anteriormente descritos), y con los que se analizó como es el comportamiento entre los datos simulados y los datos *in situ* entre el 01 y el 04 de noviembre 2021. Con esta simulación además de se pudo sugerir los parámetros a ajustar (**Tabla 6**).

3.2.7.3 Caso 3 - Valores paramétricos ajustados

La ejecución de este caso se realizó teniendo en cuenta los valores ajustados en el proceso de calibración, como se mencionó anteriormente en la **Tabla 7**.

Estos valores se ajustaron para que la serie de tiempo simulada representara de forma adecuada las mediciones *in situ*, además, debido a que la zona de estudio es muy somera, las simulaciones se pueden volver inestables debido a la compleja interacción en el oleaje generado por viento, el fondo marino y la profundidad (Deltares, s.f.), sin embargo, se buscó simular de forma óptima las condiciones del oleaje.

3.2.7.4 Caso 4 – Validación del modelo

Para la validación del modelo se seleccionó el período del 18 al 26 de noviembre de 2021, donde se presenta una variabilidad y características propias de las condiciones del oleaje de la época en la zona de estudio.

Con el objetivo de verificar si la calibración del modelo representa de forma óptima la tendencia y variabilidad temporal del oleaje se utilizó la variable altura significativa. Además, los datos simulados se compararon con los datos *in situ* mediante un diagrama de dispersión e índice de correlación para así también verificar los ajustes realizados.

3.2.7.5 Caso 5 – Casos estacionarios

Se ejecutaron 8 casos estacionarios, es decir, que varían en el espacio, pero no en el tiempo.

Estos casos se generaron con la finalidad de conocer y analizar el comportamiento de la dirección del oleaje al chocar con el obstáculo topobatimétrico en su propagación hacia la línea de costa con direcciones y magnitudes del viento característicos del patrón bimodal del área de estudio. En estos casos se analizaron los dos procesos objetivos del presente trabajo, difracción y refracción. Por consiguiente, es de importancia conocer las características de estos fenómenos de

propagación en cada una de las épocas climáticas tomando como referencia el promedio de velocidad máxima y mínima del viento, como también las direcciones predominantes.

Es de importancia mencionar que el caso numero 4 aplica tanto para época húmeda como para época seca debido a que en la primera época en mención es el promedio máximo de la velocidad del viento, mientras que la segunda es el mínimo. Por su parte, los casos número 7 y 8 hacen referencia a un segundo pico que se presenta en la época húmeda (Thomas, Cesaraccio, García-Valencia, & Ménanteau, 2007). Sin embargo, en este trabajo se presentó el caso más significativo de cada época, marzo para le época seca, con el promedio de velocidad del viento más fuerte, alcanzando los 9.4 m/, mientras que para la época húmeda se toma el mes de julio, que se caracteriza por vientos más débiles con velocidades máximas de hasta 4 m/; esto con la intención de analizar los resultados con el máximo y mínimo del ciclo anual.

A continuación, en la **Tabla 8** se detallan los casos estacionarios:

Tabla 8

Casos estacionarios modelados.

Época Seca		
Numero de Caso	Velocidad media Viento (m/s)	Dirección predominante
1	9.4	Norte
2	9.4	Noreste
3	4	Norte
4	4	Noreste
Época Húmeda		
Numero de Caso	Velocidad media Viento (m/s)	Dirección predominante
5	2	Norte
6	2	Noreste
7	4	Suroeste
8	2	Suroeste

4. Resultados y Discusión

4.1 Procesamiento de datos

4.1.1 *Altura significativa del oleaje (Hs)*

Los valores de Hs sugieren un comportamiento característico del área de estudio resaltando el patrón bimodal estacional, en otras palabras, a partir del mes de noviembre se presenta un incremento paulatino en la velocidad de los vientos alisios del noreste, lo que conlleva a un aumento en la altura del oleaje, alcanzando valores de hasta 0.9 metros. Por el contrario, se presenta una disminución significativa en el período de transición hacia la época húmeda, donde los vientos alisios se debilitan y en la Hs del oleaje predominan valores más bajos (**Figura 13**).

En el presente set de datos, como resultado de la prueba de Kolmogórov-Smirnov no sigue una distribución normal, lo que se evidencia debido a que la media es mayor que la mediana, sugiriendo una distribución sesgada a la derecha, determinando la concentración de valores más alta en el lado izquierdo, donde se encuentran los valores más bajos de Hs. Además, el área bajo la curva de densidad indica que en el rango entre 0.05 m y 0.3 m existe mayor probabilidad de ocurrencia. En la **Figura 14** se presenta el Histograma de probabilidad y función de densidad de probabilidad de la altura significativa del oleaje en Puerto Rey, Arboletes, tanto para la época seca y húmeda.

Por lo tanto, se sugiere tomar como medida de tendencia central la mediana ya que es menos susceptible a los valores extremos y proporciona un buen análisis debido a que la distribución es sesgada. Así mismo, se toma como medida de variación el rango intercuartil, el cual adquiere en este caso un valor de 0.22, sugiriendo así, que los datos presentan una dispersión baja con respecto a la mediana.

La mediana registra un valor de 0.21, lo que sugiere que el 50% de los datos se encuentran por debajo de este valor, y el otro 50% son mayores. En esa misma línea, se presentaron valores máximos y mínimos de 0.88 m y 0.03 m respectivamente, siendo estas representaciones del patrón estacional bimodal del área de estudio ya que las mayores alturas se presentaron en época seca y las menores en la época húmeda como lo sugiere (Paniagua & Correa).

En la época seca, la Hs del oleaje tiene más probabilidad de alcanzar valores más altos, estos se concentran entre aproximadamente 0.3 m y 0.5, con más del 20% de probabilidad de alcanzar valores iguales o mayores a 0.4 m. Por su parte, en la época húmeda la mayor

concentración de alturas se encuentra entre 0.05 m y 0.2 m, con probabilidades menores al 5 % de alcanzar valores mayores a 0.4 m.

Figura 13

Serie temporal de la altura significativa del oleaje con datos medidos in situ Período de agosto de 2021 a enero de 2023. La línea roja y azul indican el inicio de la época seca y húmeda respectivamente.

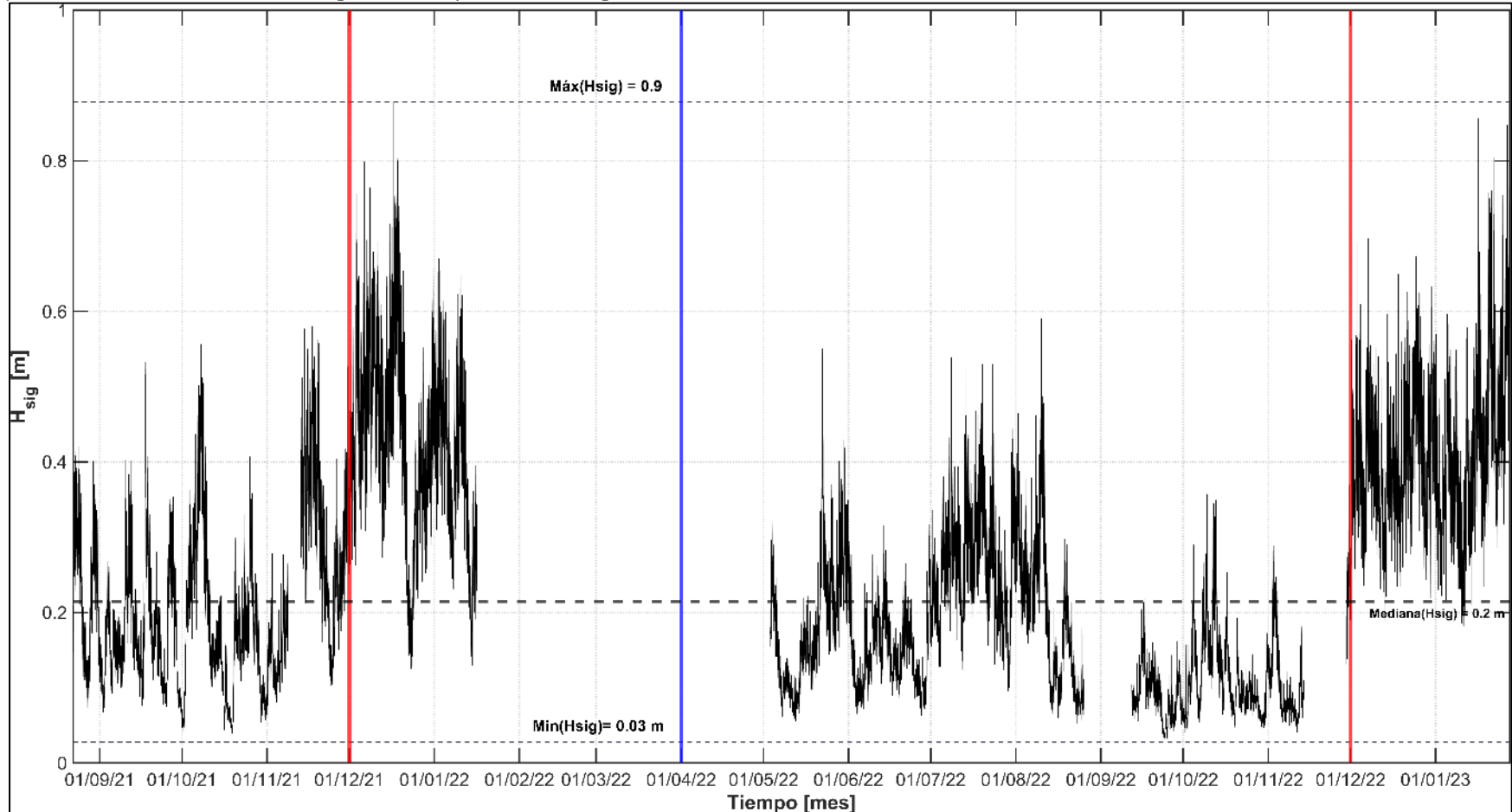


Figura 14

Histograma de probabilidad y función de densidad de probabilidad de la altura significativa del oleaje en Puerto Rey, Arboletes. Época seca y época húmeda.

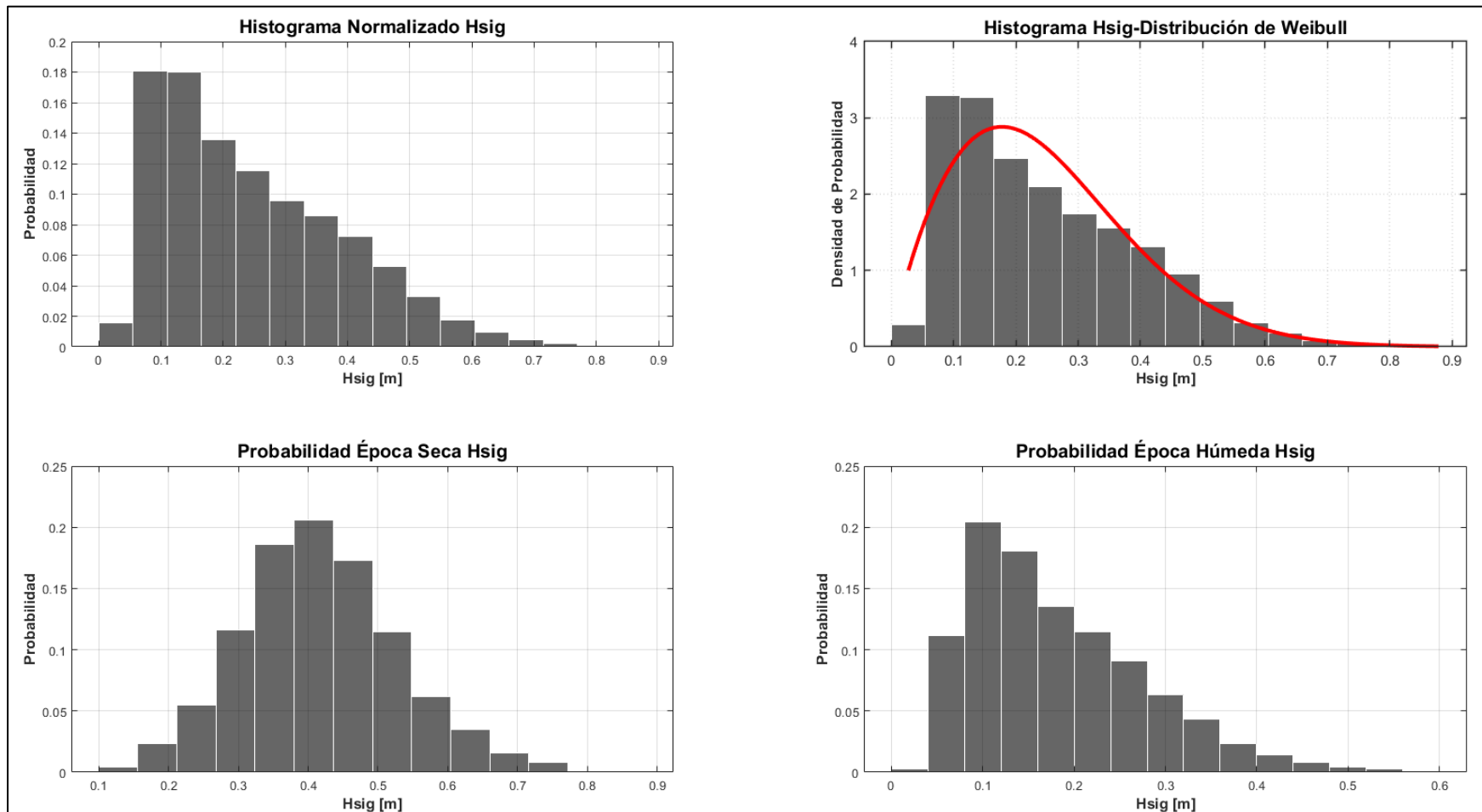


Figura 15

Probabilidad de la altura significativa del oleaje en Puerto Rey, Arboletes. Serie de datos completa (línea sólida), época seca (línea con cuadros) y época húmeda (línea con triángulos).

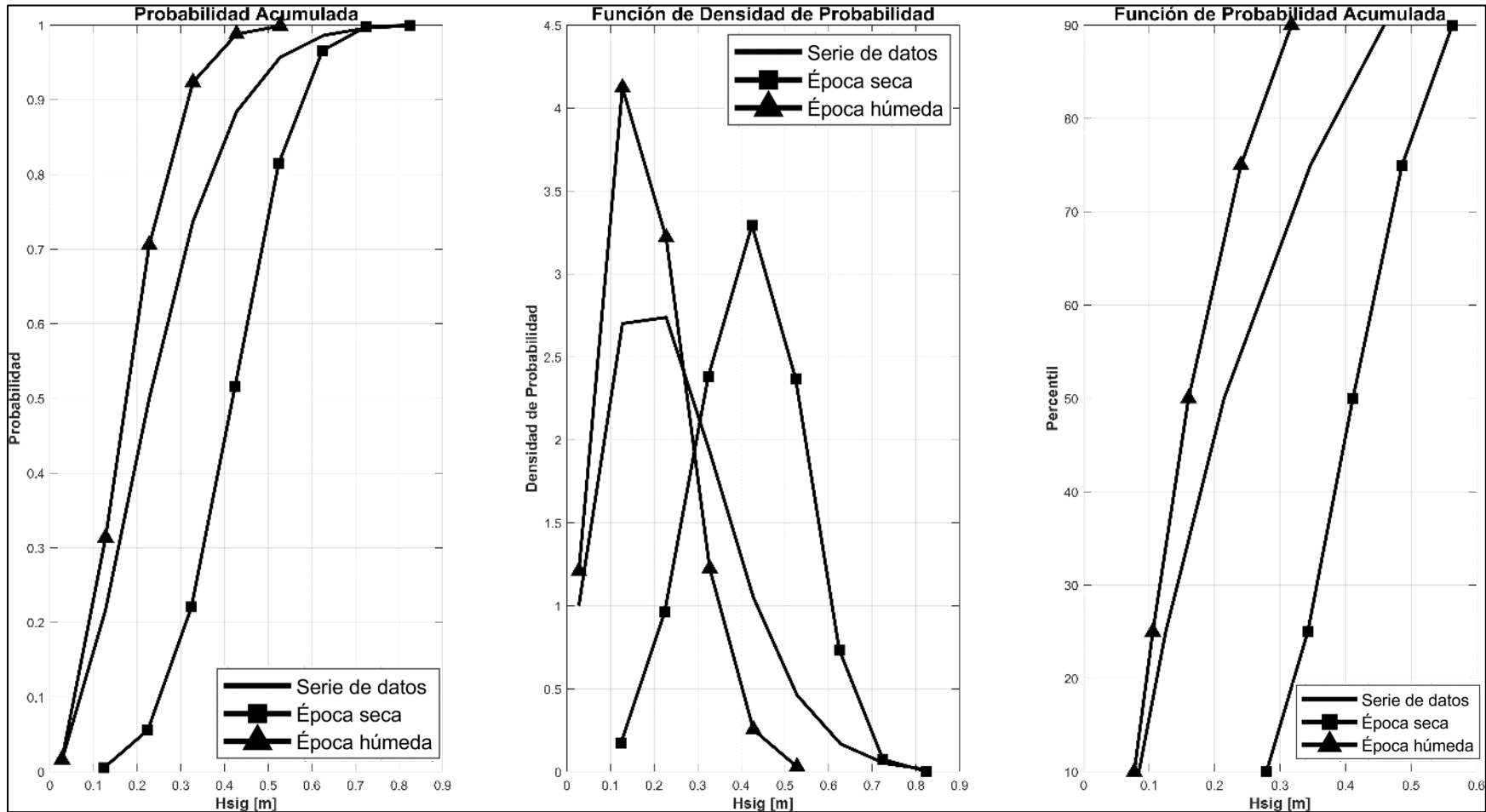
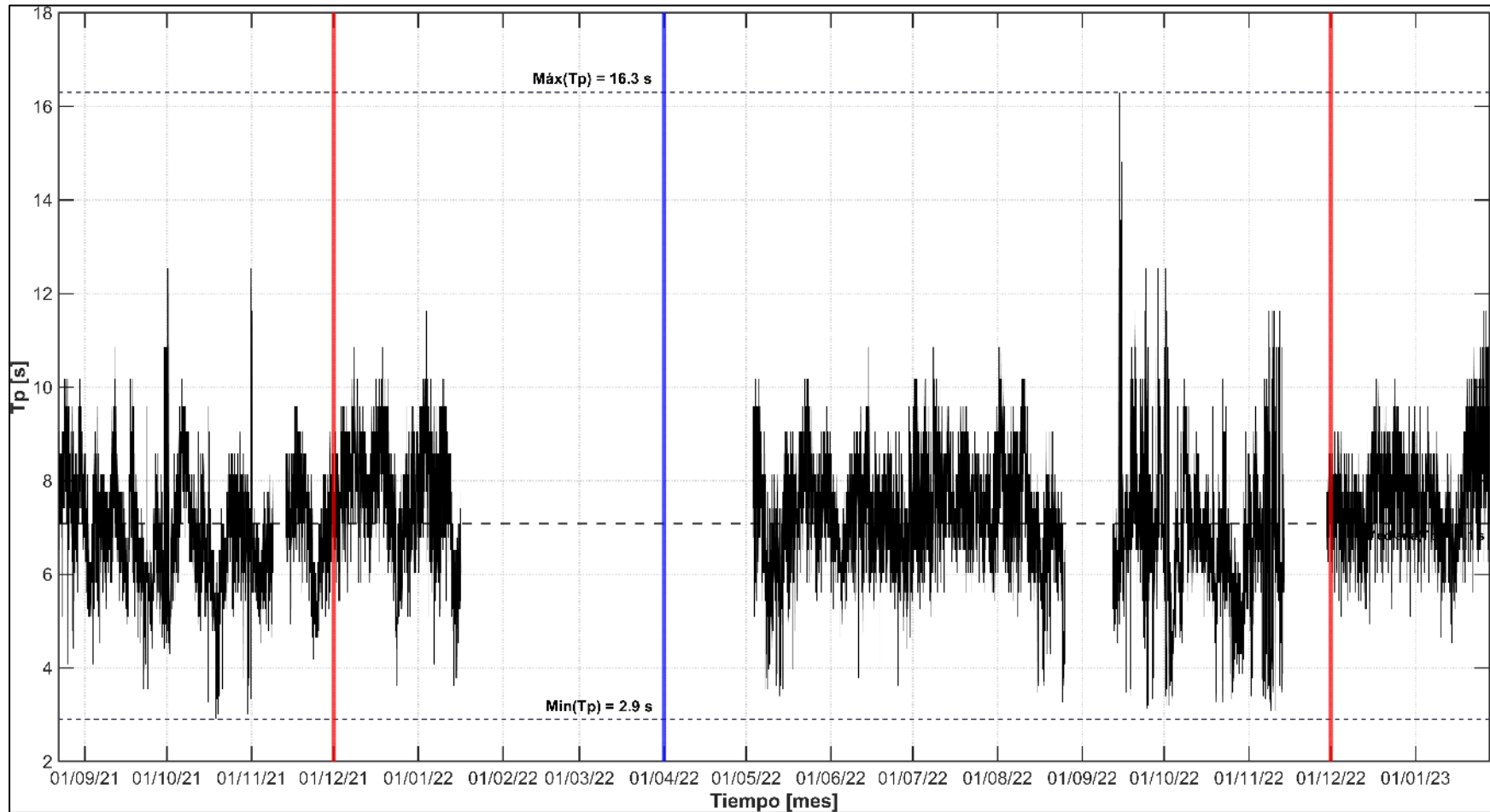


Figura 16

Serie temporal del período del oleaje con datos medidos in situ Período de agosto de 2021 a enero de 2023. La línea roja y azul indican el inicio de la época seca y húmeda respectivamente.



En la **Figura 15** se sugiere que la probabilidad y la altura significativa del oleaje son inversamente proporcionales, a mayor altura significativa menor probabilidad de ocurrencia.

Donde el percentil 50 de las alturas significativas son inferiores a 0.21 m, por su parte el primer cuartil (25) está por debajo de 0.35 m, y únicamente el 10% de las alturas significativas excede los 0.46 m, y esto ocurre en la época seca, donde los vientos alisios del norte se incrementan influyendo así el incremento en la altura del oleaje, en esta época el 50% de las alturas se ubican por debajo de 0.4 m y el 90% por debajo de 0.56 m, además, la frecuencia acumulada y la curva de densidad también sugieren que existe una mayor concentración de alturas más altas entre los meses de diciembre a abril.

En contraste, en la época húmeda, el 50% de las alturas son menores a 0.16 m y el 90% se ubica por debajo de 0.32 m. Ubicando el área bajo la curva de densidad y la frecuencia acumulada la mayor probabilidad de alcanzar valores más bajos con respecto a la época seca, centrando su probabilidad más alta entre 0.1 y 0.3 m.

4.1.2 Período del oleaje

En el área de Puerto Rey, el período del oleaje en el tiempo muestreado registró una media de 7.2 s, un período máximo de 16.3 s y un período mínimo de 2.9 s. Se observaron patrones “estacionales” claros en la serie, sugiriendo que, durante los meses correspondientes a la época seca, los períodos del oleaje fueron más cortos; esto representa las características propias de la zona debido al incremento de los vientos alisios del noreste, en contraste, durante la época húmeda sugieren períodos de oleaje más largos (**Figura 16**).

4.2 Casos simulados

4.2.1 Caso 1- Comparación entre malla 3 sin refinamiento y malla 3 refinada en forma de T

4.2.1.1 Malla 3 sin refinamiento

Para el caso evaluado con la malla computacional sin refinamiento se sugieren tres direcciones predominantes del oleaje, norte, noreste y noroeste, adicionalmente, se evidencia claramente que no hay un cambio significativo en la dirección del oleaje al chocar con el obstáculo topobatimétrico presente en la zona debido a la poca resolución de la malla en comparación con el tamaño del obstáculo topobatimétrico y el proceso de difracción que se busca representar.

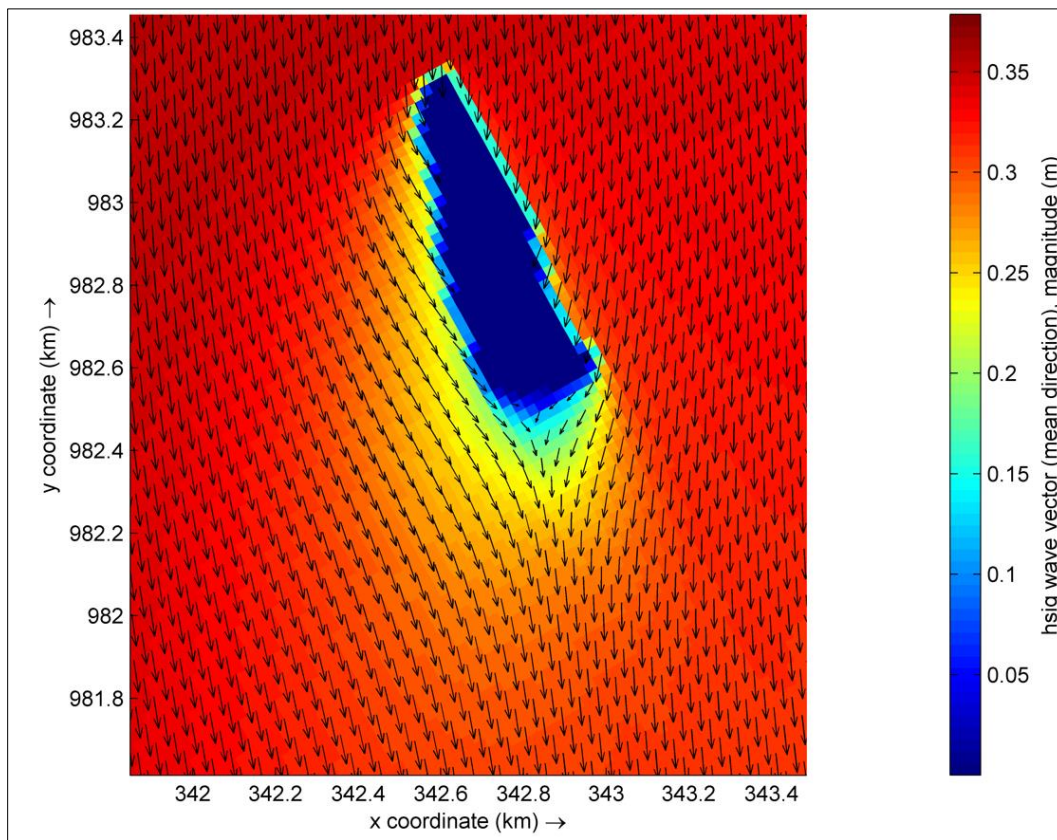
Por su parte, la H_s presenta valores poco precisos en comparación de las medidas debido a que el modelo aún no se encuentra calibrado. Sin embargo, se observa como esta se ve afectada al chocar con el obstáculo generando una zona de sombra con alturas significativas menores desde la zona posterior del obstáculo hasta la línea de costa teniendo en cuenta la incidencia del oleaje, lo

que sugiere que el obstáculo topobatimétrico está generando una disminución en la altura significativa del oleaje y así mismo en su energía al momento de llegar a la línea de costa.

En la **Figura 17** se muestra el campo de dirección y altura significativa del oleaje cerca al obstáculo topobatimétrico para el día 5 de noviembre de 2021.

Figura 17

Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje cerca al obstáculo topobatimétrico para el día 5 de noviembre de 2021.



En la **Figura 18** se muestra el campo de dirección y altura significativa del oleaje cerca al obstáculo topobatimétrico para el día 10 de noviembre de 2021.

Mientras que en la **Figura 19** se muestra el campo de dirección y altura significativa del oleaje cerca al obstáculo topobatimétrico para el día 15 de noviembre de 2021.

Figura 18

Representación gráfica de la dirección (izquierda) y de la altura significativa del oleaje (derecha) para el día 10 de noviembre de 2021.

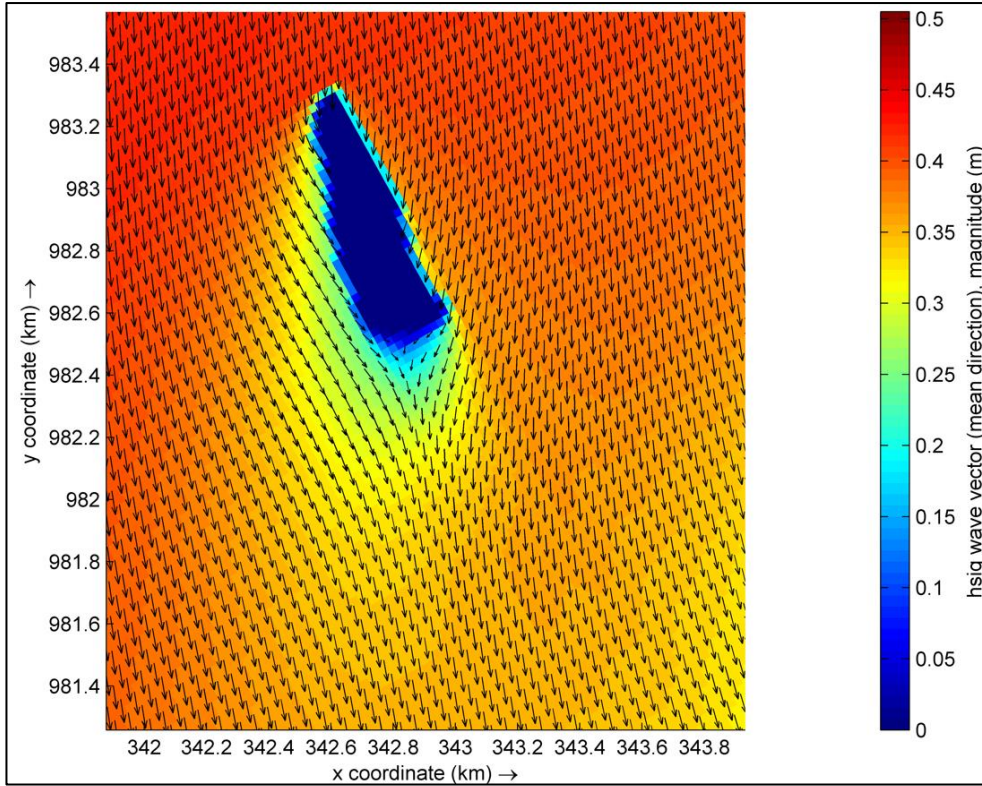
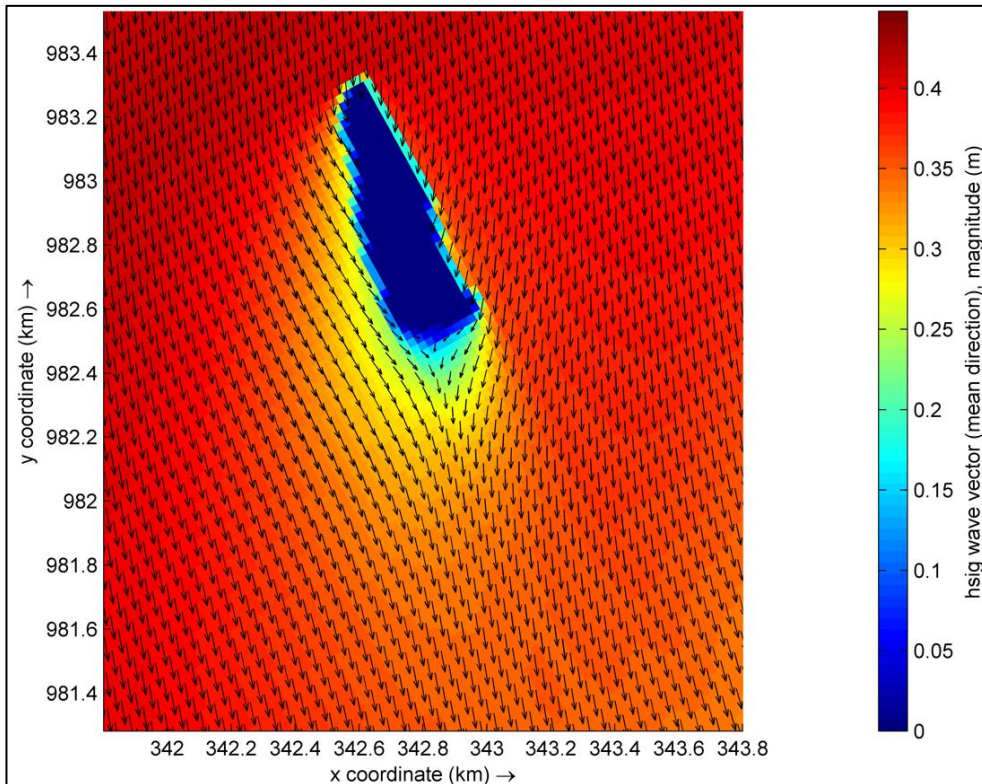


Figura 19

Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje para el día 15 de noviembre de 2021.

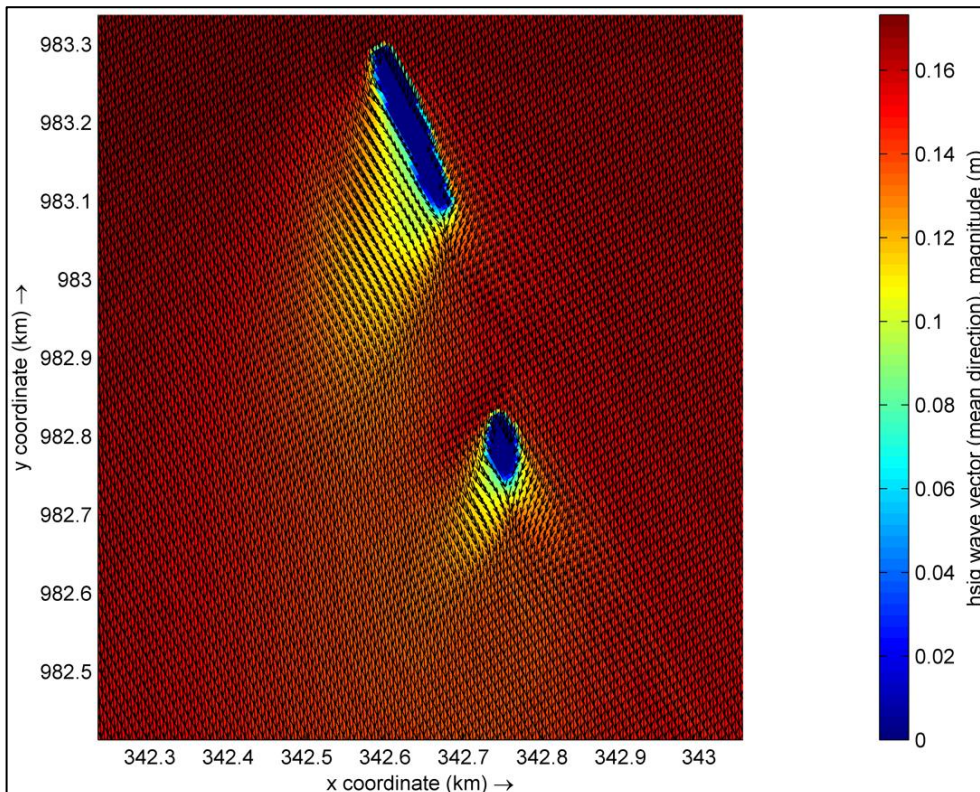


4.2.1.2 Malla 3 con refinamiento en forma de T

La representación del proceso de difracción se logra evidenciar al aplicar el refinamiento sugerido por (The SWAN team, 2019). En la **Figura 20** se presentan los campos de dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 5 de noviembre de 2021.

Figura 20

Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 5 de noviembre de 2021.



En la **Figura 21** se presentan los campos de dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 10 de noviembre de 2021.

Por su parte, en la **Figura 22** se presentan los campos de dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 15 de noviembre de 2021.

Una vez representada de manera correcta la difracción al chocar el oleaje con el obstáculo topobatimétrico se observa que el 10 de noviembre, a mayor altura significativa del oleaje en comparación con las otras dos fechas, se representa con mayor intensidad del proceso de difracción.

Figura 21

Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 10 de noviembre de 2021.

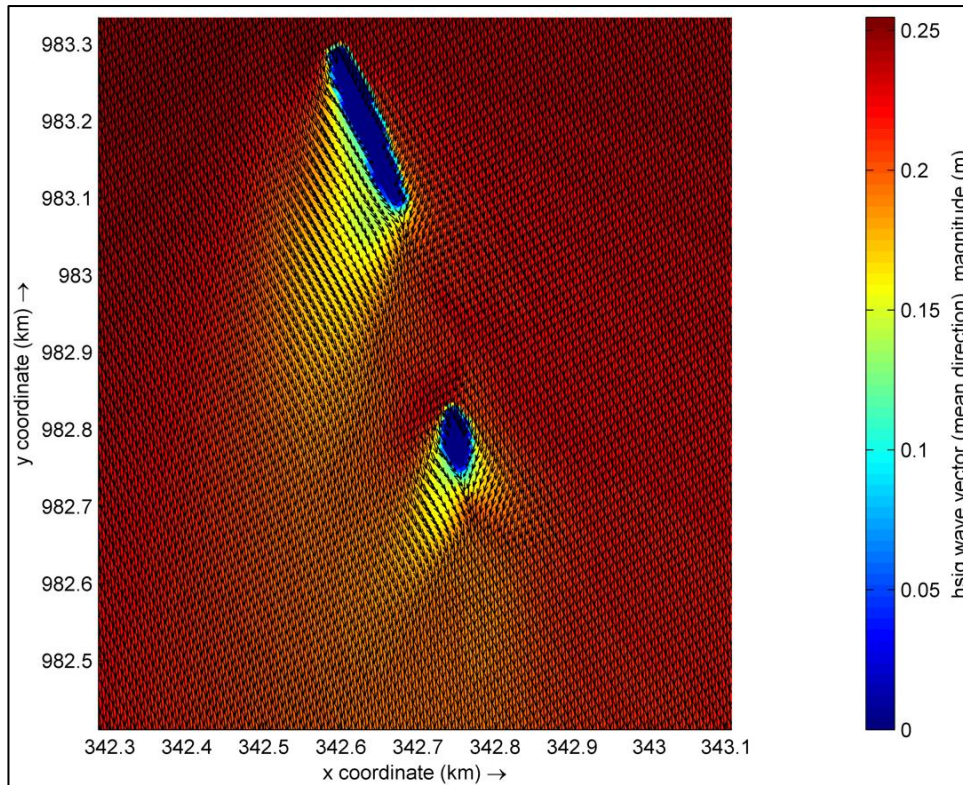
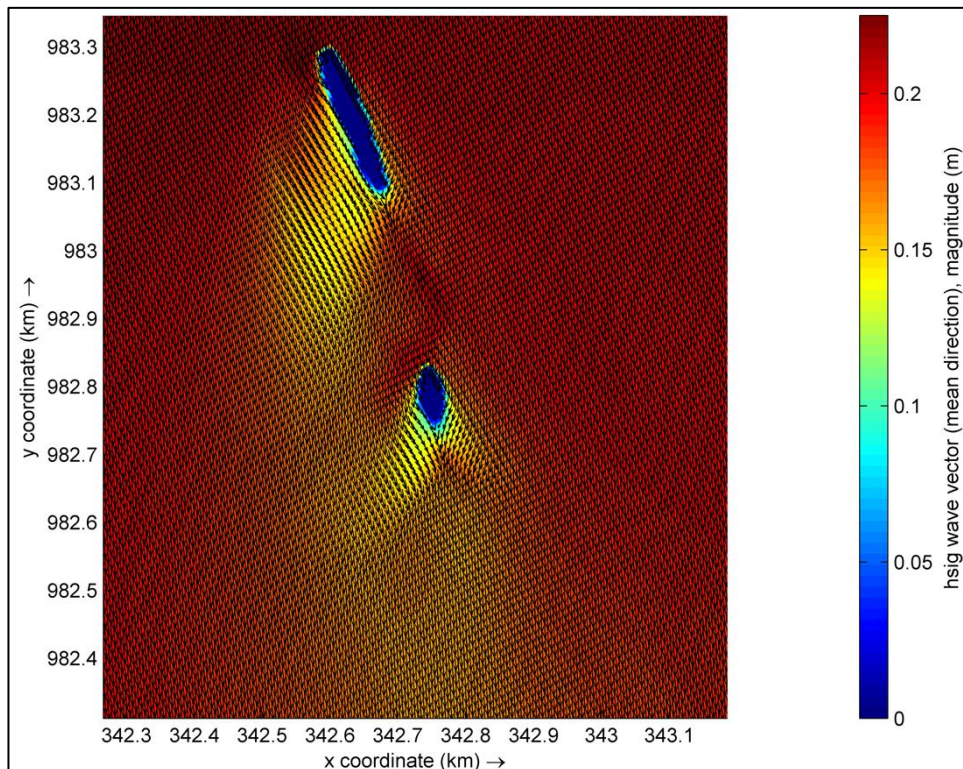


Figura 22

Representación gráfica de la dirección y altura significativa del oleaje con malla refinada en T para el día 15 de noviembre de 2021.



Indagando un poco más, al llegar el oleaje al obstáculo, este no se detuvo ni se reflejó por completo, sino que se propagó en forma de curvas alrededor del obstáculo continuando su propagación hacia la línea de costa, lo cual es una clara representación de la difracción, y se puede evidenciar en la **Figura 23** tomada de google earth, donde el frente del oleaje se propaga en dirección norte-sur y al encontrarse con el obstáculo se observa claramente tanto el proceso de difracción como de refracción. Además, se observa con claridad la zona de sombra generada posterior a la ide incidencia del oleaje sobre el obstáculo, pero, en los bordes de este mismo, la difracción ocurre con más intensidad. Resaltando que la difracción depende del tamaño del obstáculo en relación con la longitud de onda presente en la zona.

Figura 23

Proceso de difracción y refracción del oleaje generado por obstáculo topobatimétrico en Puerto Rey, Arboletes. Captado mediante Figura satelital.



Nota. Fuente Google Earth 03/2024

El tamaño del obstáculo en nuestra área de estudio es menor que la longitud de onda del oleaje incidente, por lo cual, se genera una difracción significativa, de lo contrario, si el obstáculo tiene un tamaño mucho mayor que la longitud de onda, la onda prácticamente se reflejaría y refractaría, pero no se difractará de manera significativa. Cabe resaltar que, aunque los datos representan el proceso de difracción, el modelo aún no se encuentra calibrado.

4.2.2 Caso 2 – Calibración

En esta simulación se tuvieron en cuenta los parámetros por defecto sugeridos por SWAN descritos anteriormente. Donde se pretende representar de forma cercana a la realidad las condiciones del oleaje en la zona de estudio. Esta ejecución del modelo se realizó en la malla computacional 1, teniendo en cuenta que en este dominio se ingresan las condiciones de fronteras, y es a partir de esta que se propagan las condiciones para mallas computacionales anidadas, sin embargo, representa la tendencia, pero no representa de con óptima resolución la variabilidad. Sin embargo, teniendo en cuenta que los datos medidos *in situ* fueron tomados por el sensor instalado a una profundidad de 7 metros, lo que significa que estaba en una zona muy somera, se sugiere que el modelo representa bien las condiciones del punto, en esa misma línea, se considera que al utilizar datos de viento con una mayor resolución como forzante, la variabilidad podría mejorar significativamente.

En oceanografía, una manera esencial de analizar las oscilaciones del oleaje es mediante la Hs. En la **Figura 24** se presenta la comparación entre los datos simulados con los parámetros de disipación por whitecapping y disipación por fricción del fondo ajustados (línea roja) y los datos medidos *in situ* (línea negra). Durante el periodo de la simulación se observan patrones similares entre las dos series, evidenciando fluctuaciones significativas en la Hs.

El valor máximo de la Hs en los datos *in situ* se sitúa muy cercano a los 0.3 m, mientras que los simulados se ubican ligeramente por debajo de los 0.2 m. Así mismo, el valor mínimo de los datos *in situ* se ubica muy cercano a los 0.1 m, sin embargo, los datos simulados son ligeramente superiores. Estas diferencias podrían deberse tanto a las condiciones del mar durante el período de estudio como a la complejidad del modelo en resolver las ecuaciones adecuadamente en zonas tan someras, a la baja resolución espacial de los vientos utilizados como forzante y a los demás detalles numéricos presentados en la metodología.

Por otro lado, en la **Figura 25** se representa la correlación entre las dos variables, donde se puede observar que existe una correlación positiva, tal como lo indica la línea de ajuste lineal. El índice de correlación obtenido es de 0.69, lo que sugiere una correlación moderada entre los dos sets de datos.

Figura 24

Calibración datos simulados (línea roja) con datos in situ (línea negra). Simulación realizada con coeficientes de disipación ajustados.

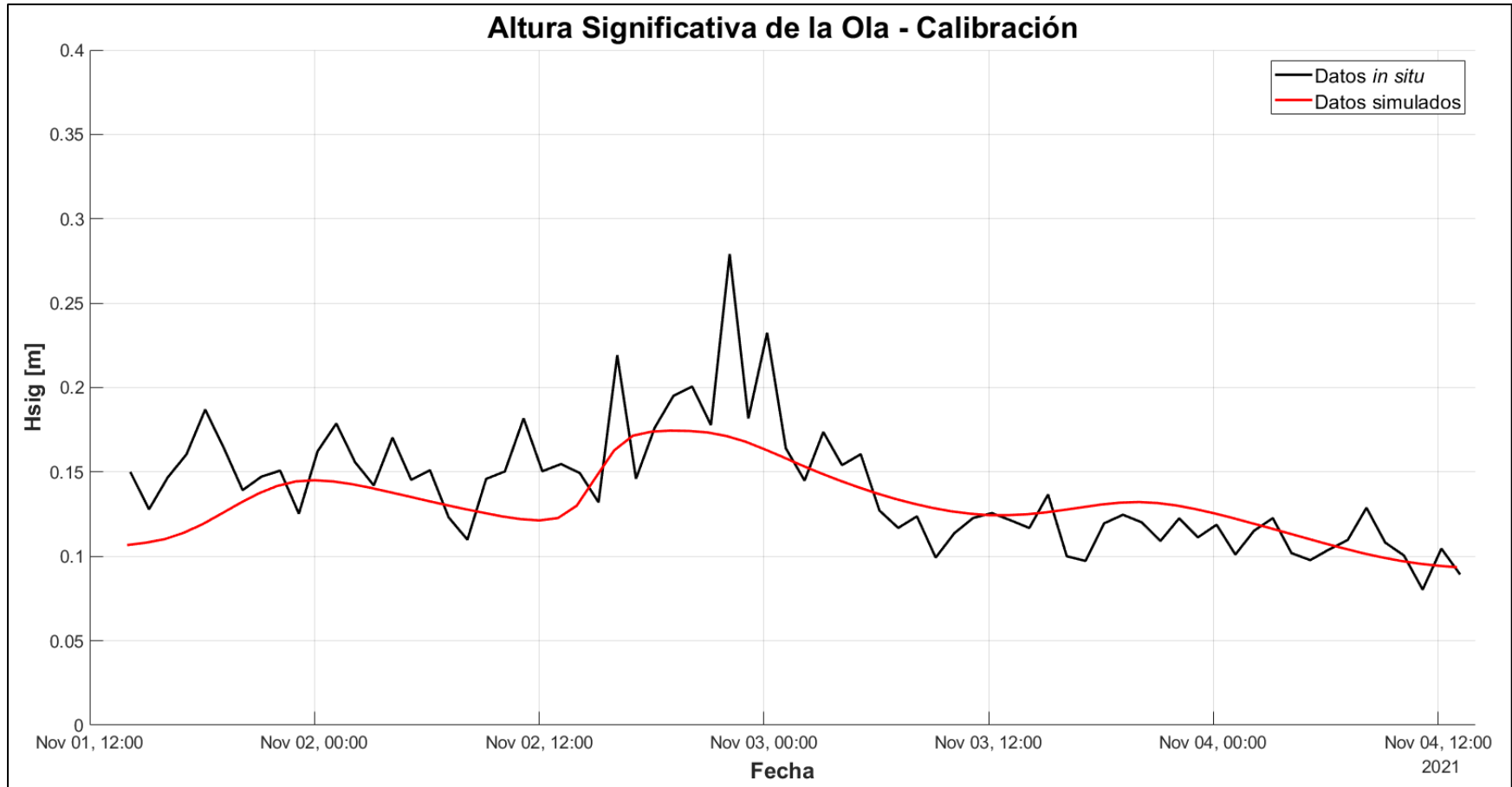
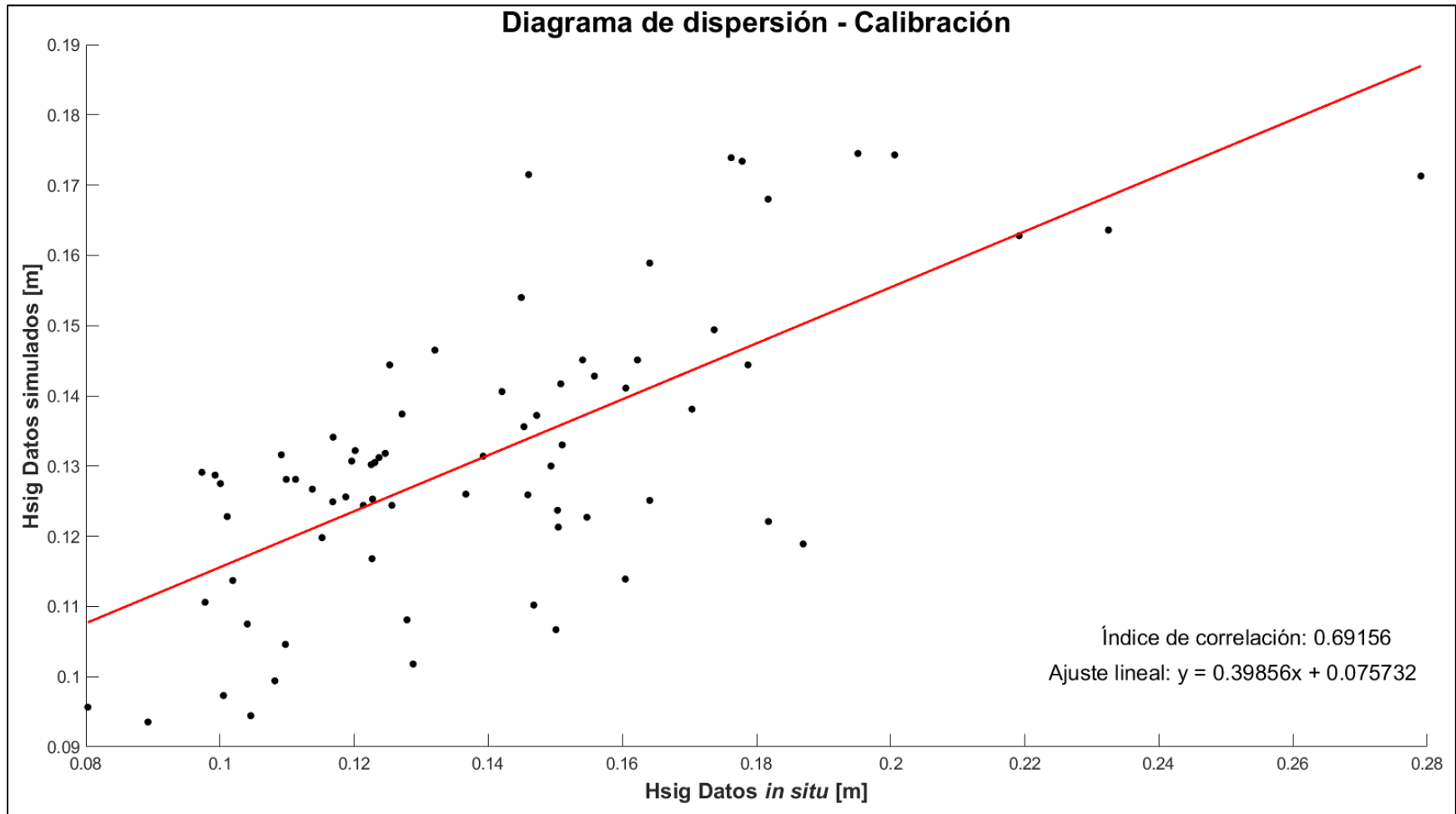


Figura 25

Diagrama de dispersión. Correlación de los datos de altura significativa de la ola medidos in situ y los datos de altura significativa de ola simulados.



4.2.3 Caso 3 – Validación

En esta ejecución se procede a ejecutar en otro rango de tiempo un caso con los valores de los parámetros físicos de disipación que condicionan en gran medida la energía y altura de la ola, el *whitecapping* y la fricción del fondo, con la finalidad de sugerir como resuelve el modelo la condiciones con la calibración realizada anteriormente. En el presente estudio estos coeficientes fueron ajustados hasta obtener un valor adecuado para que se ajustaran de mejor forma los datos simulados y los datos *in situ*, lo que en este apartado representó en un incremento del índice de correlación.

Para la calibración del coeficiente de *whitecapping* según la teoría de Janssen se disminuyó aproximadamente un 40 % del valor por defecto, siendo 2.0 un valor óptimo para la simulación, por su parte, también se disminuyó el coeficiente de disipación por fricción del fondo ajustándose a un valor de $0.0304 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ debido a las condiciones del fondo. Esta simulación, al igual que el caso 2, se evaluó con la variable de altura significativa. Del mismo modo, teniendo en cuenta la profundidad a la cual se encontraba el sensor (7m) y la baja resolución espacial de los vientos se sugiere que el modelo representa de forma muy cercana a la realidad las condiciones del oleaje en el área de estudio.

En la **Figura 26** se observa que las dos series de tiempo de Hs presentan patrones similares, pero aun con diferencias notables principalmente cuando la Hs de los datos *in situ* tiende a valores menores a los 0.2 m. No obstante, los datos *in situ* representan de forma más precisa el comportamiento del oleaje, mientras que los datos simulados muestran una tendencia más suavizada reproduciendo de forma adecuada los datos reales, sin embargo, sobrestima y subestima ligeramente los valores mínimos y máximos.

Con los parámetros físicos de disipación ajustados se logra evidenciar un mejor ajuste entre los datos *in situ* y los datos simulados. Lo anterior sugiere, como se representa en la **Figura 27**, el índice de correlación presentó un incremento significativo en el proceso de validación del modelo alcanzando un valor de 0.81, determinando que los resultados de esta validación apuntan a que el modelo reproduce de forma apropiada las condiciones reales de la zona.

Figura 26

Validación datos simulados con calibración (línea roja) con datos in situ (línea negra). Simulación realizada con coeficientes de disipación por whitecapping y fricción del fondo ajustados.

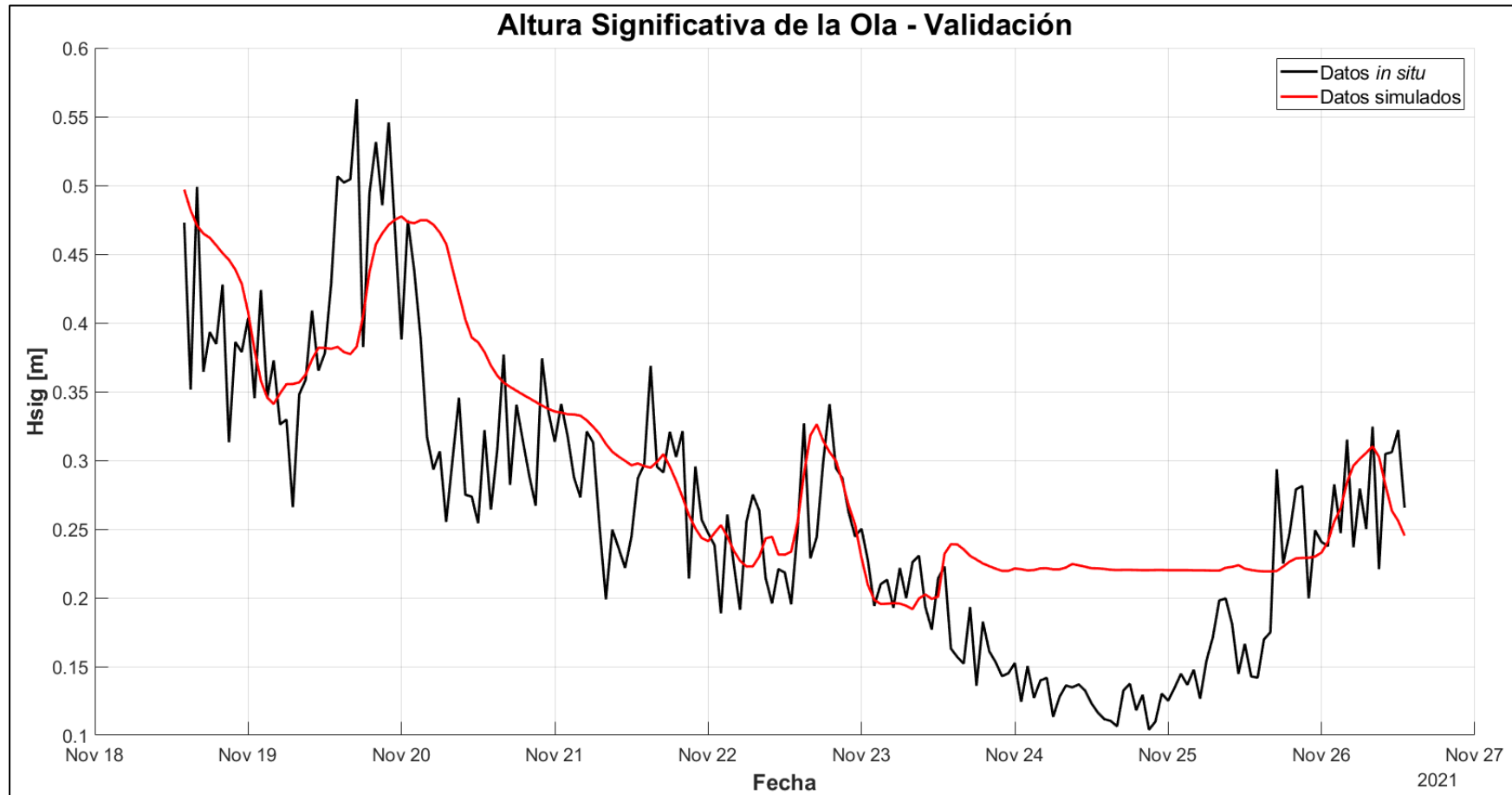
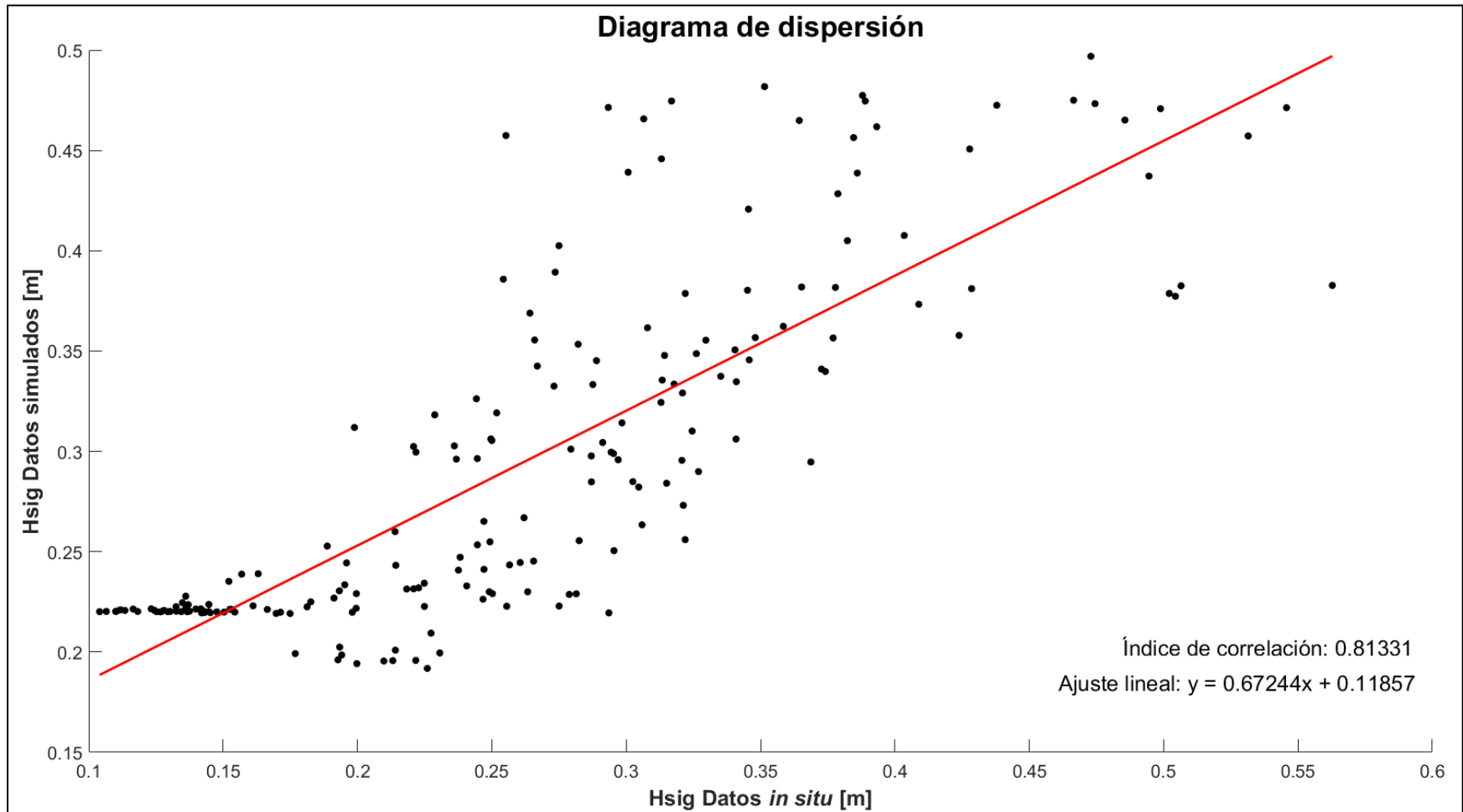


Figura 27

Diagrama de dispersión. Correlación de los datos de altura significativa de la ola medidos in situ y los datos de altura significativa de ola simulados con calibración.



4.2.4 Casos estacionarios

A medida que el oleaje se propaga hacia la línea de costa sobre aguas someras y choca con diferentes obstáculos, ya sean cabos, una roca, estructuras o islas, se genera un fenómeno denominado difracción (Oleaje en rotura en zonas de refracción–difracción en los modelos de evolución de playas-sección 3).

La presencia de un obstáculo emergido, como es el caso del área de estudio, provoca una curvatura del frente del tren de ondas hacia la parte posterior del obstáculo. Cuando esto se produce se demarcan dos áreas: el área iluminada, que es el área que se encuentre de frente al tren de ondas, y la región de sombra, que hace referencia al área protegida donde la altura de ola es menor debido a la cesión lateral de energía (Sañudo Oria, 2016).

Por su parte, el cambio de dirección del oleaje que se presenta en las zonas someras o a medida se va propagando a la línea de costa, o en su defecto a un obstáculo, por la acción del fondo sobre la superficie libre, el tren de olas tiende a desplazarse de forma paralela a las curvas batimétricas del fondo. Este fenómeno de la propagación denominado refracción se presenta principalmente cuando el oleaje encuentra cambios en la profundidad, forzando a que una parte de la onda se refracte disminuyendo así su celeridad y cambiando su dirección.

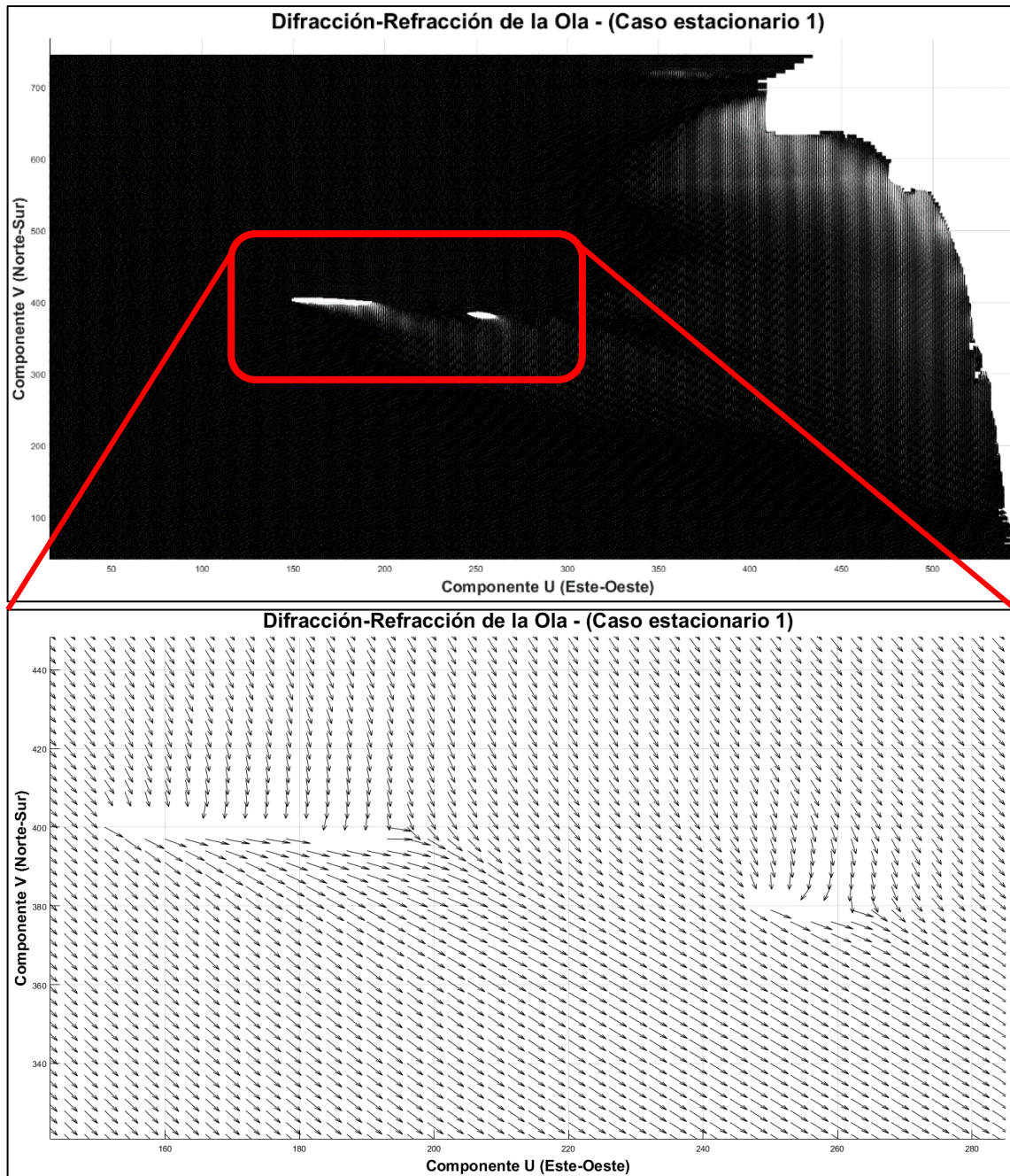
4.2.4.1 Caso estacionario 1

En la **Figura 28** se ve representada una de las condiciones promedio de la época seca, con viento constante predominante del norte y magnitud de 9.4 m/s, además de condiciones de frontera propagadas desde la malla computacional 1, forzada con vientos de ERA5. Por consiguiente, en este caso se observa como el oleaje se desplaza en dirección norte-sur chocando con la parte expuesta del obstáculo, generando una cesión lateral de energía y generando ondas circulares en la región de sombra. Lo anterior genera un cambio en la dirección del tren de olas, desplazándose en dirección noroeste y este, desde la zona de sombra del obstáculo hasta la franja litoral.

Conjuntamente, también se presenta refracción-difracción cuando el tren de olas se acerca a punta Rey, ubicado en la zona norte del área de estudio, esto genera que las características del oleaje cambien de forma significativa, arribando a la costa en forma paralela u oblicua, esta última podría estar generando corrientes de deriva litoral, influyendo en gran medida en el movimiento y desplazamiento de los sedimentos a lo largo de la costa, siendo un aspecto importante a tener en cuenta en términos de erosión y progradación de la costa (Avila & Porres, 2021).

Figura 28

Caso estacionario 1. Vectores de difracción y refracción de la ola época seca.

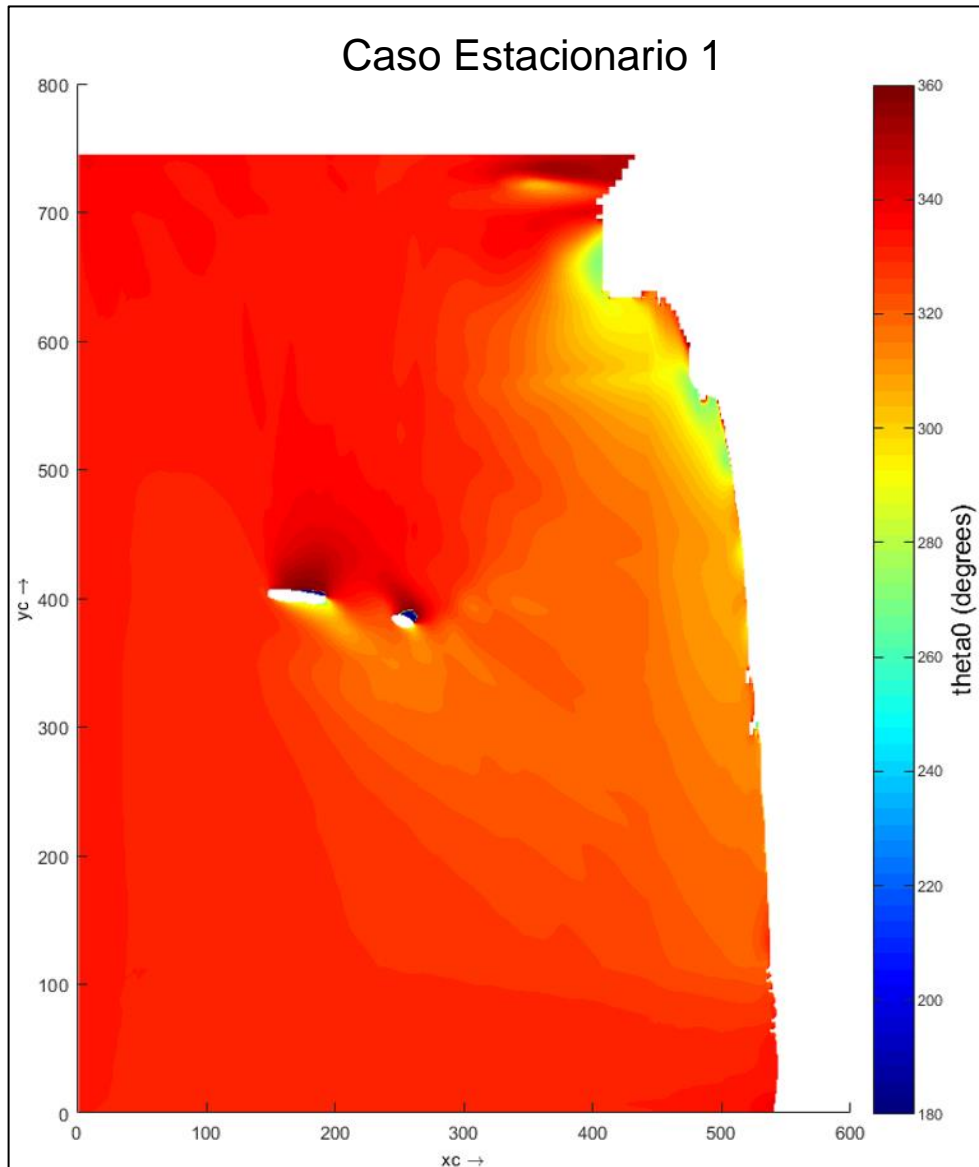


Por su parte, en la **Figura 29** se puede evidenciar el cambio en la dirección del oleaje, representando el color rojo 360° y el color azul 180° . A medida que el oleaje se propaga desde norte y noreste choca con el obstáculo emergido sugiriendo los procesos de difracción y refracción de la onda, es decir, en la zona iluminada, adquiere un tono rojo fuerte debido a que a medida que

el tren de olas se acerca a al obstáculo y debido a las condiciones del fondo estas se refractan, ocasionando diferencias significativas en sus parámetros integrales.

Figura 29

Caso estacionario 1. Difracción y refracción de la ola época seca.



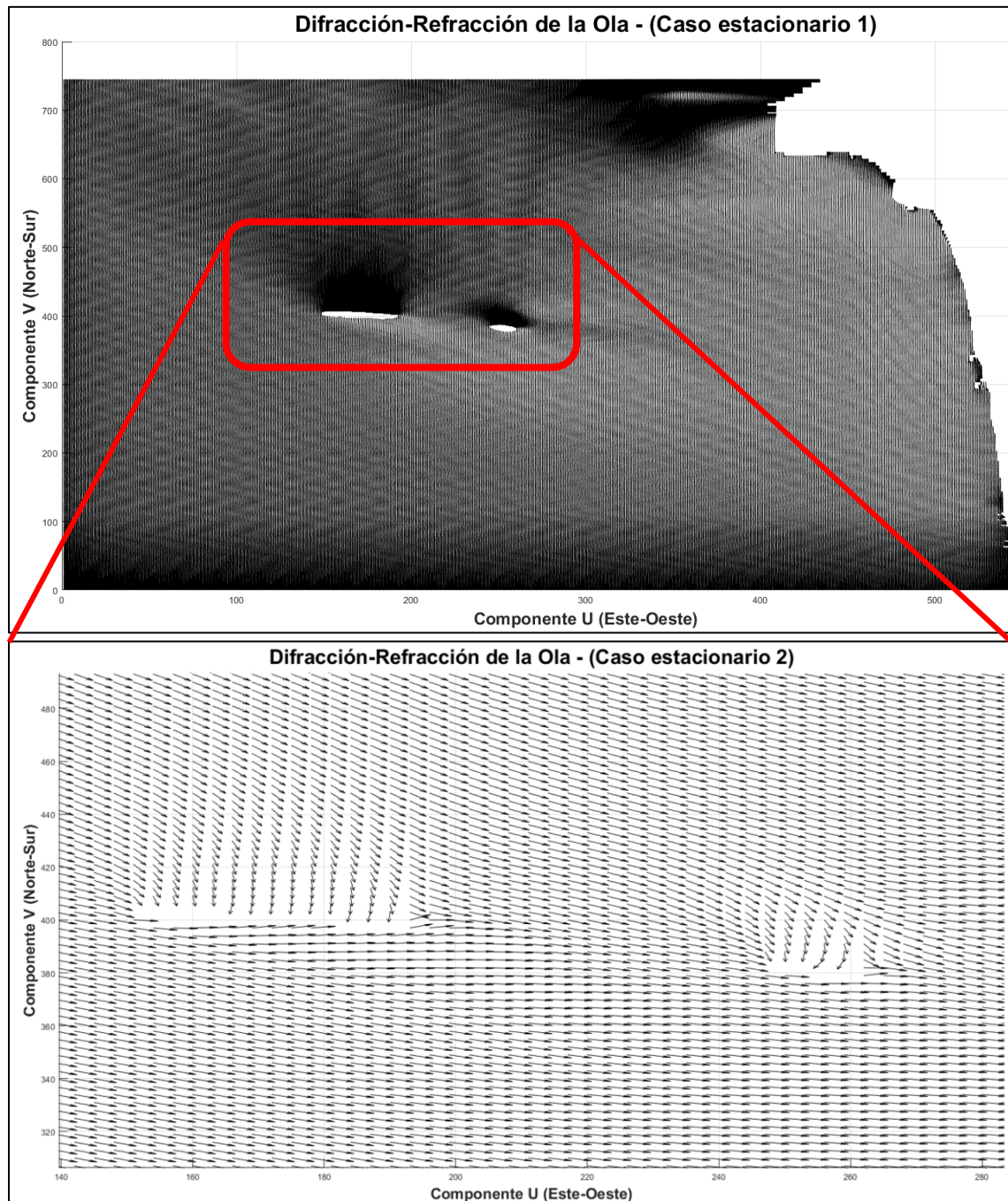
Adicionalmente, en la zona de sombra se observa con claridad como el oleaje al experimentar la difracción este se propaga con esas nuevas características hacia la línea de costa, lo que puede estar influyendo de forma significativa tanto en el transporte de sedimentos como el moldeamiento de las costas (Restrepo, Otero , & López, 2009).

4.2.4.2 Caso estacionario 2 – Época húmeda

En la época húmeda, predominan vientos de dirección norte y noreste, sin embargo, existe un pico poco significativo con vientos de dirección suroeste (Thomas, Cesaraccio, García-Valencia, & Ménanteau, 2007).

Figura 30

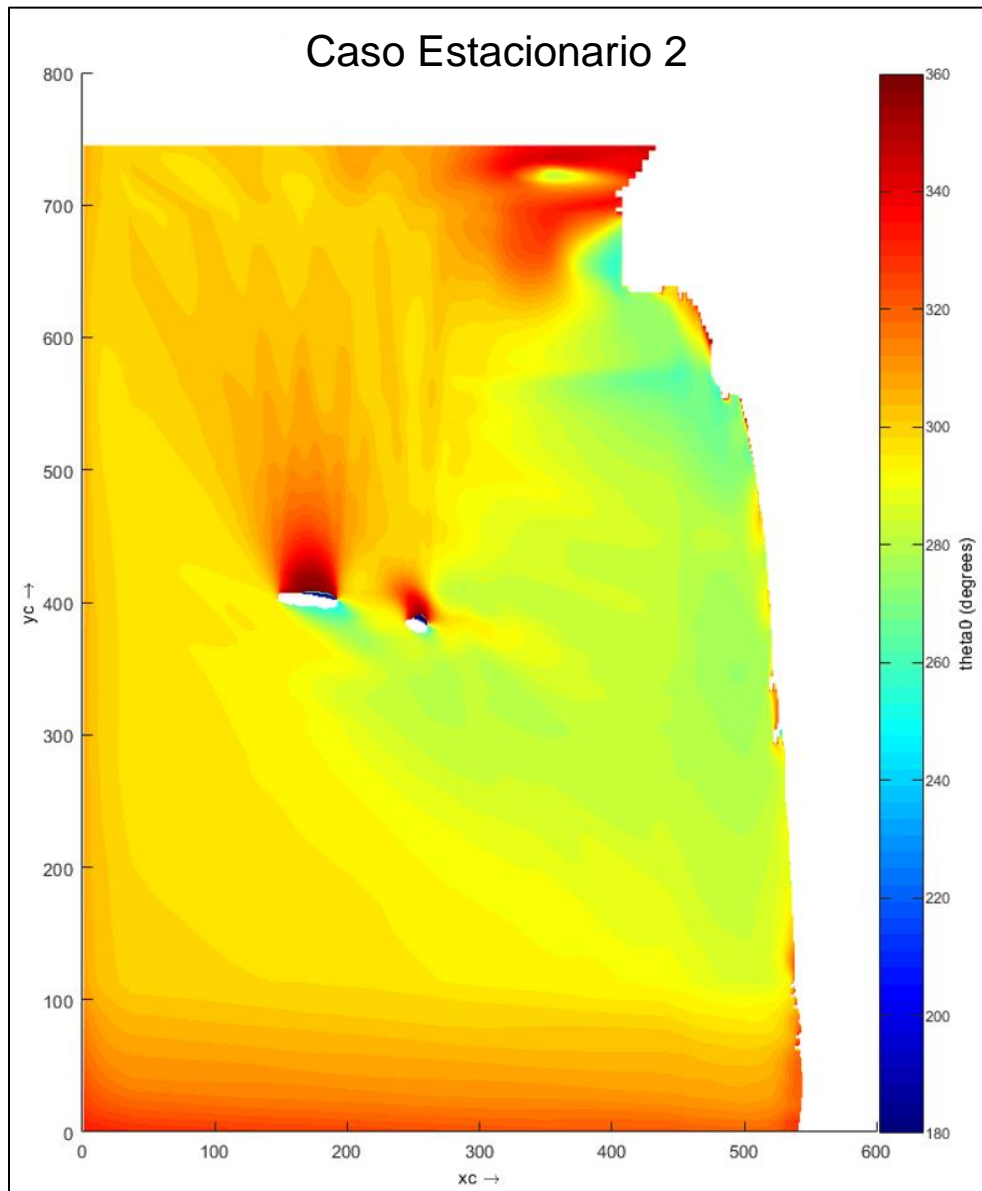
Caso estacionario 2. Vectores de difracción y refracción de la ola época húmeda.



La **Figura 30** sugiere que, para el periodo en estudio predominante con dirección norte y noreste, sin embargo, las Hs de ola es menor en comparación con la época seca, esto debido al debilitamiento de los vientos alisios.

Figura 31

Caso estacionario 2. Difracción y refracción de la ola época seca.



La dirección por su parte cambia significativamente de dirección al chocar con el obstáculo topobatemétrico, generando un efecto significativo en la distribución de la energía tanto en el remanente de rocas como en la franja litoral. Los resultados obtenidos sugieren que posterior al

choque, el oleaje cambia de dirección norte y noreste a dirección oeste-noroeste en su desplazamiento hasta la costa, esto se presenta en la **Figura 31** de la siguiente forma, el color rojo representa los 360° mientras que los colores más fríos representan dirección hacia el sur en sentido contrario a las manecillas del reloj. En la Figura 31 se presenta el campo de dirección del oleaje para el caso estacionario 2. Es notoria la difracción y refracción de la ola época seca.

5. Conclusiones

El presente estudio nos ha permitido comprender de mejor forma el comportamiento del oleaje bajo fenómenos de difracción y refracción en el área de estudio. Al analizar la difracción se demuestra que las olas se curvan alrededor del obstáculo topobatimétrico efectuando una cesión lateral de energía, y creando zonas de sombra y afectando principalmente la dirección de propagación del oleaje hacia la costa. Esto sugiere una posible influencia en la dinámica del transporte de sedimentos y por consiguiente en la erosión costera que tiene la zona.

El modelo SWAN representó de forma adecuada los valores de H_s al ser comparados con los datos *in situ*. Es importante mencionar que teniendo en cuenta que la zona de estudio es muy somera, se optó por utilizar una malla computacional fina con la que se logró representar adecuadamente las características del oleaje en esa zona.

Por su parte, las ejecuciones con condiciones estacionarias en la zona de estudio sugieren que, en la época seca, cuando los vientos alisios se intensifican generan un oleaje más energético, lo que se traduce en un aumento en la altura y cambio en la dirección más intenso debido a los procesos de difracción y refracción ocasionados por el obstáculo topobatimétrico. Es decir, el cambio en la dirección se propaga en un área mucho más amplia y con mayor energía hacia la línea de costa a diferencia que en la época húmeda, la cual se caracteriza por vientos alisios más débiles. En ese orden de ideas, se tomó como referencia un punto ubicado entre el obstáculo y la línea de costa, donde, al comparar con el oleaje inicial, en la época seca la dirección tuvo un cambio del 83.3% al chocar con el obstáculo emergido, mientras que en la época húmeda el cambio en este mismo punto fue de 3.1%.

Por otra parte, al analizar la refracción se ha observado como el oleaje presentan cambios significativos al desplazarse sobre una batimetría somera y variable. Adicionalmente, el fenómeno de refracción es fundamental para comprender la dinámica costera ya que a medida que las olas se acercan a la costa su energía tiene un impacto significativo en el proceso de transporte de sedimentos.

6. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se sugiere:

Realizar un análisis del oleaje y sus fenómenos de propagación en una ventana temporal más amplia con la finalidad de abarcar el patrón climático bimodal, como también la posible ocurrencia de eventos extremos.

Realizar simulaciones incluyendo la influencia de las corrientes, así como también la rugosidad del fondo con el fin de sugerir los patrones o características que generen.

Tener energía eléctrica constante en el servidor con el objeto de que los casos que se encuentren en ejecución no se detengan y generen atrasos en las investigaciones.

7. Referencias

- Avila, D., & Porres, A. (5 de 2021). Gobierno de Mexico. *Notas*, 191(1). Obtenido de Instituto Mexicano del transporte, publicación bimestral de divulgación externa: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=533&IdBoletin=192>
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe*. (s.f.). Obtenido de EPOCAS CLIMATICAS EN EL LITORAL CARIBE COLOMBIANO: <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ClimatologiaCaribe7.php>
- Correa, I. D., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe colombiana. *Bol. investig. Mar*, 33, 5-26.
- Correa, I., & Paniagua-Arroyave, J. F. (2015). *The Arboletes-Punta Rey Littoral, Southern Caribbean Coast*.
- Correa, I., & Vernet, G. (2004). *Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes-Turbo) costa Caribe colombiana*.
- Dagua, C. J., Lonin, S., Urbano, C. P., & Förster, A. O. (2013). Calibración del modelo SWAN y validación de reanálisis del oleaje en el Caribe. *Boletín Científico CIOH*, 16.
- De la Cruz, L. (2019-2021). *Modelación computacional en las ciencias y las ingenierías como apoyo en el proceso enseñanza-aprendizaje*. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Deltares . (2020). *Delft3D-WAVE*. The Netherlands: Deltares.
- Deltares. (2020). *Delft3D-WAVE*. The Netherlands: Deltares.
- Deltares. (s.f.). *Deltares*. Obtenido de <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft3d-4-suite>
- Fuentes, M. J. (2017). *COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE REFINAMIENTO DE ESCALA DE REANÁLISIS DE OLAJE*. Departamento de Física y Geociencias - Universidad del Norte.
- Galende, D. M. (2009). *Modelación numérica del oleaje en zonas costeras con batimetría no constante mediante elementos finitos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gobernación de Antioquia. (24 de Julio de 2022). *Gobernación de Antioquia*. Obtenido de Pimecla: el laboratorio natural para mitigar la erosión costera en Antioquia avanza con resultados

- satisfactorios: <https://antioquia.gov.co/component/k2/17226-pimecla-el-laboratorio-natural-para-mitigar-la-erosion-costera-en-antioquia-avanza-con-resultados-satisfactorios>
- Gutierrez, C., Rey, P., & Gambin-Carrasquilla, F. (2021). *Actualización del Estado de la línea de costa por medio de información histórica*.
- JARAMILLO, F. P. (2019). *MODELO HIDRODINÁMICO Y DE OLEAJE DEL MAR CARIBE*. UNIVERSIDAD EAFIT.
- Lonin, S., & Escobar, C. A. (s.f.). *Aspectos sobre modelación numérica de la evolución morfológica en el mar Caribe*. Red Iberoamericana en Teledetección aplicada a la Prevención de Riesgos Geológicos Litorales.
- Mesa, J. (2009). *Metodología para el reanálisis de series de oleaje para el Caribe colombiano*. Medellín: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN.
- Montoya, R. D., & Osorio, A. (2007). *LOS MODELOS DE GENERACIÓN DE OLEAJE DE VIENTO: CARACTERÍSTICAS, EVOLUCIÓN Y FUTURAS APLICACIONES EN COLOMBIA. AVANCES EN RECURSOS HIDRÁULICO*.
- Oleaje en rotura en zonas de refracción–difracción en los modelos de evolución de playas-sección 3. (s.f.).
- Orejuela, F. (2020). *Modulación de oleaje causado por la construcción de una obra de protección costera utilizando un modelo numérico con mallas no estructuradas*.
- Osorio Arias, A., Gómez Giraldo, A., Molina Flórez, L., Álvarez Silva, O., & Osorio Cano, J. (2010). *BASES METODOLÓGICAS PARA CARACTERIZAR EL OLEAJE LOCAL (SEA) Y DE FONDO (SWELL) EN EL GOLFO DE URABÁ. XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA PUNTA DEL ESTE, URUGUAY*.
- Osorio, A. F., Mesa, J. C., & Bernal, G. R. (2009). *Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. Boletín Científico CIOH(27), 19*.
- Paniagua, J. F., & Correa, I. D. (s.f.). *Predicción de las magnitudes de retroceso de algunos sectores acantilados de Antioquia en condiciones de ascenso del nivel del mar -Resultados para el sector de Arboletes*. Área de Ciencias del Mar, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Restrepo, J. C., Otero, L., & López, S. (2009). *CLIMA DE OLEAJE EN EL PACÍFICO SUR DE COLOMBIA, DELTA DEL RÍO MIRA: COMPARACIONES ESTADÍSTICAS Y*

*APLICACIÓN A PROCESOS COSTEROS. REV. ACAD. COLOMB. CIENC.:
VOLUMEN XXXIII.*

Sañudo Oria, T. (2016). *Estudio de la difracción en modelos de propagación del oleaje*. Santander: Universidad de Cantabria.

The SWAN team. (2019). *SWAN USER MANUAL*. The Netherlands.

Thomas, Y.-F., Cesaraccio, M., García-Valencia, C., & Ménanteau, L. (2007). *Contribución de la hidrografía histórica al estudio de la cinemática de los fondos marinos: evolución del golfo de Urabá, Colombia*. CIOH.

Tolman , H., & The WAVEWATCH III Development Group. (s.f.).

Torres, R., & Lonin, S. (2007). Estudio del espectro de oleaje en el Caribe. *Boletín Científico CIOH*(25), 10. doi:1200542.25.8_18