

Metodología para simular la dinámica marina en el Mar Caribe  
usando DELFT3D

David Alejandro Ruiz Sarrazola

Grupo de Mecánica Aplicada  
Departamento de Ingeniería Civil  
Escuela de Ingeniería  
Universidad EAFIT  
Medellín, Colombia  
2015

Metodología para simular la dinámica marina en el Mar Caribe  
usando DELFT3D

David Alejandro Ruiz Sarrazola

*Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título  
de Master en Ingeniería*

Asesor: Carlos Alejandro Escobar Sierra  
Profesor Asociado  
Departamento de Ingeniería Civil

Grupo de Mecánica Aplicada  
Departamento de Ingeniería Civil  
Escuela de Ingeniería  
Universidad EAFIT  
Medellín, Colombia

2015

Nota de aceptación

---

---

---

Presidente de jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

---

Ciudad y Fecha

# Agradecimientos

Primero quiero agradecer a mis padres Sonia Sarrázola y Benhur Ruiz por su apoyo incondicional y motivación antes y durante el desarrollo de este trabajo. A mi compañero de maestría Diego Uribe por su colaboración en el desarrollo del mismo y a mis amigos Felipe Restrepo, Paola Quintero, Tatiana Gonzáles y Jeimy Rubio por aguantarme cuando el cansancio y el estrés eran difíciles de manejar.

También agradezco a Juan David Pineda y los otros miembros del Centro de Computación Científica Apolo.

Por último quiero agradecer a la universidad EAFIT al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias, al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), a la Dirección General Marítima (DIMAR) y a la Universidad del Norte por la financiación y participación del proyecto Erosión Costera en la Región de Cartagena (Galerazamba-Bocachica), Costa Caribe Colombiana, Módulo Oceanografía”, proyecto de investigación dentro del cual se encuentra inmerso este trabajo.

# Resumen

Se desarrolló una metodología para simular la hidrodinámica del mar Caribe. El mar Caribe es una zona de vital importancia para los países de la región Caribe debido a la presencia de recursos naturales y ubicación estratégica. Sin embargo la falta de estaciones de monitoreo y las políticas poco claras respecto al manejo de la información disponible, dificultan el desarrollo de proyectos y estudios que buscan explotar y/o proteger estos recursos, como la construcción de infraestructura y la mitigación de la erosión costera. Aunque se han realizados distintos estudios que han contribuido a la caracterización de la dinámica marina del Caribe, éstos se encuentran limitados en su cobertura espacial y temporal. Como alternativa para superar estos inconvenientes se han desarrollado distintos modelos numéricos para reproducir las corrientes, el oleaje y las mareas del Caribe, sin embargo los modelos desarrollados consideran éstos procesos de forma separada, o solo consideran uno de ellos, despreciando sus interacciones. Lo anterior conlleva a plantear una metodología de simulación para la dinámica marina del mar Caribe que considere las corrientes, oleaje y mareas de forma simultanea y sus interacciones.

Las simulaciones se realizaron utilizando la plataforma DELFT3D que permite acoplar la hidrodinámica, el oleaje y los fenómenos de transporte. El modelo también considera la descarga de los principales afluentes del Caribe, forzamientos atmosféricos, un modelo de intercambio de calor por la superficie libre y las fuerzas gravitacionales sobre las mareas.

Se realizó un análisis detallado de las distintas fuentes de información disponibles para meteorología y batimetría, determinando la precisión de cada una en distintas zonas y épocas para el área de estudio.

El modelo fue calibrado y validado mediante comparaciones con datos medidos, las comparaciones se realizaron para las dos épocas climáticas características del Caribe en diferentes años. Se analizó la influencia de procesos, parámetros físicos y numéricos

sobre el desempeño del modelo, para esto se utilizaron parámetros estadísticos que permitieron determinar que el modelo se puede calificar entre excelente y razonable, de acuerdo a lo encontrado en la literatura.

El modelo fue utilizado para generar los datos de condiciones de frontera para un modelo de menor escala en la región de Cartagena, con el objetivo de modelar el transporte de sedimentos en esta zona. El acoplamiento de los dos modelos permitió reproducir de forma correcta la hidrodinámica de la zona, con un desempeño entre bueno y razonable de acuerdo a la literatura. Por último el modelo fue acoplado con el modelo de pronóstico meteorológico GFS como herramienta para pronosticar el comportamiento de la hidrodinámica en el Caribe.

# Abstract

A methodology to simulate the hydrodynamics of the Caribbean Sea was developed, this sea is highly important for the countries of the zone due to the presence of natural resources and its strategic location. However the lack of monitoring stations and information disclosure politics, make difficult the development of projects and studies to exploit and/or to protect these resources, such as the construction of infrastructure or the mitigation of coastal erosion. Different studies have contributed to the characterization of the Caribbeans marine dynamics, however these studies are limited spatially and temporally. As an alternative different numerical models have been implemented for the Caribbean, but these models consider the tides, currents and waves processes in a separate manner or only consider one of them, disregarding their interactions. In order to contribute to the resolution of these problems a new model for the hydrodynamics of the Caribbean was developed which considers the waves, currents and tides processes simultaneously and their interactions.

The simulations were developed using the DELFT3D platform which allows to incorporate the hydrodynamics, waves and transport phenomena. The model also considers the discharge of the mayor Caribbean affluent rivers, atmospheric effects, a heat exchange model through the free surface and the gravitational forces over the tides.

A detailed analysis was made about the different information sources available for meteorology and bathymetry, determining this way the accuracy of each one for different zones and climatic seasons in the region of interest.

The model was calibrated and validated through comparisons with measured data, the comparisons were made for the two characteristic climate seasons of the Caribbean and included different years. The influence of processes, physical and numeric parameters in the model's performance were analyzed, in order to do so, different statistics measurements were calculated which lead to the conclusion that the model can be classified between excellent and reasonable, according to the literature.

The model was used to generate the data for the boundary conditions of a small scale model of the Cartagena region, which is intended to be used for study of sediment transport. The correct coupling of the two models reproduced the hydrodynamics of the region, with a performance level that can be classified between good and reasonable, according to literature. Finally the model was coupled with the meteorological forecast model GFS as tool to forecast the Caribbeans hydrodynamics.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>Resumen</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>16</b>
1.1. Planteamiento del Problema . . . . .	19
1.2. Objetivos . . . . .	20
1.3. Descripción del Area de Estudio . . . . .	21
<b>2. Materiales y Datos</b>	<b>25</b>
2.1. Batimetría y Topografía . . . . .	25
2.2. Meteorología . . . . .	28
2.3. Análisis de las fuentes de información meteorológica . . . . .	29
2.4. Información Oceanográfica . . . . .	43
2.5. Fuentes de monitoreo oceanográfico en el Caribe . . . . .	45
<b>3. Modelo Numérico</b>	<b>47</b>
3.1. Descripción del Modelo . . . . .	47
3.2. Análisis de Sensibilidad . . . . .	54
<b>4. Calibración y Validación</b>	<b>60</b>
4.1. Calibración . . . . .	60
4.2. Validación . . . . .	67
<b>5. Aplicaciones</b>	<b>73</b>
5.1. Modelo Anidado - Región Cartagena . . . . .	73

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	10
5.2. Pronósticos utilizando el modelo GFS . . . . .	77
<b>6. Conclusiones</b>	<b>81</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>85</b>

# Índice de figuras

1.1. Principales puertos del Caribe (Elaboración propia) . . . . .	17
1.2. Mapa Geopolítico del Caribe (Elaboración propia) . . . . .	22
2.1. Contornos Batimétricos del Mar Caribe (Elaboración propia) . . . . .	27
2.2. Aeropuertos y boyas meteorológicas seleccionadas para análisis de modelos meteorológicos. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	31
2.3. Trayectoria de huracanes por el Caribe seleccionados para realizar el análisis de desempeño de los modelos meteorológicos. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	33
2.4. Diagrama de Taylor para la dirección del viento en la posición de la boya 42060 para la época seca. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	36
2.5. Diagrama de Taylor para la dirección del viento en la posición de la boya 42059 para la época húmeda. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	37
2.6. Velocidad del viento en la posición de la boya 42057 para el época húmeda del 2010. Medición, CCMP, NCAR, NARR y ERA. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	38
2.7. Velocidad del viento en el aeropuerto de Nicaragua (Puerto Cabezas) para la época húmeda del 2010. Medición, CCMP, NCAR, NARR y ERA. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	39
2.8. Velocidad del viento durante el paso del huracán Paula. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	40
2.9. Análisis de desempeño del GFS para zonas de aguas profundas para la velocidad del viento . . . . .	41
2.10. Análisis de desempeño del GFS para zonas de aguas profundas para la dirección de viento . . . . .	42
2.11. Principales afluentes del Caribe . . . . .	44

2.12. Ubicación de las estaciones de medición y mediciones en el Mar Caribe	45
3.1. Esquema de la malla tipo $\sigma$ (derecha) y malla tipo Z (izquierda), imagen de Deltares (2013a)	48
3.2. Malla de cálculo del modelo	51
3.3. Puntos de control para las fronteras del modelo	54
3.4. Comparación del modelo patrón con el modelo con oleaje en 3 dimensiones con intervalo de tiempo hidrodinámico de 5 min para la velocidad promedio	57
3.5. Comparación del modelo patrón con el modelo con oleaje en 3 dimensiones con intervalo de tiempo de oleaje de 360 min para la velocidad superficial	58
4.1. Ubicación de los puntos de medición y referencia utilizados para el proceso de calibración	61
4.2. Comparación de los datos del modelo para la marea con los datos del mareógrafo en zona de aguas profundas (Estación 42047) para la época seca de 2010	66
4.3. Comparación de los datos del modelo para el oleaje con los datos medidos en la estación 42095 para la época húmeda de 2010 - Rosa de Oleaje modelado	67
4.4. Comparación de los datos del modelo para la marea con los datos del mareógrafo en zona de aguas profundas (estac para la época húmeda de 2011	69
4.5. Comparación de los datos simulados para el oleaje con los datos medidos en la estación 42059 para la época seca de 2011 - Rosa de Oleaje modelado	70
4.6. Corriente modeladas para la época húmeda del Caribe	71
4.7. Corriente modeladas para la época seca del Caribe	72
5.1. Malla del modelo de Cartagena anidada en la malla del modelo del Caribe. En colaboración con Uribe Suarez (2015)	74
5.2. Tipos de fronteras modelo de Cartagena. En colaboración con Uribe Suarez (2015)	75
5.3. Puntos de medición corrientes en Cartagena. En colaboración con Uribe Suarez (2015)	76

5.4. Puntos de medición oleaje en Cartagena. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	76
5.5. Pronóstico de la marea utilizando el GFS comparada contra mediciones	80
5.6. Pronóstico del oleaje utilizando el GFS comparada contra mediciones .	80

# Índice de tablas

2.1. Errores de los modelos meteorológicos de re-análisis de acuerdo a la literatura, para la velocidad del viento . . . . .	30
2.2. Errores del modelo GFS de acuerdo a la literatura . . . . .	30
2.3. Análisis estadístico boya 42059 para el periodo 2010 - 2011 para la velocidad del viento . . . . .	34
2.4. Análisis estadístico boya 42058 para el periodo 2010 - 2011 para la presión	34
2.5. Análisis estadístico boya 42058 para el periodo 2010 - 2011 para la temperatura . . . . .	35
2.6. Caudales medios de los principales afluentes del Caribe . . . . .	44
3.1. Parámetros considerados en el análisis de sensibilidad del modelo . . .	55
3.2. Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo hidrodinámico para la marea	55
3.3. Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo hidrodinámico para las corrientes . . . . .	56
3.4. Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo hidrodinámico para la altura significativa de ola . . . . .	56
3.5. Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo de oleaje para la marea . .	57
3.6. Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo de oleaje para las corrientes	57
3.7. Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo de oleaje para la altura significativa de ola . . . . .	57
3.8. Análisis de sensibilidad: Número elementos de la malla . . . . .	59
4.1. Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Rugosidad . . . . .	62
4.2. Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Procesos . . . . .	62
4.3. Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Viento	62

4.4. Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Viscosidad . . . . .	62
4.5. Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Modelo de Calor . . . . .	62
4.6. Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Fronteras . . . . .	62
4.7. Valores de los parámetros calibrados - Rugosidad . . . . .	63
4.8. Valores de los parámetros calibrados - Procesos . . . . .	64
4.9. Valores de los parámetros calibrados - Viento . . . . .	64
4.10. Valores de los parámetros calibrados - Viscosidad . . . . .	64
4.11. Valores de los parámetros calibrados - Modelo de Calor . . . . .	64
4.12. Valores de los parámetros calibrados - Fronteras . . . . .	64
4.13. Errores obtenidos al comparar los resultados de marea simulados contra mediciones para la época húmeda de 2010 . . . . .	65
4.14. Errores obtenidos al comparar los resultados de marea simulados contra mediciones para la época seca de 2010 . . . . .	65
4.15. Errores obtenidos al comparar los resultados de marea simulados contra mediciones para la época húmeda de 2011 . . . . .	68
4.16. Errores obtenidos al comparar los resultados de marea simulados contra mediciones para la época seca de 2011 . . . . .	68
4.17. Errores obtenidos al comparar los resultados de oleaje simulados contra mediciones para las épocas seca y húmeda de 2011 . . . . .	68
5.1. Errores al comparar las corrientes del modelo de Cartagena contra mediciones en estaciones fijas. En colaboración con Uribe Suarez (2015) .	75
5.2. Errores al comparar las corrientes del modelo de Cartagena contra mediciones en estaciones móviles. En colaboración con Uribe Suarez (2015)	75
5.3. Errores al comparar el oleaje del modelo de Cartagena contra mediciones. En colaboración con Uribe Suarez (2015) . . . . .	75
5.4. Simulaciones utilizando el modelo de predicción GFS . . . . .	78
5.5. Errores promedio en la predicción de las mareas alimentando el modelo con el GFS . . . . .	78
5.6. Errores promedio en la predicción del oleaje alimentando el modelo con el GFS . . . . .	79

# Capítulo 1

## Introducción

El mar Caribe se encuentra ubicado en el océano Atlántico, al este de América Central y al norte de América del sur. Es una zona de gran importancia para los países de la región debido a su biodiversidad, presencia de recursos naturales y ubicación estratégica como ruta para comercio marítimo.

A nivel ambiental el Caribe cuenta con más de 13000 especies de plantas, 450 especies de peces, 600 especies de aves, 500 especies de reptiles, varias especies de mamíferos y anfibios, destacándose que el 42% de estas especies son endémicas. A su vez en el Caribe se ubican el 9% de los arrecifes de coral del mundo incluida la barrera de arrecife de Belice la cual fue declarada en 1996 patrimonio de la humanidad (Paramo et al., 2012; Snyderman y Wiseman, 1996). Estas condiciones ambientales han permitido el desarrollo de la industria turística y pesquera, las dos industrias representan un ingreso anual de 3,1 – 4,6 billones de dólares al año para las naciones del Caribe.

A nivel comercial el Caribe es una ruta marítima estratégica para el comercio internacional, siendo entrada al canal de Panamá, el cual comunica los océanos Atlántico y Pacífico y una ruta directa para el comercio entre Asia, América y Europa. De acuerdo a estimaciones del AEC (2012) el 90% de las mercancías que circulan a nivel mundial se transportan por medio marítimo. La figura 1.1 muestra los principales puertos ubicados en el mar Caribe. De acuerdo a un estudio presentado por el AEC (2012) en conjunto con la Comisión Centroamericana de Transporte Marino (COCATRAM) se estima que actualmente existen 167 rutas de transporte marítimo en el Caribe, distribuidas entre 55 compañías marítimas las cuales cuentan con 614 barcos de carga pesada, presencia en 37 países y 71 puertos en el Caribe; en conjunto se estima que estas tienen una capacidad de operación de 1357992 TEU (1 TEU = Capacidad de carga de un contenedor

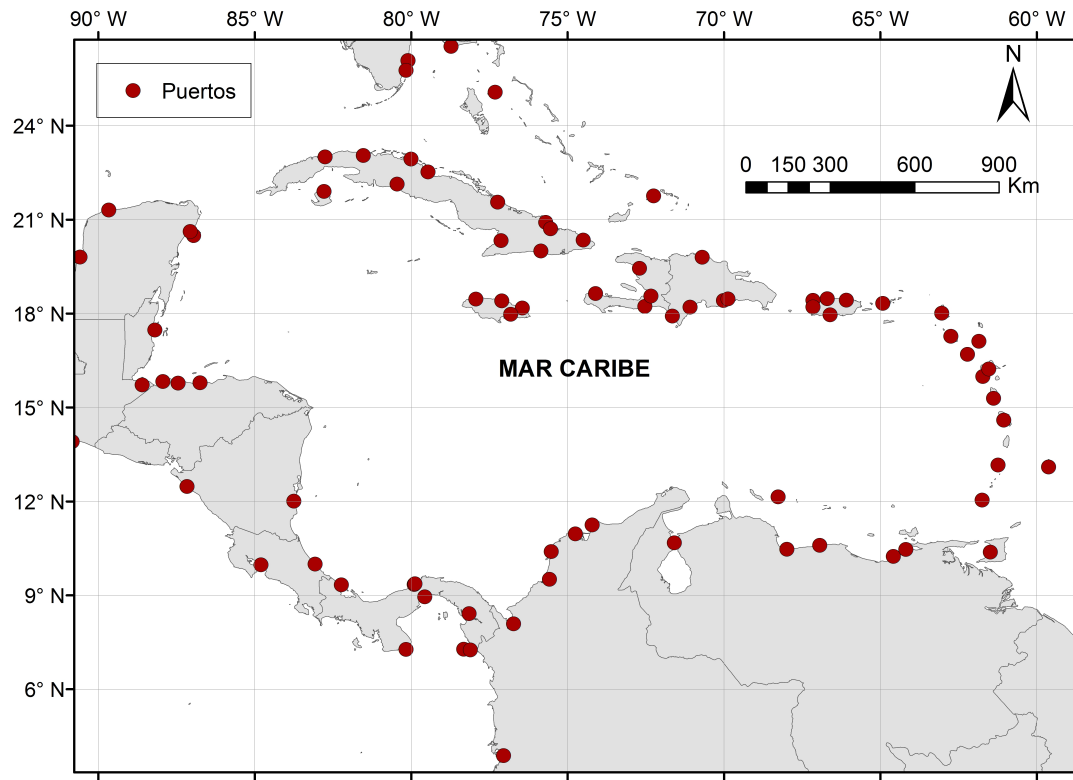


Figura 1.1: Principales puertos del Caribe (Elaboración propia)

normalizado de 20 pies), de los cuales 149649 corresponden a productos que requieren refrigeración.

El transporte marítimo, la pesca, la construcción y funcionamiento de infraestructura para explotación de recursos y la navegación turística son actividades muy susceptibles a las variaciones de las condiciones oceanográficas (oleaje, mareas y corrientes) puesto que estas introducen: Pérdida de operatividad, retrasos, sobrecostos y daños a la infraestructura (Barcena et al., 2013). Sumado a esto se encuentra el constante deterioro de la infraestructura costera y de las playas por efecto de la erosión generada por las corrientes y el oleaje (González et al., 2009).

Lo anterior genera la necesidad de caracterizar y poder predecir el comportamiento del oleaje y las corrientes en el Caribe, lo que ha motivado el desarrollo de distintos estudios como: Agudelo et al. (2005) presenta una metodología para corrección y predicción probabilística de regímenes de oleaje, a partir de mediciones visuales y velo-

idades máximas de viento en época de tormenta, culminando con una caracterización de los regímenes de oleaje en el Caribe; Jury (2011) realizó un análisis de patrones de variación a largo plazo de las condiciones superficiales del Caribe, basándose en observaciones superficiales y modelos de re análisis de datos, encontrando un aumento lineal de la temperatura con una distribución homogénea para zonas por debajo de los 100 m, presentándose el aumento más significativo a 150 m, capas diferenciadas de salinidad baja en la zonas superiores y altas en zonas profundas; Mesa (2009) propone una metodología para corrección de series de oleaje de varios modelos numéricos y misiones satelitales, usando como referencia las mediciones de boyas en la zona.

Por su parte Montoya y Osorio (2007) presentan una caracterización y evolución de los distintos modelos de oleaje junto con una recopilación de la información de oleaje disponible para Colombia, destacándose que la mayor parte de la información proviene de observaciones de buques mercantes, como parte del proyecto ICOADS (The International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set Project), la cual presenta una resolución temporal y espacial poco adecuada y no provee información bajo condiciones extremas; Richardson (2005) describe las corrientes y remolinos principales del Caribe, mediante el monitoreo de boyas a la deriva, se muestran la existencia de vórtices a lo largo de la corriente del Caribe en su paso por los cuencas de Colombia y Venezuela; Chérubin y Richardson (2007) estudia la influencia de los flujos de agua dulce de los ríos Orinoco y Amazonas sobre la corriente del Caribe, se observa que los caudales de agua dulce son transportados por dos corrientes principales provenientes de la corriente del norte de Brasil, una entra al Caribe por la parte sur de la isla Granada para luego convertirse en la rama principal de la corriente del Caribe y la segunda entra a través de las Antillas Menores (14N 18N) uniéndose con la corriente ecuatorial del norte; (Althié et al., 2012) estudia el impacto de los remolinos generados en el mar Caribe sobre el desprendimiento de remolinos en la '*Loop Current*' y su desplazamiento.

Adicionalmente a los estudios mencionados anteriormente se han desarrollado proyectos por parte de los gobiernos locales como: El proyecto de Investigación Erosión Costera en Antioquia (Universidad EAFIT, Universidad Nacional, Universidad de Antioquia y CIOH), Mapas de Rutas Marítimas del Caribe (AEC) y Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe (CEPAL).

Los estudios realizados muestran falta de información histórica, en tiempo real y predictiva acerca de las características oceanográficas del Caribe y su variabilidad en tiempo y espacio, ya que esta se encuentra limitada a periodos de tiempo específicos y no posee una buena cobertura espacial; esto sumado a la complejidad de los fenómenos

implicados y la falta de estaciones de monitoreo que abarquen la totalidad de la zona; han llevado al uso y desarrollo de modelos de simulación numérica como alternativa. Entre estos se incluye el implementado por Sheng y Tang (2003), quienes presentan un modelo numérico tridimensional para estudiar la circulación y la variación mes a mes de esta en el Caribe occidental, el modelo incluye los efectos de forzamientos por vientos y gradientes de densidad, los resultados son acordes con los patrones observados por boyas a la deriva, pero las comparaciones realizadas son cualitativas en cierta medida; Candela et al. (2003); Tanahara (2004) evalúan los resultados del modelo de circulación OPA (Madec et al., 1998) bajo distintas configuraciones con mediciones realizadas en el canal de Yucatán; Jouanno et al. (2008) utiliza el modelo de circulación NEMO (Madec, 2008) para estudiar la variabilidad del Caribe destacando que la dinámica no es homogénea a lo largo de toda la cuenca Caribe; adicional a éstos están los modelos de circulación de Carton (1999); Murphy y Hurlburt (1999); Oey y Lee (2003) y modelos para la reproducción del oleaje como Lonin et al. (1996); Tolman (1989).

## 1.1. Planteamiento del Problema

Las distintas metodologías de simulación que se han implementado en el Caribe, reproducen el comportamiento de las corrientes, mareas y el oleaje de forma independiente o solo consideran uno de los procesos, despreciando la interacción entre estos fenómenos, la cual puede resultar muy significativa en la capa superficial del océano y en zonas costeras. Debido a esto Posada Jaramillo (2013) propone la implementación de un modelo acoplado para oleaje, marea y corrientes en el mar Caribe. El presente trabajo es una continuación del estudio de Posada Jaramillo (2013), en este se presentará una metodología para la simulación de la hidrodinámica del mar Caribe, en la cual se incluyen los procesos de mareas, oleaje, corrientes, fenómenos de transporte, fuerzas gravitatorias, efectos de los fenómenos meteorológicos y las interacciones entre estos, logrando de esta manera obtener información más completa de la hidrodinámica del Caribe facilitando de esta forma su estudio y la implementación de estudios específicos en zonas costeras, como modelos de transporte de sedimentos.

Con respecto al trabajo de Posada Jaramillo (2013) se busca: (I) Ampliar la zona de estudio hasta los pasajes de las Antillas y reubicar la fronteras del modelo, de forma que se tenga una mayor cobertura de la dinámica marina del Caribe y permita que el modelo reproduzca por si solo los distintos fenómenos en su magnitud real sin necesidad

de introducirlos de forma externa (Por ejemplo no sea necesario introducir swell\* como condición de frontera); (II) Calcular los efectos de la fuerza de Coriolis de forma variable de acuerdo a la latitud, ya que ésta se vuelve representativa debido a la extensión del área de estudio; (III) Considerar los efectos de la circulación termohalina mediante la inclusión de un modelo de calor y transporte, de forma que se consideren estos efectos sobre las corrientes y sea posible obtener información de temperatura y salinidad a partir del modelo; (IV) Eliminar la dependencia del modelo de mediciones in - situ como fuente de información de entrada, permitiendo realizar predicciones y que el modelo no se encuentre limitado a la disponibilidad de estas mediciones; (V) Seleccionar las fuentes de información meteorológicas y batimétricas más adecuadas para alimentar el modelo, mediante un análisis detallado de la precisión de distintas fuentes disponibles en la región de estudio, debido a la influencia de éstas sobre el desempeño del modelo; (VI) Por último se desea evaluar la efectividad del modelo como fuente de información para modelos de menor escala y su capacidad de predicción, con el fin de comprobar si es una herramienta útil para el estudio de la dinámica marina del Caribe.

*\*swell: Oleaje que se genera por fuera del área de estudio, debido a condiciones meteorológicas lejanas y viaja hacia el interior de ésta.*

## 1.2. Objetivos

Desarrollar un metodología para la simulación de la hidrodinámica del mar Caribe usando la plataforma DELFT3D, que permita reproducir y pronosticar el comportamiento de ésta bajo diferentes condiciones atmosféricas, con una buena resolución espacial y temporal para distintas épocas, incluyendo los procesos de mareas, oleaje, corrientes, fenómenos de transporte, fuerzas gravitatorias, efectos de los fenómenos meteorológicos y las interacciones entre estos.

### 1.2.1. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos hacen referencia a los cambios con respecto a la primera fase del modelo desarrollada por Posada Jaramillo (2013).

- Lograr una mayor cobertura del área de estudio.
- Formular el modelo en coordenadas esféricas.

- Considerar los efectos termohalinos mediante el uso de un modelo de transporte y un modelo de calor.
- Analizar de forma detallada las fuentes de información meteorológicas y batimétricas disponibles.
- Establecer condiciones de frontera independientes de mediciones in - situ.
- Utilizar el modelo como fuente de información para modelos de menor escala.
- Evaluar la capacidad de predicción del modelo, utilizando el modelo de pronóstico meteorológico GFS (Global Forecast System) como fuente de información para las condiciones atmosféricas.

### 1.3. Descripción del Area de Estudio

El mar Caribe limita al norte con las Antillas Mayores (Cuba, Haití, República Dominicana y Puerto Rico), al sur con Venezuela, Colombia y Panamá, al este con las Antillas Menores y al oeste con México, Belice, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Costa Rica. La imagen 1.2 muestra la distribución política del Caribe y sus principales accidentes geográficos.

Tiene una superficie de 2'763,800  $Km^2$ , su punto más profundo se encuentra en la fosa de las islas Caimán (7,686 m), su superficie se encuentra dividida en 5 cuencas oceánicas separadas entre sí por varias cadenas montañosas, lo que le da una batimetría poco uniforme. Las dos cuencas de mayor tamaño son la cuenca de Colombia con una profundidad promedio de 3,000 m y la Cuenca de Venezuela con una profundidad promedio de 5,000 m. En la zona este al oeste de las antillas menores se encuentra la cuenca de Granada con una profundidad promedio de 3,000 m seguida al oeste por el risco de las Aves. Entre las cuencas de Venezuela y Colombia se encuentra el dorsal de Beata, al norte de la cuenca de Colombia se encuentra el escarpe de Herzs y el elevado de Nicaragua seguidos por la fosa Caimán (Estos datos se refieren al mar Caribe en su totalidad, la descripción detallada del area de estudio se presenta en la sección 'Modelo Numérico').

Su línea costera cuenta con gran cantidad de accidentes geográficos como: el golfo del Darién, el canal de Yucatán, el paso de los vientos, el canal de la mona, la península de Yucatán, la península de la Guajira entre otros. A los accidentes geográficos presentes a

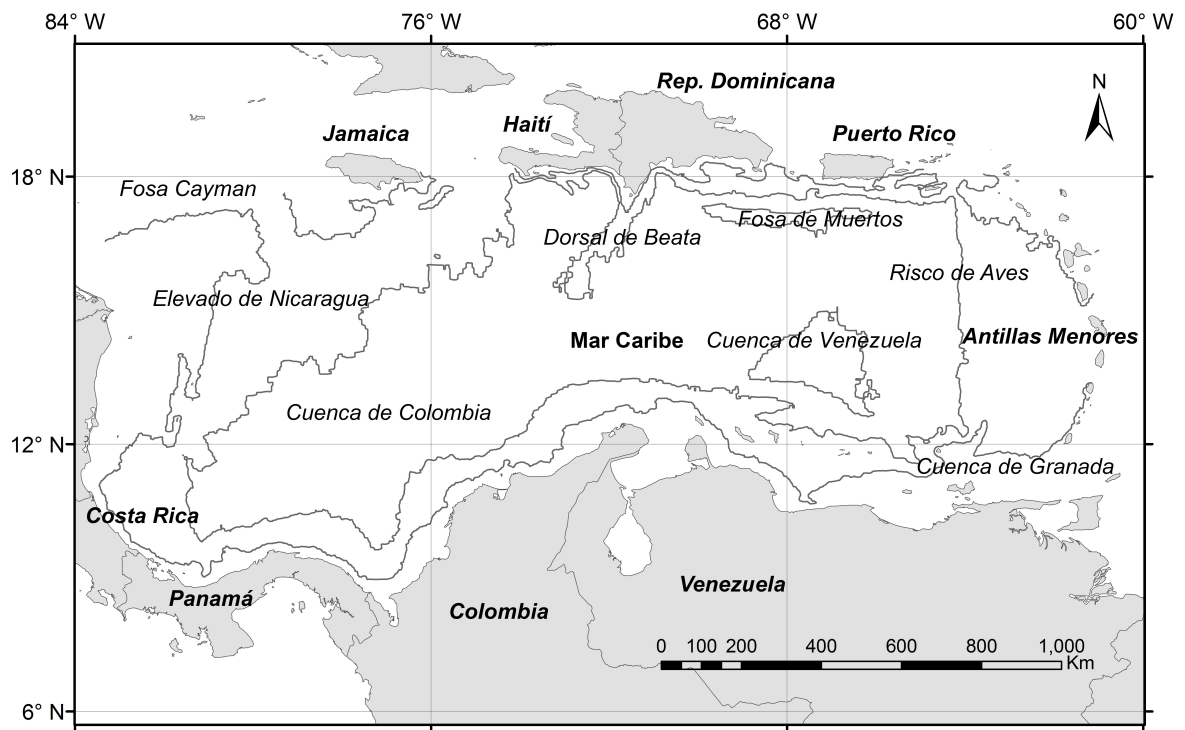


Figura 1.2: Mapa Geopolítico del Caribe (Elaboración propia)

lo largo de la plataforma continental se le adicionan las cadenas de islas que conforman las antillas menores y mayores. Este conjunto de accidentes le dan una línea de costa muy variada.

Debido a su ubicación el Caribe presenta un clima tropical, el cual se caracteriza por temperaturas atmosféricas en la superficie que varían entre los 26°C y 29°C durante todo el año, con máximos en el mes de mayo y mínimos en el mes de diciembre. El clima está definido por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), cuando la ZCIT se desplaza al sur, la región se encuentra sometida a la influencia de los vientos Alisios generando una época seca, cuando el desplazamiento es al norte se reduce la velocidad de los vientos y se fomentan las precipitaciones, de acuerdo a esto se definen cuatro estaciones: la seca mayor presente entre los meses de diciembre a abril, la lluviosa menor entre los meses de mayo a julio, la seca menor entre los meses de julio a agosto y la lluviosa mayor entre los meses de septiembre a noviembre. La estación lluviosa menor y la seca menor también se conocen como de transición (Franco Herrera, 2005; INVEMAR, 2013). Adicionalmente de acuerdo al Centro Nacional de Huracanes (NOAA) en el Caribe se presenta una temporada de huracanes durante los meses de

junio a diciembre, teniendo mayor intensidad en los meses de agosto y septiembre, en promedio se producen 9 tormentas tropicales de las cuales 5 logran alcanzar la categoría de huracán (<http://www.nhc.noaa.gov/>).

Las estaciones climáticas afectan el comportamiento del viento en el Caribe, el cual presenta una dirección predominante nor-este. En la época seca se presentan los vientos de mayor intensidad (8 a 15  $m/s$ ), los cuales disminuyen durante las épocas de transición hasta llegar a los de menor intensidad en la época lluviosa, en esta época el desplazamiento de la ZCIT también genera vientos en dirección suroeste a lo largo de la costa sur del Caribe. A su vez se presenta una variación espacial siendo las costa norte Colombiana la zona donde se presentan las mayores intensidades, la intensidad se reduce hasta alcanzar mínimos en la zona oeste del Caribe (Andrade, 1993; Thomas et al., 2012).

Los vientos juegan un papel fundamental en la hidrodinámica del Caribe al ser el principal forzador de las corrientes superficiales y del oleaje. El forzamiento del viento sumado al efecto de las mareas generan un patrón de corrientes el cual se encuentra caracterizado por dos corrientes principales: La corriente del Caribe la cual viaja desde las Antillas menores en dirección nor-oeste hasta llegar al Cabo Gracias a Dios (Nicaragua), punto en el que gira en dirección norte y sale por el estrecho de Yucatán (México), convirtiéndose en la corriente del Golfo de México y en el principal flujo de salida del Caribe con una magnitud de  $\approx 30 Sv$  ( $1 Sv = 10^6 m^3/s$ ); La segunda corriente principal se conoce como el giro de Panamá Colombia, se presenta en la parte sur oeste de la cuenca colombiana, es un flujo cíclico en dirección contraria a las manecillas del reloj. Aunque estas dos se consideran las corrientes principales del Caribe existe evidencia de una tercera corriente a lo largo de las costas de Venezuela y Colombia que viaja en dirección este. (Andrade et al., 2003; Johns et al., 2002; Richardson, 2005).

Las corrientes superficiales del caribe presentan zonas de alta y baja intensidad, las velocidades más altas ( $> 100 cm/s$ ) se concentran en dos zonas: En la parte central a lo largo de la corriente del Caribe intensificándose al llegar al estrecho de Yucatán y a lo largo de la costa de Panamá como parte del Giro de Panamá Colombia. Por su parte las velocidades más bajas ( $< 30 cm/s$ ) se concentran en la zona norte del Caribe a lo largo de las Antillas menores (Andrade et al., 2003; Richardson, 2005).

Aunque el principal forzador de corrientes superficiales es el viento, la circulación general está regulada por los gradientes de densidad y los flujos de entrada y salida de agua. El Caribe posee aguas altamente estratificadas en los primeros 1200 m, pasando a una estratificación débil hasta los 2000 m y aguas casi homogéneas a partir de los

2000 m, la estratificación superficial se caracteriza por lo presencia de una termoclina permanente a una profundidad de 100 m (Day, 2005; Gordon, 1967).

En zonas costeras la estratificación varía y se encuentra influenciada por las vertientes hídricas, siendo el río Magdalena el río más extenso que desemboca directamente en el Caribe, sumado a este se encuentran: Unare, Tocuyo, y Chama, en Venezuela; Ranchería, Sinú y Atrato, en Colombia; San Chagres (Canal de Panamá) en Panamá entre otros. También se encuentra influenciado por las desembocaduras de los ríos Orinoco y Amazonas que desembocan al este del Caribe pero sus flujos son transportados al Caribe por la corriente del norte de Brasil (Chérubin y Richardson, 2007).

Se pueden identificar tres flujos de entrada principales desde el océano Atlántico: El flujo a través del pasaje de las islas de Barlovento con una magnitud promedio de 10 Sv, el flujo a través del pasaje de las islas de Sotavento con una magnitud promedio de 8 Sv y el flujo a través de los pasajes de las Antillas Mayores con una magnitud promedio de 10 Sv. A través de estos entran al Caribe los flujos provenientes en su mayoría de la corriente del Norte de Brasil y de la corriente Ecuatorial del Norte (Johns et al., 2002).

Por otra parte el oleaje del Caribe está caracterizado por alturas significativas de ola para la época seca, de 2,2m en la zona este, 1,8m en la zona norte y 1,2m en la costa sur, en la época húmeda la reducción en la velocidad de los vientos conlleva una disminución significativa de estos valores. Estos datos fueron obtenidos del modelo Wave Watch III (Tolman, 1997).

Junto con las corrientes y oleajes el Caribe presenta un complejo patrón de mareas, en el que se pueden encontrar por lo menos 6 regiones con un rango de marea característico. En general los niveles de mareas se encuentran por debajo de los 20 cm, especialmente en la cuenca venezolana y la zona al sur de Puerto Rico y Haíti, donde los niveles se encuentran por debajo de los 10 cm. En contraste la costa de Nicaragua es la zona donde se presentan los máximos rangos de niveles de marea con valores por encima de los 40 cm, por su parte la costa de Colombia presenta un rango de mareas que oscila entre los 20 y 40 cm, caracterizada como mixta de tipo diurno y semidiurno. Aunque los rangos de mareas en el Caribe son pequeños, estudios muestran que en zonas de aguas someras ejercen efectos importantes sobre el comportamiento de las corrientes (Kjerfve, 1981; Morales, 2004).

# Capítulo 2

## Materiales y Datos

La presente sección hace referencia a las fuentes de información que se usaron en la realización del mismo.

### 2.1. Batimetría y Topografía

#### 2.1.1. Batimetría

La información batimétrica se obtuvo de las siguientes fuentes:

- **GEBCO** (General Bathymetric Chart of the Oceans): Provee información batimétrica en una malla global con una resolución de arco de 30 segundos, la información proviene de la recopilación controlada de sondeos batimétricos e interpolación entre puntos de sondeo basada en gravimetría satelital (GEBCO, 2014).
- **IBCCA** (The International Bathymetric Chart of Caribbean Sea and the Gulf of Mexico): Provee acceso a información digitalizada de distintos sondeos batimétricos en el golfo de México y el Caribe (IBCCA, 2014).
- **IHO DCDB** (International Hydrographic Organization Data Center for Digital Bathymetry) Provee acceso a una base de datos de sondeos batimétricos y DEM (Digital Elevation Models) (DCDB, 2014).
- **ETOPO1** Modelo de la superficie terrestre que integra batimetría y topografía con una resolución de arco de 1 minuto, producto de la recopilación de bases de datos globales y regionales (ETOPO, 2014).

### 2.1.2. Análisis fuentes de información de batimetría

Las fuentes batimétricas mencionadas fueron comparadas de acuerdo a su resolución, cobertura y precisión, para determinar cual es la más adecuada para la construcción del modelo. El IBCCA y el IHO DCDB proveen acceso a distintos sondeos batimétricos realizados en el mar Caribe, sin embargo al ser sondeos diferentes no procesados, se presentan los siguientes problemas: no se cuenta con una cobertura completa de toda la zona, existen diferencias entre los datos reportados entre los distintos sondeos y la resolución de los datos no es homogénea. Lo que hace que no sea viable su uso en este trabajo. Por otra parte GEBCO y el ETOPO al ser datos procesados no presentan los inconvenientes mencionados anteriormente y aunque la resolución del GEBCO es mayor, la resolución del ETOPO resulta adecuada al considerar el tamaño de las celdas del modelo que se está construyendo (Ésto se describirá con más detalle en la sección modelo numérico).

En el siguiente paso se comparó la precisión del GEBCO y ETOPO, para esto se seleccionaron puntos de control a lo largo del Caribe en los cuales se conoce la profundidad, para ésto se tomo como referencia los puntos en los cuales se encuentran ubicadas las boyas del *National Data Buoy Center* en el mar Caribe (Mostrados en la figura 2.2). Los datos de ambos modelos se compararon con las mediciones reportadas, para comparar los datos en las posiciones de las boyas fue necesario interpolar los datos de los modelos a los posiciones exactas de las boyas, se observó que el GEBCO presenta los menores errores, por lo se seleccionó para su uso en este trabajo, la figura 2.1 muestra los contornos batimétricos obtenidos del GEBCO (En la figura 2.1 se muestran simplificados).

### 2.1.3. Topografía

La información topográfica se obtuvo de las siguientes fuentes:

- **ASTER** (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) Misión Satelital que provee información de la elevación de la superficie terrestre de imágenes de alta resolución en 14 bandas del espectro electromagnético, posee una resolución que varía entre los 15 y 90 m.
- **SRTM** (Shuttle Radar Topography Mission) Misión Satelital previa al lanzamiento del ASTER la cual brinda un DEM de escala casi global, la información sin procesar presenta una resolución 30 m la cual solo esta disponible para uso

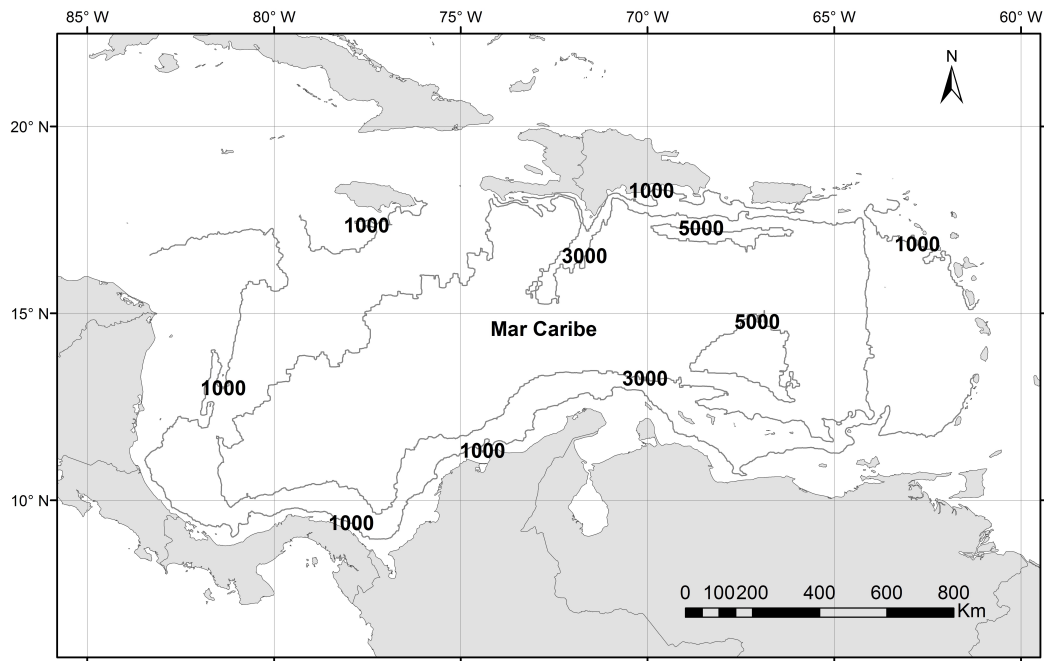


Figura 2.1: Contornos Batimétricos del Mar Caribe (Elaboración propia)

gubernamental, para el público se encuentra disponible una versión procesada con una resolución de 90 m.

- **ETOPO1** Descrito en la sección de batimetría.
- **GEBCO** El GEBCO brinda información topográfica sin embargo esta proviene del SRTM, se encuentra simplificada a la resolución del GEBCO.

#### 2.1.4. Análisis fuentes de información de topografía

De forma similar al análisis realizado para las fuentes batimétricas, se realizó un análisis de las fuentes topográficas con el fin de determinar la fuente más acorde para utilizar en este trabajo, teniendo en cuenta los mismos criterios mencionados anteriormente. Todas las fuentes de información cuentan con una cobertura completa de la costa Caribe, siendo el ASTER y el SRTM los que poseen la mejor resolución, por lo que se procedió a comparar la precisión de ambos. Para esto se tomaron como referencia puntos a lo largo de la costa de Colombia, en los cuales se tiene una elevación medida por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi -<http://www.igac.gov.co/igac>). Los resultados mostraron que los datos del ASTER presentan un desfase promedio de 6 m

en zonas costeras, mientras que para los datos del SRTM este corresponde a 1,5 m. De acuerdo a lo anterior se seleccionó el SRTM como la fuente de información a utilizar en el modelo.

## 2.2. Meteorología

La información meteorológica se obtuvo de las siguientes fuentes, las cuales debido a la falta de estaciones de medición, corresponden a modelos numéricos:

### 2.2.1. Re-análisis y datos Históricos

**NARR:** (North America Regional Reanalysis) Base de meteorología e hidrología terrestre para el territorio de América del Norte de alta resolución y alta frecuencia (Mesinger et al., 2006). Cubre el periodo entre 1979 - 2014 y actualmente es continuada en casi tiempo real bajo el nombre R - CDAS. Fue desarrollado como una mejora al previo NCEP - NCAR GR1 (mencionado a continuación) en resolución y precisión, utiliza el NCEP - DOE GR2 (Kanamitsu et al., 2002) como condiciones de frontera laterales. Posee una resolución temporal de 3 horas y espacial de  $0,25^\circ$ , tiene una cobertura determinada por una malla *Northern Lambert Conformal Conic Grid* con esquinas en 12.2N, 133.5W, 54.5N, 152.9W, 57.3N, 49.4W, 14.3N y 65.1W. Los datos del NARR fueron obtenidos de la NOAA/OAR/ESRL (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>).

**NCAR:** (National Center for Atmospheric Research Reanalysis Project) Modelo de análisis y predicción climatológico (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001), cubre el periodo desde 1948 hasta el presente con una resolución horizontal T62 (aproximadamente  $180km$ ) con 28 capas verticales. Asimila datos de barcos, boyas, aeronaves, radio sondas y datos derivados de satélites para el viento y la radiación. Los datos son asimilados usando interpolación estadística espectral, presenta una cobertura global con una resolución temporal de 6 horas. Los datos del NCAR fueron obtenidos de la NOAA/OAR/ESRL (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>).

**CCMP:** (Cross - Calibrated Multi - Platform Ocean Surface Wind Vector L3.0 First - Look Analyses) Base de datos derivada del proyecto CCMP la cual contiene datos de velocidad y dirección de viento con una resolución temporal de 6 horas y espacial de  $0,25^\circ$ . La base de datos combina mediciones satelitales de vientos REMSS (Remote Sensing Systems) usando un metodo de análisis variacional. Se incluyen mediciones de sensores satelitales como: SSM/I, AMSR-E, TRMM TMI, QuickSCAT, SeaWinds y

WindSat. Actualmente sólo se encuentran datos disponibles entre 2 de julio de 1987 y el 31 de diciembre de 2011 (CCMP, 2014).

**ERA - Interim:** Es el modelo de re-análisis meteorológico más reciente desarrollado por el ECMWF (Dee y Coauthors, 2011; Simmons et al., 2006). Cubre el periodo de tiempo de 1979 hasta el presente, tiene una resolución horizontal de aproximadamente 70 km con 60 capas verticales. El modelo corresponde a una versión mejorada de su predecesor el ERA - 40 (Uppala y Coauthors, 2005). Utiliza una técnica de asimilación de datos variacional en 4 dimensiones para asimilar datos de mediciones in situ y mediciones satelitales.

### 2.2.2. Predicción Numérica Meteorológica

**GFS** (Global Forecast System) es un modelo de predicción meteorológica desarrollado inicialmente por Sela (1980, 1982). bajo el nombre de *Medium Range Forecast Model*. El GFS es ejecutado 4 veces al día y produce un pronóstico de 16 días, con una disminución en la resolución espacial a partir del octavo día, de forma similar la precisión del modelo disminuye con el tiempo causando que las predicciones a largo plazo sólo mantengan una precisión significativa en sus escalas de mayor tamaño. El GFS es un modelo espectral con una resolución espacial aproximada de 27 km para los primeros 8 días y de 70 km para los 8 días restantes, verticalmente el dominio se encuentra dividido en 64 capas espaciadas no uniformemente con mayor resolución en las zonas cercanas a los polos. Temporalmente el modelo entrega un pronóstico cada hora para las primeras 24 horas, cada 3 horas para los primeros 8 días y cada 12 horas para los 8 días finales. El GFS es 1 de los 5 modelos predominantes de rango medio en uso actualmente, además es el único modelo global del cual toda la información se encuentra disponible de forma gratuita para el público general de acuerdo a las leyes de Estados Unidos.

## 2.3. Análisis de las fuentes de información meteorológica

Los forzamientos atmosféricos tienen una gran influencia en el comportamiento de los modelos hidrodinámicos, al representar las interacciones entre el océano y la atmósfera, sin embargo la limitada información en tiempo y espacio hace que sea necesario usar

información derivada de modelos de re-análisis, la cual debido a la complejidad de los procesos involucrados puede presentar un alto grado de incertidumbre que se traduce en errores en los procesos hidrodinámicos modelados. De acuerdo a lo anterior se hace necesario conocer la precisión de los modelos de re-análisis que se usarán como fuente de información con el fin de determinar cual es el más acorde y cuales son los errores que se le introducirán al modelo desde los forzamientos atmosféricos.

En la literatura se encuentran distintas evaluaciones del desempeño de los modelos de re-análisis disponibles (Atlas et al., 2011; Ayan H et al., 2013; Bourras, 2006; Carvalho et al., 2014; Dee y Coauthors, 2011; Grotjahn, 2008; Kalnay et al., 1996; Kishore et al., 2011; Mooney et al., 2011; Yang, 2013). Las tablas 2.1 y 2.2 muestran la precisión general de algunos de los modelos, mostrando los errores de éstos para la velocidad del viento, sin embargo los distintos estudios no diferencian entre el desempeño para distintas regiones, épocas y variables, lo que hace necesario evaluar el comportamiento de éstos para las variables y zonas de interés de este trabajo. En consecuencia se desarrolló el análisis presentado a continuación:

No	Modelo	<i>RMSE</i> (Vel. Viento (m/s))
1	CCMP	0.967
2	NCAR	2.733
3	NARR	5.006

Tabla 2.1: Errores de los modelos meteorológicos de re-análisis de acuerdo a la literatura, para la velocidad del viento

GFS	Día 1	Día 2	Día 3
Parámetro AC	0.934	0.868	0.802
<i>RMSE</i> (Vel. Viento (m/s))	1.916	2.638	3.176

Tabla 2.2: Errores del modelo GFS de acuerdo a la literatura

### 2.3.1. Análisis de las fuentes meteorológicas de re-análisis

El análisis consistió en una comparación de los datos arrojados por los modelos (CCMP, NCAR, NARR, ERA) contra mediciones in-situ en diferentes puntos a lo largo del Caribe, para diferentes periodos de tiempo. Se determinaron como variables de interés la velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica y temperatura, al ser los principales forzadores que se le introducirán al modelo hidrodinámico.

Inicialmente se determinaron los puntos de control (puntos en los cuales se realizaron las comparaciones), estos se encuentran limitados por la existencia de estaciones de monitoreo de las variables ya mencionadas. Se seleccionaron 5 boyas del NDBC (*National Data Buoy Center*) distribuidas a lo largo del Caribe y 4 estaciones meteorológicas ubicadas en aeropuertos a la largo de la costa Caribe, la ubicación geográfica de los aeropuertos y las boyas seleccionadas para la realización del análisis se presentan en la figura 2.2.

Después de seleccionar los puntos de control se procedió a analizar la disponibilidad de los datos, de acuerdo a esto se seleccionaron los años 2010 y 2011 como intervalo de tiempo para el análisis (Este periodo coincide con el seleccionado para las fases de calibración y validación del modelo, las cuales se seleccionaron de acuerdo a la disponibilidad de datos de mareógrafos y boyas de oleaje. Este tema se abordará más a fondo en secciones siguientes). Los datos de las boyas se obtuvieron de <http://www.ndbc.noaa.gov/> y los datos de las estaciones en aeropuertos se obtuvieron de <http://www.wunderground.com>.

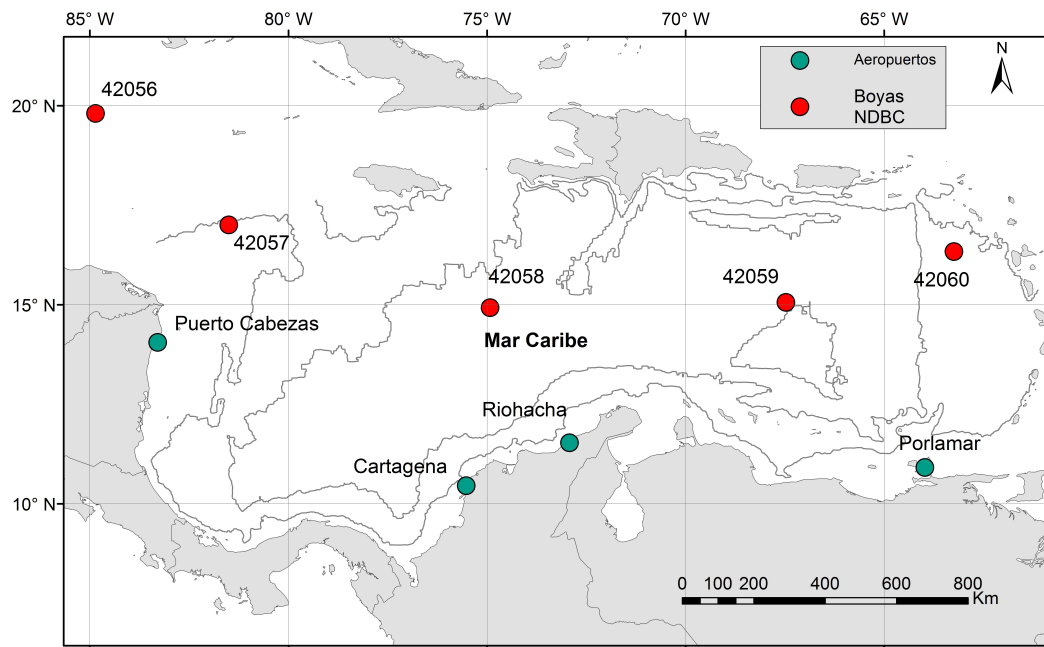


Figura 2.2: Aeropuertos y boyas meteorológicas seleccionadas para análisis de modelos meteorológicos. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

Los modelos (CCMP, NCAR, NARR, ERA) entregan los datos en posiciones fijas determinadas por mallas cálculo y en intervalos de tiempo que varían de acuerdo a la

resolución de cada uno, como ya fue descrito. En consecuencia el siguiente paso consistió en interpolar espacial y temporalmente los datos de los modelos a las ubicaciones y tiempos de los puntos de control. Para esto se utilizó un esquema de interpolación bilineal para la posición y lineal para el tiempo. Este procedimiento se realizó para los 4 modelos en los 9 puntos de control para cada una de las variables de interés.

Con los datos interpolados se calcularon para cada una de las series obtenidas los estadísticos: Media de acuerdo a la ecuación 2.1, Desviación estandar de acuerdo a la ecuación 2.2, MAE (Mean Absolute Error) de acuerdo a la ecuación 2.3, RMAE (Relative Mean Absolute Error) de acuerdo a la ecuación 2.4, RMSE (Root Mean Square Error) de acuerdo a la ecuación 2.5, Coeficiente de correlación de acuerdo a la ecuación 2.6 y las pruebas F y T con un intervalo de confiabilidad del 95 %.

Para las ecuaciones mostradas a continuación considere 2 variables  $f_n$  y  $r_n$  definidas en  $N$  puntos discretos donde  $\bar{f}$  y  $\bar{r}$  son las medias y  $\sigma_f$  y  $\sigma_r$  son las desviaciones estándar para las variables  $f$  y  $r$  respectivamente.

$$\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n \quad (2.1)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2} \quad (2.2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |f_n - r_n| \quad (2.3)$$

$$RMAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|f_n - r_n|}{|f_n|} \quad (2.4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_i - r_n)^2} \quad (2.5)$$

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f \sigma_r} \quad (2.6)$$

Inicialmente se realizó el análisis para las 5 boyas para el periodo completo entre los años (de acuerdo a la disponibilidad de los datos) 2010 y 2011, este análisis resulta similar a lo encontrado en la literatura. Sin embargo debido a que los errores pueden amortiguarse para periodos tan largos de tiempo se procedió a seleccionar periodos de

tiempo más cortos que representaran las épocas climáticas del Caribe (Época seca y época húmeda), adicionalmente se diferenció el comportamiento entre zonas de aguas profundas (Representada por las boyas del NDBC) y zonas costeras (Representadas por las estaciones ubicadas en los aeropuertos). Por último se analizó el comportamiento bajo condiciones extremas (Paso de huracanes y/o tormentas tropicales).

Para el análisis bajo condiciones climáticas extremas, paso de huracanes y tormentas tropicales por el Caribe, se seleccionaron periodos de tiempo en los cuales se hubiera presentado paso de tormentas tropicales por el Caribe, en zonas cerca de las estaciones de monitoreo disponibles, como se muestra en la figura 2.3, en la cual se presentan las trayectorias de los huracanes seleccionados. Los huracanes seleccionados fueron: el huracán Paula, que pasó cerca de la boya 42056 los días 12 y 13 de Octubre del 2010; el huracán Rina, que pasó cerca de la boya 42057 el 24 de Octubre de 2011; el huracán Tomás, que pasó cerca de la boya 42059 entre el 31 de Octubre de 2010 y el 2 de Noviembre del 2010. Los datos de los huracanes fueron obtenidos del *National Hurricane Center* (<http://www.nhc.noaa.gov/>)

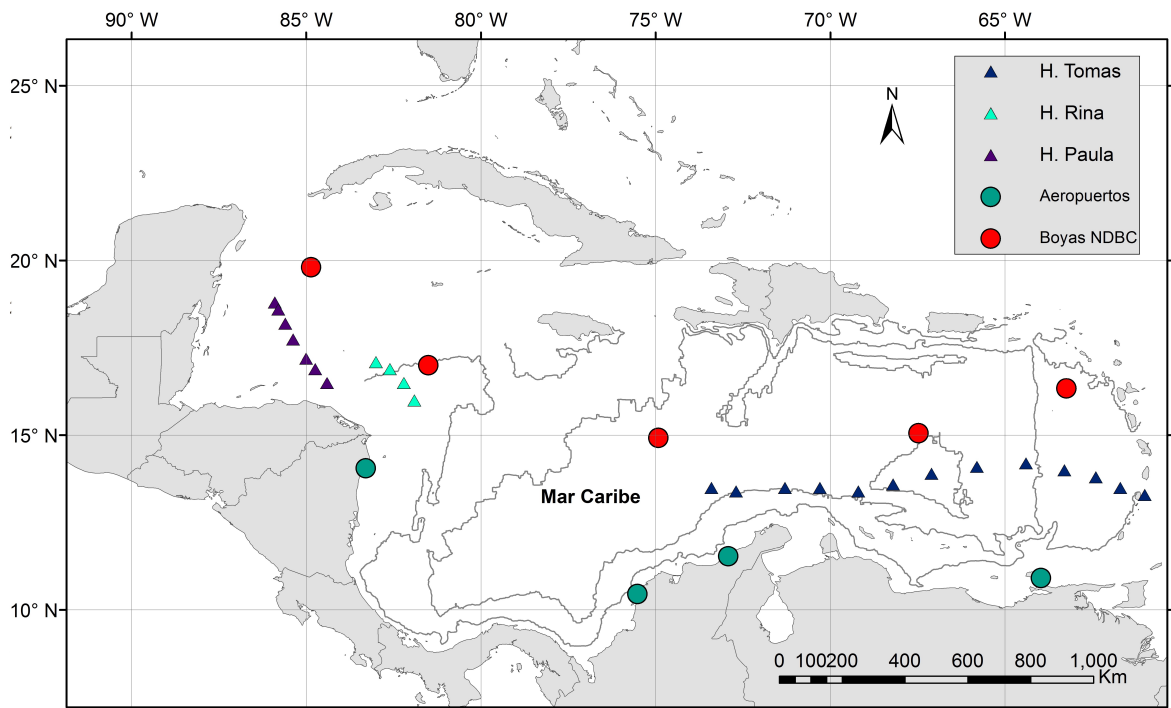


Figura 2.3: Trayectoria de huracanes por el Caribe seleccionados para realizar el análisis de desempeño de los modelos meteorológicos. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

**2.3.1.1. Resultados del análisis de las fuentes de información meteorológica**

Los resultados obtenidos mostraron que no existe una diferencia significativa en el desempeño de los modelos, al comparar en aguas profundas las escalas temporales medias y pequeñas. Las diferencias en los resultados obtenidos para los distintas escalas temporales se encuentran por debajo del 3%, refiriéndose a comparaciones de desempeño de un mismo modelo para las escalas de 2 años y 2 meses. Esto indica que los análisis para escalas de tiempo pequeñas son representativos del comportamiento general de los modelos.

Las tablas 2.3, 2.4 y 2.5 muestran los resultados del comportamiento de los modelos para largos periodos de tiempo en la zona de aguas profundas, presentando los estadísticos calculados, el modelo Ref que se presenta en las tablas corresponde a los datos medidos. Los resultados muestran que la velocidad del viento es la variable que presenta mayor variabilidad y mayores errores relativos, sin embargo también muestra los coeficientes de correlación más altos, indicando que los modelos siguen la tendencia de variación de forma adecuada pero no logran una correcta reproducción del valor medio. Opuestamente a esto la presión y la temperatura presentan errores relativos bajos, poca variabilidad y coeficientes de correlación muy bajos, indicando que para estas dos variables, los modelos reproducen de forma adecuada el comportamiento medio, pero no logran reproducir las tendencias de variación.

<b>Modelo</b>	<b>Med</b>	<b>Std</b>	<b>RMSE</b>	<b>RMAE</b>	<b>R</b>
Ref	6.95	2.09	0.00	0.00	1.00
CCMP	7.45	2.04	0.84	0.10	0.93
NCAR	7.09	2.10	0.90	0.12	0.87
NARR	5.82	2.02	1.22	0.22	0.74
ERA	6.71	1.89	0.86	0.11	0.88

Tabla 2.3: Análisis estadístico boya 42059 para el periodo 2010 - 2011 para la velocidad del viento

<b>Modelo</b>	<b>Med</b>	<b>Std</b>	<b>RMSE</b>	<b>RMAE</b>	<b>R</b>
Ref	101077.94	154.31	0.00	0.000	1.00
NCAR	101639.67	137.36	24.58	0.006	0.75
NARR	101266.76	153.54	14.33	0.002	0.53
ERA	101154.32	132.30	10.15	0.001	0.77

Tabla 2.4: Análisis estadístico boya 42058 para el periodo 2010 - 2011 para la presión

Modelo	Med	Std	RMSE	RMAE	R
Ref	28.10	0.77	0.00	0.00	1.00
NCAR	28.22	0.76	0.66	0.02	0.75
NARR	28.79	0.57	0.89	0.03	0.36
ERA	28.21	0.60	0.71	0.02	0.72

Tabla 2.5: Análisis estadístico boya 42058 para el periodo 2010 - 2011 para la temperatura

De forma similar, para las variables analizadas (velocidad del viento, dirección del viento, presión y temperatura), no se encontraron diferencias significativas en el desempeño de los modelos para las épocas húmedas y secas, esto permite establecer que los modelos logran un comportamiento homogéneo durante las épocas climáticas presentes en el Caribe, excluyendo eventos extremos, aunque estos fueron considerados en el análisis no fue posible considerarlos en su magnitud completa, debido a que sus trayectorias no cruzaron los puntos de control seleccionados o no se encontraron datos disponibles para esas épocas. Las figuras 2.4 y 2.5 muestran el desempeño de los modelos para la época seca y húmeda respectivamente mediante los diagramas de Taylor (2001), en los cuales se muestra de forma relacionada los estadísticos desviación estándar, coeficiente de correlación y error medio cuadrático, para la velocidad del viento para los modelos analizados, adicionalmente se muestra como referencia la boya, la posición del modelo con respecto a la de la boya en el diagrama, indica que tan cercanos son los datos reproducidos por el modelo a los medidos, se observa que no existen cambios significativos, los modelos mantienen sus tendencias de desempeño.

El análisis también mostró que aunque el NARR posee una resolución temporal de 3 horas, siendo la más refinada en comparación con las 6 horas de los modelos restantes, el primero no presenta un desempeño mejor que los otros, los coeficientes de correlación muestran que bajo condiciones normales, las predicciones cada 6 horas permiten una reproducción correcta de las variaciones en las variables analizadas, siendo ejemplo de esto los resultados presentados por el CCMP, el cual mostró los coeficientes de correlación más altos, del orden de 0,9, en la mayoría de los casos. La figura 2.6 muestra la velocidad del viento contra el tiempo para la época húmeda, se presenta la serie medida y las series correspondientes a cada uno de los modelos, se observa que el NARR presenta la peor reproducción del comportamiento de la variable mencionada, ya que la serie se mantiene por debajo de la medida y de las correspondientes a los modelos restantes.

Taylor Diagram for Wind Direction at Buoy 42059 for Dry Season 2011

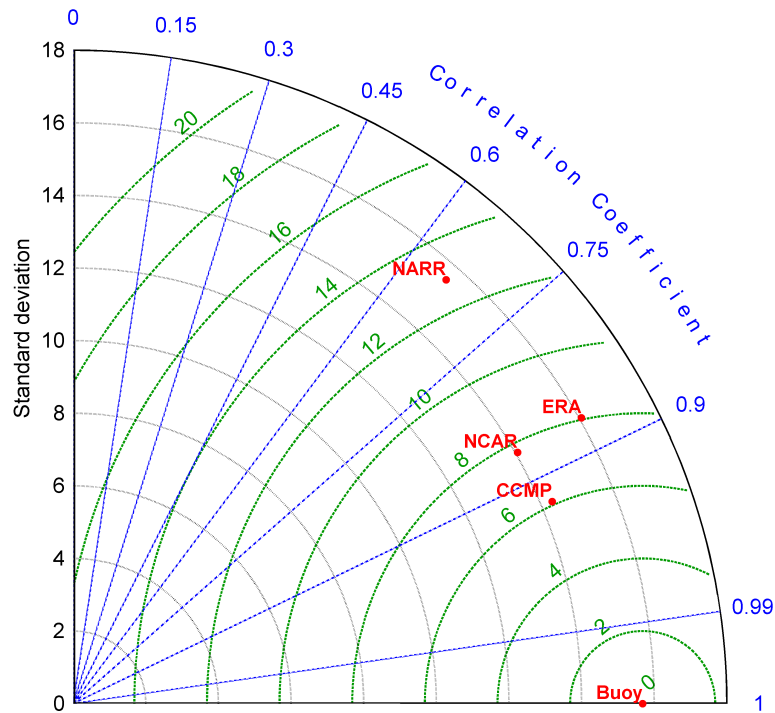


Figura 2.4: Diagrama de Taylor para la dirección del viento en la posición de la boya 42060 para la época seca. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

Por otra parte la variación espacial en aguas profundas si resultó significativa para los modelos NARR y ERA, observándose comportamientos diferenciados para las distintas zonas del Caribe. El ERA presenta los máximos errores en la zona oeste, disminuyendo al desplazarse hacia el este, mostrando en esta zona un desempeño mejor; mientras que el NARR presentó los errores máximos en la zona este, lo cuales disminuyen al desplazarse hacia la zona oeste. El CCMP y el NCAR presentaron comportamientos homogéneos en todos los puntos correspondientes a zonas de aguas profundas.

Para la zona de aguas profundas se puede concluir que el CCMP mostró el mejor desempeño para la reproducción de la velocidad y la dirección del viento, con errores alrededor del 10%, en segundo lugar se ubicó el NCAR con errores alrededor del 15%. Para la presión y temperatura los mejores resultados los presentó el NCAR, presentando para la presión errores menores al 1% y menores al 5% para la temperatura.

En el caso de zonas costeras resulta difícil determinar cual de los modelos presenta el mejor comportamiento para esta zona, se observaron comportamientos muy diferen-

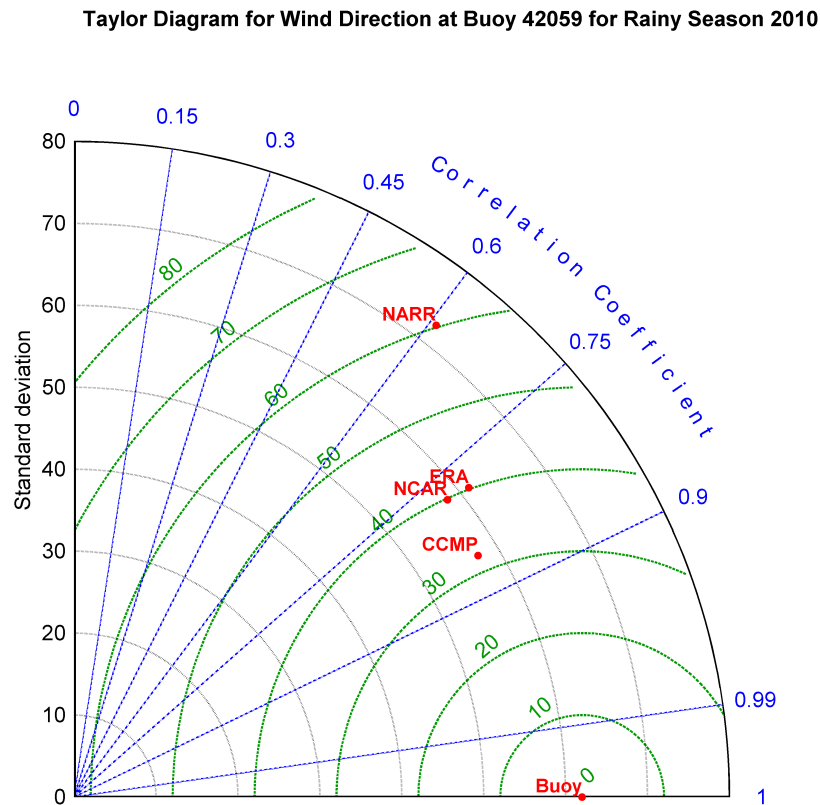


Figura 2.5: Diagrama de Taylor para la dirección del viento en la posición de la boya 42059 para la época húmeda. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

ciados en todos los casos analizados. Sin embargo si es posible establecer que para estas zonas ninguno de los modelos reproduce de forma confiable, el comportamiento de las variables analizadas, siendo más críticos los casos de la dirección y la velocidad del viento, las cuales presentaron errores por encima del 50% en la mayoría de los casos. La figura 2.7 muestra el comportamiento de la velocidad del viento contra el tiempo en zona costera (Aeropuerto de Nicaragua), para la época húmeda, se presenta la serie medida y las series correspondientes a los modelos, se observa que los modelos presentan un desfase significativo con respecto al valor medido y no logran seguir de forma adecuada las variaciones medidas.

Para el caso de condiciones extremas se observó que la variable más afectada fue la velocidad del viento, la cual presentó aumentos significativos, para el caso de los huracanes Rina y Paula, de paso corto por el Caribe, sólo el CCMP logro reproducir de forma correcta el aumento observado, como se muestra en la figura 2.8, en la cual se muestra la velocidad del viento contra el tiempo, durante el paso del huracán Paula,

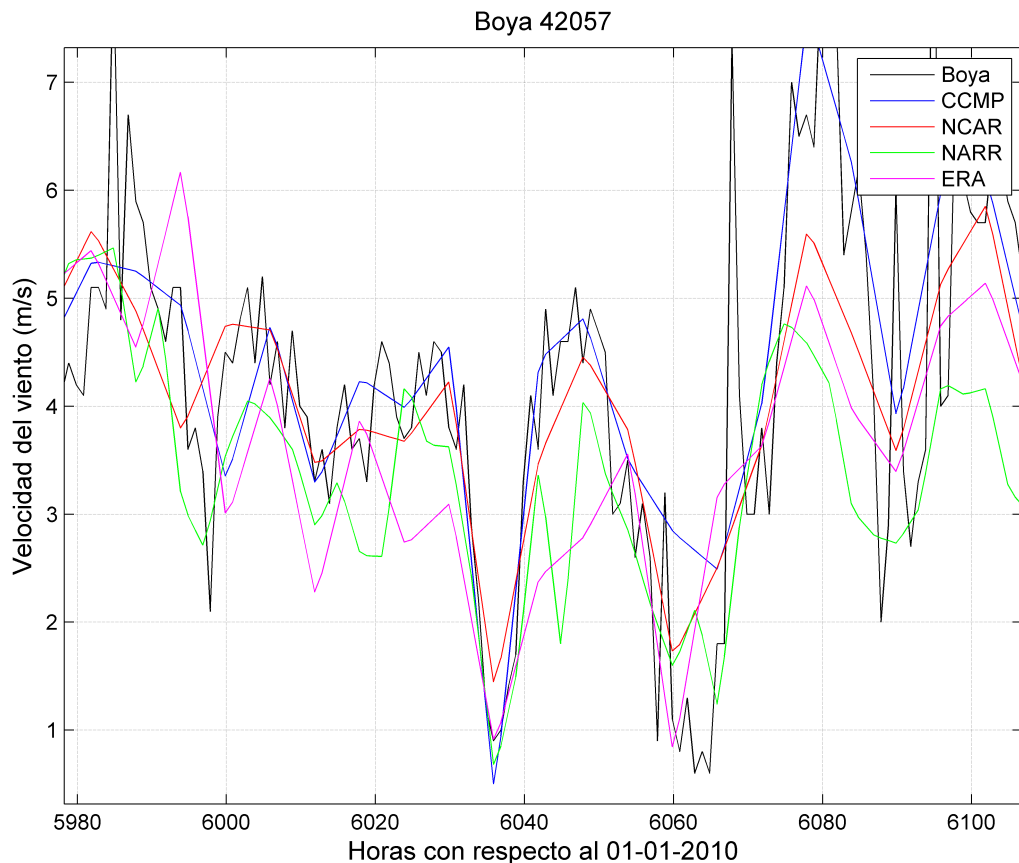


Figura 2.6: Velocidad del viento en la posición de la boya 42057 para el época húmeda del 2010. Medición, CCMP, NCAR, NARR y ERA. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

se presenta la serie medida y las series correspondientes a los modelos, ésto se tradujo en una aumento de los errores relativos con valores cercanos a 50 % para los modelos NCAR, NARR y ERA. Para el caso de Tomás el cual presentó un paso más largo por el Caribe, se observó que los aumentos en la velocidad fueron menos bruscos que los casos anteriores, permitiendo que los modelos logaran reproducir de forma correcta la variación observada, por lo que no se presentaron cambios significativos en el desempeño de éstos.

### 2.3.2. Análisis de las fuentes metereológicas de predicción

La capacidad predictiva del modelo esta muy influenciada por la capacidad predictiva del GFS, ya que los datos proporcionados por éste constituyen la fuente de información meteorológica que se usará para alimentar el modelo al realizar prediccio-

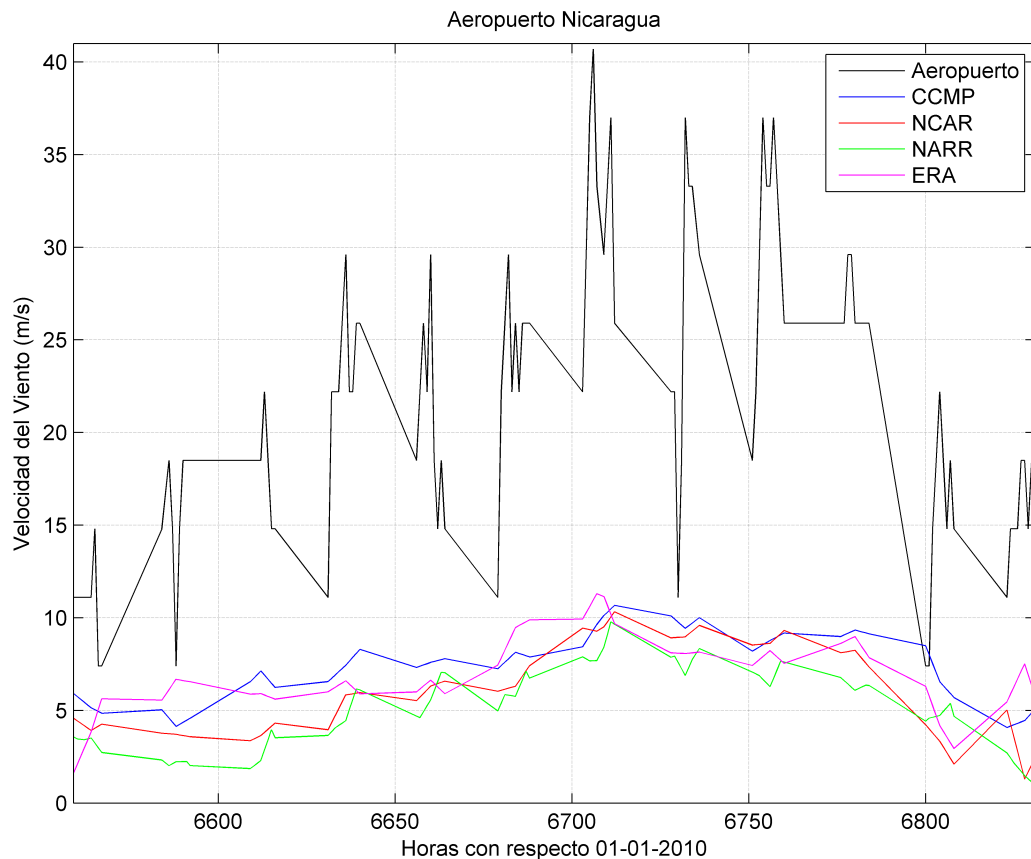


Figura 2.7: Velocidad del viento en el aeropuerto de Nicaragua (Puerto Cabezas) para la época húmeda del 2010. Medición, CCMP, NCAR, NARR y ERA. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

nes a corto tiempo. Debido a esto resulta necesario determinar la precisión que presenta el GFS al reproducir las condiciones meteorológicas y su variación de acuerdo al tiempo con respecto al momento de la predicción.

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo a la literatura la precisión de predicción del GFS está medida, entre otros parámetros, de acuerdo al parámetro AC, el cual determina que para la versión operacional más reciente del GFS, una capacidad de predicción con buena precisión de 8.08 días (Yang, 2013). Con el fin de corroborar esta información para la región Caribe para las variables de interés se realizó un análisis similar al descrito en la sección anterior, el cual se describe a continuación.

El análisis para los modelos anteriores mostró que de las variables de interés (velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y presión), la velocidad y dirección del viento son las variables que presentan la mayor variabilidad y que presentan los

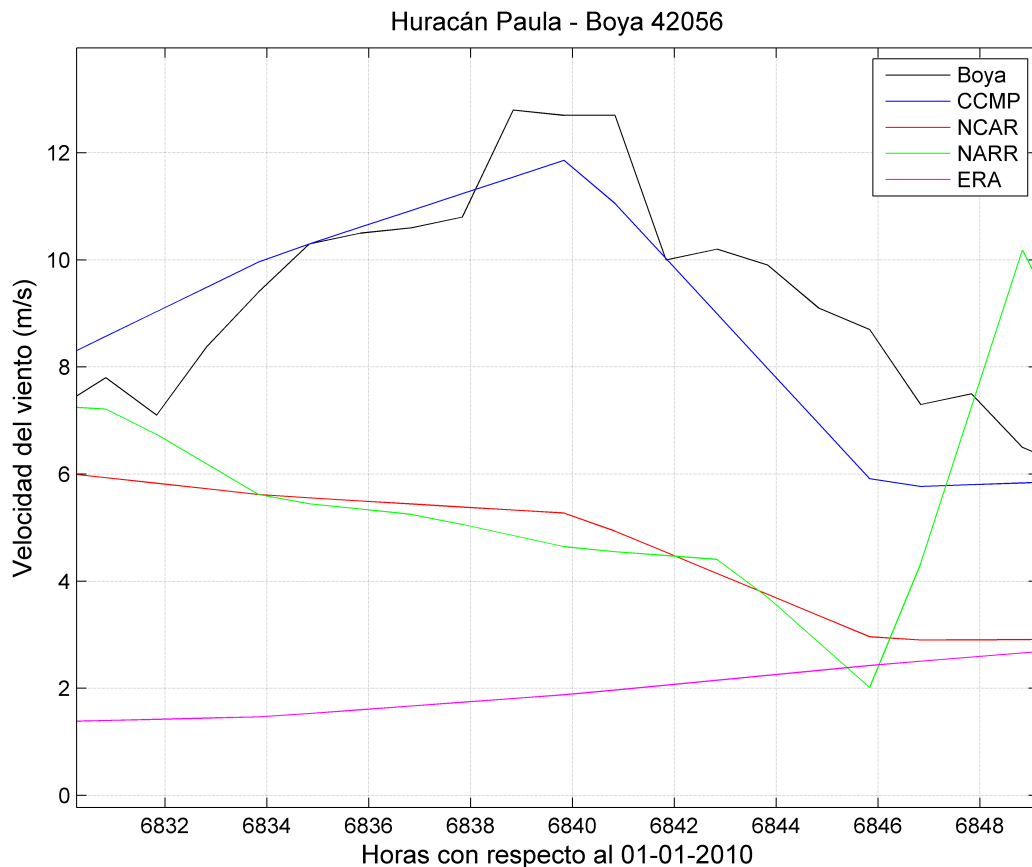


Figura 2.8: Velocidad del viento durante el paso del huracán Paula. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

errores más significativos, de acuerdo a ésto el análisis realizado se enfocó en estas dos variables.

El análisis consistió en comparar la información proveniente del GFS con la información medida por estaciones meteorológicas, ubicadas en los puntos de control que se utilizaron para el análisis descrito en la sección anterior. El GFS al igual que los modelos analizados anteriormente entrega la información en mallas fijas para intervalos de tiempo determinados, esto hizo que fuera necesario realizar una interpolación espacial y temporal de forma que los datos provenientes del GFS correspondieran con las posiciones y tiempos de medición de los puntos de control.

Al ser el GFS un modelo de predicción, para cada uno de los tiempos de medición en cada uno de los puntos de control, se tienen 33 datos distintos, los cuales corresponden a las predicciones realizadas para ese tiempo en esa posición, realizadas desde 192 horas antes hasta 0 horas en intervalos de 6 horas. Para cada uno de los datos obtenidos se

calcularon los estadísticos MAE Y RMAE, descritos en la sección anterior.

En cada uno de los puntos de control los datos se agruparon de acuerdo al tiempo con respecto al momento de predicción, para cada punto de control se calcularon los errores promedio correspondientes a cada uno de los tiempos de predicción, obteniendo para cada punto 33 errores promedio que corresponden al error promedio de predicción en ese punto, desde 192 horas antes hasta 0 horas en intervalos de 6 horas.

Teniendo en cuenta que el análisis anterior mostró que estudiar periodos cortos de tiempo (2 meses) resultan representativos para comportamientos generales y que no existen diferencias significativas de acuerdo a la época climática del Caribe, se selecciono el periodo entre el 1 diciembre de 2013 y el 31 de enero de 2014. En las figuras 2.9 y 2.10 se observan los resultados obtenidos para algunos de los puntos de control seleccionados y el promedio general correspondiente a la zona de aguas profundas, se presentan los errores calculados mediante el MAE para la velocidad del viento y la dirección del viento respectivamente, contra las horas previas al momento de la predicción.

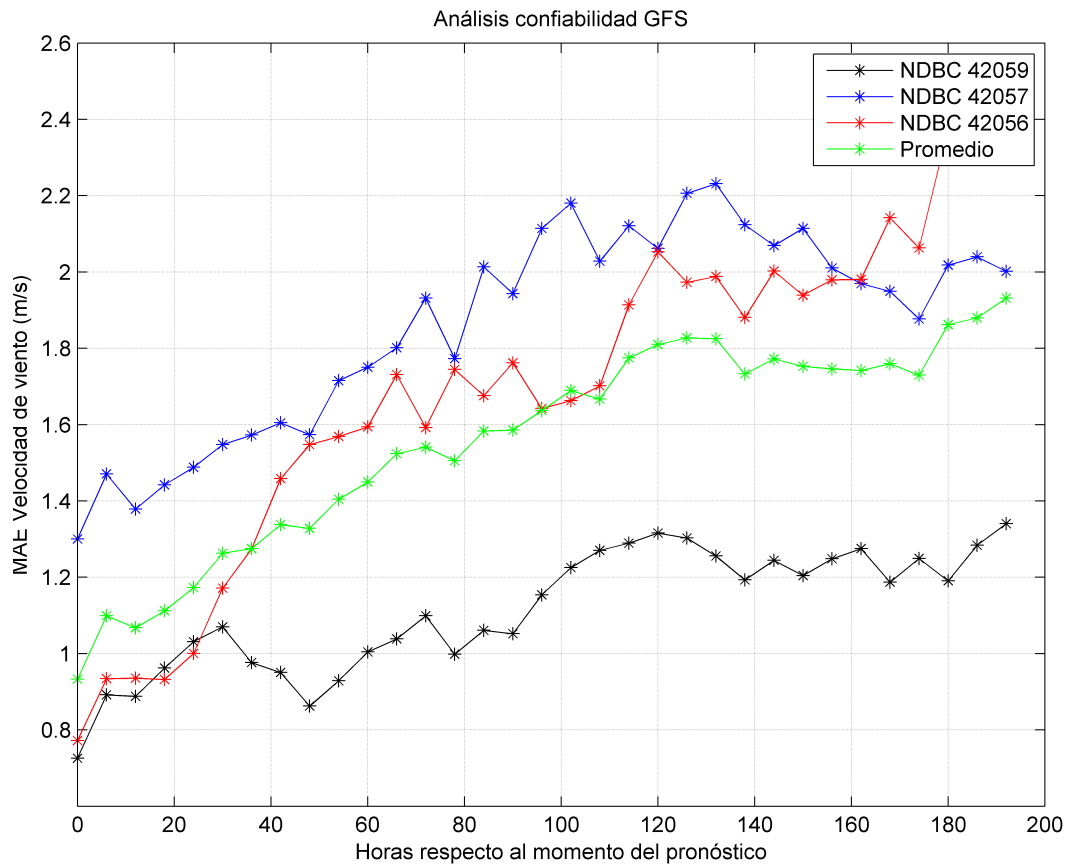


Figura 2.9: Análisis de desempeño del GFS para zonas de aguas profundas para la velocidad del viento

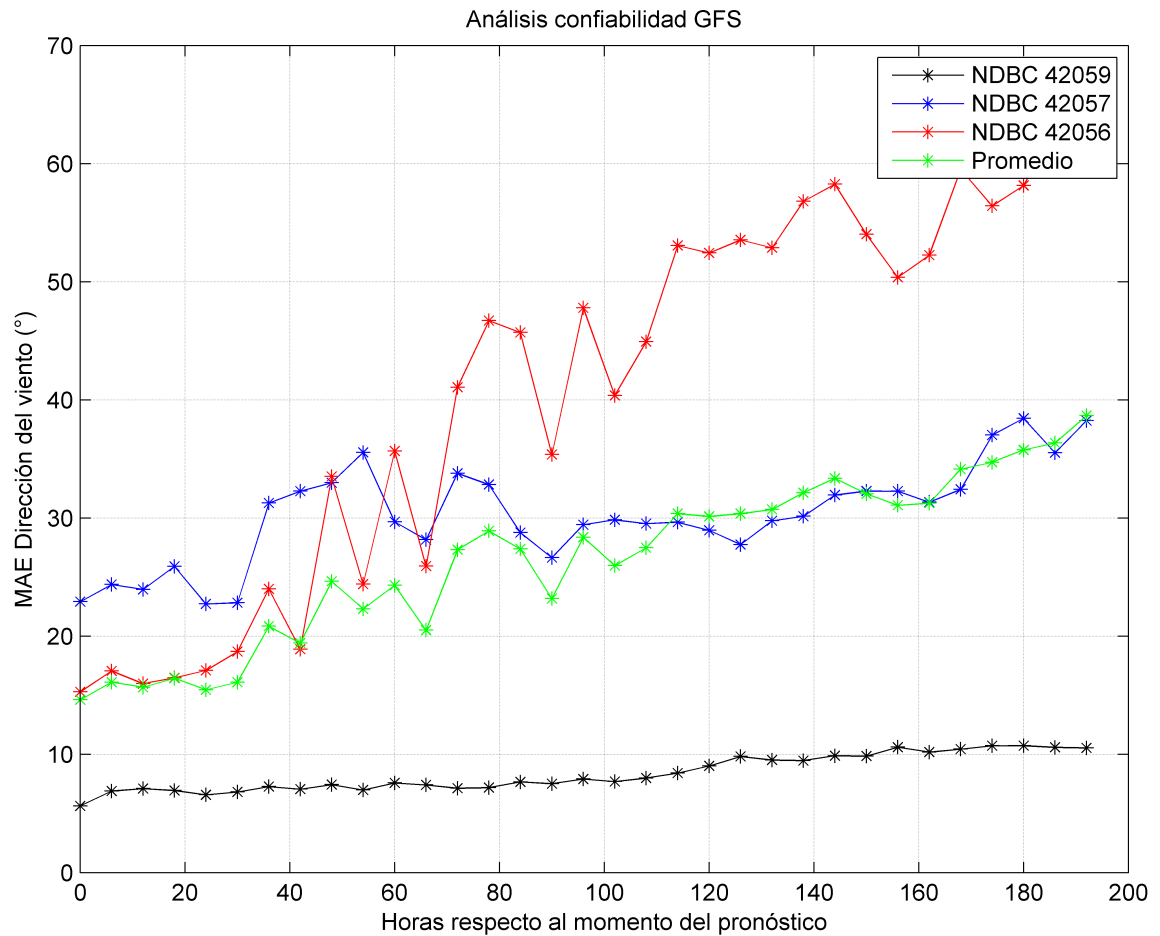


Figura 2.10: Análisis de desempeño del GFS para zonas de aguas profundas para la dirección de viento

En promedio se observó que el modelo presenta un RMAE para la velocidad de viento del 25 % correspondiente a 192 horas de tiempo de predicción el cual disminuye con una tasa 0.07 % cada 6 horas, hasta alcanzar un RMAE mínimo de 12 %. De forma similar la dirección del viento presenta un MAE máximo de 38°, el cual disminuye con una tasa de 0.13° cada 6 horas, hasta alcanzar un mínimo de 12°. Se observó una variación espacial en el comportamiento del modelo, los errores y las oscilaciones en la precisión de los datos aumentan al desplazarse al norte y al oeste. Para los puntos de zonas costeras se observó de forma similar al análisis previo, que el comportamiento se vuelve errático en los distintos puntos de control y se presentan errores por encima del 40 % en todos los momentos de la predicción, mostrando que el modelo no logra reproducir de forma coorrecta el comportamiento en estos puntos.

## 2.4. Información Oceanográfica

### 2.4.1. Mareas Astronómicas

Los niveles de marea astronómicos corresponden a los niveles de marea generados por la interacción gravitatoria del sistema Tierra, Luna, Sol, sin tener en cuenta los efectos generados por la acción atmosférica y los efectos batimétricos, se obtuvieron de:

- **TPXO 6.2: Global Inverse Tide Model**; modelo de marea global con una resolución de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . El modelo usa como principal fuente de datos la información proveniente del proyecto *TOPEX/Poseidon* complementada con el *Circum Antarctic inverse model CADA00.10* y el *Ross Sea Height based inverse model Ross Inv 2002* (PADMAN y EROFEEVA, 2005).

Los niveles de marea astronómicos no logran describir por si solos el comportamiento de las mareas, debido a que no consideran los efectos de las mareas meteorológicas y las condiciones batimétricas locales. Al comparar los niveles de marea obtenidos del modelo TPXO con los datos medidos por un mareógrafo ubicado en las coordenadas  $(12, 35^\circ, 278, 58^\circ)$  durante un periodo de un mes, se obtuvo un error absoluto promedio (MAE) de  $0,0743 \text{ m}$  y un error relativo promedio (RMAE) de  $68,51 \%$ . Sin embargo representan el forzador principal de las mareas, y debido a que dependen de las interacciones gravitatorias, las cuales son cíclicas, luego de ser determinados pueden aplicarse a periodos de tiempo diferentes al periodo de tiempo del cual provienen los datos que se utilizaron para su cálculo.

### 2.4.2. Modelación de Oleaje

La información del oleaje que corresponde a la altura significativa, dirección y periodo pico se obtuvo de:

- **WAVE WATCH III** modelo de oleaje de tercera generación desarrollado por NOAA/NCEP, el modelo cuenta con una resolución espacial de  $0,1667^\circ \times 0,1667^\circ$  y temporal de 3 horas (Tolman, 1997).

Al ser un modelo numérico, la información se encuentra disponible con una cobertura global y para cualquier periodo de tiempo en el cual se ejecute el modelo, sin embargo al comparar los datos obtenidos con respecto a los datos medidos por estaciones en el Caribe se observó, que por ejemplo la altura significativa de ola, presenta un error promedio del  $20,0 \%$ , calculado mediante el RMAE.

### 2.4.3. Afluentes del Caribe

Los afluentes considerados y sus respectivos caudales fueron obtenidos de la base de datos de GRDC (2001) y del trabajo de Roldán (2008), éstos se presentan en la tabla 2.6 y en la figura 2.11.

Nombre	Caudal $m^3/s$
Sinú, Colombia	550
Coco, Nicaragua	70
Neverí, Venezuela	32
Zulia, Venezuela	54
Magdalena, Colombia	7317
Reventazón, Nicaragua	113
San Juan, Costa Rica	420
Atrato - Coco Grande, Colombia	165
Atrato - Tarena, Colombia	211
Atrato - Roto, Colombia	2388
Atrato - Leoncito, Colombia	183
Atrato - Urabá, Colombia	183
Atrato - Matutubo, Colombia	281
Atrato - Pavas, Colombia	116

Tabla 2.6: Caudales medios de los principales afluentes del Caribe

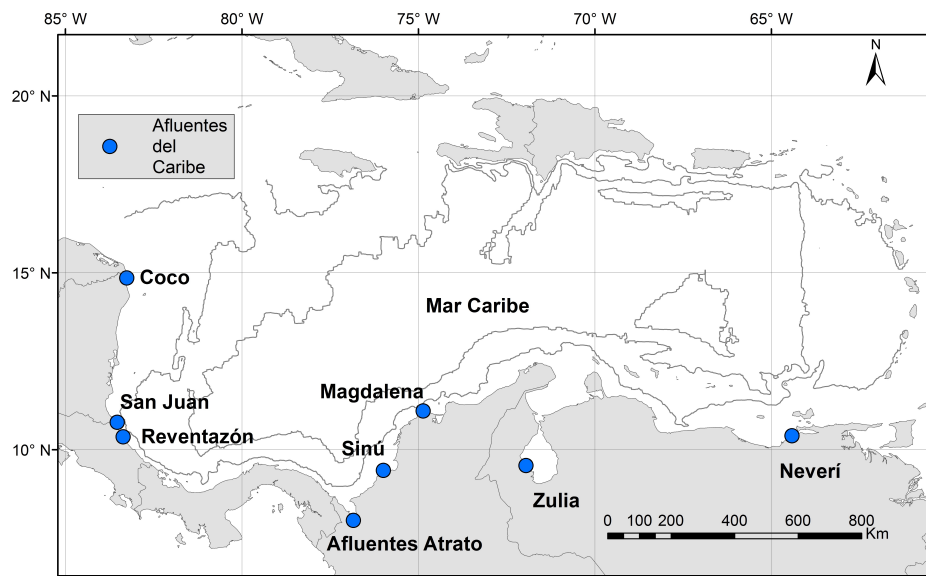


Figura 2.11: Principales afluentes del Caribe

## 2.5. Fuentes de monitoreo oceanográfico en el Caribe

En el Caribe se encuentran las siguientes fuentes de monitoreo (Corresponden a mediciones), la figura 2.12 muestra la ubicación de las estaciones de medición y mediciones que se describen a continuación:

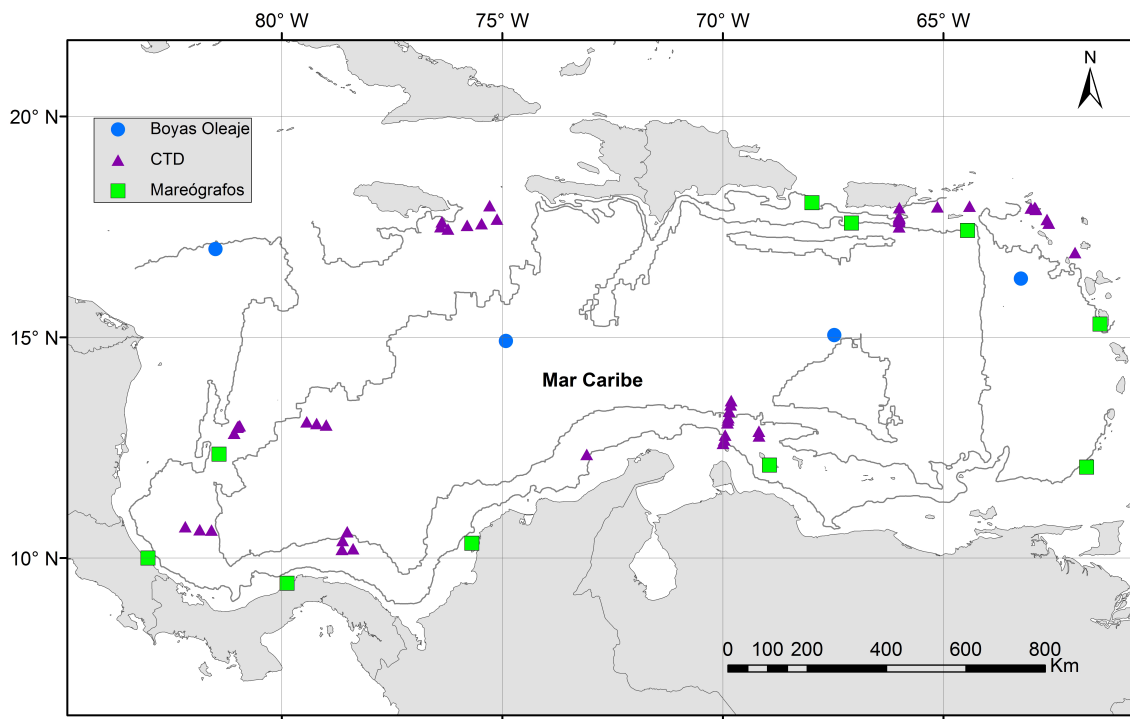


Figura 2.12: Ubicación de las estaciones de medición y mediciones en el Mar Caribe

### 2.5.1. Oleaje y meteorología

**Boyas NDBC (National Data Buoy Center):** Las boyas del NDBC proveen información con una resolución horaria de las siguientes variables: dirección de viento, velocidad de viento, altura significativa de ola, período promedio de ola, dirección de ola, presión atmosférica a nivel de mar, temperatura del aire, temperatura a nivel de mar y nivel de mar (NDBC, 2014).

**JASON** La misión satelital JASON brinda mediciones de la altura significativa del oleaje a nivel global, aunque cuenta con una muy buena resolución espacial, la resolución temporal resulta muy pobre ya que está sujeta a la órbita del satélite, adicionalmente al tratarse de mediciones satelitales, los datos obtenidos no cuentan con la misma precisión que aquellos provenientes de mediciones in-situ.

### 2.5.2. Niveles de marea

**Mareógrafos UHSLC** (University of Hawaii Sea Level Center): Los mareógrafos del UHSLC brindan información del nivel de marea con una resolución horaria (UHSLC, 2014).

### 2.5.3. Perfiles de Temperatura y Salinidad

**NODC**: La página de la *National Oceanographic Data Center* (<http://www.nodc.noaa.gov/>) brinda acceso a los resultados de distintas mediciones de temperatura y salinidad realizadas en el Mar Caribe, entre éstos se incluye el proyecto ARGO, el cual provee perfiles de temperatura y salinidad en puntos del océano hasta una profundidad de 2000 m, mediante el uso de sondas robóticas submarinas (ARGO, 2014).

### 2.5.4. Corrientes superficiales

Estudios con boyas a la deriva (Richardson, 2005), observaciones superficiales (Jury, 2011) y análisis de los flujos a través de los pasajes entre islas del Caribe (Chérubin y Richardson, 2007), proveen información de la circulación general del mar Caribe.

# Capítulo 3

## Modelo Numérico

### 3.1. Descripción del Modelo

Para el desarrollo de las simulaciones se usó el software DELFT3D, el cual es un software ampliamente utilizado en modelamiento hidrodinámico, como lo evidencian los trabajos de [Rahbani \(2015\)](#), [Li et al. \(2015\)](#), [Garcia et al. \(2015\)](#), [Borsje et al. \(2013\)](#), [Razmi et al. \(2013\)](#), [Morelissen et al. \(2010\)](#), entre otros. El software DELFT3D resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para un fluido incompresible, bajo los supuestos de aguas profundas y de Boussinesq, en la ecuación de momentum vertical las aceleraciones verticales no son tomadas en cuenta lo que lleva a la ecuación de presión hidroestática. Para modelos 3D las velocidades verticales son calculadas a partir de la ecuación de continuidad. Las ecuaciones se resuelven utilizando un esquema de diferencias finitas, en un sistema coordenado curvilíneo ortogonal  $(\xi, \eta)$ , la coordenada vertical de el dominio se discretiza en un número igual de capas, las capas no tienen un espesor uniforme sino que varían de acuerdo a la profundidad, para cada una de las celdas correspondientes a la discretización se resuelven las ecuaciones constitutivas del modelo. Para mayor información consultar [Deltares \(2013a\)](#).

Existen 2 opciones para la implementación de las simulaciones, se puede utilizar un malla tipo  $\sigma$  o una malla tipo Z, ambas mallas se muestran en la figura 3.1. Los modelos de circulación que incluyen fenómenos de transporte (temperatura y salinidad) que se han implementado en el Caribe, utilizan mallas tipo Z ya que estas brindan mayor estabilidad al compararlas con mallas tipo  $\sigma$ , en zonas costeras con flujo estratificado y cambios batimétricos pronunciados ([Stelling y Kester, 1994](#)), sin embargo el uso de estas mallas no permite considerar la interacción entre el oleaje y las corrientes. Pero

considerando que los efectos de la interacción oleaje y corrientes resultan significativos y el objetivo de este trabajo es incluir este fenómeno al igual que los fenómenos de transporte, el modelo descrito a continuación se implementó utilizando mallas tipo  $\sigma$  a diferencia de otros modelos implementados para el Caribe.

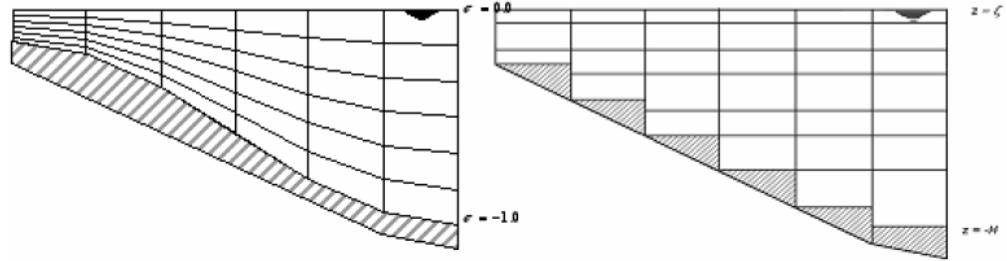


Figura 3.1: Esquema de la malla tipo  $\sigma$  (derecha) y malla tipo Z (izquierda), imagen de Deltares (2013a)

A continuación se presentan las ecuaciones de continuidad ecuación 3.1 y momentum ecuación 3.2 las cuales determinan el movimiento del fluido (Las ecuaciones se encuentran definidas para un sistema coordenado  $\sigma$  definido por Philips (1957)).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q \quad (3.1)$$

con  $U$  y  $V$  definidas como las velocidades promediadas para la velocidad.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \\ - fv = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \quad (3.2) \end{aligned}$$

Donde:

- $\nu_v$  coeficiente de remolino viscoso en la dirección vertical
- $P_\xi$  y  $P_\eta$  gradientes de presión
- $F_\xi$  y  $F_\eta$  balances en los esfuerzos horizontales de Reynolds

- $M_\xi$  y  $M_\eta$  contribuciones de fuentes externas (Olas, entradas o salidas de agua, estructuras hidrúlicas)

La velocidad vertical  $w$  la cual se define en las superficies  $\sigma$  como la velocidad relativa al movimiento del plano.

La densidad se encuentra definida por la ecuación de estado (Millero et al., 1980a,b), los fenómenos de transporte son modelados mediante la ecuación de advección - difusión la cual se presenta en la ecuación 3.3. Se incluyen términos fuentes y de perdidas que permiten simular entradas y salidas de flujos, también pueden incluirse procesos de degeneración de primer orden.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(d + \zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left\{ \frac{\partial[G_{\eta\eta}(d + \zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[G_{\xi\xi}(d + \zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial wc}{\partial \sigma} = \\ \frac{d + \zeta}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} \\ + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_d(d + \zeta)c + S \quad (3.3) \end{aligned}$$

Donde:

- $c$  concentración de mása
- $D_H$  coeficiente de difusión horizontal
- $D_V$  coeficiente de difusión vertical
- $\lambda_d$  procesos de degeneración de primer orden
- $S = (d + \zeta)(q_{in}c - q_{out}) + Q_{tot}$  fuentes y perdidas por unidad de área

El oleaje se encuentra descrito por el espectro de acción de densidad de oleaje en dos dimensiones, el software DELF3D considera el espectro de densidad  $N(\sigma, \theta)$  ya que en la presencia de corrientes el espectro de densidad se conserva mientras que el espectro de energía  $E(\sigma, \theta)$  no lo hace (Whitham, 1974), siendo las variables independientes  $\sigma$  la frecuencia relativa y  $\theta$  la dirección de la ola. Ambos espectros se encuentra relacionados mediante  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$  (Deltares, 2013b). La evolución del espectro está descrita por la ecuación de balance de acción espectral (Ecuación 3.4) (Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}C_xN + \frac{\partial}{\partial y}C_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (3.4)$$

Donde el primer término representa el cambio en el espectro en el tiempo, el segundo y tercer termino la propagación en el espacio, el cuarto término el cambio en la frecuencia debido a los cambios en la profundidad y corrientes, el quinto termino representa la refracción inducida por el terreno y las corrientes y el termino de la derecha representa las fuentes en términos de densidad de energía debidas a los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales (Dingemans, 1997; Mei, 1989; Whitham, 1974).

El procedimiento general para derivar las fuerzas inducidas por las olas se compone de dos pasos: Promediar las ecuaciones de continuidad y momentum para un periodo de ola y expresar los terminos residuales en función de las propiedades de la ola. Este procedimiento solo es aplicable para profundidades uniformes, por lo que se utiliza el Promedio Langrangiano Generalizado (GLM) descrito por Andrews y McIntyre (1978).

Las ecuaciones son solucionadas usando el método de diferencias finitas. Para esto se discretiza el dominio mediante una malla curvilínea. Las variables a solucionar se arreglan en el dominio de tal forma el nivel del agua queda en el centro de las celdas y los componentes de velocidad son perpendiculares a las caras de la celda en la que están ubicados. Este arreglo se conoce como una malla Arakawa C la cual es un tipo de malla escalonada, la integración temporal se realiza mediante el método ADI (*Alternating direction implicit method*) (Leendertse, 1967, 1972).

### 3.1.1. Dominio de Cálculo (Malla)

El dominio de cálculo del modelo mostrado en la figura 3.2, se extiende entre las latitudes  $7,8^\circ$  -  $18,4^\circ$  y las longitudes  $-84,0^\circ$  -  $-60,8^\circ$ , verticalmente esta delimitado por la batimetría y topografía de la zona abarcando zonas abisales con una profundidad máxima de 5200 m hasta zonas costeras con una altura hasta 100 m aproximadamente, transversalmente se encuentra delimitado por la linea costera de los países del Caribe. Se encuentra discretizado mediante una malla estructurada curvilínea de 110000 celdas con un rango de tamaño que va desde 2000 m en zonas costeras y poco profundas, hasta 9700 m en zonas de mayor profundidad.

Para la discretización en vertical se analizaron por separado los distintos procesos involucrados: Los procesos hidrodinámicos por si solos, se reproducen de forma correcta utilizando una discretización de 5 capas, de acuerdo a los resultados observados aumen-

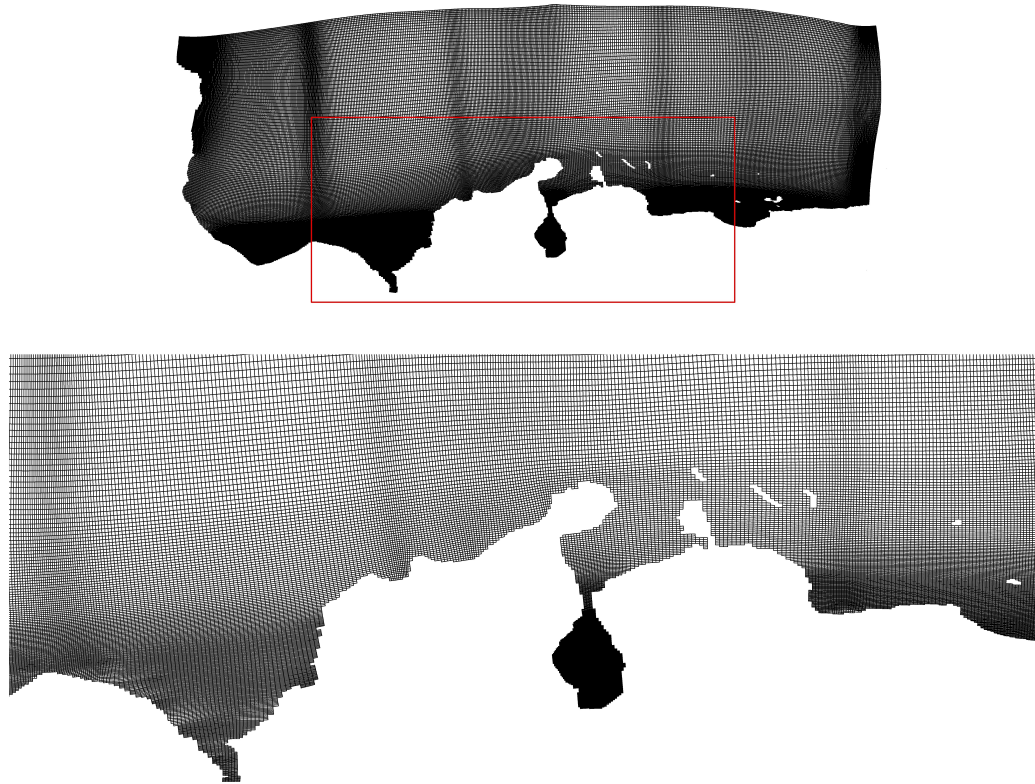


Figura 3.2: Malla de cálculo del modelo

tar el número de capas no genera cambios significativos en los resultados obtenidos; Los procesos de oleaje, al ser procesos netamente superficiales, son sensibles a la discretización de la capa superficial del modelo, se determinó que era necesario mantener una capa superficial de 1 % de acuerdo a los resultados de Posada Jaramillo (2013), para reproducir de forma correcta la interacción entre el oleaje y las corrientes; Los gradientes termohalinos requieren una discretización muy fina para ser reproducidos utilizando modelos tipo  $\sigma$ , los modelos encontrados en la literatura hacen referencia a discretizaciones mayores a 30 capas, ya que las profundidades de las capas no son fijas sino que varían de acuerdo con el nivel de mar, para el caso del Caribe, los perfiles de temperatura y salinidad ubican los mayores gradientes en los primeros 300  $m$  y valores casi constantes a partir de los 1500  $m$ . Sin embargo con la capacidad computacional disponible no es posible realizar una discretización tan fina.

De acuerdo a lo anterior se optó por discretizar el modelo con 12 capas en la vertical (máximo permitido de acuerdo a la capacidad computacional disponible) distribuidas de la superficie al fondo como se menciona a continuación: 1 %, 4 %, 5 %, 5 %, 5 %, 5 %, 5 %, 5 %, 5 %, 5 %, 5 %, 5 %.

10 %, 10 %, 10 %, 15 %, 15 % y 15 %.

### 3.1.2. Condiciones de Frontera

El modelo cuenta con tres tipos de condiciones de frontera las cuales representan los límites del modelo y su interacción con el resto del océano y corresponden con los procesos que se incluyen: hidrodinámica, oleaje y de transporte. Las fronteras hidrodinámicas corresponden a los niveles de marea astronómicos, ingresados a partir de sus componentes armónicas de amplitud y fase; las fronteras de oleaje corresponden a los valores de altura significativa de ola, periodo pico y dirección, sin embargo el modelo también puede ser ejecutado sin introducir condiciones de frontera de oleaje, esto permite disminuir el número de datos de entrada necesarios y facilita su ejecución al disminuir la dependencia de fuentes de información externas, por lo tanto en la sección de calibración se analizará si es necesario incluir estas fronteras, de acuerdo a comparaciones con mediciones en la zona; las fronteras de transporte consisten en los perfiles de temperatura y salinidad, debido a que la información disponible es limitada, se optó por delimitar el modelo mediante perfiles promedio, calculados a partir de los datos disponibles.

Las fronteras del modelo se introducen mediante puntos de control que las delimitan y en los cuales se asignan valores a las respectivas variables, los valores en los puntos intermedios se calculan mediante interpolación. Para determinar los puntos de control necesarios para cada uno de los tipos de frontera se procedió a analizar el comportamiento de las respectivas variables a lo largo de las fronteras. Para las fronteras hidrodinámicas se calculó el nivel de marea astronómico con un intervalo horario para un periodo de un mes, en puntos ubicados a lo largo de las fronteras del modelo con un espaciamiento medio de  $1,0^\circ$ , en latitud o longitud dependiendo de la orientación de la frontera. Se observó el cambio del nivel de marea entre puntos y se determinaron como puntos de control aquellos que garantizaran un cambio medio entre ellos menor a 0.05 m. Para el oleaje se procedió de manera similar se calcularon series de altura significativa de ola para dos periodos de un mes (correspondientes a las épocas climáticas húmeda y seca del Caribe) con un intervalo de 3 horas (resolución del modelo WWIII), en puntos consecutivos espaciados  $0,16^\circ$  en latitud o longitud dependiendo de la orientación de la frontera. Se observó el cambio de la altura significativa entre puntos consecutivos, con ésto se determinó que los datos en la época seca presentaban mayor variación por lo que se tomo esta época como referencia y como puntos de control se seccionaron puntos

que garantizaran un cambio medio entre ellos menor a 0.5 m.

Para las fronteras de transporte se procedió de forma diferente, teniendo en cuenta que no hay datos disponibles para periodos continuos de tiempo ni a lo largo de puntos consecutivos, por lo que es necesario trabajar con perfiles medios. Adicionalmente para este tipo de condiciones de frontera es necesario considerar la discretización vertical, ya que los perfiles se introducen como valores en las capas en cada uno de los puntos de control y la profundidad de las capas respectivas a cada punto de control varía de acuerdo con el valor de la batimetría en cada punto. De acuerdo a lo anterior para determinar los puntos de control se analizó la batimetría a lo largo de las fronteras del modelo y se determinaron como puntos de control los puntos de inflexión de ésta.

Por último se consideró que los puntos de las fronteras hidrodinámicas deben coincidir con los correspondientes a las fronteras de transporte, al comparar los puntos seleccionados para cada una, se observó que las fronteras de transporte presentaban una discretización mayor que las fronteras hidrodinámicas, por lo que se utilizó esta discretización como definitiva, cumpliendo de esta manera los criterios establecidos para ambas fronteras. La figura 3.3 muestra los puntos de discretización a lo largo de las fronteras.

### 3.1.3. Forzadores Externos

Adicionalmente a los forzamientos generados mediante las condiciones de frontera, el modelo incluye los siguientes procesos:

- Fuerzas resultantes de las interacciones gravitacionales actuando sobre las mareas.
- Influencia de arrastre del viento.
- Influencia de la presión atmosférica.
- Modelo para intercambio de calor por la superficie libre.
- Descarga media de los principales afluentes del Caribe.

Los datos meteorológicos necesarios: velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, nubosidad y radiación solar neta, se introducen mediante mallas a partir de las cuales se interpolan los datos a las celdas del modelo.

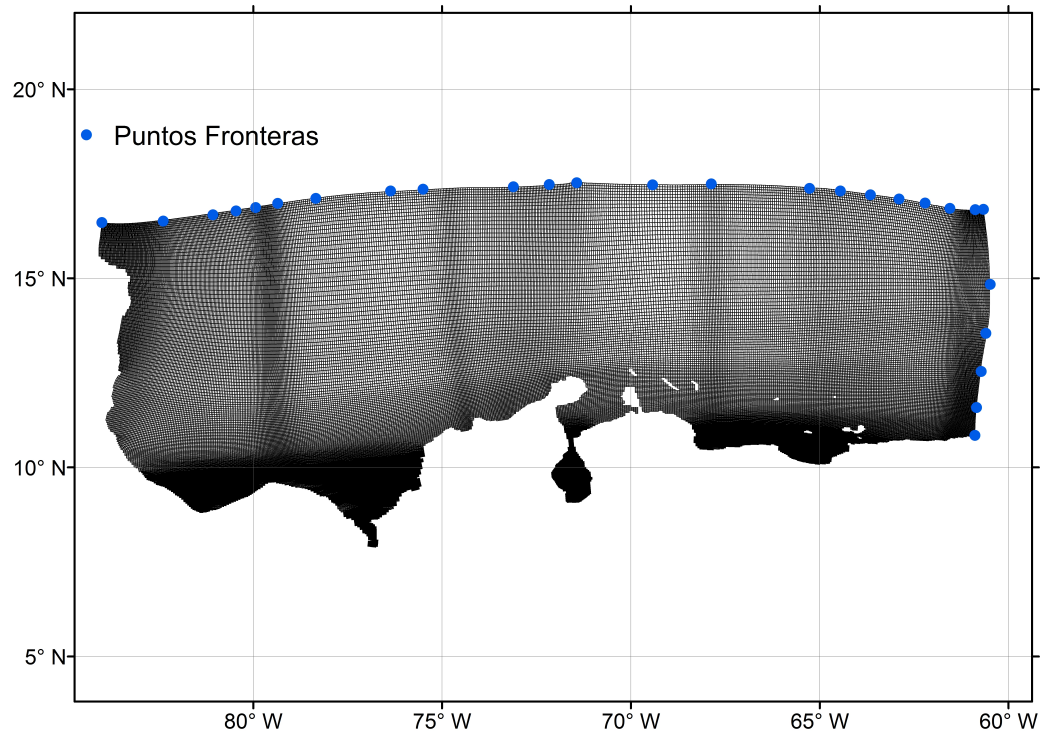


Figura 3.3: Puntos de control para las fronteras del modelo

## 3.2. Análisis de Sensibilidad

La primera fase de la modelación consistió en la realización de un análisis de sensibilidad espacial del modelo a cambios en los parámetros numéricos del mismo. Para esto se usó como referencia la metodología propuesta por Escobar (2010); Escobar y Pérez Mesa (2009), en la cual se hacen comparaciones celda a celda entre una simulación definida como patrón y simulaciones en las que se modifican los parámetros de interés. De esta forma se determinó si las variaciones en los parámetros numéricos del modelo conllevan variaciones significativas en los resultados del mismo (corrientes, oleaje y mareas). Con esta información se seleccionó una configuración acorde para el modelo la cual considera la influencia de los parámetros numéricos sobre los resultados y el costo computacional que implican las distintas configuraciones.

Las simulaciones para el análisis de sensibilidad se realizaron para el mes de enero de 2010, los casos considerados se presentan en la tabla 3.1, como simulación patrón se seleccionó la simulación con los valores de los parámetros más refinados. Para cada una

de las variables se calculó la variación absoluta promedio y la variación absoluta relativa promedio de acuerdo a las ecuaciones 3.5 y 3.6, mediante el uso de los estadísticos MAE y RMAE tomando como datos medidos los resultados de la simulación patrón.

Parámetro	Valores
Número de celdas malla	110000 - 40000
Int. tiempo Hidrodinámica	3 min - 5 min - 10 min
Int. tiempo Oleaje	180 min - 360 min

Tabla 3.1: Parámetros considerados en el análisis de sensibilidad del modelo

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_f} |Vp(m, n)_t - V(m, n)_t| \quad (3.5)$$

$$RMAE = \frac{MAE}{\frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_f} |Vp(m, n)_t|} \quad (3.6)$$

Donde:  $Vp(m, n)_t$  es el valor de la variable de interés en la celda (m,n) para el tiempo t en la simulación patrón,  $V(m, n)_t$  es el valor de la variable de interés en la celda (m,n) para el tiempo t en la simulación modificada,  $t_0$  es el tiempo inicial de la simulación,  $t_f$  es el tiempo final de la simulación y  $T$  es el número total tiempos de simulación. Las variaciones de cada una de las celdas se refieren como variaciones locales, mientras que el promedio de la variación de todas las celdas de la malla se refiere como variación global.

### 3.2.1. Intervalo de tiempo hidrodinámico

Para el análisis del delta de tiempo para el cálculo hidrodinámico se generaron dos modelos: un modelo en 3 dimensiones con oleaje con intervalo de tiempo de 5 minutos y un modelo en 3 dimensiones con oleaje con intervalo de tiempo de 10 minutos, los cambios globales con respecto al modelo patrón se presentan en las tablas 3.2, 3.3 y 3.4

Modelo	MAE Marea (m)	RMAE Marea (%)
Modelo 5 min	0,011	8,68
Modelo 10 min	0,022	16,39

Tabla 3.2: Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo hidrodinámico para la marea

Los resultados muestran que el oleaje no presenta cambios significativos en ninguno de los casos, por otra parte las mareas y los corriente sí se ven afectadas, con cambios

<b>Modelo</b>	<b>MAE Corrientes (m/s)</b>	<b>RMAE Corrientes (%)</b>
Modelo 5 min	0,0031	7,22
Modelo 10 min	0,0082	19,28

Tabla 3.3: Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo hidrodinámico para las corrientes

<b>Modelo</b>	<b>MAE Hs (m)</b>	<b>RMAE Hs (%)</b>
Modelo 5 min	0,0045	0,43
Modelo 10 min	0,0063	0,60

Tabla 3.4: Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo hidrodinámico para la altura significativa de ola

medios de 8% y 7% respectivamente para la comparación con el modelo de 5 min y cambios mayores a 10% para el modelo de 10 min, los cambios más significativos se presentaron a lo largo de las costas, en zonas cercanas a las islas y en las zonas cercanas al elevado de Nicaragua, el dorsal de beata y el risco de las aves, como se observa en la figura 3.4, en la cual se muestran las variaciones absolutas de la simulación con tiempo de 5 minutos con respecto a la patrón para la velocidad promedio de las corrientes. Los resultados muestran que aunque aumentar el intervalo de tiempo hidrodinámico disminuye el tiempo de cómputo, no es justificable debido a los efectos sobre los resultados del modelo.

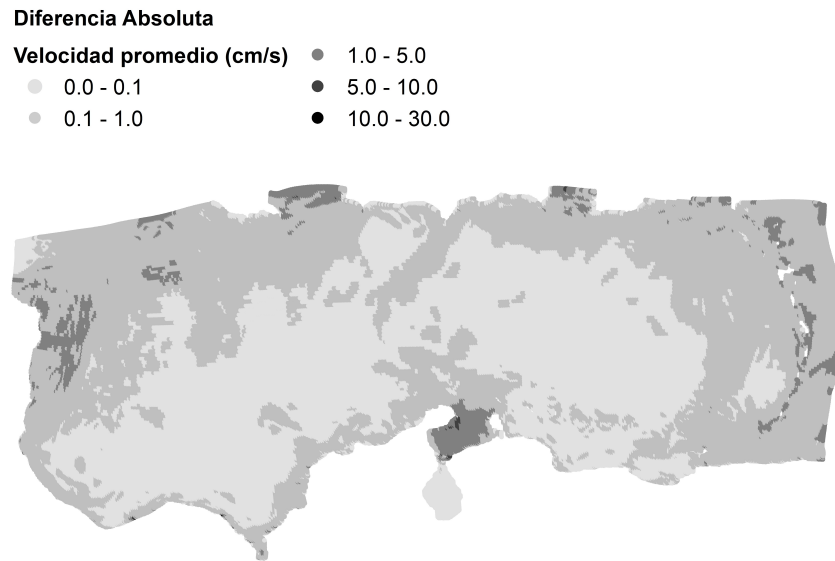


Figura 3.4: Comparación del modelo patrón con el modelo con oleaje en 3 dimensiones con intervalo de tiempo hidrodinámico de 5 min para la velocidad promedio

### 3.2.2. Intervalo de tiempo de oleaje

Para el análisis del intervalo de tiempo del cálculo de oleaje se configuró un modelo con intervalo de tiempo de oleaje de 360 minutos. Las tablas 3.5, 3.6 y 3.7 muestran los cambios con respecto al modelo patrón.

Modelo	MAE Marea (m)	RAME Marea (%)
Modelo 360 min	0,0006	0,50

Tabla 3.5: Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo de oleaje para la marea

Modelo	MAE Corrientes (m/s)	RMAE Corrientes (%)
Modelo 360 min	0,0003	0,89

Tabla 3.6: Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo de oleaje para las corrientes

Modelo	MAE Hs (m)	RAME Hs (%)
Modelo 360 min	0,0054	0,50

Tabla 3.7: Análisis de sensibilidad: Intervalo de tiempo de oleaje para la altura significativa de ola

Los resultados mostraron que ninguna de las variables presentó cambios significativos al aumentar el intervalo de calculo de tiempo de oleaje a 360 min, todas las variables mostraron cambios por debajo del 1%. Adicionalmente se compararon los cambios de las corrientes en la capa superficial del modelo, que es la capa más sensible a los efectos del oleaje y se encontró como se muestra en la figura 3.5, en la cual se presenta la variación absoluta del modelo de 360 minutos con respecto al patrón, para las corrientes superficiales, en ésta se evidencia que los cambios tampoco fueron significativos, presentándose una variación media por debajo del 3%. Este comportamiento puede explicarse al considerar que el viento principal forzador de oleaje, se introduce con un intervalo de tiempo de 6 horas. Como contra parte a nivel de costo computacional este cambio si resulta muy significativo, ya que el oleaje es el proceso que más tiempo de cómputo requiere, por lo que duplicar el intervalo de tiempo de calculo de oleaje (180 min a 360 min), disminuye el tiempo de simulación en 35%. Considerando lo anterior permite se puede concluir que el intervalo de tiempo de oleaje acorde para el modelo es de 360 min.

**Diferencia Absoluta**

<b>Velocidad superficial (cm/s)</b>	● 1.0 - 5.0
● 0.0 - 0.1	● 5.0 - 10.0
● 0.1 - 1.0	● 10.0 - 30.0



Figura 3.5: Comparación del modelo patrón con el modelo con oleaje en 3 dimensiones con intervalo de tiempo de oleaje de 360 min para la velocidad superficial

### 3.2.3. Número elementos de la malla

El último caso considerado fue el número de elementos de la malla, para esto se configuró un modelo con una malla de 40000 elementos que corresponde a desrefinar por un factor de 2 en ambas direcciones. Se debe tener en cuenta que para refinar o desrefinar la malla es necesario hacerlo en la misma proporción en las dos direcciones de tal forma que se mantengan los patrones y los valores de las propiedades de la malla. Al tener dos mallas de tamaños distintos fue necesario interpolar los datos de la malla de 40000 elementos a las posiciones de la malla original, para de esta forma realizar la comparación celda a celda, los resultados se muestran en la tabla 3.8

Los resultados mostraron cambios significativos en las mareas y las corrientes con valores de 19 % y 45 % respectivamente, el oleaje por otra parte presentó cambios, pero éstos no fueron tan significativos con un valor medio de 5 %. Mostrando que reducir el número de elementos de la malla de 110000 a 40000 no es justificable debido a los efectos en los resultados. Se aclara que no se evaluaron casos con un número de elementos mayor al definido en la simulación patrón, ya que no es posible ejecutarlo con la capacidad computacional disponible.

<b>Variables</b>	<b>VAP</b>	<b>VARP (%)</b>
Marea ( $m$ )	0,025	19,91
Corrientes ( $m/s$ )	0,01168	45,48
A.S. Ola ( $m/s$ )	0,0306	5,20

Tabla 3.8: Análisis de sensibilidad: Número elementos de la malla

# Capítulo 4

## Calibración y Validación

### 4.1. Calibración

La calibración es el proceso en el que se determinan los valores de los parámetros físicos de las simulaciones de los cuales se tiene un nivel de incertidumbre, de tal forma que los resultados obtenidos se ajusten de mejor manera a la realidad. La metodología para realizar este proceso consiste en ir modificando los valores de los parámetros, dentro de intervalos coherentes con la realidad, y comparar los resultados obtenidos con mediciones.

Las comparaciones con los valores medidos, se realizan mediante el cálculo de los estadísticos MAE, RMAE (Descritos en secciones anteriores) y ARMAE (Ecuación 4.1). Durante el proceso se modifica el valor de un parámetro a la vez, se determina el valor adecuado para éste, luego con el valor de este parámetro calibrado se continua a modificar el siguiente parámetro. Aunque esta metodología va fijando un parámetro a la vez, para los parámetros más sensibles, resulta recomendable realizar verificaciones con las configuraciones finales de otros parámetros, de tal forma que se consideren las correlaciones existentes entre éstos.

$$ARMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - t_i| - OE}{|\langle t_i \rangle|} \quad (4.1)$$

Donde  $p_i$  es el valor modelado,  $t_i$  es el valor medido,  $|\langle t_i \rangle|$  es el promedio de los valores absolutos de las mediciones,  $OE$  es el error de las observaciones y  $n$  es el número de datos. Para el caso del ARMAE se tiene que valores negativos en el numerador se convierten a cero antes de promediar.

Para realizar el proceso de calibración se seleccionó el periodo comprendido entre enero y abril de 2010, el cual corresponde a la época climática seca del Caribe y el periodo comprendido entre agosto y noviembre de 2010, correspondiente a la época húmeda del Caribe. Se consideraron las dos épocas debido a la disponibilidad de datos y que ambas épocas presentan características diferentes.

Como fuentes de información para evaluar el desempeño del modelo para el proceso de calibración se usaron: Mediciones de 4 mareógrafos ubicados a lo largo de la costa Caribe y 1 mareógrafo ubicado en zona de aguas profundas; mediciones de 4 boyas de oleaje ubicadas a lo largo del Caribe; puntos de observación correspondientes con mediciones de perfiles de temperatura y salinidad realizados en la época seleccionada; boyas a la deriva virtuales las cuales permiten observar los patrones de corrientes modelados. La ubicación de los elementos descritos anteriormente se muestra en la figura 4.1.

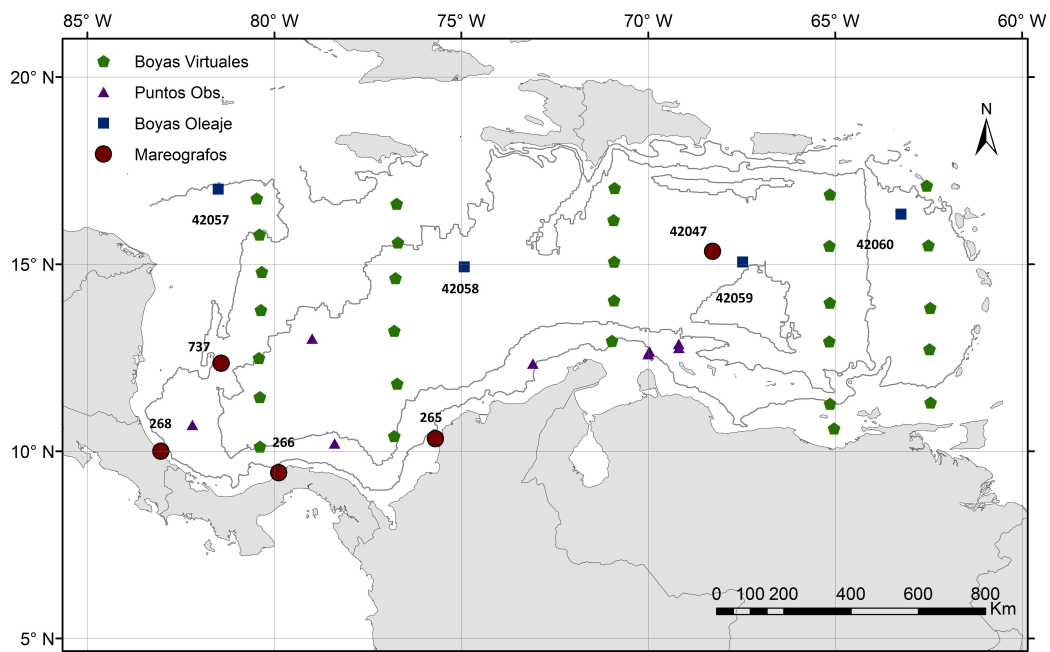


Figura 4.1: Ubicación de los puntos de medición y referencia utilizados para el proceso de calibración

En la fase de calibración además de los parámetros físicos, también se consideraron los efectos de incluir algunos procesos en las simulaciones como: Fuerzas gravitatorias, procesos de transporte y oleaje, adicionalmente algunos de los parámetros fueron sometidos a variación espacial. En las tablas 4.1 a 4.6 se presentan los parámetros considerados y sus respectivos valores.

Parámetros	Valores
Coefficiente de rugosidad manning	0,015 - 0,020 - 0,021 - 0,025

Tabla 4.1: Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Rugosidad

Parámetros	Valores
Fuerzas gravitatorias	Si - No
Procesos de Transporte	Si - No
Interacción Oleaje Corrientes	Si - No

Tabla 4.2: Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Procesos

Parámetros	Valores
Coefficiente dragado viento ( $0m/s$ )	0,001176 - 0,01752 - 0,002352 - 0,003

Tabla 4.3: Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Viento

Parámetros	Valores
Viscosidad de remolino horizontal	100 - 300 - 500 - 700
Viscosidad de remolino vertical	0,000 - 0,001 - 0,010 - 0,100
Difusividad de remolino horizontal	1,0 - 10 - 50 - 100
Difusividad de remolino vertical	0,000 - 0,001 - 0,010 - 0,100
Escala de Ozmidov	0,00 - 0,01 - 0,05 - 0,10

Tabla 4.4: Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Viscosidad

Parámetros	Valores
Modelo de Calor	Ocean - Absolute Flux - Murakami
Nubosidad (%)	0 - 25 - 50 - 100
Profundidad Secchi	0 - 2 - 5 - 10
Número de Dalton para evaporación	0,001 - 0,0013 - 0,005 - 0,010
Número de Staton para convección	0,001 - 0,0013 - 0,005 - 0,010

Tabla 4.5: Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Modelo de Calor

Parámetros	Valores
Factor de corrección de amplitud de mareas	0,9 - 1,0 - 1,1 - 1,2
Coefficiente de reflexión alpha	0 - 100 - 1000 - 10000
Retardos de Thatcher - Harleman	0 - 30 - 60 - 120

Tabla 4.6: Valores de los parámetros considerados en el proceso de calibración - Fronteras

*\*Los coeficientes de dragado de viento se obtuvieron de Yelland et al. (1998) y los valores de coeficiente de Manning variable se obtuvieron de Lynch y Davies (1995)*

El proceso de calibración mostró que los factores más influyentes en los resultados de las simulaciones corresponden a la inclusión de distintos procesos: La inclusión de las fuerzas gravitatorias sobre la marea generaron una reducción de alrededor de 10 %, en los errores calculados con respecto a las mediciones de los mareógrafos; los procesos de transporte modificaron de forma significativa los patrones de circulación del modelo, permitiendo que se observará de forma clara la corriente del Caribe y el giro de Panamá - Colombia, al igual que varios fenómenos de circulación profunda; la interacción del oleaje y las corrientes generó cambios significativos sobre las corrientes superficiales en especial en la zona de aguas pocos profundas.

De los otros parámetros se mencionan: el coeficiente de dragado de viento que presenta influencia significativa sobre el oleaje, principalmente la altura significativa de ola; el coeficiente de rugosidad de manning influye sobre las corrientes y las mareas en las zonas muy poco profundas; el coeficiente de difusividad de remolino vertical afecta de forma significativa los perfiles de temperatura y salinidad principalmente en las zonas de aguas profundas. Adicionalmente se debe mencionar que los parámetros correspondientes al modelo de Calor presentaron comportamientos muy diferenciados entre zonas de aguas costeras y zonas de aguas profundas, sin embargo la plataforma DELFT3d no permite hacer esta diferenciación para todos los parámetros por lo que fue necesario seleccionar valores medios.

De los parámetros referentes a las condiciones de frontera el parámetro más relevante es el coeficiente de reflexión alpha, el cual permite estabilizar las condiciones de frontera de mareas astronómicas con las condiciones de frontera de transporte, sin embargo valores muy altos generan que las mareas modeladas presenten amplitudes por debajo de las medidas, por lo que se seleccionaron valores diferenciados para las distintas secciones de frontera, buscando que el modelo fuera estable y que la precisión de los resultados de marea fuera aceptable, a las secciones de frontera correspondientes a los cambios en la batimetría más pronunciados se les asignaron los valores más altos. En Las tablas 4.7 a 4.12 muestran los valores de los parámetros calibrados.

Parámetros	Valores
Coefficiente de rugosidad manning	0,015

Tabla 4.7: Valores de los parámetros calibrados - Rugosidad

Parámetros	Valores
Fuerzas gravitatorias	Si
Procesos de Transporte	Si
Interacción Oleaje Corrientes	Si

Tabla 4.8: Valores de los parámetros calibrados - Procesos

Parámetros	Valores
Coefficiente dragado viento ( $0m/s$ )	0,003

Tabla 4.9: Valores de los parámetros calibrados - Viento

Parámetros	Valores
Viscosidad de remolino horizontal	500
Viscosidad de remolino vertical	0,001
Difusividad de remolino horizontal	10
Difusividad de remolino vertical	0,001
Escala de Ozmidov	0,05

Tabla 4.10: Valores de los parámetros calibrados - Viscosidad

Parámetros	Valores
Modelo de Calor	Ocean
Nubosidad (%)	0
Profundidad Secchi	5
Número de Dalton para evaporación	0,001
Número de Staton para convección	0,001

Tabla 4.11: Valores de los parámetros calibrados - Modelo de Calor

Parámetros	Valores
Factor de corrección de amplitud de mareas	1,0
Coefficiente de reflexión alpha	1000
Retardos de Thatcher - Harleman	0

Tabla 4.12: Valores de los parámetros calibrados - Fronteras

Las simulaciones calibradas al ser comparadas con mediciones presentó para la marea en zonas costeras un MAE de aproximadamente  $0,036 m$  para la época seca correspondiente a un RMAE de  $36 \%$ , para aguas profundas se obtuvieron mejores resultados con un MAE de  $0,027 m$  que corresponde a un RMAE de  $34 \%$ , por otra parte para la época húmeda se observó que a lo largo de la costa Colombiana se mantuvo el mismo comportamiento que para la época seca en términos de errores absolutos con un MAE

0,03 m, sin embargo en las zonas de Nicaragua y Panamá se observó un aumento de los errores con un MAE de 0,04 m, correspondiente a un RMAE del 53 %. Adicionalmente en la zona de San Andrés Colombia se obtuvo un comportamiento diferenciado con un MAE de 0,055 m, el más alto obtenido, correspondiente a un RMAE de 49 %, este valor se ve influenciado por el tamaño de las islas de San Andrés y Providencia, las cuales debido a la resolución de la celdas de la malla no se representan de forma adecuada. Las tablas 4.13 y 4.14 muestran los resultados mencionados.

<b>Estación</b>	<b>MAE (m)</b>	<b>RMAE (%)</b>
265	0,030	27,22
266	0,041	53,20
268	0,040	52,10

Tabla 4.13: Errores obtenidos al comparar los resultados de marea simulados contra mediciones para la época húmeda de 2010

<b>Estación</b>	<b>MAE (m)</b>	<b>RMAE (%)</b>
265	0,035	34,99
266	0,038	36,35
268	0,041	39,77
737	0,055	49,34
42047	0,027	34,02

Tabla 4.14: Errores obtenidos al comparar los resultados de marea simulados contra mediciones para la época seca de 2010

Adicionalmente la figura 4.2, muestra a la derecha una gráfica de dispersión de la marea modelada contra la medida, a la izquierda la marea contra el tiempo para la serie modelada y la medida, ésta permite observar el comportamiento del modelo al ser comparado con el mareógrafo para dos de los casos mencionados, mostrando que las simulaciones logran una buena correlación con las mediciones y sigue de forma correcta la tendencia de éstas. Siendo la causa de los errores observados las discrepancias en las amplitudes máximas en algunos de los puntos.

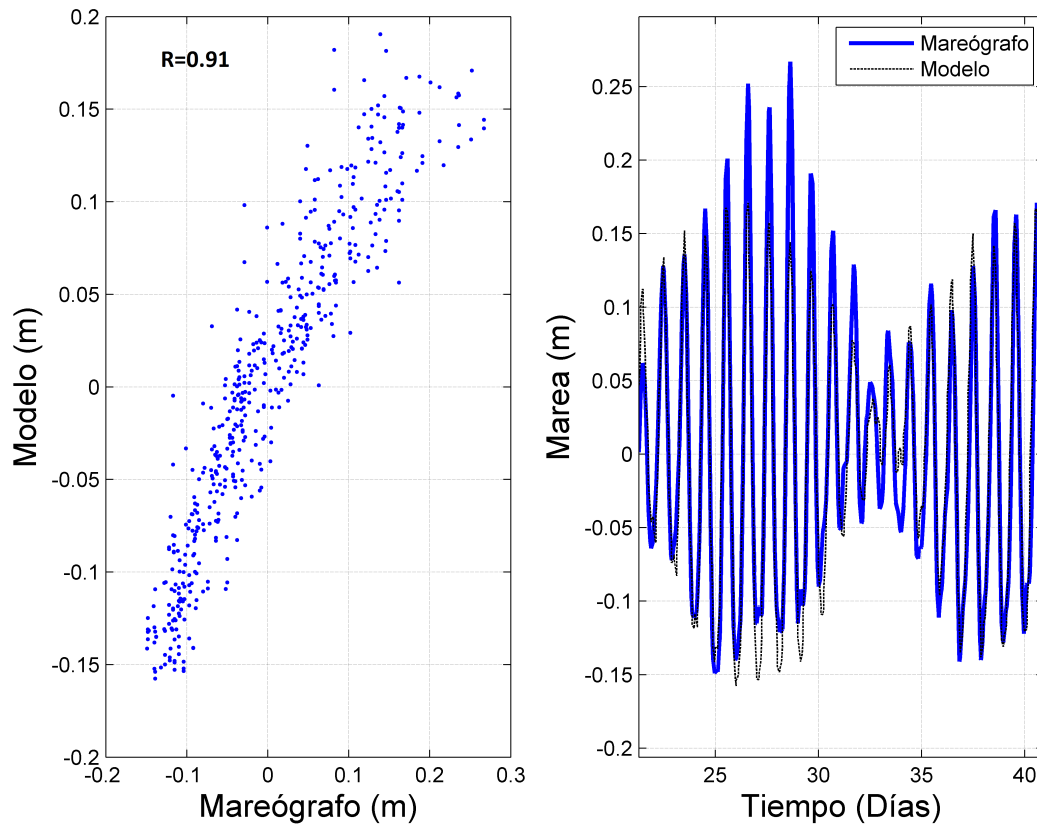


Figura 4.2: Comparación de los datos del modelo para la marea con los datos del mareógrafo en zona de aguas profundas (Estación 42047) para la época seca de 2010

Para el olaje sólo se realizaron comparaciones para la época húmeda de 2010 debido a la disponibilidad de datos, para la altura significativa de ola se obtuvieron MAE de 0,284 (m) y 0,32 (m), RMAE de 23,53 % y 26,28 % y ARMAE de 16,31 % y 18,86 %, correspondientes a las estaciones 42059 y 42060 respectivamente, se denota que la estación 42060 se encuentra más cerca a las fronteras y que no se están utilizando fronteras de oleaje a partir de datos de modelos externos, lo cual puede explicar el leve aumento en los errores. Los resultados obtenidos clasifican los resultados simulados entre excelente y razonable de acuerdo a Sutherland et al. (2004) y van Rijn et al. (2003) respectivamente.

De igual manera las figura 4.3, muestra la comparación de los datos simulados con respecto a las mediciones, se presenta a la izquierda la altura significativa de ola contra el tiempo para la serie modelada y la medida, a la derecha la rosa de oleaje modelado, en ésta se observa que aunque no se contaban con datos para comparar la dirección, los resultados obtenidos son lógicos y son consecuentes con el comportamiento general del

viento.

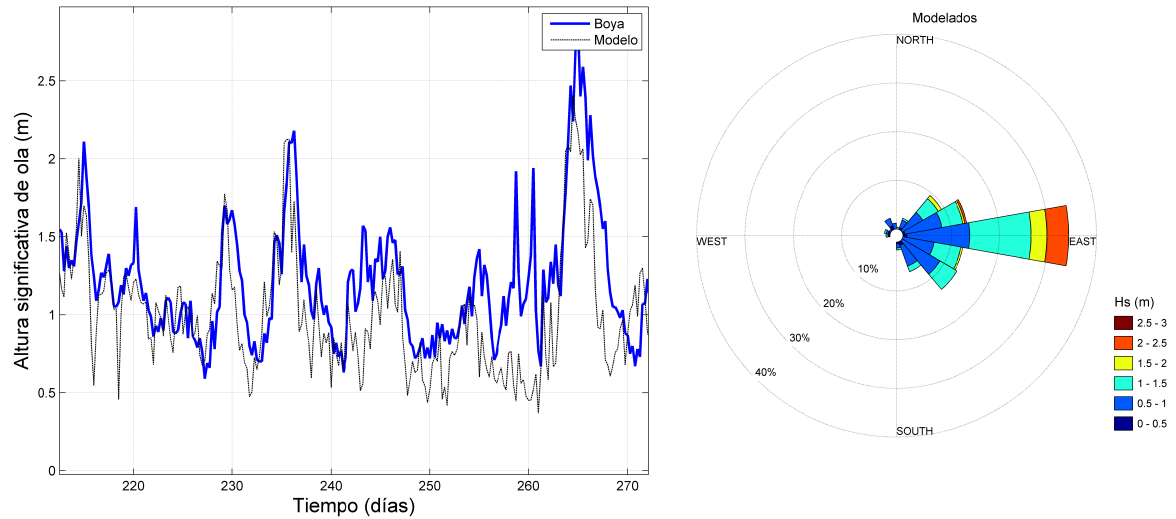


Figura 4.3: Comparación de los datos del modelo para el oleaje con los datos medidos en la estación 42095 para la época húmeda de 2010 - Rosa de Oleaje modelado

## 4.2. Validación

El proceso de validación permite comprobar que las simulaciones mantienen el desempeño alcanzado mediante la calibración, en periodos de tiempo diferentes. Para esto se ejecutaron simulaciones en los periodos comprendidos entre el primero de enero y abril de 2011 y el periodo comprendido entre agosto y noviembre de 2011, que corresponden igual que en la calibración, a las dos épocas climáticas del Caribe. Los resultados se compararon contra los datos de las estaciones de medición mostrados en la sección de calibración.

Para las mareas se observó un comportamiento muy similar para las dos épocas climáticas, a diferencia de lo observado en el proceso de calibración, en la zona costera para la época seca se obtuvo un MAE medio de 0,04 m correspondiente a un RAME de 44% y para la época húmeda se obtuvo un MAE medio de 0,039 m correspondiente a un RAME de 43%. Para la zona de aguas profundas la época seca presentó un MAE de 0,028 m correspondiente a un RAME de 42,18% y en la época húmeda se obtuvo un MAE de 0,026 m correspondiente a un RAME de 39,82%. Las tablas 4.15 y 4.16 muestran los resultados obtenidos. Se observó que en general para la época seca se obtuvo un comportamiento muy similar al mostrado en la etapa de calibración y para la época húmeda se observó una reducción en los errores obtenidos.

Estación	MAE (m)	RMAE (%)
266	0,040	44,68
267	0,037	42,37
42047	0,026	39,82

Tabla 4.15: Errores obtenidos al comparar los resultados de marea simulados contra mediciones para la época húmeda de 2011

Estación	MAE (m)	RMAE (%)
265	0,039	43,91
266	0,041	48,01
268	0,042	47,83
737	0,028	42,18

Tabla 4.16: Errores obtenidos al comparar los resultados de marea simulados contra mediciones para la época seca de 2011

Adicionalmente la figura 4.4, muestra a la derecha una gráfica de dispersión de la marea modelada contra la medida, a la izquierda la marea contra el tiempo para la serie modelada y la medida, está permite observar que de igual manera a lo observado en la calibración, el modelo presenta un correcta correlación y sigue de forma adecuada la tendencia de las mediciones, siendo la causa del error las discrepancias de la amplitud en algunos puntos.

Para el oleaje los datos mostraron para la época húmeda resultados similares a los obtenidos para el periodo de calibración con leves mejoras, para la época seca se observó que los errores absolutos presentaron errores muy similares, sin embargo dado que en esta época los regímenes de oleaje son mayores debido al aumento en la velocidad del viento, los errores relativos obtenidos si presentaron una reducción significativa. Los resultados obtenidos se presentan en las tabla 4.17.

Estación	MAE (m)	RMAE (%)	ARMAE (%)
42059 Seca	0,30	14,84	10,36
42060 Seca	0,32	18,41	13,34
42058 Húmeda	0,265	21,54	14,41
42059 Húmeda	0,292	21,48	15,01
42060 Húmeda	0,308	24,98	17,68

Tabla 4.17: Errores obtenidos al comparar los resultados de oleaje simulados contra mediciones para las épocas seca y húmeda de 2011

De acuerdo a los resultados obtenidos las simulaciones mantienen la clasificación

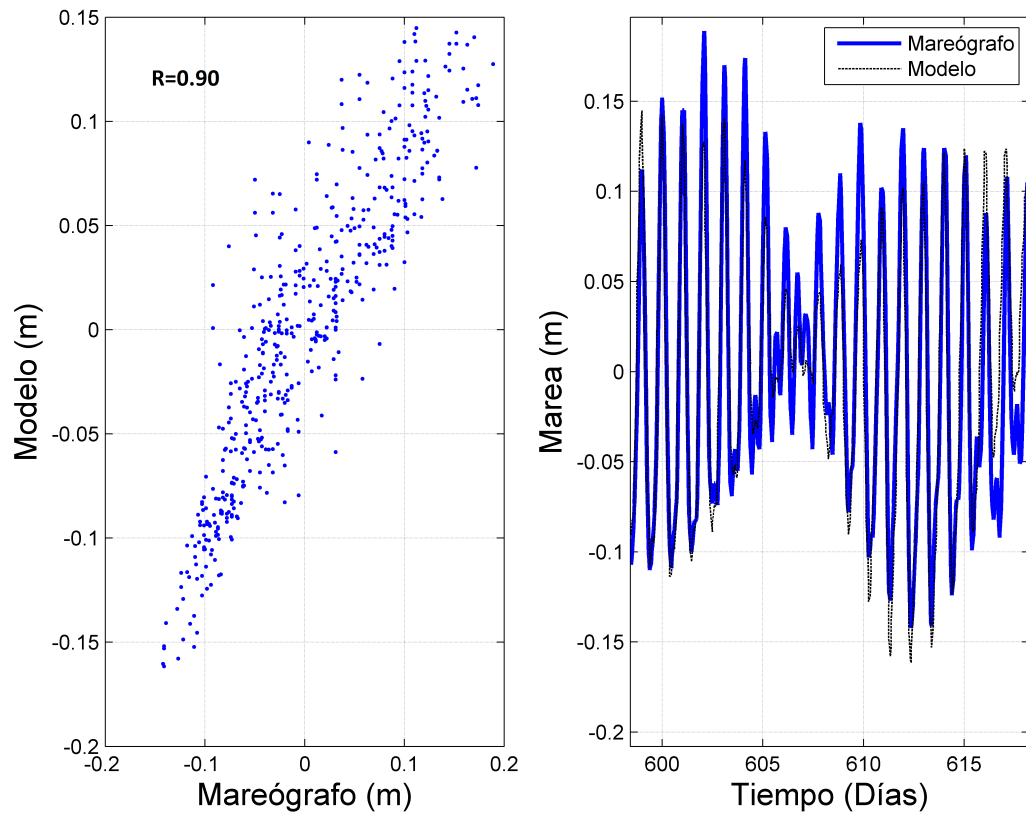


Figura 4.4: Comparación de los datos del modelo para la marea con los datos del mareógrafo en zona de aguas profundas (estac para la época húmeda de 2011)

entre excelente y razonable de acuerdo a Sutherland et al. (2004) y van Rijn et al. (2003) respectivamente. Adicionalmente los figura 4.5, muestra la comparación de los datos del modelo con respecto a las mediciones, se presenta a la izquierda la altura significativa de ola contra el tiempo para la serie modelada y la medida, a la derecha la rosa de oleaje modelado,, se observa que en la época seca no solo se observa un aumento de la altura significativa media sino que la dirección se vuelve mucho más homogéna que la observada en la época húmeda.

Para los fenómenos de transporte temperatura y salinidad, los resultados del modelo son consistentes con los perfiles medios medidos que se presentan en la región Caribe, sin embargo debido a la resolución de las celdas tanto horizontal como verticalmente y a que las condiciones de fronteras consisten en perfiles medios, no es posible observar las pequeñas variaciones en la termoclina y haloclina que se presentan de acuerdo a la época y zona.

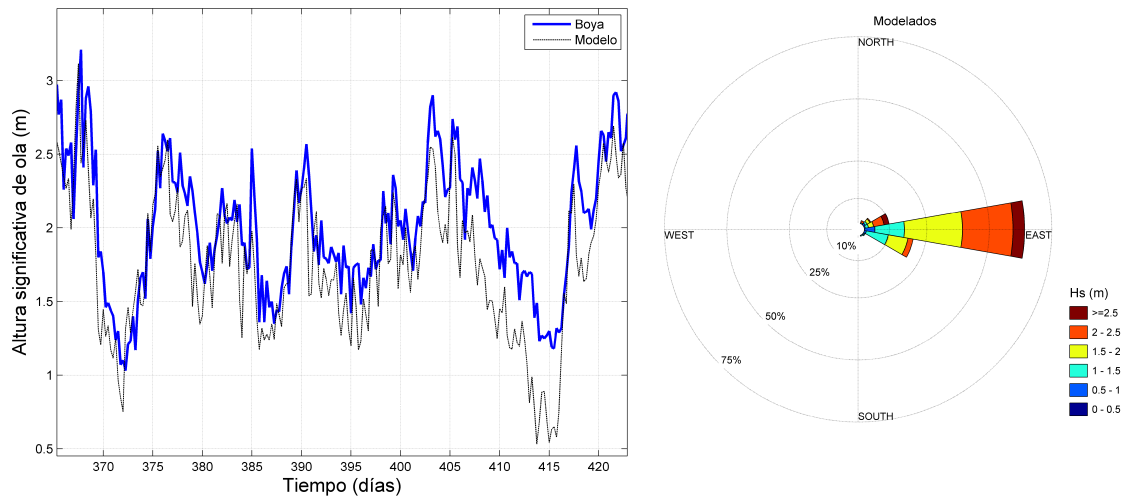


Figura 4.5: Comparación de los datos simulados para el oleaje con los datos medidos en la estación 42059 para la época seca de 2011 - Rosa de Oleaje modelado

Por último debido a que la información de las corrientes se encuentra muy limitada y existen pocas mediciones, es necesario compararlos de acuerdo a los patrones generales observados. Las figuras 4.6 y 4.7 muestran rosas de corrientes (Dirección corresponde a de donde vienen las corrientes) para las épocas secas y húmedas en distintos puntos ubicados a lo largo del dominio. En las figuras son visibles los patrones característicos de la circulación del Caribe como: (I) La dirección de la corriente del Caribe a lo largo del dominio, entrando desde el norte por las Antillas menores para salir por el estrecho de Nicaragua descrita por Richardson (2005), (II) las zonas de mayor velocidad en las cuales es posible encontrar velocidades máximas de  $1,0 \text{ m/s}$ , ubicadas cerca de la península de la Guajira - Colombia y al pasar por el estrecho de Nicaragua descritas por Richardson (2005), (III) el aumento de velocidad propio de la época seca y ((IV)) la corriente proveniente del norte a lo largo de la costa Colombiana en la región de Cartagena caracterizada por velocidades por debajo de los  $0,5 \text{ m/s}$  descrita por Molina et al. (1996).

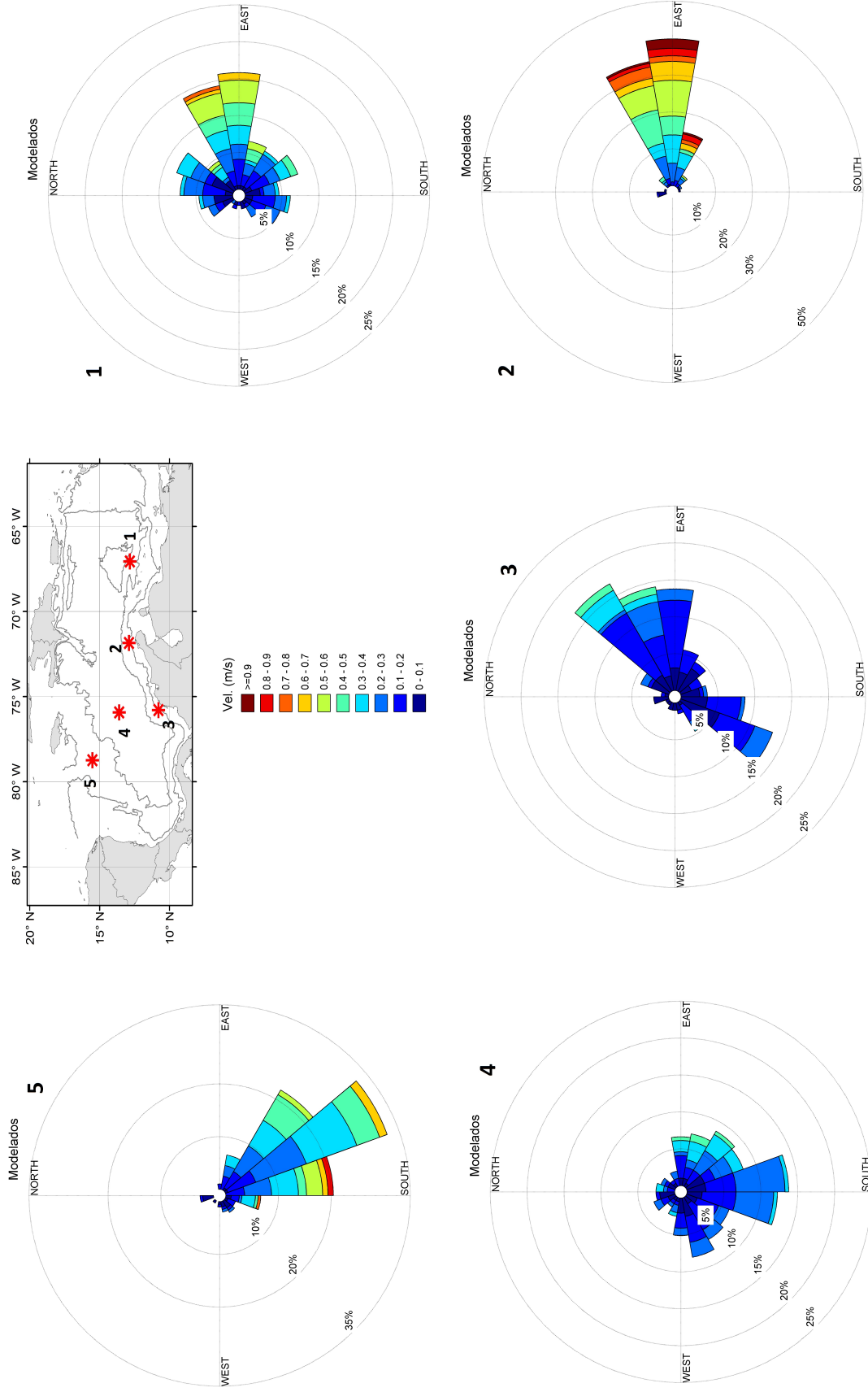


Figura 4.6: Corriente modeladas para la época húmeda del Caribe

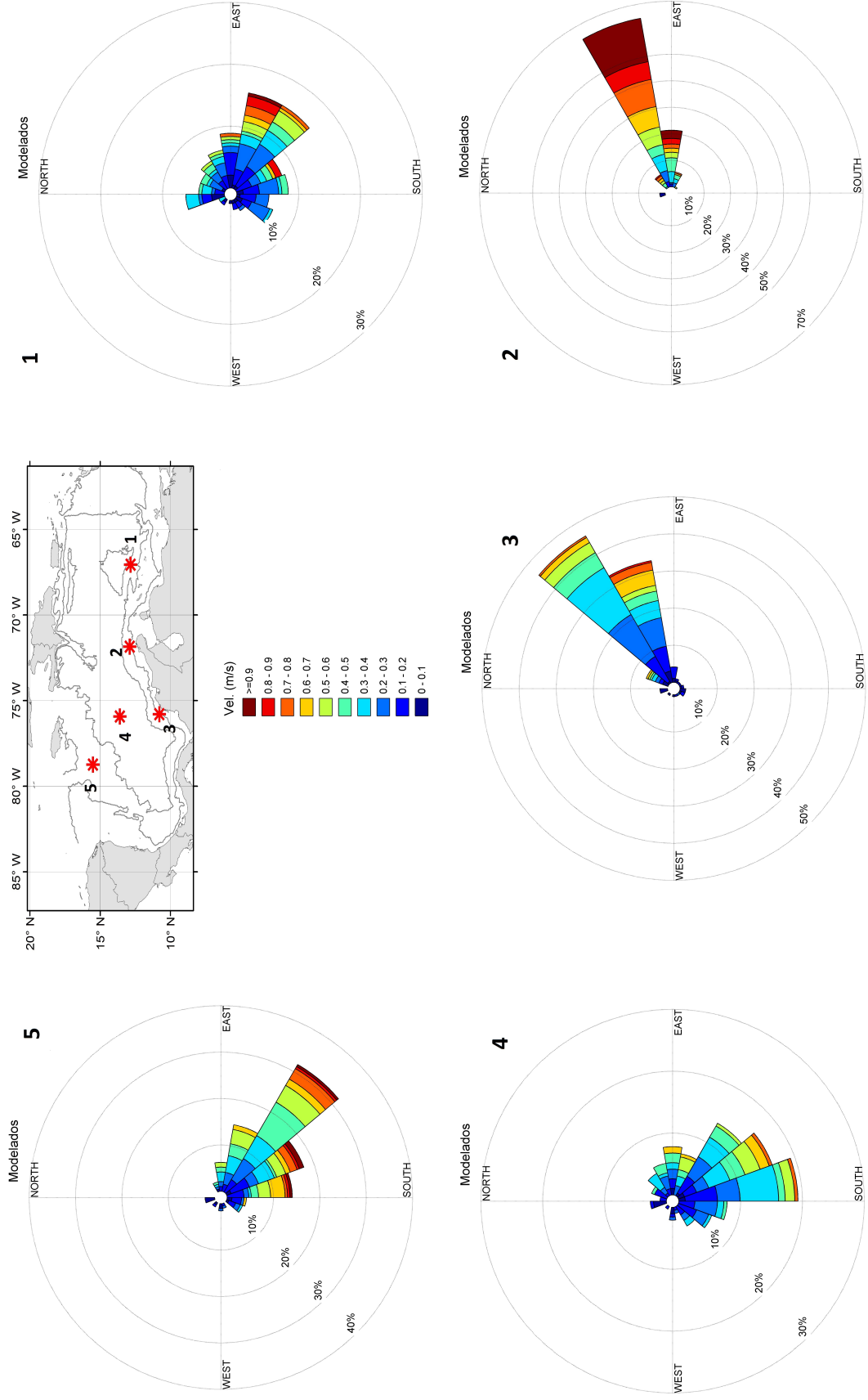


Figura 4.7: Corriente modeladas para la época seca del Caribe

# Capítulo 5

## Aplicaciones

### 5.1. Modelo Anidado - Región Cartagena

Uno de los objetivos específicos del modelo construido es alimentar modelos de pequeña escala, enfocados en el estudio de diferentes fenómenos a lo largo de las costas. Como ejemplo de ésto se presenta el anidamiento con el modelo construido por Uribe Suarez (2015), el cual es un modelo hidrodinámico construido en la plataforma DELFT3D aplicado al estudio del transporte de sedimentos en la región de Cartagena, como herramienta que busca contribuir a entender y solucionar el problema de la erosión costera que afecta esta zona.

El modelo de Cartagena está conformado por una malla de 35000 celdas, con tamaños que van desde 100 *m* en zona costera hasta 300 *m* en zonas profundas, la malla del modelo se extiende desde la costa hasta los 200 m de profundidad y abarca la región comprendida entre Galerazamba y Bocachica. La malla del modelo de Cartagena se encuentra embebida en la malla del modelo del Caribe y se acoplan como se muestra en la figura 5.1.

El modelo de Cartagena es un modelo en 2 dimensiones, utiliza 2 tipos de condiciones de fronteras: hidrodinámicas las cuales consisten en datos de marea y velocidad de corrientes promedio, distribuidas en la malla como se muestra en la figura 5.2; fronteras de oleaje que consisten en los datos de altura significativa de ola, dirección y periodo pico, las cuales se encuentran ubicadas en la misma posición que las fronteras hidrodinámicas ya mencionadas. Adicionalmente el modelo considera los forzamientos meteorológicos del viento y la presión atmosférica los cuales se obtienen de las fuentes CCMP y NCAR. A partir del modelo del Caribe es posible generar información para

todas las condiciones de frontera descritas e información para fronteras de temperatura y salinidad, para este caso específico se generaron condiciones de frontera de corrientes para el modelo de Cartagena, al ser ésta la información más limitada y necesaria para poder describir correctamente el comportamiento de las corrientes en la zona.

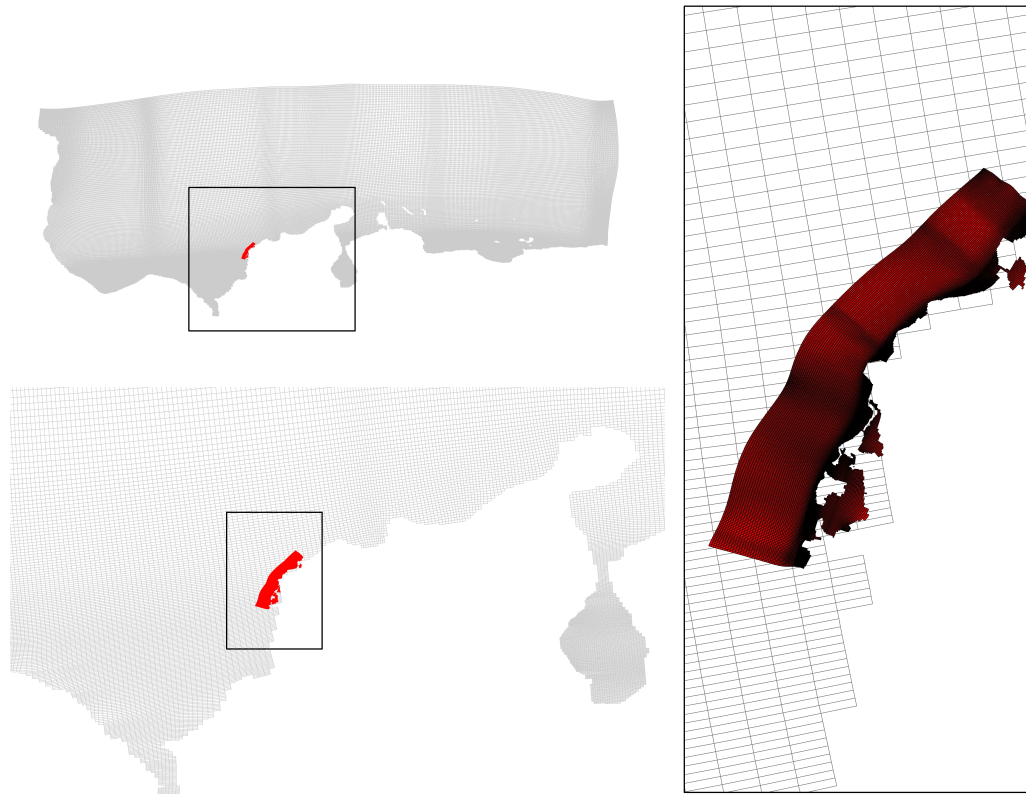


Figura 5.1: Malla del modelo de Cartagena anidada en la malla del modelo del Caribe. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

Para evaluar el desempeño del modelo de Cartagena, se compararon los resultados obtenidos con mediciones en la zona de: estaciones fijas de medición de corrientes, estaciones fijas de medición de oleaje, mediciones de la misión satelital JASON y estaciones móviles de medición de corrientes, realizadas entre el 15 marzo y 3 de mayo de 2012 y el 1 de agosto y el 27 de septiembre de 2012. Las figuras 5.3 y 5.4 muestran la ubicación de los puntos de medición.

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3, los cuales permiten calificar el modelo entre bueno y razonable de acuerdo a Sutherland et al. (2004) y van Rijn et al. (2003) respectivamente.

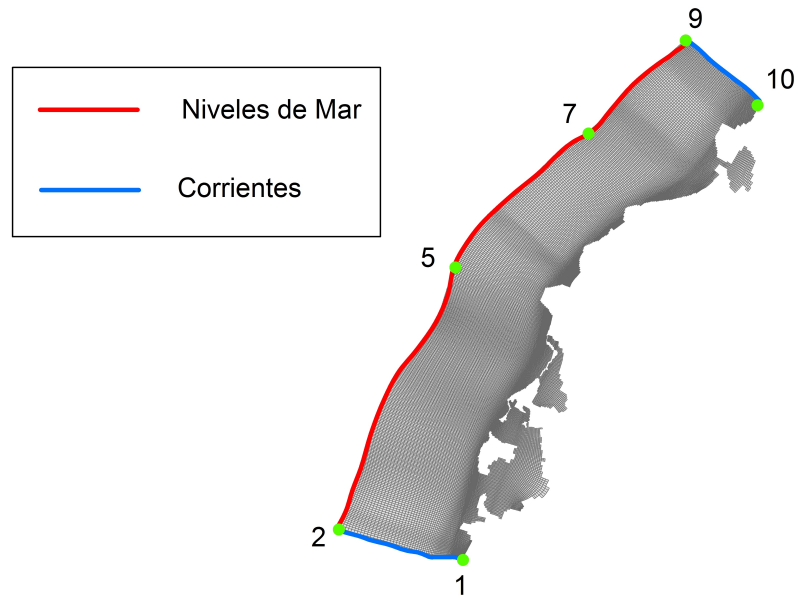


Figura 5.2: Tipos de fronteras modelo de Cartagena. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

Galerazamba-Punta Canoas			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad	Dirección	Velocidad	Velocidad
0.078 (m/s)	55.77°	59.32 %	28.22 %

Tabla 5.1: Errores al comparar las corrientes del modelo de Cartagena contra mediciones en estaciones fijas. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

Transectos			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad	Dirección	Velocidad	Velocidad
0.084 (m/s)	75.47°	62.04 %	32.92 %

Tabla 5.2: Errores al comparar las corrientes del modelo de Cartagena contra mediciones en estaciones móviles. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

JASON-2			Estación			
MAE	RMAE	ARMAE	MAE	RMAE	ARMAE	MAE
Altura de Ola						Dirección
0.36 (m)	27.19 %	24.87 %	0.33 (m)	36.96 %	25.86 %	39.16°

Tabla 5.3: Errores al comparar el oleaje del modelo de Cartagena contra mediciones. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

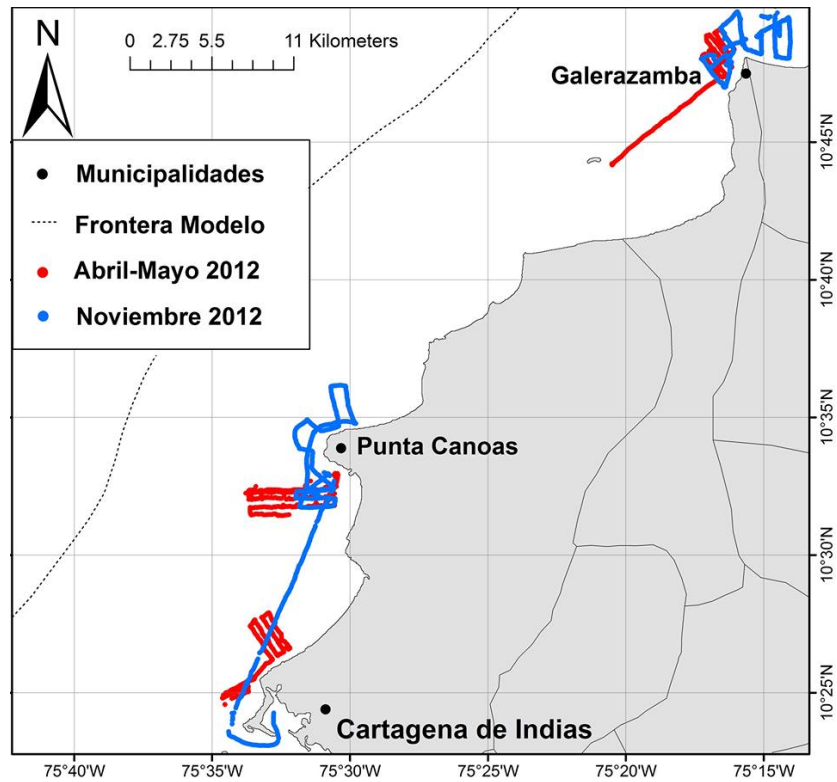


Figura 5.3: Puntos de medición corrientes en Cartagena. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

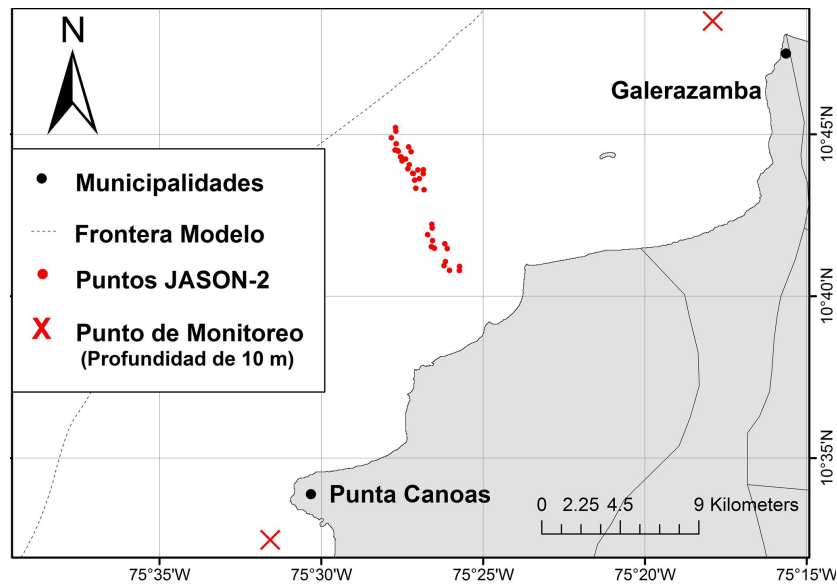


Figura 5.4: Puntos de medición oleaje en Cartagena. En colaboración con Uribe Suarez (2015)

Adicionalmente se realizaron distintas comparaciones utilizando el anidamiento con el modelo de Cartagena para evaluar la funcionalidad del modelo del Caribe para generar condiciones de frontera para modelos de pequeña escala:

- Se ejecutó el modelo de Cartagena alimentando las condiciones de frontera de oleaje con datos del modelo WWIII y datos del modelo del Caribe, al comparar los resultados obtenidos contra las distintas mediciones se obtuvieron errores con diferencias menores al 1 % entre los dos casos.
- Se ejecutó el modelo de Cartagena alimentado las condiciones de frontera de hidrodinámicas unicamente con series de nivel de mar del modelo TMD y bajo la configuración descrita de corrientes y mareas provenientes del modelo del Caribe. Los resultados con el modelo TMD mostraron patrones irregulares de corrientes que no coherentes con lo descrito en la literatura, mientras que los resultados con el modelo del Caribe mostraron patrones de corrientes regulares que coinciden con lo descrito en la literatura.
- Se ejecutó el modelo de Cartagena alimentando únicamente las condiciones de frontera hidrodinámicas con series de nivel de mar del modelo del Caribe y bajo la configuración descrita de corrientes y mareas provenientes del modelo del Caribe. Los resultados mostraron que los errores correspondientes a las corrientes aumentaron 30 % para la magnitud y 25° en dirección, mostrando que para una correcta reproducción de la hidrodinámica en este tipo de modelos el forzamiento unicamente a partir de mareas (información que más se encuentra disponible) no resulta suficiente.
- Se ejecutó el modelo de Cartagena alimentando las condiciones de frontera hidrodinámicas con corrientes y mareas del modelo del Caribe, variando la configuración del modelo del Caribe entre incluir procesos de transporte y no incluirlos. Los resultados mostraron que incluir los procesos de transporte en el modelo del Caribe se tradujo en una reducción de los errores correspondientes a las corrientes de 5 % para la magnitud y 40° en dirección.

## 5.2. Pronósticos utilizando el modelo GFS

Otro de los objetivos específicos del modelo consiste en evaluar su capacidad para pronosticar el comportamiento de la hidrodinámica del Caribe, utilizando como fuente

de información para la meteorología el modelo de pronóstico GFS. Para ésto se ejecutaron 5 simulaciones en periodos continuos, las cuales se describen en la tabla 5.4, alimentando el modelo con los datos del GFS y se compararon los resultados con los datos de las estaciones de medición ya descritas. De acuerdo a lo descrito en secciones anteriores el GFS provee datos con una precisión adecuada para un periodo de 8 días a partir del día de la predicción, por lo que se establece éste como tiempo máximo de simulación.

No.	Periodo	Día de la predicción
1	05-01-2011 a 13-02-2011	05-01-2012
2	06-01-2011 a 14-02-2011	06-01-2012
3	07-01-2011 a 15-02-2011	07-01-2012
4	08-01-2011 a 16-02-2011	08-01-2012
5	09-01-2011 a 17-02-2011	09-01-2012

Tabla 5.4: Simulaciones utilizando el modelo de predicción GFS

El modelo necesita tener un tiempo de calentamiento que permita un correcto acoplamiento entre las condiciones iniciales y las condiciones de frontera impuestas, el cual debido a la extensión y número de procesos que involucra el modelo es de mínimo 15 días, este tiempo se encuentra muy por encima del intervalo permitido por el GFS, debido a ésto se opto por repetir las condiciones descritas por el GFS para el primer instante, durante los 15 días previos al día de inicio de simulación de forma que se disponga del tiempo de calentamiento necesario.

Para cada una de las 5 simulaciones realizadas se calcularon los estadísticos ya descritos, éstos se promediaron para cada una de las estaciones de medición, obteniendo de esta forma un comportamiento general, los resultados se presentan en las tablas 5.5 y 5.6.

Mareógrafo	MAE ( $m$ )	RMAE (%)
265	0,032	40,02
266	0,032	37,81
268	0,032	37,28
737	0,038	44,12
42047	0,025	35,32

Tabla 5.5: Errores promedio en la predicción de las mareas alimentando el modelo con el GFS

Boya	MAE ( $m$ )	RMAE (%)	ARMAE (%)
42059	0,41	20,33	15,67
42060	0,581	21,04	15,73

Tabla 5.6: Errores promedio en la predicción del oleaje alimentando el modelo con el GFS

Los resultados muestran que para las mareas el modelo presenta un comportamiento muy similar al obtenido en las secciones de validación y calibración, aunque en algunos casos se observan leves incrementos en los errores relativos, los errores absolutos se mantienen iguales, el incremento en los errores relativos puede explicarse al considerar que el periodo en el que se realizaron las simulaciones, corresponde con la fase menor del ciclo mareal, ya que debido a la limitación del tiempo de pronóstico no es posible considerar el ciclo completo, la figura 5.5, muestra a la derecha una gráfica de dispersión de la marea modelada contra la medida, a la izquierda la marea contra el tiempo para la serie modelada y la medida, ésta permite observar que el comportamiento observado en los casos de reproducción se mantiene y las causas de error se deben a discrepancias en las amplitudes, como este error se observa tanto para los casos de reproducción como de pronóstico es posible concluir la causa de este, es independiente de la meteorología con la que se alimente el modelo. Lo anterior indica que el modelo posee la capacidad de pronosticar el comportamiento de la marea con precisión muy similar a la que se obtiene en las fases de reproducción.

Para el caso del oleaje los resultados si mostraron aumento en los errores medios obtenidos al compararse con la reproducción de la misma época, como se observa en la figura 5.6, la cual muestra la comparación de los datos del modelo con respecto a las mediciones, se presenta a la izquierda la altura significativa de ola contra el tiempo para la serie modelada y la medida, a la derecha la rosa de oleaje modelado, ésto se debe a que para el caso de pronóstico el modelo reproduce la línea de altura significativa media de forma adecuada, sin embargo no logra seguir los cambios que se presentan en esta, a diferencia de los casos de reproducción en los cuales se observaba una mayor correlación entre los datos modelados y los medidos. Lo anterior si se encuentra estrechamente relacionado con el cambio en la fuente de información meteorológica, ya que a diferencia de las mareas, el viento si es el principal forzador del oleaje. Sin embargo en términos generales los errores obtenidos se mantienen en un rango aceptable, lo que indica que la predicción del oleaje lograda por el modelo es correcta.

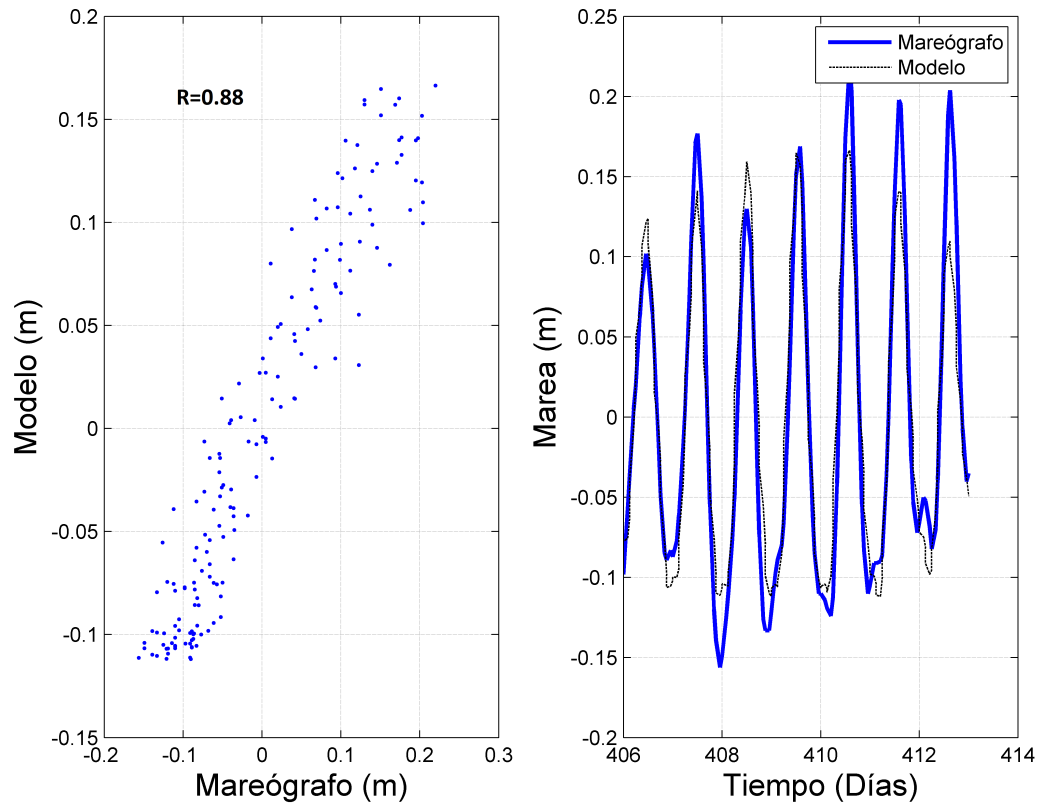


Figura 5.5: Pronóstico de la marea utilizando el GFS comparada contra mediciones

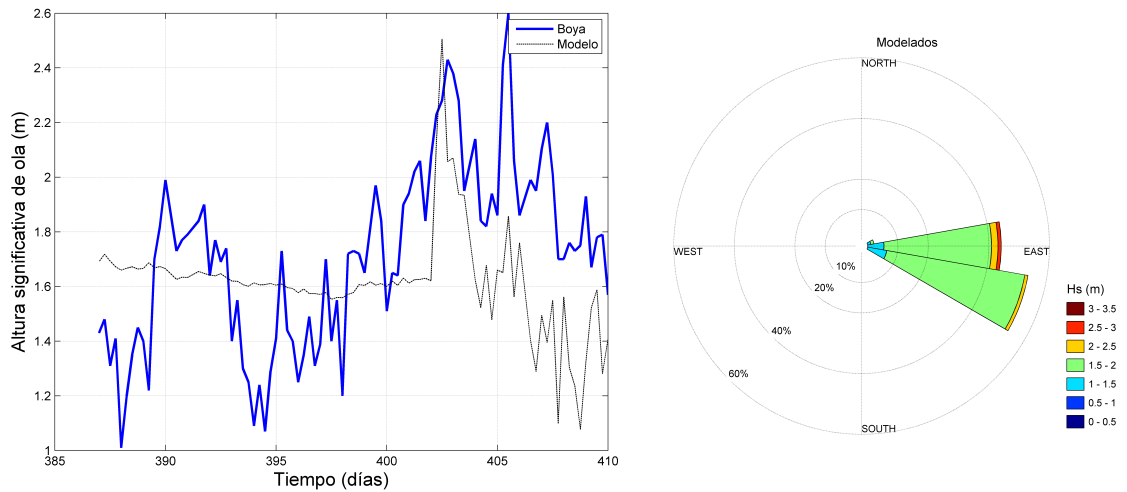


Figura 5.6: Pronóstico del oleaje utilizando el GFS comparada contra mediciones

# Capítulo 6

## Conclusiones

Se implementó una metodología para simular la hidrodinámica del mar Caribe, el cual incluye los efectos de mareas, efectos gravitacionales sobre las mareas, transporte (temperatura y salinidad), oleaje, corrientes, interacción oleaje y corrientes, efectos meteorológicos y descarga de afluentes. El modelo se comparó con mediciones y se evaluó su desempeño con criterios normalmente usados en modelación numérica en el area de oceanografía, obteniendo como resultado un desempeño entre excelente y razonable, lo que indica que el modelo es una herramienta útil para estudiar la hidrodinámica de esta zona.

En la primera etapa se estudiaron las distintas fuentes de información que alimentan el modelo, el análisis realizado mostró que aunque éstas logran comportamientos adecuados en las zonas de aguas profundas, siendo los de mejor desempeño el NCAR y el CCMP, en la zona de aguas costeras el comportamiento es muy pobre. Esto afecta el comportamiento general del modelo haciéndolo menos preciso en las zonas costeras, indicando que es necesario buscar fuentes de información diferentes, que brinden una mayor precisión al reproducir el comportamiento en estas zonas. De forma similar la reproducción de eventos extremos resulta muy pobre, ya que ninguna de las fuentes logra reproducir el comportamiento de estos eventos en su magnitud real, lo que imposibilita que los efectos de estos sobre la dinámica marina puedan ser reproducidos y pueda ser analizada su zona de influencia.

Adicionalmente se estudiaron distintas fuentes de información batimétrica, se observó que aunque el GEBCO provee información adecuada, debido a la resolución de las celdas del modelo principalmente en las zonas costeras, la zona donde termina la plataforma continental y las zonas de ciertos accidentes geográficos como el risco de las aves,

se generan cambios demasiado bruscos que no logran ser representados correctamente con la resolución de las celdas del modelo.

El modelo fue calibrado y validado mediante el uso de mediciones en la zona, debido a la extensión del área de estudio se utilizaron mediciones ubicadas en distintos puntos. De igual manera debido a la existencia de distintas épocas climáticas, seca y húmeda, se consideraron distintos periodos de tiempo que correspondieran con las distintas épocas, de esta forma se garantizó que el modelo funcionara correctamente para los distintos escenarios y a lo largo de toda la zona de estudio.

El proceso de calibración permitió observar que los cambios más representativos en los resultados del modelo se generaron debido a la inclusión de distintos procesos, lo cual corroboró la premisa con la que se planteó este trabajo, que para modelar correctamente la dinámica marina del Caribe era necesario implementar un modelo que incluyera la mayor cantidad de fenómenos posibles. El Caribe presenta un rango micromareal por lo que las corrientes generadas por mareas no constituyen el principal componente de las corrientes, siendo necesario la inclusión del forzamiento del viento y de los procesos de transporte. Adicionalmente el análisis de sensibilidad y la calibración mostraron que la interacción entre el oleaje y las corrientes, genera un efecto significativo sobre el comportamiento de las corrientes en la zona costera y en la zona superficial en general, siendo la inclusión de este proceso una de las diferencias más significativas con respecto a otros modelos que se han implementado en el Caribe.

Los resultados del modelo mostraron que existe un comportamiento diferenciado en el desempeño entre las zonas de aguas profundas y las zonas costeras, siendo mucho más precisos los resultados obtenidos para la zona de aguas profundas. Esta diferencia se debe a que aunque la resolución del modelo es mayor en las zonas costeras, ésta no es lo suficientemente detallada para reproducir adecuadamente la batimetría en estas zonas, afectando los resultados de la hidrodinámica, a esto se suma la pérdida de precisión de la información meteorológica en estas zonas. Lo anterior también aplica para las cadenas de islas menores, por ejemplo se observó que el modelo presentó errores por encima de la media para el caso del mareógrafo ubicado en las islas de San Andrés Colombia.

Los errores que se presentan al momento de reproducir las mareas son causados por la utilización de un valor alto para el parámetro  $\alpha$ , el cual fue necesario para poder incluir los fenómenos de transporte, sin embargo si se aumenta la resolución del modelo, el valor del parámetro  $\alpha$  puede ser disminuido, permitiendo que se obtenga una mejor reproducción de la marea.

También se observó que el modelo reproduce de forma correcta los perfiles medios de temperatura y salinidad característicos del Caribe, sin embargo debido a la resolución vertical y al uso de valores medios como condiciones de frontera, no se logra reproducir con claridad las variaciones que se presentan en la termoclina y haloclina durante las distintas épocas climáticas. Siendo éste uno de los puntos débiles del modelo, las condiciones de frontera basadas en datos promedio fueron implementadas debido a que la información correspondiente a estas variables es muy limitada y la resolución vertical se limitó a 12 capas en la vertical debido a la capacidad computacional que se tenía disponible.

Por otra parte aunque el oleaje solo fue posible evaluado para zonas de aguas profundas los resultados encontrados fueron muy buenos, mostrando que la ubicación de las fronteras del modelo, basada en la suposición que las cadenas de islas funcionan como barrera al swell, fue correcta y el modelo logró reproducir de forma correcta el oleaje sin necesidad de utilizar swell obtenido de estaciones de monitoreo o modelos externos, como condición de frontera.

El caso de aplicación para el modelo de Cartagena mostró que el modelo del Caribe representa una buena alternativa para generar condiciones de frontera para modelos de menor escala, el modelo de Cartagena al ser alimentado con los datos del modelo del Caribe logró una correcta reproducción de la hidrodinámica de esta zona, con errores que lo califican entre bueno y razonable. De igual manera las distintas pruebas realizadas con el modelo de Cartagena permitieron establecer la necesidad de alimentar estos tipos de modelos con información de corrientes para garantizar una correcta reproducción de la hidrodinámica, corroborando la funcionalidad del modelo del Caribe, adicionalmente las distintas pruebas mostrarán la importancia de incluir los procesos de transporte para reproducir correctamente las corrientes.

Por último el uso del GFS permite que el modelo no solo se encuentre limitado a reproducir sino que adiciona la funcionalidad de pronóstico sin afectar de forma significativa la precisión de los resultados, lo que abre la posibilidad de utilizar el modelo para generar alertas.

**Trabajo Futuro:** En el presente trabajo se mostró que el modelo del Caribe representa una herramienta útil para el estudio de la dinámica marica del Caribe, de igual manera también se mostró que existen puntos en los cuales es necesario mejorarlo entre los que se incluyen: Utilizar la funcionalidad domain decomposition de la plataforma DELFT3D para aumentar la resolución vertical y horizontal del modelo en las zonas costeras, evaluar alternativas para complementar la información de las fuentes meteo-

rológicas actuales en las zonas costeras para las variables relacionadas con el viento, las cuales mostraron el comportamiento más pobre y aumentar la variabilidad de las condiciones de frontera de temperatura y salinidad buscando una mejor reproducción de los cambios en la termoclina y haloclina.

# Bibliografía

- AEC. *Mapas de Rutas Marítimas del Caribe*. Asociación de Estados del Caribe, 2012. URL: <http://www.acs-aec.org/index.php?q=es/transport/proyectos/mapas-de-rutas-maritimas-del-gran-caribe>, Consultada el 14 de enero de 2014.
- Agudelo, Pablo, Restrepo, Andres F., Morales, Ricardo, Tejada, Carlos E., Torres, Ricardo, y Osorio, Andres F. Determinación del clima de oleaje medio y external en el caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 23:120–542, 2005.
- Althié, Gabriela, Candela, Julio, Ochoa, José, y Sheinbaum, Julio. Impact of caribbean cyclones on the detachment of loop current anticyclones. *Journal of Geophysical Research*, 117:C03018, 2012.
- Andrade, Carlos Alberto. Analisis de la velocidad del viento en el mar caribe. *Boletn Cientfico CIOH*, 13:33–43, 1993.
- Andrade, Carlos Alberto, Barton, Eric Desmond, y Mooers, Chistopher N.K. Evidence for an eastward flow along the central and south american caribbean coast. *Journal of Geophysical Research*, 108:16 1 – 16 11, 2003.
- Andrews, D. G. y McIntyre, M. E. An exact theory of nonlinear waves on a lagrangian - mean flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 89:609 – 646, 1978.
- ARGO. Argo project. 2014. [Http://www.argo.net/](http://www.argo.net/) , Consultada el 20 de marzo de 2014.
- Atlas, Robert, Hoffman, Ross, Ardizzone, Joseph, Leidner, S. Mark, Jusem, Juan Carlos, Smith, Deborah K., y Gombos, Daniel. A cross - calibrated multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. *American Metereological Society*, 92:157 – 174, 2011.

- Ayan H, Chaudhuri, Ponte, Rui M, Forget, Gael, y Heimbach, Patrick. A comparison of atmospheric reanalysis surface products over the ocean and implications for uncertainties in air - sea boundary forcing. *Journal of Climate*, 26:153–170, 2013.
- Barcena, Alicia, Pardo, Antonio, Samaniego, Jose Luis, y Perez, Ricardo. *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. DINMICAS, TENDENCIAS Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Naciones Unidas, 2013.
- Borsje, B.W., Roos, P.C., Kranenburg, W.M., y Hulscher, S.J.M.H. Modeling tidal sand wave formation in a numerical shallow water model: The role of turbulence formulation. *Continental Shelf Research*, 60(0):17 – 27, 2013. ISSN 0278-4343.
- Bourras, Denis. Comparison of five satellite - derived latent heat flux products to moored buoy data. *Journal of Climate*, 19:6291–6313, 2006.
- Candela, Julio, Tanahara, Sorayda, Crepon, Michel, y Barnier, Bernard. Yucatan channel flows: Observations versus clipper atl6 and mercator pam models. *Journal of Geophysical Research*, 108:C12–3385, 2003.
- Carton, James A. Caribbean sea eddies inferred from topex-POSEIDON altimetry and a 1/6 Atlantic ocean model simulation. *Journal of Geophysical Research*, 104:7743–7752, 1999.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteria, M., y Silva Santos, C. Offshore wind energy resource simulation forced by different reanalyses: Comparison with observed data in the Iberian peninsula. *Applied Energy*, 134:57–64, 2014.
- CCMP. Cross calibrated multi platform ocean surface wind vector 13.0 first look analyses. 2014. <http://podaac.jpl.nasa.gov/>, Consultada el 20 de marzo de 2014.
- Chérubin, L.M. y Richardson, P.L. Caribbean current variability and the influence of the Amazon and Orinoco freshwater plumes. *Deep-Sea Research I*, 54:1451 – 1473, 2007.
- Day, Trevor. *Oceans*. Facts on File, 2005.
- DCDB, IHO. International hydrographic organization data center for digital bathymetry. 2014. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/iho.html>, Consultada el 20 de marzo de 2014.

- Dee, D. P. y Coauthors. The era - interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137:553–597, 2011.
- Deltares. *Delft3D - Flow user Manual*. Deltares, 2013a.
- Deltares. *Delft3D - Wave user Manual*. Deltares, 2013b.
- Dingemans, Maarten W. *Water Wave Propagation Over Uneven Bottoms*. World Scientific Publishing, 1997.
- Escobar, Carlos Alejandro. Análisis de sensibilidad espacial de un modelo hidrodinámico del embalse punchiná (antioquia). *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 14:97 – 113, 2010.
- Escobar, Carlos Alejandro y Pérez Mesa, Jesús Alberto. Aplicación del análisis de sensibilidad de un modelo hidrodinámico en la determinación de la relevancia de procesos físicos y forzamientos externos en las corrientes del embalse punchiná (antioquia). *Revista Universidad EAFIT*, 45:73 – 89, 2009.
- ETOPO. Etopo global relief model. 2014. [Http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html) , Consultada el 20 de marzo de 2014.
- Franco Herrera, Andrés. *Oceanografía de la ensenada de Gaira: El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe Colombiano*. Fundación Universitaria de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2005.
- Garcia, Mariangel, Ramirez, Isabel, Verlaan, Martin, y Castillo, Jose. Application of a three-dimensional hydrodynamic model for san quintin bay, b.c., mexico. validation and calibration using openda. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 273(0):428 – 437, 2015. ISSN 0377-0427.
- GEBCO. General bathymetric chart of the ocean. 2014. URL: <http://www.gebco.net/> , Consultada el 20 de marzo de 2014.
- González, Alfázar, Puentes, Vladimir, Jiménez, Germán, Rojas, Paula, Garay, Jesús, Guzmán, Georgina, Posada, Blanca, Guzmán, Wilmer, Nivia, Álvaro, Carvajal, José, Olarte, Claudia, Acosta, Juan, Puentes, Milton, Vega, Edward, Moreno, Emilio, Cavides, Marcela, Zamora, Alejandro, Correa, Iván, Martínez, Jaime, Alvarado, Manuel,

- Castillo, Francisco, Melendro, Ernesto, y Restrepo, Andrés. Programa nacional de investigación para la prevención, mitigación y control de la erosión costera en Colombia. Informe técnico final, INVEMAR, Santa Marta D.T.C.H, Colombia, 2009.
- Gordon, Arnold L. Circulation of the caribbean sea. *Journal of Geophysical Research*, 77:6207 – 6223, 1967.
- GRDC, Global Runoff Data Center. Monthly discharge data for world rivers (except former soviet union). 2001. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory <http://rda.ucar.edu/datasets/ds552.1/> , Consultada el 15 de julio de 2014.
- Grotjahn, Richard. Different data, different general circulations ? a comparison of selected fields in ncep/doe amip-ii and ecmwf era - 40 reanalyses. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 44:108–142, 2008.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bows, E., Carlson, H., Cartwrightm, D.E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., y Walden, H. *Mesurements of Wind - Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project*. Deutches Hydrographisches Institut Hamburg, 1973.
- IBCCA. The international bathymetric chart of caribbean sea and the gulf of mexico. 2014. <Http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/ibcca/> , Consultada el 20 de marzo de 2014.
- INVEMAR. Boletín informativo no 8 de cambio climático. 2013.
- Johns, William E., Townsend, Tamara L., Fratantoni, David M., y Wilson, W. Douglas. On the atlantic inflow to the caribbean sea. *Deep-Sea Research*, 49:211–243, 2002.
- Jouanno, Julien, Sheinbaum, Julio, Barnier, Bernard, Molines, Jean-Marc, Debreu, Laurent, y Lemarié, Florian. The mesoscale variability in the caribbean sea. part i: Simulations and characteristics with an embedded model. *Ocean Modeling*, 23:82–101, 2008.
- Jury, Mark R. Long-term variability and trends in the caribbean sea. *International Journal of Oceanography*, 2011.

- Kalnay, E, Kanamitsu, M, Kistler, R, Deaven, D, Gandin, L, Iredell, M, Saha, S, White, G, Woollen, J, Zhu, Y, Chelliah, M, Ebisuzaki, W, Higgins, W, Janowiak, J, Mo, K C, Ropelewski, C, Wang, J, Leetmaa, A, Reynolds, R, Jenne, Roy, y Joseph, Dennis. The ncep/ncar 40 - year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996.
- Kanamitsu, Masao, Ebisuzaki, Wesley, Woollen, Jack, Yang, Shi-Keng, Hnilo, J.J., Fiorino, M, y Potter, G.L. Ncep - doe amip - ii reanalysis (r2). *American Meteorological Society*, 83:1631–1643, 2002.
- Kishore, P, Venkat Ratnam, M., Namboothiri, S.P., Velicogna, Isabella, Basha, Ghose, Jiang, J.H., Igarashi, K., Rao, S.V.B., y Sivakumar, V. Global (50 s-50 n) distribution of water vapor observed by cosmic gps ro: Comparison with gps radiosonde, ncep, era-interim, and jra-25 reanalysis data sets. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*, 73:1849–1860, 2011.
- Kistler, Rober, Kalnay, Eugenia, Collins, William, Saha, Suranjana, White, Glenn, Woollen, Jhon, Chelliah, Muthuvel, Ebisuzaki, Wesley, Kanamitsu, Masao, Kousky, Vernon, Dool, Huug van den, Jenne, Roy, y Fiorino, Michael. The ncep - ncar 50 - year reanalysis: Monthly means cd - rom and documentation. *American Meteorological Society*, 82:247–268, 2001.
- Kjerfve, Bjorn. Tides of the caribbean sea. *Journal of Geophysical Research*, 86:4243 – 4247, 1981.
- Leendertse, Jan J. *Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation*. Rand Institute, 1967.
- Leendertse, Jan J. *A Water-Quality Simulation Model for Well Mixed Estuaries and Coastal Seas*. Rand Institute, 1972.
- Li, Zhijie, Chen, Qiuwen, y Xu, Qiang. Modeling algae dynamics in meiliang bay of taihu lake and parameter sensitivity analysis. *Journal of Hydro-environment Research*, 9(2):216 – 225, 2015. ISSN 1570-6443. Special Issue on Environmental Hydraulics.
- Lonin, Sergei, Lonina, Irina S, y Tuchkovenko, Yuri S. Utilización del modelo nedwam para el cálculo y pronóstico del oleaje en el mar caribe. *Boletín Científico CIOH*, 17:37–46, 1996.

- Lynch, D.R. y Davies, A.M. *Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models*. Coastal and Estuarine Studies. American Geophysical Union, 1995. ISBN 9780875902616.
- Madec, G., Delecluse, P., Imbard, M, y Lévy, C. Opa 8.1 ocean general circulation model reference manual. 1998. Note du Pole de modélisation.
- Madec, Gurvan. Nemo ocean engine. 2008. ISSN No 1288-1619.
- Mei, Chiang C. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. World Scientific Publishing, 1989.
- Mesa, Julio César. *Metodología para el Reanálisis de Series de Oleaje para el Caribe Colombiano*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2009.
- Mesinger, Fedor, DiMego, Geoff, Kalnay, Eugenia, Mitchell, Kenneth, Shafran, Perry C, Ebisuzaki, Wesley, Jovic, Dusan, Woollen, Jack, y Rogers, Eric. North american regional reanalysis: A long-term, consistent, high-resolution climate dataset for the north american domain, as a major improvement upon the earlier global reanalysis datasets in both resolution and accuracy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3):343 – 360, 2006.
- Millero, Frank J., Chen, Cheng-Tung, Bradshaw, Alvin, y Schleicher, Karl. A new high pressure equation of state for seawater. *Deep Sea Research*, 27A:255–264, 1980a.
- Millero, Frank J., Chen, Cheng-Tung, Bradshaw, Alvin, y Schleicher, Karl. Summary of data treatment for the international equation of state for seawater. *Unesco technical papers in marine science*, 38:99–188, 1980b.
- Molina, Amparo, Pelgrain, Arnaud, Suzunaga, Jairo, y Giraldo, Luis. Comportamiento de la dinámica marina en el sector costero entre Galerazamba y Cartagena. *Boletín Científico CIOH No. 17*, págs. 73–78, 1996.
- Montoya, Rubén Darío y Osorio, Andrs. Los modelos de generación de oleaje de viento: Características, evolución y futuras aplicaciones en colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 15:47 – 74, 2007.

- Mooney, P. A, Mulligan, F.J, y Fealy, R. Comparison of era - 40, era - interim and ncep/ncar reanalysis data with observed surface air temperatures over ireland. *International Journal of Climatology*, 31:545–557, 2011.
- Morales, Ricardo. Clasificación e identificación de las componentes de marea del caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, 22:105 – 114, 2004.
- Morelissen, R., Bijlsma, A.C., y Tapley, M.J. A dedicated tidal stream atlas of the stratified tidal flows near stonecutters bridge, hong kong, based on 3d numerical simulations with {HLES}. *Journal of Hydro-environment Research*, 3(4):224 – 231, 2010. ISSN 1570-6443. 2nd Shallow Flows.
- Murphy, Sylvia J. y Hurlburt, Harley E. The connectivity of eddy variability in the caribbean sea, the gulf of mexico, and the atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research*, 104:1431–1453, 1999.
- NDBC. National data buoy center. 2014. [Http://www.ndbc.noaa.gov/](http://www.ndbc.noaa.gov/) , Consultada el 20 de marzo de 2014.
- Oey, L-Y y Lee, H-C. Effects of winds and caribbean eddies on the frequency of loop current eddy shedding: A numerical model study. *Journal of Geophysical Research*, 108:C10–3324, 2003.
- PADMAN, L. y EROFEEVA, S. *Tide Model Driver (TMD) Manual*. Earth and Space Research, 2005.
- Paramo, Jorge, Wolff, Matthias, y Saint-Paul, Ulrich. Deep-sea fish assemblages in the colombian caribbean sea. *Fisheries Research*, 125:87 – 98, 2012.
- Philips, N. A. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *Journal of Metereology*, 14:184–185, 1957.
- Posada Jaramillo, Federico. *Modelo Hidrodinámico y de Oleaje del Mar Caribe*. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2013.
- Rahbani, Maryam. A comparison between the suspended sediment concentrations derived from {DELFT3D} model and collected using transmissometer a case study in tidally dominated area of dithmarschen bight. *Oceanologia*, 57(1):44 – 49, 2015. ISSN 0078-3234.

- Razmi, A.M., Barry, D.A., Bakhtyar, R., Dantec, N. Le, Dastgheib, A., Lemmin, U., y West, A. Current variability in a wide and open lacustrine embayment in lake geneva (switzerland). *Journal of Great Lakes Research*, 39(3):455 – 465, 2013. ISSN 0380-1330.
- Richardson, P.L. Caribbean current and eddies as observed by surface drifters. *Deep Sea Research*, 52:429–463, 2005.
- Roldán, Paola Andrea. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía colombia, golfo de urabá. 2008.
- Sela, Joseph G. Spectral modeling at the national meteorological center. *National Metereological Center*, 108:1279–1292, 1980.
- Sela, Joseph G. The nmc spectral model. *NOAA Technical Report*, 30:36, 1982.
- Sheng, Jinyu y Tang, Liqun. A numerical study of circulation in the western caribbean sea. *Journal of Physical Oceanography*, 33:2049–2069, 2003.
- Simmons, A, Uppala, S., Dee, D., y Kobayashi, S. Era - interim: New ecmwf reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, 110:25–35, 2006.
- Snyderman, Marty y Wiseman, Clay. *Guide to Marine Life: Caribbean-Bahamas-Florida*. Aqua Quest Publications, 1996.
- Stelling, G.S. y Kester, J.A.T.M Van. On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes. *International Journal Numerical Methods in Fluids*, 18(1):915 – 955, 1994.
- Sutherland, J., Walstra, D.J.R., Chesher, T.J., Rijnvan , L.C., y Southgate, H.N. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, 51(2):119 – 142, 2004. ISSN 0378-3839. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.12.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383903001327>.
- Tanahara, Sorayda. *Etude de la circulation dans le Golfe du Mexique et la Mer des Caraibes. Validation des simulations CLIPPER - ATL6 a láide des observations CANEK*. Tesis de Maestría, Université Pierre et Marie Curie - Paris6, 2004.

- Taylor, Karl E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106:7183–7192, 2001.
- Thomas, Yves-Francois, Nicole-Lerma, Alexandre, y Posada, Blanca Olivia. *Atlas climatológico del mar Caribe colombiano*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés", 2012.
- Tolman, Hendrik L. The numerical model wavewatch: a third generation model for hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. 1989.
- Tolman, H.L. *User manual and system documentation of WAVEWATCH -III version 1.5*. NOAA/NWS/NCEP/OMB, 1997.
- UHSLC. University of hawaii sea level center. 2014. [Http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/faq](http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/faq) , Consultada el 20 de marzo de 2014.
- Uppala, S. M. y Coauthors. The era - 40 re - analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131:2961–3012, 2005.
- Uribe Suarez, Diego Alejandro. *Modelación de la hidrodinámica marina en la región de Cartagena con aplicaciones al transporte de sedimentos*. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT - Medellín Colombia, 2015.
- Rijnvan , L.C, Walstra, D.J.R, Grasmeyer, B, Sutherland, J, Pan, S, y Sierra, J.P. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47(3):295 – 327, 2003. ISSN 0378-3839. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383902001205>.
- Whitham, G. B. *Linear and Nonlinear Waves*. John Wiley and Sons, 1974.
- Yang, Fangling. Review of gfs forecast skills in 2013. 2013. [Http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/docs/GFS.performance.review.2013.pdf](http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/docs/GFS.performance.review.2013.pdf), Consultada el 28 de julio de 2014.
- Yelland, M. J., Moat, B. I., K., Taylor P., Pascal, R. W., Hutchings, J., y Cornell, V. C. Wind stress measurements from the open ocean corrected for airflow distortion by the ship. *Journal of Physical Oceanography*, 28:1511–1526, 1998.