

**INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES DEL RIO MAGDALENA EN LOS
CAMPOS DE OLEAJE EN EL AREA DE BOCAS DE CENIZA**

CLAUDIA PATRICIA URBANO LATORRE



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2009**

**INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES DEL RIO MAGDALENA EN LOS
CAMPOS DE OLEAJE EN EL AREA DE BOCAS DE CENIZA**

CLAUDIA PATRICIA URBANO LATORRE
TESIS PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERA FISICA

Directores

Capitán De Fragata LUIS OTERO DIAZ

Ph. D. Ciencias y Tecnologías Marinas



SERGUEI LONIN

Ph. D. Ciencias Físicas y Matemáticas



Codirector

LUIS FERNANDO ECHEVERRI

MSc. Ciencias Físicas

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN

2009

NOTAS DE ACEPTACIÓN

**Ph. D LUIS OTERO DIAZ
DIRECTOR DE LA TESIS**

**INGENIERA CLAUDIA DAGUA
JURADO**

**TENIENTE LEONARDO MARRIAGA
JURADO**

**MSC. VICTOR HUGO MOSQUERA
JURADO**

FECHA DE SUSTENTACION: 19 de octubre de 2009.

A mi esposo y mi hija que son mi fortaleza...

Agradecimientos

Resultaría prácticamente imposible mencionar a todas aquellas personas e instituciones a quien debo un profundo y sincero agradecimiento. No obstante, creo necesario mencionar a algunos...

A Dios por permitir esta oportunidad y a las personas indicadas para lograrlo.

A mi familia, mi esposo y mi hija que fueron los gestores de esta labor, con su respaldo y entrega, compartieron conmigo las dificultades de mi separación durante la elaboración de este trabajo.

A mis padres por sus oraciones y fortaleza transmitida.

A hermana Ximena y Vh por su colaboración académica y apoyo familiar con mi Sofí

A mi hermana Mona por su especial ayuda, como hermana y amiga...

A mis amigos que durante mi carrera, hicieron más placentera mi paso por esta institución (Patricia, Paula, Milton, Alex, Karin).

A mi profesor Echeverri por su apoyo y confianza en mi formación.

Al Capitán Otero por su respaldo y paciencia en la elaboración del proyecto.

A Sandra y Claudia por su compañía en Cartagena, haciendo más familiar la estadía en los camarotes.

Y a todas la personas que colaboraron de algún modo, en el desarrollo del trabajo dentro del CIOT...

Gracias!!!

Tabla de Contenido

Resumen	XIII
1. Introducción	16
1.1 Planteamiento y contexto del problema	17
1.1.1. Deltas	17
1.1.1.1. Clasificación de los deltas	18
1.1.2. Antecedentes	19
1.2 Objetivo	22
1.2.1. Objetivo general	22
1.2.2. Objetivos específicos	23
2. Características generales de Bocas de Ceniza	24
2.1 Río Magdalena	25
2.1.1. Economía y sociedad	27
2.1.1.1. Trafico Marítimo en el Puerto de Barranquilla	27
2.1.1.2. Canal de Acceso	28
2.2 Caudal Río Magdalena	30
2.3 Batimetría	33
2.4. Mareas	36
2.5. Características generales del oleaje	36
2.5.1. Altura y Periodo de la ola	38
2.5.1.1. Datos de Oleaje visual	38
2.5.1.2. Tratamiento estadístico de datos	40
2.5.1.2.1. Régimen medio	40

2.5.1.2.1.1. Clima Marítimo en el área de Bocas de Ceniza	42
2.5.1.2.1.2. Descripción del oleaje mensual	55
2.4.1.2.2 Régimen extremal	58
3. Simulaciones Numéricas	61
3.1 Modelo (H2D)	63
3.1.1 Descripción del modelo	63
3.1.3 Mallas de Calculo	65
3.2 Modelo Simulating Waves Nearshore (SWAN)	66
3.2.1. Modelos espectrales de la ola	66
3.2.2. Descripción del modelo	69
3.2.3. Mallas de Calculo	70
3.2.4. Condiciones Iniciales y de contorno	71
3.2.5. Escenarios	75
3.2.6. Presentación de resultados	78
4. Análisis de Resultados	80
4.1. Análisis teórico interacción ola-corriente	80
4.2. Análisis descriptivo del efecto de las corrientes en el oleaje	87
4.3. Análisis descriptivo por direcciones de propagación	92
5. Conclusión y recomendaciones	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación genética de los deltas.

Figura 1.2. Organización de la desembocadura de un río en una costa dominada por el oleaje. Las olas pueden llegar perpendicularmente a la costa.

Figura 2.1. Área de Bocas de Ceniza y su localización en el Caribe.

Figura 2.2. Ubicación del Río Magdalena en Colombia.

Figura 2.3. Vista aérea de un muelle de la sociedad portuaria de Barranquilla.

Figura 2.4. Frecuencia de Niveles Excedidos – Estación Calamar.

Figura 2.5. Correlación de niveles excedidos – Estación Calamar.

Figura 2.6. Batimetría Base del sector de estudio área de Bocas de Ceniza.

Figura 2.7. Ubicación de Bocas de Ceniza respecto al cañón submarino.

Figura 2.8. Profundidades y ancho del canal en la batimetría de estudio.

Figura 2.9. Diagrama de vientos.

Figura 2.10. Localización parcial de los datos disponibles que muestra la distribución espacial de los mismos directamente relacionada con las principales rutas de navegación.

Figura 2.11. Rosa de oleaje medio para altura significativa y dirección.

Figura 2.12. Probabilidad no excedida de periodo pico y dirección.

Figura 2.13. Rosa de periodo para periodo pico y dirección.

Figura 2.14. Probabilidad no excedida de periodo pico (s).

Figura 2.15. Probabilidad conjunta en las direcciones predominantes de Enero a Abril.

Figura 2.16. Escala de Douglas.

Figura 2.17. Probabilidad conjunta en las direcciones predominantes de Mayo a Septiembre.

Figura 2.18. Probabilidad conjunta en las direcciones predominantes de Octubre a Diciembre.

Figura 2.19. Rosas de oleaje de altura y dirección en (%) de los meses de Enero a Febrero.

Figura 2.20. Rosas de oleaje de altura y dirección en (%) de los meses de Marzo a Junio.

Figura 2.21. Rosas de oleaje de altura y dirección en (%) de los meses de Julio a Octubre.

Figura 2.22. Rosas de oleaje de altura y dirección en (%) de los meses de Noviembre y Diciembre.

Figura 2.23. Hs vs Tp durante las tormentas de 1994 en la boya de la NOAA 41018.

Figura 2.24. Régimen de temporales en profundidades indefinidas

Figura 3.1. Características de la onda en tres dimensiones.

Figura 3.2. Salida grafica del modelo H2D.

Figura 3.3. Dominios utilizados en el modelo SWAN.

Figura 3.4. Rio Magdalena – Estacion Calamar. Frecuencia de niveles excedidos 1967-2007.

Figura 3.5. Puntos de las curvas de nivel tomados para el análisis.

Figura 3.6. Caudales típicos del rio Magdalena según la velocidad de su corriente.

Figura 4.1. Área donde suponemos la corriente constante.

Figura 4.2. Esquema visto en plano horizontal que muestra el rayo de la ola, la velocidad de grupo, la velocidad de fase y el vector numero de onda.

Figura 4.3. Espectro de energía, moviéndose a la derecha.

Figura 4.4. Perfil de la corriente.

Figura 4.5. Grafica de la velocidad de la corriente en la época de Enero a Abril.

Figura 4.6. Propagación del oleaje en la desembocadura del rio Magdalena.

Figura 4.7. Zona 1, relación de la dirección de las corrientes (flechas negras) y la propagación del oleaje (flechas blancas)

Figura 4.8. Perfil longitudinal de la altura de la ola significativa en la salida de los tajamares sin la influencia de la corriente (izquierda) y con la influencia de la corriente.

Figura 4.9. Zona 2, relación de la dirección de las corrientes (flechas negras) y la propagación del oleaje (flechas blancas)

Figura 4.10. Zona 3, relación de la dirección de las corrientes (flechas negras) y la propagación del oleaje (flechas blancas)

Figura 4.11. Diferencias de altura de oleaje en dirección N, para diferentes estados de mar y caudal.

Figura 4.12. Simulación de la propagación de un estado de mar en dirección N (blanco), con la corriente (negra).

Figura 4.13. Diferencias de altura de oleaje en dirección NNE, para diferentes estados de mar y caudal.

Figura 4.14. Simulación de la propagación de un estado de mar en dirección NNE (blanco), con la corriente (negra).

Figura 4.15. Diferencias de altura de oleaje en dirección NE, para diferentes estados de mar y caudal.

Figura 4.16. Simulación de la propagación de un estado de mar en dirección NE (blanco), con la corriente (negra).

Figura 4.17. Salida de la desembocadura con una propagación de la ola en dirección NE

Figura 4.18. Diferencias de altura de oleaje en dirección NEE, para diferentes estados de mar y caudal.

Figura 4.19. Simulación de la propagación de un estado de mar en dirección NEE (blanco), con la corriente (negra).

Figura 4.20. Diferencias de altura de oleaje en dirección E, para diferentes estados de mar y caudal.

Figura 4.21. Grafica de la desembocadura en un estado de mar en dirección E.

Figura 4.22. Simulación de la propagación de un estado de mar en dirección E (blanco), con la corriente (negra).

Figura 4.23. Diferencias de altura de oleaje en dirección W, para diferentes estados de mar y caudal.

Figura 4.24. Simulación de la propagación de un estado de mar en dirección W (blanco), con la corriente (negra).

Figura 4.25. Diferencias de altura de oleaje en dirección N, para diferentes estados de mar y caudal.

Figura 4.26. Simulación de la propagación de un estado de mar extremal (blanco), con la corriente (negra).

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Cuadro de estadísticas de Gestión CTM_CP8. Febrero 2006

Tabla 2.2. Origen y destino externo del comercio exterior.

Tabla 2.3. Variación de niveles de las subcuencas del río Magdalena.

Tabla 2.4. Resumen de la mayor probabilidad de la propagación de oleaje en parámetros de altura significativa, periodo pico y dirección entre los meses de Enero a Abril.

Tabla 2.5. Probabilidad de ocurrencia y el grado de clasificación en los meses de Enero a Abril.

Tabla 2.6. Resumen de la mayor probabilidad de la propagación de oleaje en parámetros de altura significativa, periodo pico y dirección entre los meses de Mayo a Septiembre.

Tabla 2.7. Probabilidad de ocurrencia y el grado de clasificación en los meses de Mayo a Septiembre.

Tabla 2.8. Resumen de la mayor probabilidad de la propagación de oleaje en parámetros de altura significativa, periodo pico y dirección entre los meses de Octubre a Diciembre.

Tabla 2.9. Probabilidad de ocurrencia y el grado de clasificación en los meses de Octubre a Diciembre.

Tabla 2.10. Altura significativa y periodo pico basado en la figura 2.18 y 2.19, la dirección es tomada de Ortiz (2006).

Tabla 3.1. Descripción de las mallas utilizadas.

Tabla 3.2. Valores de Gamma para el espectro JONSWAP en el Caribe.

Tabla 3.3. Relación de los caudales típicos en 1999-2005-2006-2007, en función del nivel del agua.

Tabla 3.4. Estados de mar seleccionados mas representativos en cada época.

Tabla 4.1. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección Norte, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

Tabla 4.2. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección N.

Tabla 4.3. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección NNE, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

Tabla 4.4. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección NNE.

Tabla 4.5. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección NE, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

Tabla 4.6. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección NE.

Tabla 4.7. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección NEE, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

Tabla 4.8. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección NEE.

Tabla 4.9. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección E, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

Tabla 4.10. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección E.

Tabla 4.11. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección W, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

Tabla 4.12. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección W.

Tabla 4.13. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar en régimen extremal, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

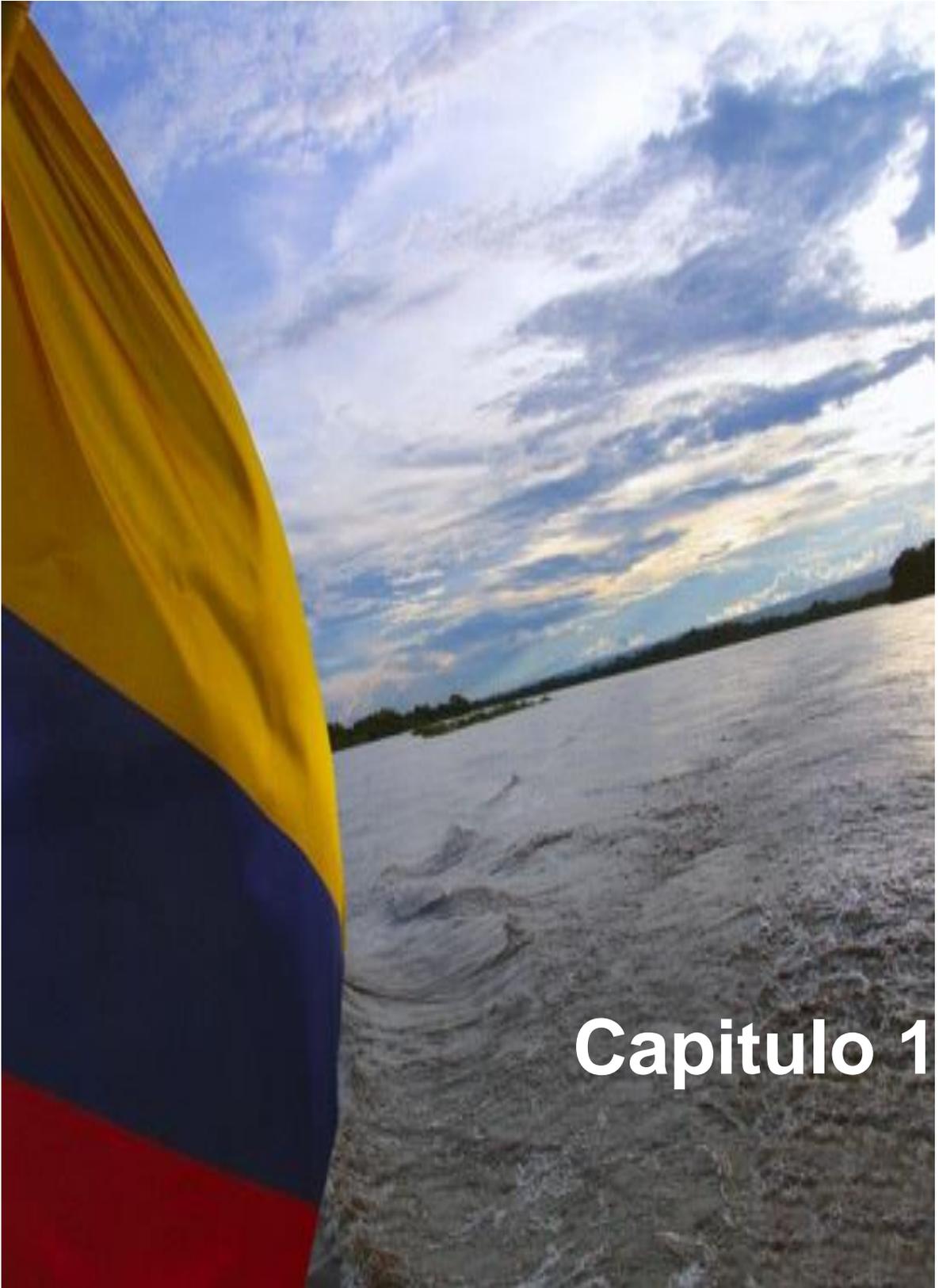
INFLUENCIA DE LAS CORRIENTES DEL RIO MAGDALENA EN LOS CAMPOS DE OLAJE EN EL ÁREA DE BOCAS DE CENIZA

RESUMEN

El efecto generado por la influencia de la corriente en el campo de oleaje en la desembocadura del río Magdalena, es de gran importancia en la seguridad marítima, como paso hacia el puerto marítimo de Barranquilla, el cual mensualmente tiene un tráfico marítimo de 100 naves aproximadamente, las cuales dependen de las condiciones del río para su oportuno arribo.

El Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) en alianza con la Universidad del Cauca plantean generar alternativas para el mejor aprovechamiento de los datos disponibles y suplir carencias de comprensión, como sucede con la influencia del caudal en los campos de corriente en la desembocadura del Río Magdalena. Actualmente, no hay un estudio específico sobre el tema, lo cual tiene un importante impacto en futuros proyectos, donde podría ayudar en análisis del estado de mar enfocado en temas como la navegación, basados en la necesidad de la recuperación de la navegación fluvial y hacer viable a nivel internacional la industria Nacional principalmente ubicada en el interior del país, además del conocimiento sobre el comportamiento de la desembocadura del Río.

Esta situación ha motivado a la formulación del presente proyecto en cuatro dimensiones: la recopilación de datos, generación de campos de corriente, simulación de propagación del oleaje utilizando el Modelo Hidrodinámico Bidimensional (H2D) y el Modelo Simulating Waves Nearshore (SWAN) y su respectivo análisis enfatizado en la diferencia de altura generada cuando se toma en cuenta o no el efecto de las corrientes sobre el oleaje.



Capitulo 1

INTRODUCCIÓN

Bolívar le había dicho categóricamente a Elbers, el pionero alemán de la navegación a vapor por el Magdalena:

"Yo les he dado la libertad, déles Usted el desarrollo".

Al describir y reflexionar sobre la historia y la memoria de la nación colombiana contenida a través de sus íconos, no habría tal vez ninguno que superase la presencia inequívoca del río Magdalena: eje organizador y paso obligado de nuestra historia. Actualmente sigue siendo aun la principal arteria fluvial del país, de la cual treinta millones de colombianos derivan su sustento.

De ahí originamos una necesidad intrínseca de conocer y proteger la zona costera, donde desde el punto de vista de la ingeniería es posible dar solución a numerosos problemas costeros, derivados de la dinámica y complejidad del sistema, sujeto a las fuerzas de las corrientes, de los flujos de sedimentos y de tormentas frecuentes.

A raíz del crecimiento desordenado de las ciudades y poblaciones costeras, se han generado dificultades, como inundaciones en sectores bajos de la costa y los deltas, retroceso de la línea de costa y otros peligros, es entonces nuestro deber canalizar la actividad científica para mejorar las condiciones de este sector, como parte de la misión de DIMAR, "estimular el desarrollo marítimo del país", a través del CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS, un Instituto de investigación preocupado por proveer herramientas para el conocimiento de la dinámica costera.

La temática resulta demasiado extensa, por lo cual durante varios años diversas instituciones privadas y gubernamentales han realizado trabajos de provecho para diferentes análisis, de nuestro interés será abordar de manera puntual el estudio sobre los efectos que se generan por la influencia de las corrientes en los campos de oleaje en la desembocadura del río Magdalena en un trayecto de unos 2 km aproximadamente, lo cual aun no ha sido documentado en la literatura dentro del marco local, y sería de provecho para futuros proyectos y pronósticos regionales.

Los resultados presentados dentro del ámbito del centro de investigación nos permite aportar bases en la profundización de proyectos como en el "Sistema de Pronósticos Oceanográficos y Atmosféricos a Escala Local – SPOA", actualmente adelantado en el CIOH, para aquellas zonas en la costa donde existe la interacción de corrientes

1.1 PLANTEAMIENTO Y CONTEXTO DEL PROBLEMA

La Costa Caribe colombiana no es ajena a eventos naturales como el paso de huracanes, tsunamis y el eventual ascenso del nivel del mar, por consecuencia del cambio climático. Es claro que el país no está preparado para la ocurrencia de estos eventos, por lo tanto, es indispensable mejorar la información sobre el conocimiento de los efectos en las costas colombianas.

La Dirección General Marítima – DIMAR como parte de las actividades marítimas que ejecuta, viene desarrollando a través de Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH, el proyecto SPOA, con la visión de ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de las condiciones oceanográficas y atmosféricas en las aguas jurisdiccionales de Colombia, cuyo objetivo primordial es el mejoramiento de la seguridad marítima.

La ubicación geográfica del río Magdalena, discurre por el norte entre las cordilleras Oriental y Central, dos alineaciones de los Andes. Cruza la región septentrional de tierras bajas donde confluye con el río Cauca antes de desembocar en el mar Caribe, cerca de la ciudad de Barranquilla. La longitud total del Magdalena es de 1.540 Km. El trayecto entre el Caribe y La Dorada, a unos 600 Km. del mar, fue en su tiempo una importante ruta fluvial navegable y hoy lo es sólo en su tramo final. Gran parte del río es poco profundo y tortuoso, y la reciente deforestación ha causado aluviones que, a su vez, han reducido su navegabilidad¹. Por lo que se ha desarrollado una economía oscilante, proceso por el cual la reactivación de la navegación por el río Magdalena es un tema de trascendencia para la región.

En este sentido el presente trabajo tiene como objeto de estudio en la costa Caribe, el delta del río Magdalena.

1.1.1. DELTAS

Los Deltas de los ríos están habitados por más de 60% de la población mundial, y son por consiguiente de suma importancia agrícola y económica. Constituyen entornos de humedales únicos que le dan importancia ecológica también. Además, muchos deltas contienen grandes acumulaciones de petróleo, gas y carbón, que aumentan aún más el valor de su economía.

¹ Río Magdalena: El río de la Patria. <http://espanol.geocities.com/magangue2001/riomagdalena.htm> [1 de junio de 2009]

Los deltas evolucionan bajo la influencia del caudal, el sedimento del río y la acción de los agentes marinos. Dichas influencias no son permanentes, sino que llegan como pulsos: una avenida del río nos trae gran cantidad de agua y sedimento, y un temporal puede modificar la línea de costa. El hombre siempre ha percibido estos episodios como una amenaza, y ha intentado minimizar sus efectos.

1.1.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DELTAS

En los años 1960-70, el estudio de los medios sedimentarios recientes reveló las relaciones entre los mecanismos de transporte, las facies y la geometría de los depósitos, y demostró que la morfología de las costas, y particularmente de los deltas varía en función de la importancia relativa de tres factores como se relaciona en la figura 1.1., la importancia de los aportes y de los procesos fluviales, la energía del oleaje y la de las mareas.



Figura 1.1. Clasificación genética de los deltas. Fuente: Los Deltas: Morfología y tipología. Sección 3.2 Tipos de Deltas. Escuela de Ingeniería de Antioquia²

Los deltas con predominio de las acciones marinas, son asociados a los oleajes. Donde la acción de los oleajes se efectúa sobre la parte externa de la llanura deltaica y a lo largo del frente del delta. A este patrón pertenece el río Magdalena en el Caribe Colombiano³.

El oleaje se hace sentir más que todo en la parte externa de la llanura deltaica y en el frente deltaico. En estas zonas, la turbulencia de la rompiente y el vaivén de las olas impide el depósito de los sedimentos finos, que son dispersados hacia el

² Rodríguez, C. 3. Los Deltas: Morfología y tipología. Sección 3.2 Tipos de Deltas. Escuela de Ingeniería de Antioquia. <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoencanales/deltas/page5.html> [10 de mayo de 2009]

³ J. Restrepo, Ph.D. (2008). Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio Global. Ed. Universidad EAFIT.

mar, y provoca el retrabajamiento continuo de las arenas fluviátiles y su transporte lateral, si existe una deriva litoral.

Entre los numerosos deltas sometidos al oleaje, algunos experimentan solo este efecto, otros están sometidos a efectos mixtos del oleaje o a los efectos mixtos del oleaje y de las mareas.

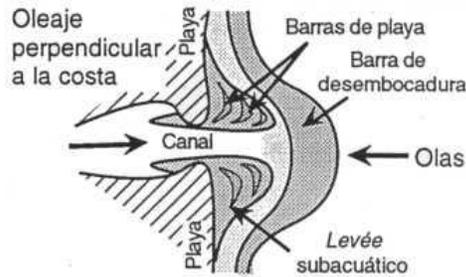


Figura 1.2. Organización de la desembocadura de un río en una costa dominada por el oleaje. Las olas pueden llegar perpendicularmente a la costa. Fuente: Los Deltas: Morfología y tipología. Sección 3.2 Tipos de Deltas. Escuela de Ingeniería de Antioquia

1.1.2. ANTECEDENTES

Debido a la importancia que tienen los deltas a nivel mundial se han realizado diversos estudios experimentales sobre los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos en la zona cercana a la costa, los cuales son importantes dado que los procesos físicos interactúan de forma más concentrada e intensa en una zona más estrecha, estos son llevados a cabo por distintas universidades e instituciones de investigación alrededor del mundo.

Durante 20 años continuos el Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales IDEHA de la Universidad del Norte en la operación del Laboratorio de las Flores y la Corporación Autónoma Regional del río grande de la Magdalena CORMAGDALENA, ha realizado mediciones en el río, lo cual ha permitido precisar cómo varían los caudales extremos: entre 1.500 y 14.000 m³/s, con una media multianual de 7.100 m³/s. Lo anterior nos brinda información del comportamiento del río Magdalena a través del año; caudales bajos de enero a marzo, caudales altos de octubre a diciembre y caudales medios el resto del año⁴. Esto es realizado gracias a diferentes campañas, de la mano de CORMAGDALENA y el

⁴Condiciones generales del puerto de Barranquilla, durante Abril de 2006. E-004-046-06. CORMAGDALENA. UNIVERSIDAD DEL NORTE. IDEHA. 8 de agosto de 2209.
<http://fs03eja1.cormagdalen.com.co/nuevaweb/Puertos/E-004-046%20Sexto%20Inf.%20Mensual%20C%20de%20A-Abr%202006.pdf>.

IDEAM, en el río Magdalena, de las cuales se han derivado varios análisis sobre agua, suelo, erosión, sedimentos y como observatorio ambiental, entre otros; además la Universidad del Norte ha adelantado estudios relacionados con el río Magdalena, Alvarado (2009)⁵.

En la literatura autores como Restrepo(2008)⁶, aclara que, el Magdalena es el único delta colombiano razonablemente documentado en los análisis globales de morfodinámica deltaica, pero en los estudios se evidencia la ausencia de información detallada proveniente de investigaciones locales, y los resultados obtenidos están basados en el análisis de mapas, fotografías e imágenes de satélites. Es importante solventar la carencia de información de los fenómenos en esta zona, para poder evaluar las condiciones reales de acceso al Puerto de Barranquilla. Un ejemplo de ello es el efecto de las corrientes del río Magdalena en los campos de oleaje en la zona de Bocas de Ceniza.

Actualmente el CIOH se encuentra adelantando el proyecto SPOA, el cual contempla para el Caribe, un modelo de oleaje regional con capacidad de pronósticar las condiciones de oleaje para varios días (Lonin, 2007)⁷, así mismo, dentro de este proyecto se implementó un modelo de oleaje a escala local para los principales puertos, los cuales incluyen las áreas de San Andrés, Providencia, Puerto Bolívar, Riohacha, Santa Marta, Barranquilla, Cartagena, Golfo de Morrosquillo y Golfo de Urabá, basado en el acople del modelo Nedwam al Caribe, cuyas modificaciones resultaron ser significativas, surgiendo así un nuevo modelo, llamado CaribWAM-III, el cual realiza pronósticos de oleaje a nivel regional.

Las principales dinámicas en la zona son: el oleaje, las mareas y las corrientes. En la costa Caribe colombiana son características las mareas semidiurnas y mixtas tendiendo a semidiurnas, con amplitudes que oscilan entre los 20 y los 30 cm⁸. Se puede discernir entonces, que la energía del oleaje es la principal dinámica marina en la zona de estudio. No obstante en el pronóstico, para el cálculo de los campos de oleaje en el Puerto de Barranquilla, el modelo no toma en cuenta la influencia de las corrientes del río Magdalena, siendo esta una dinámica importante que afecta los campos de oleaje y sumado a los fuertes vientos y las fluctuaciones del

⁵ Alvarado, M. (2009). Río Magdalena navegación marítima y fluvial (1986-2008). Universidad del Norte.

⁶ J. Restrepo, Ph.D. (2008). Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio Global.

⁷ LONIN, S. (2007). Informe final de resultados 2007 Proyecto implementación de un sistema de pronóstico oceánicos y atmosféricos a escala local en el Caribe y pacífico colombiano – SPOA.

⁸ Caribe Colombia FEN Colombia Oceanografía. Publicación digital en la página web de la Biblioteca Luis Ángel Arango del Banco de la República. [11 de agosto de 2009].

calado del río, dificulta la navegación en el área de Bocas de Ceniza y por ende el acceso al Puerto de Barranquilla afectando la seguridad en la navegación.

Por lo tanto, las actividades crecientes en nuestras regiones costeras requieren de información más detallada de lo que suministran estos institutos o los modelos a escala global. En la actualidad hay una tendencia claramente creciente al uso de modelos numéricos predictivos para los procesos hidrodinámicos, morfodinámicos y de evolución costera. Sin embargo, poco se tiene sobre los efectos hidrodinámicos en la desembocadura del río, como la influencia de las corrientes en los campos de oleaje. La mayor parte de los estudios realizados sobre la interacción ola-corriente en el mundo, como por ejemplo: Liu y Dalrymple (1979)⁹, Nishimura (1982)¹⁰, Hass, *et al.* (1998)¹¹ y Özkan-Haller¹² y Li (2003)¹³, entre otros, han sido llevados a cabo con el propósito de describir sus efectos en la hidrodinámica de la zona de rompientes de las playas.

En Canadá realizaron un estudio desarrollado por el Meteorological Service of Canada, Pacific & Yukon Región, compilado de Stronach (2005)¹⁴, el cual enfatiza sobre la interacción oleaje – corriente con el modelo predictivo Simulating Waves Nearshore (SWAN), donde, este tipo de interacciones frecuentemente representa condiciones peligrosas para la navegación debido al aumento de la altura de ola.

En Estados Unidos, la Universidad de Ciencias Oceánicas y Atmosféricas analiza las condiciones de navegación peligrosa en los deltas, en Andes (2006)¹⁵.

Subandono (1998)¹⁶, trata sobre la complejidad de los fenómenos de deformación de la ola, las corrientes cercanas a la costa y el cálculo de los efectos hidrodinámicos en la costa de Indonesia¹⁷.

⁹LIU, Y DALRYMPLE, R.A. (1979). Bottom frictional stresses and longshore currents due to waves with large angles of incidence. *Journal of marine research*, 32, No. 2

¹⁰ NISHIMURA, H. (1982). Numerical simulation of nearshore circulations. in: proceedings 29th Japanese conference on coastal engineering. *jpn. soc. civ. eng., tokyo*, 33- 173.

¹¹ HASS, K.A., SVENDSEN, I.A. Y HALLER, M.C. (1998). Numerical modelling of nearshore circulation on arched beach with rip channels. *proc. 26th int. conf. on coastal engineering*, 801-814.

¹² ÖZKAN- HALLER, H.T. Y LI, Y. (2003). Effects of wave- current interaction on shear instabilities of longshore currents. *journal of geophysical research*, 108 (c5).

¹³ M. OLABARRIETA, R. MEDINA Y P. LOMÓNACO() Efecto de la interacción ola-corriente en la propagación de la marea en estuarios.

¹⁴ Stronach, J., Zaremba, L. (2005). HAY & COMPANY CONSULTANTS. Wong, M., Neil, L., McLennan, N. ENVIRONMENT CANADA – METEOROLOGICAL SERVICE OF CANADA, PACIF & YUKON REGION. Wave and current forecast system for the mouth of the Fraser River.

¹⁵ Andes, L., Ozkan-Haller, T. (2006). Wave-Current Interactions at the Mouth of the Columbia River College of Oceanic and atmospheric Sciences, Oregon State University, #OS32A-03.

La presente investigación será enfocada en el área de la desembocadura del río Magdalena, combinando los modelos numéricos, Simulating Waves Nearshore (SWAN) y el modelo Hidrodinámico bidimensional (H2D) para corrientes. El modelo SWAN está basado en la ecuación de balance de movimiento de ondas con fuentes y sumideros, en aguas someras. Es una extensión de los modelos de tercera generación en aguas profundas. El modelo H2D es un modelo promediado en vertical que resuelve las ecuaciones de onda larga en diferencias finitas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone el análisis de distintos escenarios con diferentes condiciones de caudal en el tiempo, basado en modelos predictivos, para luego ser utilizados en el análisis y aplicaciones en posibles soluciones en temas como la navegación marítima y fluvial.

Lo anterior, permitirá la ampliación del conocimiento en el manejo de los modelos numéricos, y ejercer un mayor aprovechamiento en su uso, como herramienta muy útil de predicción a corto, mediano y largo plazo, estando así a la vanguardia en los avances científicos, como muchos de los centros de investigación oceanográfica y meteorológica del mundo. Los resultados de la presente investigación, proporcionará mayor precisión y conocimiento sobre el comportamiento de los campos de oleaje en la zona de estudio, para establecer las condiciones de acceso al puerto, con el objetivo de perfeccionar el pronóstico, y por consiguiente mejorar las condiciones de seguridad para la navegación hacia el puerto de Barranquilla.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la influencia de las corrientes del río Magdalena en los campos de oleaje en el área de su desembocadura, considerando la variabilidad estacional de las corrientes y las condiciones de oleaje en el mar Caribe.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una recopilación de datos de caudal y oleaje existente en la zona como los datos de las boyas de registro, datos visuales y así obtener el clima

¹⁶ Subandono Diposaptono and Akira Mano. Near – Shore current analysis around Krueg Aceh river mouth, Indonesia. <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00011/1998/14-0107.pdf>. [12 de agosto de 2009]

¹⁷ Subandono Diposaptono. Wave and current fields around Sand Barrier at a river mouth. <http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/bitstream/10097/7807/1/T1H112534.pdf> [12 de agosto de 2009].

marítimo representado en forma de: régimen medio escalar, régimen extremal direccional y distribución de alturas.

- Generar campos de corrientes debido al caudal del río y a la variación del nivel del mar debido a la marea con el modelo numérico H2D
- Simulación numérica de la propagación de oleaje mediante el modelo SWAN considerando la influencia de las corrientes del Río Magdalena en los campos de oleaje.
- Efectuar un análisis comparativo de la influencia de las corrientes en los campos de oleaje en la desembocadura del Río Magdalena considerando diferentes escenarios.



Capitulo 2

Características generales del Área de Bocas de Ceniza

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE BOCAS DE CENIZA

La región Caribe de Colombia tiene una extensión de 132.288 km² que corresponden a 11.6% de la superficie total del país. El litoral Caribe está localizado en el sector norte de Colombia, limitando con las fronteras de Venezuela y Panamá al oriente y occidente respectivamente.

La zona de estudio comprende el delta del río Magdalena, en el área de Bocas de Ceniza. Bocas de Ceniza es el punto de desembocadura del [río Magdalena](#) en [Colombia](#) en el [Mar Caribe](#), localizado en el sector central del litoral Caribe Colombiano como se puede observar en la localización de la figura 2.1. Debe su nombre al color cenizo que toman las aguas del océano al recibir los sedimentos del río, como se aprecia en la figura 2.1. En la actualidad, el río desemboca en el mar a través de un canal artificial construido en los años 30.



Figura 2.1. Área de Bocas de Ceniza y su localización en el litoral Caribe. Fuente: www.earth.google.es.

2.1. RIO MAGDALENA ¹⁸

Es el sistema fluvial de mayor importancia en Colombia, no sólo por su gran extensión, superior a todos los demás, sino también y, especialmente, por la riqueza económica de las tierras que comprende. El Magdalena es el río de la Patria. Su longitud total, entre las cordilleras Central y Oriental como se observa en la figura 2.2., es de 1558 km, de los cuales son navegables 1290 interrumpidos en el salto de Honda. Es el río interandino de mayor extensión en Suramérica. Descarga al mar 8000 m³/seg. Su cuenca mide 256.622 km² de superficie. Recibe las aguas de cerca de 500 afluentes por ambas orillas y más de 5000 arroyos y quebradas. Sirve de lazo de unión entre los diversos pueblos de los territorios que recorre, desde su nacimiento en la laguna de la Magdalena, en el páramo de las Papas (Macizo Colombiano) a 3685 m de altura, hasta su desembocadura, en Bocas de Ceniza en el mar Caribe. Se destaca Barranquilla como el primero de sus puertos y le siguen en importancia, La Dorada, Puerto Berrío, Barrancabermeja, Puerto Wilches, Magangué, El Banco y Girardot. El Magdalena está comunicado con el puerto marítimo de Cartagena a través del canal del Dique, obra humana de 105 km de longitud. Gran parte del río es poco profundo y sinuoso, y la reciente deforestación ha causado aluviones que, a su vez, han reducido su navegabilidad ¹⁹.

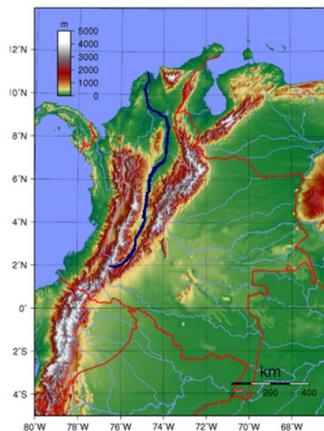


Figura 2.2. Ubicación del Río Magdalena en Colombia. Fuente:

http://solar.physics.montana.edu/munoz/AboutMe/ColombianMusic/NaturalRegions/Relieve_Colombia.jpg

La cuenca hidrográfica del río Magdalena tiene 262000 km² que corresponden al 24% de la superficie del país, está dividida en tres partes: alto, medio y bajo

¹ Hidrografía de Colombia. <http://www.colombiaya.com/seccion-colombia/hidrografia.html> [11 de agosto de 2009].

¹⁹ Río Magdalena. <http://www.cormagdalena.com.co/>. [10 de junio de 2009].

Magdalena, nuestra zona de estudio será el delta del río que está entre Calamar (km 115) y la desembocadura en Bocas de Ceniza (km 0).

2.1.1. ECONOMÍA Y SOCIEDAD

El puerto de Barranquilla está ubicado sobre la orilla occidental del río Magdalena. Posee las instalaciones portuarias más extensas de Colombia y debido a esto pasó a la categoría de Distrito Especial Industrial y Portuario en 1993.

Sobre la margen izquierda del río Magdalena opera la Sociedad Portuaria del Norte, primer muelle privado multipropósito del puerto de [Barranquilla](#). El acceso al puerto se hace por el canal navegable de Bocas de Ceniza, el cual, como toda desembocadura de río, presenta la formación de la barra (gran banco de sedimentos que taponan la entrada de los buques), por lo que requiere de mantenimiento permanente (dragado de los sedimentos) para asegurar la entrada y el arribo seguro de las naves. Para la eliminación de la barra y asegurar la navegabilidad del canal, se construyeron los tajamares de Bocas de Ceniza en 1936; y en los años 90 se construyó un dique direccional para el control de sedimentos.

2.1.1.1. TRAFICO MARÍTIMO EN EL PUERTO DE BARRANQUILLA



Figura 2.3. Vista aérea de un muelle de la Sociedad Portuaria de Barranquilla.

Fuente: <http://www.spdelnorte.com/galeria.asp>. [8 de septiembre de 2009]

Mediante el mayor o menor grado de movilización de carga por parte de un puerto es posible determinar la importancia del mismo en el comercio de un país y su participación en el comercio internacional. El potencial de tráfico de un puerto depende, entre otros factores, de su ubicación estratégica, de su disponibilidad de

equipos, de sus condiciones naturales, de su proximidad a las rutas de comercio internacional y de un equilibrado balance interno de carga de salida y de entrada al mismo.

Más del 80% del comercio internacional mundial se realiza por medio del transporte marítimo, debido a que este medio es el más económico en distancias largas. En Colombia, el 85% de la carga de comercio exterior movilizada en el país se maneja por vía marítima. En el periodo comprendido entre 1995 y 2003, el país ha movilizadopor sus zonas portuarias un total de 681,4 millones de toneladas, de las cuales cerca del 92% corresponden a movimientos de comercio exterior²⁰.

Tabla 2.1. Cuadro Estadísticas de Gestión CTM-CP8. Febrero de 2006. Fuente: <http://www.dimar.mil.co/>²¹ [8 de septiembre de 2009]

ACTIVIDAD EFECTUADA	CANTIDAD
Arribos Internacionales	45
Zarpes Internacionales	45
Arribos Cabotaje	56
Zarpes Cabotaje	50
Arribos Servicio en Puerto	91
Zarpes Servicio en Puerto	91
Arribos Pesqueros	0
Zarpes Pesqueros	0
Recepción SQL	20
Realización Visitas de Cabotaje	17

Teniendo en cuenta la Tabla 2.1. el número de arribos tanto internacionales y de cabotaje son 101 naves, en un solo mes, a pesar que el puerto de Barranquilla no es el que más tonelaje mueve, si presenta la mayor cantidad de terminales dedicados al comercio exterior como se describe en la Tabla 2.2., por lo cual es indispensable mantener adecuado el canal del río Magdalena, siendo la vía principal al puerto y con el pronóstico necesario para la seguridad en la navegación hacia el puerto.

Tabla 2.2. Origen y destino externo del comercio exterior. Fuente: Ordenamiento Físico y portuario de los litorales Colombianos²²

²⁰ Ministerio de transporte (2004). Inversiones estratégicas prioritarias en zonas portuarias de Colombia. Documento Conpes 3315.

²¹ Estadísticas de Gestión de Febrero de 2006.

<http://www.dimar.mil.co/VBeContent/library/documents/DocNewsNo4829DocumentNo2247.XLS>[8 de septiembre de 2009]

Zona portuaria	Camr	Crbe	Eaam	Loaa	Namr	Satl	Spac	Otros
Exportaciones								
Barranquilla	140.192	328.660	304.568	110.028	200.577	17.737	22.240	79.033
Total de Exportaciones	1.780.648	3.651.365	24.815.784	1.595.863	31.431.645	4.300.825	3.153.157	3.389.119

Cama : Centroamérica Namr: Norteamérica Crbe : Países del Caribe Satl: Atlántico suramericano
 Eaam : Europa, África, Asia y Medio Oriente Spac: Pacífico suramericano y Bolivia Loaa :
 Lejano Oriente, Australia, Asia pacífico

2.1.1.2. CANAL DE ACCESO

Con la Ley 1ra de 1.993 el Gobierno adquiere la responsabilidad de mantener la profundidad de 30 pies en el canal navegable. El mantenimiento del calado del río depende de su caudal, por lo tanto se realizan estudios Batimétricos diarios para determinar zonas a dragar y dragado permanente²³.

El canal de acceso fue reforzado con la construcción de un dique direccional, obra de ingeniería que permitió mejorar el flujo de aguas hacia el canal principal desalojando mas sedimento, lo que ha permitido estabilizar las condiciones de navegación de las embarcaciones que visitan el puerto de Barranquilla.

El canal de acceso al Puerto de Barranquilla tiene una longitud de 22 km. El entorno físico del canal de acceso se enmarca de la siguiente manera: Al Sur, el puente “Pumarejo”, al Norte, la desembocadura del río en el mar Caribe, en Bocas de Ceniza. Al Este, el Parque Nacional Natural Isla de Salamanca en el departamento del Magdalena y al Oeste, la ciudad de Barranquilla, capital del departamento del Atlántico.

El sector del canal que abarca la zona de estudio, esta comprendido en canal navegable fluvial, entre el Muz del tajamar Occidental (K0) y las Flores (K8). En los primeros 2.5 km se mantienen en 9.14 m de calado. Entre 2.5 km y 7.5 km tiene profundidades mayores a 12m.

2.2. CAUDAL RÍO MAGDALENA

El caudal de un río es el volumen de agua que pasa por una sección dada, en un tiempo determinado. Generalmente, se expresa en metros cúbicos por segundo (m³/seg).

²² Ordenamiento Físico y portuario de los litorales Colombianos. CORPES de occidente. Caracterización de la infraestructura portuaria.

²³ http://www.sprb.com.co/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=27

En las diferentes corrientes naturales, el comportamiento de los caudales está unido directamente con el comportamiento de las lluvias en el tiempo que cae sobre la cuenca vertiente y con las características propias de la cuenca. La cuenca baja del Magdalena se caracteriza por ser una zona plana (pendientes <math><5^\circ</math>) y alturas menores a 250 m, en esta zona se forma un valle aluvial extenso con amplias llanuras de inundación, terrazas fluviales, complejos deltaicos y llanuras litorales (Martínez, 1981)²⁴.

El Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales IDEHA de la Universidad del Norte, en la operación del Laboratorio de las Flores y CORMAGDALENA, han realizado mediciones en el río, lo cual ha permitido precisar como varían los caudales:

- Caudal Máximo 14.000 m³/s
- Caudal Mínimo 1.500 m³/s
- Caudal medio multianual 7.100 m³/s

Se evidencia la presencia de dos periodos alternos de aguas bajas y altas, variables de acuerdo a las diferentes regiones climáticas que atraviesa el río como se consigna en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Variación de niveles de las subcuencas del río Magdalena. Fuente: La cuenca del río Magdalena. <http://desastres.usac.edu.gt>.²⁵

Subcuenca	Niveles Altos	Niveles bajos
Alto Magdalena (55.500 km²)	1. Abril, Mayo. 2. Octubre, Noviembre.	1. Julio, Agosto. 2. Diciembre.
Medio Magdalena (49.150 km²)	1. Mayo, Junio. 2. Octubre.	1. Enero. 2. Julio.

²⁴ Martínez, A. (1981). Subsistencia y geomorfología de la depresión inundable del Río Magdalena. Revista CIAF.6, 1-3.

²⁵ La cuenca del Río Magdalena. <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc8918/doc8918-7ane.pdf> [20 de agosto de 2009].

Bajo Magdalena (24.705 km²)	1. Junio. 2. Octubre.	1. Enero, Febrero. 2. Julio.
---	--------------------------	---------------------------------

Esto nos brinda información del comportamiento típico que tiene el río en el Bajo Magdalena a través del año; niveles bajos desde finales de enero hasta principios de abril, niveles altos entre septiembre a diciembre y caudales medios el resto del año, como se relaciona en la figura 2.4, el cual está relacionado con el nivel del agua (m.s.n.m.) de acuerdo a la figura 2.5.

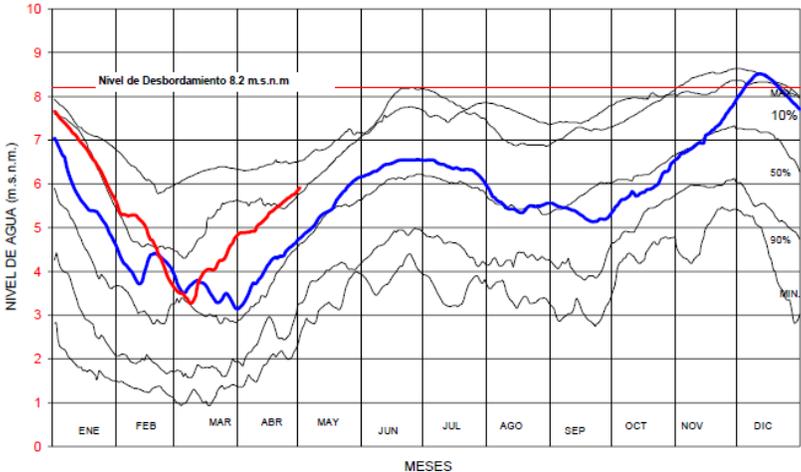
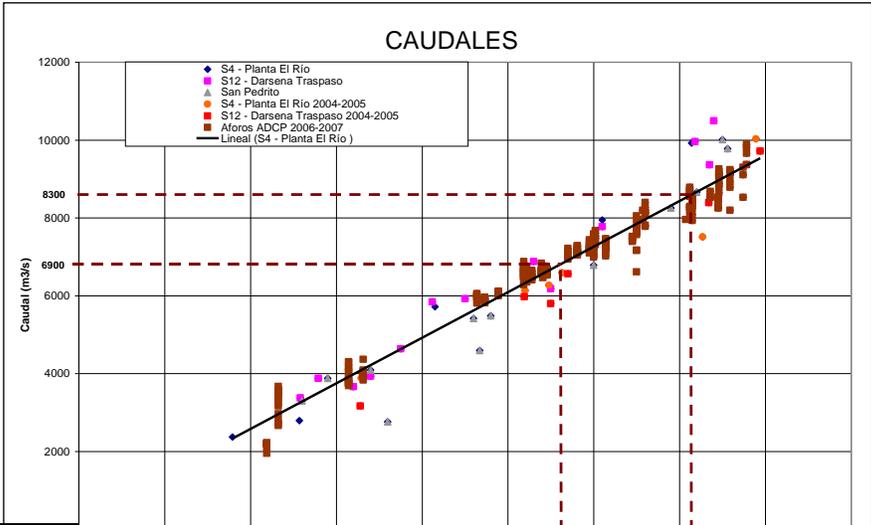


Figura 2.4. Frecuencia de Niveles Excedidos – Estación Calamar. Fuente: Condiciones generales del Puerto de Barranquilla, durante abril de 2006 ²⁶



²⁶ Condiciones generales del puerto de Barranquilla durante Abril de 2006. E-004-046-06. CORMAGDALENA. UNIVERSIDAD DEL NORTE. IDEHA. 8 de agosto de 2009. <http://fs03eja1.cormagdalena.com.co/nuevaweb/Puertos/E-004-046%20Sexto%20Inf.%20Mensual%20de%20A-Abr%202006.pdf>

Figura 2.5. Correlación Niveles Estación Calamar – Caudal en las Flores.

Fuente: Condiciones generales del puerto de Barranquilla, durante abril de 2006 ²⁷

La Ecuación de correlación de la figura 2.5. es:

$$y = 1168,99717x + 251,71351$$

donde, **y**: son caudales
x: nivel del agua

²⁷ Condiciones generales del puerto de Barranquilla, durante Abril de 2006. E-004-046-06. CORMAGDALENA. UNIVERSIDAD DEL NORTE. IDEHA. 8 de agosto de 2209. <http://fs03eja1.cormagdalena.com.co/nuevaweb/Puertos/E-004-046%20Sexto%20Inf.%20Mensual%20%20C%20de%20A-Abr%202006.pdf>

2.3. BATIMETRÍA

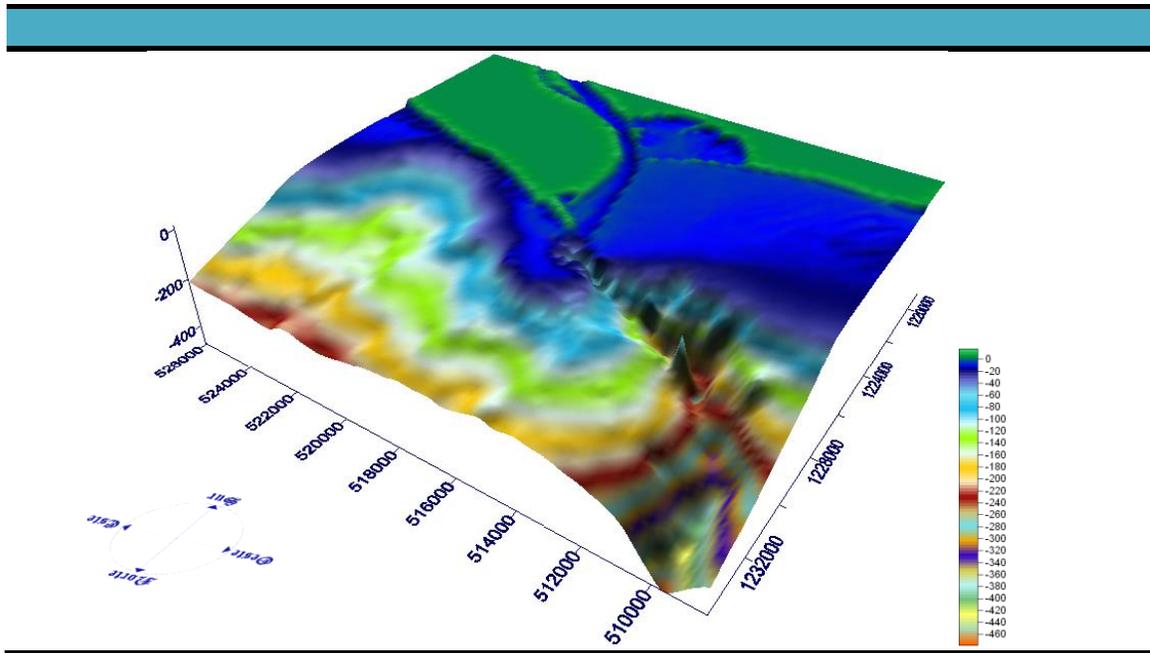


Figura 2.6. Batimetría Base del sector de estudio área de Bocas de Ceniza

En la figura 2.6. se observa la zona de estudio, un área de 17500 x 14900 m, graficada de acuerdo a sus profundidades, podemos constatar la existencia de unas depresiones al terminar los tajamares, las cuales son el nacimiento de lo que se denomina cañón submarino, figura 2.7., donde se observa claramente todo el cañón, el cual permite un dragado natural por parte de los sedimentos aportados por el río, que se incrementan con el aumento del caudal, el cual ha mantenido niveles altos entre el 2006 y 2008 con valores entre 7000 y 9000 m³/s.

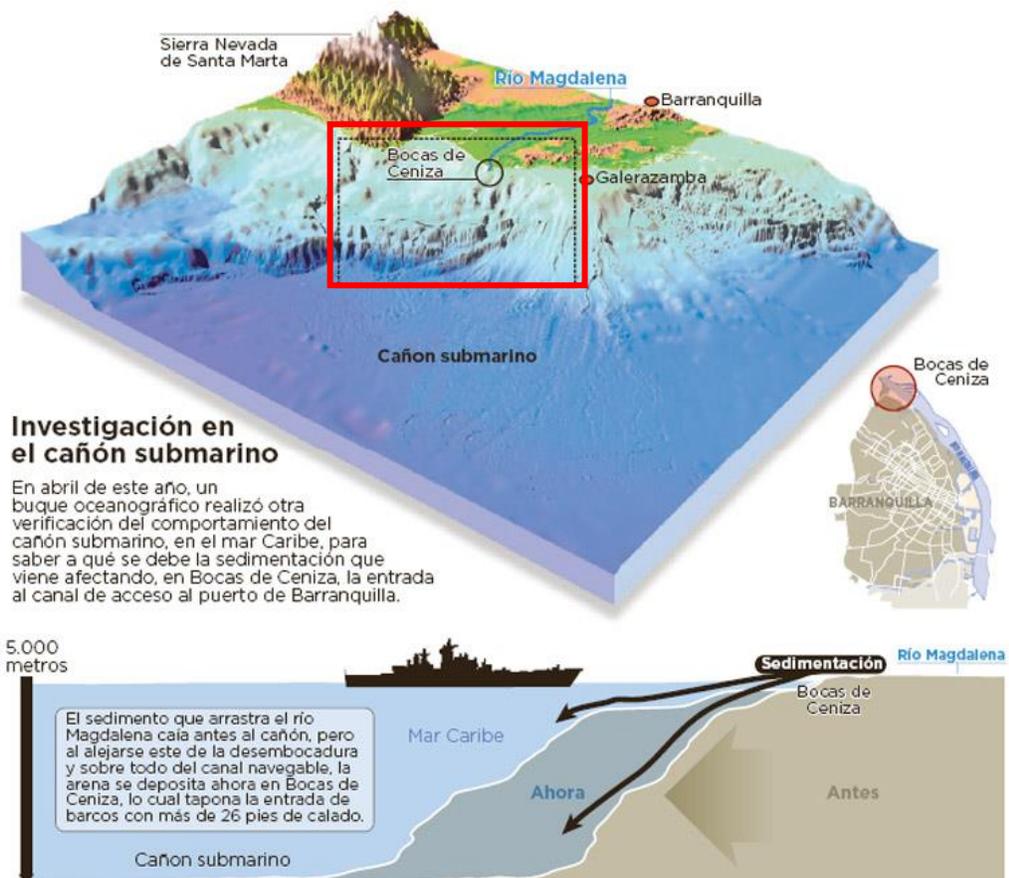


Figura 2.7. Ubicación de Bocas de Ceniza respecto al cañón submarino. Fuente: Alvarado, recorte de El Heraldó [8 de septiembre de 2009]²⁸

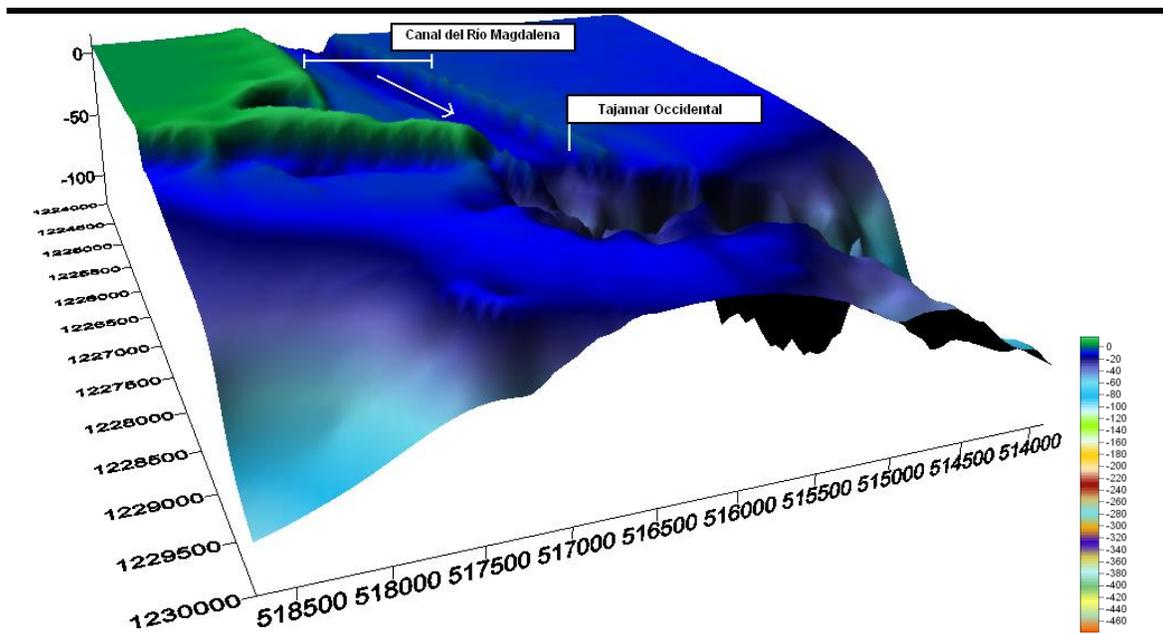
Dentro de la batimetría encontramos que la relación entre el ancho del canal que varía entre aproximadamente 500 y 1000 m, y su profundidad es bastante grande (figura 2.8.), la poca profundidad del río ha ocasionado problemas en la navegación, el cual debe conservar un mínimo de calado para el tránsito de naves como se manifestó en el ítem 2.1.1.2.; en lo que lleva este año 2009 se ha desviado un barco por estos inconvenientes²⁹.

Batimetría

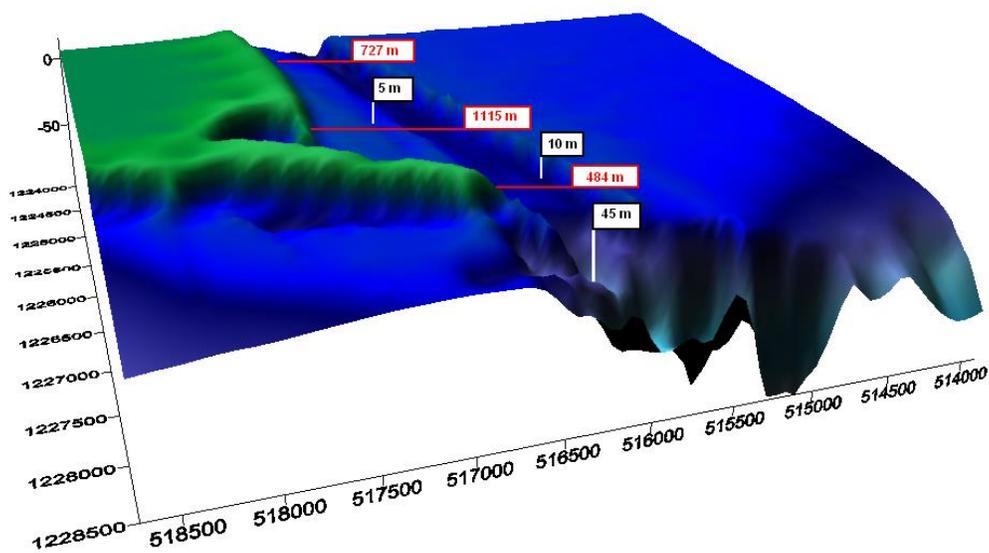
²⁸ Periódico El Heraldó. Barranquilla. Alvarado [8 de Septiembre de 2009].

http://www.elheraldo.com.co/ELHERALDO/BancoConocimiento/5/5el_dragado_en_el_puerto_tiene_que_ser_permanente/5el_dragado_en_el_puerto_tiene_que_ser_permanente.asp

²⁹ i.e. pie de página 10.



Batimetría Nest Completa



Batimetría recortada para observar mejor la desembocadura

Figura 2.8. Profundidades y ancho del canal de la Batimetría en estudio.

2.4. MAREAS

En la costa Caribe colombiana son características las mareas semidiurnas y mixtas tendiendo a semidiurnas. En la mayoría de las ocasiones sus amplitudes oscilan entre 20 y 30 cm.

La desembocadura del río Magdalena, presenta mareas con amplitud máxima de 0.60 m. La predicción de mareas calculadas por el IDEAM medidas en Antigua Casa Pilotos, en un mismo mes varió entre -0.007m y 0.493 m

2.5. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

Cuando tratamos de estudiar comportamientos físicos que generan observaciones que no podemos describir con certeza, nos enfrentamos a eventos conocidos como aleatorios o estocásticos. En general, los eventos aleatorios no pueden ser predichos con certeza, pero la frecuencia relativa con la ocurre en un intervalo grande de tiempo es a menudo estable.

La probabilidad de un evento es una medida del grado de confianza que se tiene de que dicho evento ocurra al realizar una vez el experimento correspondiente. Por ello es importante examinar las propiedades estadísticas del oleaje, acumuladas a lo largo de un periodo de tiempo ya que estas nos permiten conocer las dinámica costera, y definir las condiciones iniciales y de contorno para nuestro modelo.

A continuación se describe brevemente el comportamiento del oleaje en el Caribe el cual está muy relacionado con el comportamiento de los campo de vientos en cada una de las épocas climáticas presentes en el litoral Caribe Colombiano:

- Época seca (diciembre a marzo)

Se extiende desde Diciembre hasta Marzo, caracterizándose por vientos fuertes del sector Norte – Noreste, llamados vientos alisios provenientes del mar, con velocidades hasta 61 km/h y lluvias débiles y escasas.

- Época Húmeda (abril a junio)

Época de lluvias que se extiende desde Abril a Junio. Se caracteriza por vientos débiles, de orientación variable y por un régimen de lluvias abundantes, con una precipitación promedio de 73 mm. El régimen de vientos durante el comienzo de la temporada, se mantiene bastante constante a lo largo del litoral Caribe norte y centro, manteniéndose en

dirección noreste y este hacia finales del mes de junio, dicha velocidad del viento varía intensificándose y causando un aumento considerable de la altura del oleaje.

- Época de transición (junio a julio)

Comprendida entre junio y Julio. También denominado “*Veranillo de San Juan*”. Esta época se caracteriza por vientos uniformes y fuertes de dirección Norte y Noreste

- Época Húmeda (agosto a noviembre)³⁰

La alta presión de Azores, sistema que regula la incidencia de los vientos alisios para el océano Atlántico y Mar Caribe, para la época Húmeda, se mantiene sobre los 30° Norte. La incidencia directa de los vientos alisios disminuye considerablemente durante el mes de octubre. La procedencia de los vientos está más asociada a la Zona de Convergencia Intertropical, que a los vientos alisios, llegándose a presentar vientos en dirección oeste suroeste durante este mes con velocidades que oscilan en general entre los 05 a 10 nudos.

Los días de lluvia para estos meses están en 46 días con una precipitación promedio de 126 mm. Las más altas en todo el año.

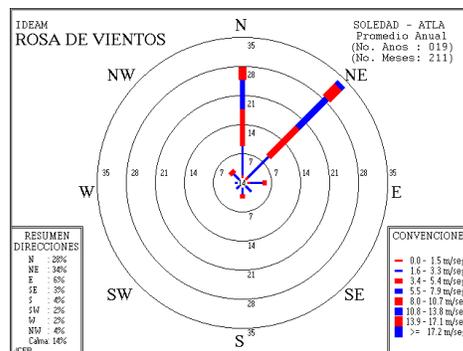


Figura 2.9. Diagrama de vientos para Barranquilla. Fuente: IDEAM ³¹

³⁰ Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano. Barranquilla. www.cioh.org.co [10 junio de 2009]

³¹ Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 1 de Junio de 1999.

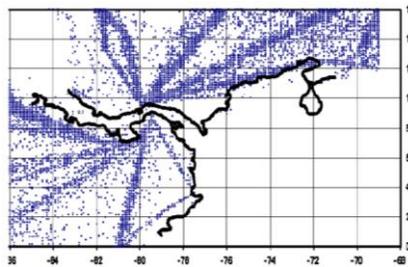
La dirección, el periodo y la altura del oleaje incidente sobre la costa son el reflejo de los vientos dominantes que soplan del N - NE con unas velocidades de 9 km/h y 23 km/h en los meses de verano y de las calmas en los meses de invierno. En consecuencia oleajes con dirección N - NE se presentan en la costa oriental y central del Caribe y oleajes provenientes del N se presentan en el sector occidental del Caribe.

2.5.1. ALTURA Y PERIODO DE LA OLA

Para la realización de la descripción del oleaje dentro del contexto del estudio, realizamos un análisis partiendo de datos visuales, debido a que se tiene series de tiempo más largas (años – décadas), ubicados en el área de Bocas de Ceniza.

2.5.1.1. DATOS DE OLEAJE VISUAL

Para la clasificación del régimen medio, debido a la ausencia de medidas específicas de oleaje en las inmediaciones de la zona de estudio, se utilizaron datos de oleaje visual, como proyecciones de la base de datos Comprehensive Ocean Atmospheric Data Set, COADS, de la National Ocean and Atmospheric Administration, NOAA, extraída del programa mundial desarrollado sobre oleaje visual, por la Organización Meteorológica Mundial, OMM, con participación de los buques mercantes, esta ha sido utilizada con éxito en varios países para determinar el régimen de oleaje. Los datos se encuentran disponibles en el modulo informático OLAS³², los cuales fueron corregidos mediante un proceso de filtración y calibración, Tejada (2004).



³² C. Tejada, M. Gonzales, L. Otero (2004), Desarrollo de un modulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las aguas jurisdiccionales colombianas. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica Sao Pedro, Estado Sao Paulo, Brasil, Octubre de 2004

Figura 2.10. Localización parcial de los datos disponibles que muestra la distribución espacial de los mismos, directamente relacionada con las principales rutas de navegación. Fuente: Tejada (2004)³³

Tejada (2004)³⁴, efectuó una selección de datos, que va desde el primero de enero de 1963 al 31 de diciembre de 1997, son 35 años de observaciones. Cada observación contiene 96 columnas de datos que siguen los parámetros determinados en el formato LMR6, donde las primeras 17 columnas corresponden a información de identificación de la observación; las columnas 18 a la 72 contienen las diferentes variables observadas; de la 73 a la 75 contiene datos de control, y de la 76 a la 96 contiene identificadores de control de calidad (COADS, 1999)³⁵. De lo anterior sólo se seleccionaron los siguientes campos:

- Longitud y latitud de cada observación en grados y décimas de grado.
- Fecha de la observación (año, mes día).
- Hora de la observación (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 y 21 horas).
- Dirección del oleaje de viento (la misma del viento).
- Altura visual del oleaje de viento (H_{SEA}).
- Período visual del oleaje de viento (T_{SEA}).
- Dirección del oleaje de fondo (θ_{SWELL}).
- Altura visual del oleaje de fondo (H_{SWELL}).
- Período visual del oleaje de fondo (T_{SWELL}).

De la base de datos OLAS se seleccionó la información correspondiente a las inmediateces de la zona de estudio, para una base de 54.594 datos.

2.5.1.2. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS

El oleaje es un proceso irregular, donde la altura de ola, periodos y direcciones no son siempre los mismos, presentando una cierta variabilidad. Sin embargo, tratamos de caracterizar el fenómeno observado con serie temporales de oleaje, que son el reflejo histórico de las acciones que han tenido lugar en un punto. Sobre este registro histórico de datos resulta interesante conocer cuál es la distribución de oleaje en condiciones medias (año medio) o determinar las características del oleaje en condiciones extremas, en ambos casos el estudio se realiza de una forma estadística³⁶.

³³ i.e. pie de página 16.

³⁴ i.e. pie de página 16.

³⁵ Comprehensive Ocean (1999). Atmosphere Data Set CODAS release 1a/1b/1c Documentation Long Marine Reports/ Fixed Length (LMR6/LMRF6) Julio de 1999.

³⁶ Caracterización del Oleaje. Ingeniería Marítima. ETSECCPB.

2.5.1.2.1. RÉGIMEN MEDIO

El régimen medio de cualquier magnitud relaciona los diversos niveles de la misma con la probabilidad de que dichos niveles no sean superados en un período de tiempo igual al año medio. En el caso del oleaje, se denomina régimen medio de oleaje a la distribución estadística que define el porcentaje de tiempo en que, durante el año medio, la altura de ola (o el período) no excede de cada valor. La elaboración del régimen de oleaje en una zona de la costa puede realizarse a partir de observaciones tomadas por barcos en ruta o bien a partir de registros obtenidos por boyas.

Los datos analizados están entre las latitudes 10 y 12.9 de latitud Norte y entre los -75 y -73.1 de longitud, en total 30.711, filtrados con el objeto de eliminar datos erróneos. Siguiendo a Tejada (2004)³⁷, se realizó el siguiente procedimiento:

1. En la base de datos tenemos dos columnas de oleaje visual de SEA y SWELL, el cual se unifico para obtener un solo dato de oleaje visual, según la metodología propuesta, donde:

$H_v = (H_{SEA}^2 + H_{SWELL}^2)^{1/2}$ siempre que las direcciones de SEA o del SWELL no difieran más de 22.5°.

$H_v =$ altura de ola del máximo entre el H_{SEA} , H_{SWELL} , cuando las direcciones del SEA y el SWELL difieran más del 22.5°.

2. El período del Oleaje visual (T_v), al igual que la altura de oleaje, se tiene dos columnas de periodo en SEA y SWELL, y para unificarlo se utilizó el siguiente procedimiento:

$$T_v = T_{SEA} \text{ si } H_{SEA} > H_{SWELL}$$
$$T_v = T_{SWELL} \text{ si } H_{SEA} < H_{SWELL}$$

3. La dirección del Oleaje visual (θ_v), al igual que la altura de oleaje, se tiene dos columnas de dirección en SEA y SWELL, y para unificarlo se utilizó el siguiente procedimiento,:

³⁷ i.e. pie de página 16.

$$\theta_v = \theta_{SEA} \quad \text{si } H_{SEA} > H_{SWELL}$$

$$\theta_v = \theta_{SWELL} \quad \text{si } H_{SEA} < H_{SWELL}$$

4. Una vez se filtraron los datos, se realizó la calibración de la altura del oleaje y periodo visual utilizando las expresiones de Agudelo (2005)³⁸, sobre el Caribe:

para la altura de ola.

$$H_s = 0.0025H_v^3 - 0.076H_v^2 + 0.8737H_v$$

para el periodo visual.

$$T_p = -0.0003T_v^4 + 0.0151T_v^3 - 0.2657T_v^2 + 2.2426T_v$$

5. Teniendo en cuenta el comportamiento típico del río en el Bajo Magdalena a través del año, se dividieron los datos de altura significativa, periodo pico y dirección de acuerdo a los meses, definidos según la variabilidad mensual de los caudales:

- Caudales Bajos: Enero, febrero, marzo, abril.
- Caudales Medios: Mayo, junio, julio, agosto, septiembre.
- Caudales Altos: Octubre, noviembre, diciembre.

Bajo este antecedente de distribución por meses, seleccionamos los datos según las direcciones de propagación del oleaje y a cada conjunto de datos le hayamos la probabilidad conjunta.

2.5.1.2.1.1. CLIMA MARÍTIMO EN EL ÁREA DE BOCAS DE CENIZA (PROFUNDIDAD INDEFINIDAS)

De acuerdo a la variación de los caudales en el año, se realizó un análisis del clima en los meses correspondientes a cada caudal típico, de donde se obtuvieron tres grupos:

- Enero, Febrero, Marzo, Abril
- Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre

³⁸ Agudelo, P., Restrepo, A., Molares, R., Tejada, C., Torres, R., Osorio, A. (2005). Determinación del Clima de Oleaje medio y extremal en el Caribe Colombiano. Boletín Científico CIOH No 23.

- Octubre, Noviembre, Diciembre

Para elaboración las figuras 2.11 hasta 2.14., se tuvo en cuenta la función de la probabilidad de no excedencia de las variables, evaluadas con diferentes funciones: Log-Normal, Gumbel de Máximos, Weibull de Mínimos, Normal. Los datos se organizaron de menor a mayor, graficándose así la altura significativa en papel probabilístico y seleccionando la de mejor ajuste de acuerdo al factor de correlación. Para graficar las rosas de oleaje se hizo en base a las Tablas de probabilidad conjunta de altura y dirección, correspondientes en el Anexo A.

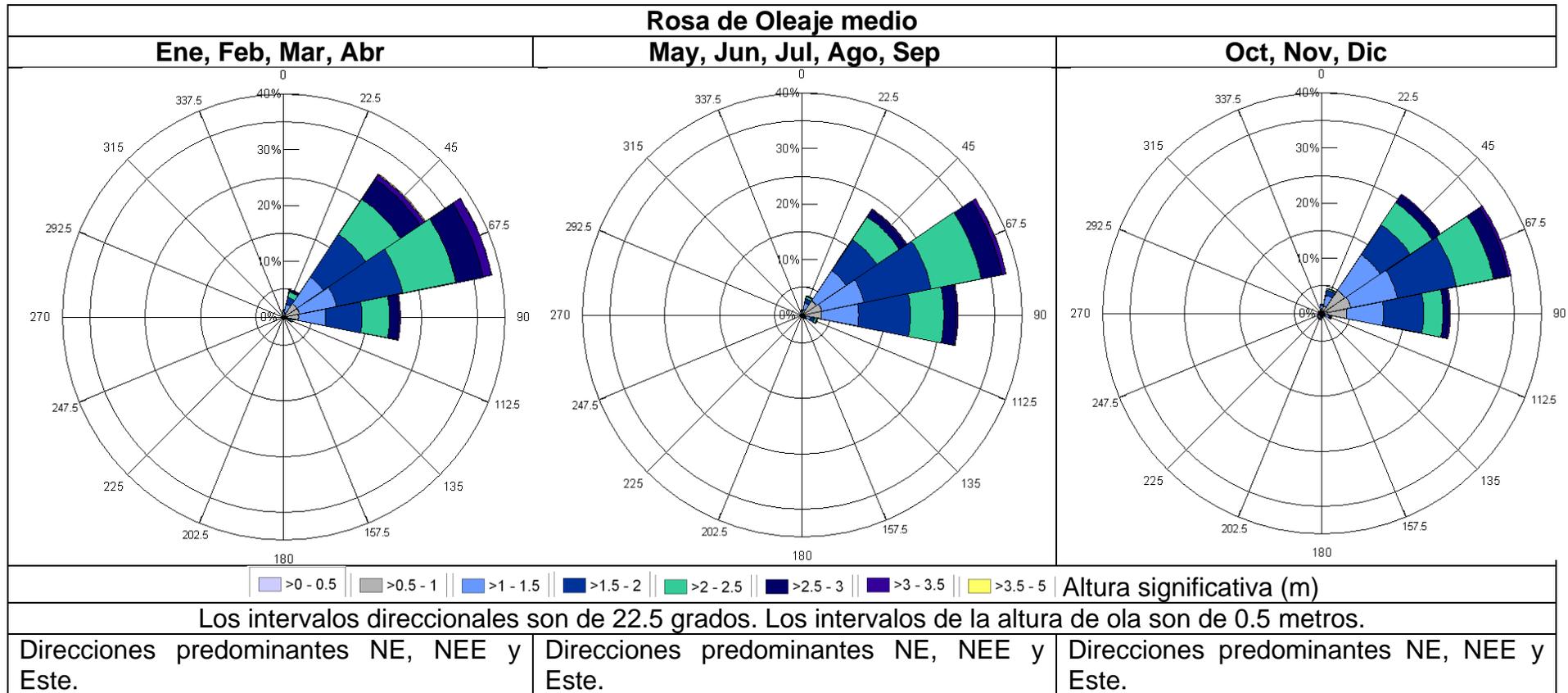
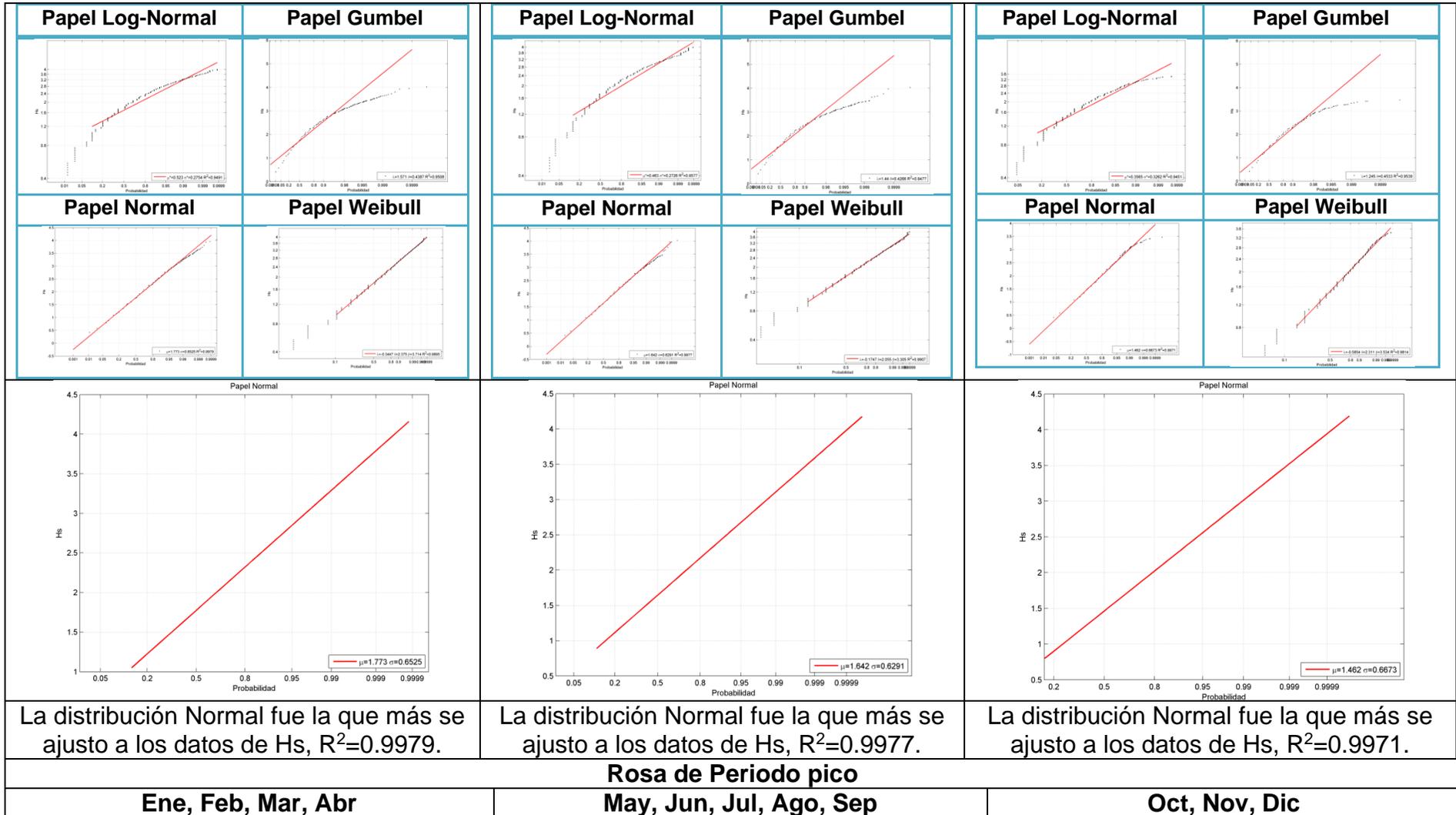


Figura 2.11. Rosa de oleaje medio para Altura significativa y Dirección.





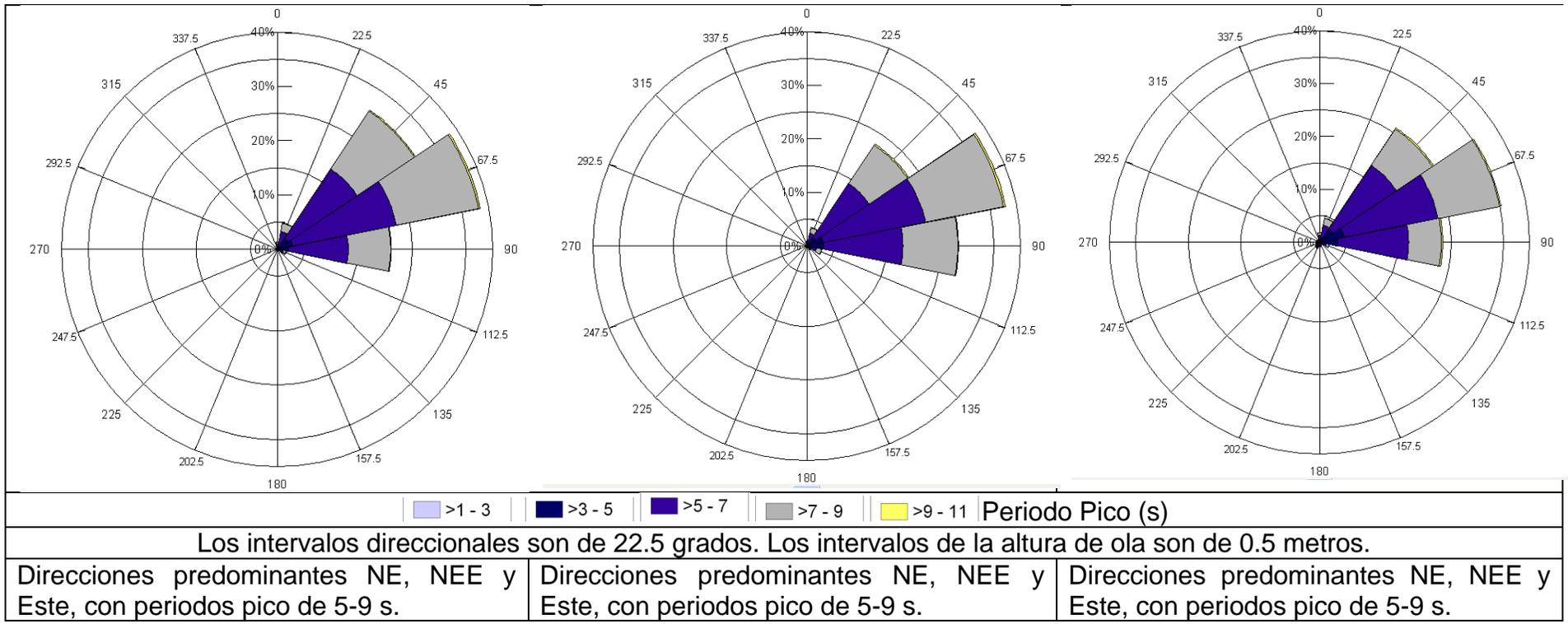
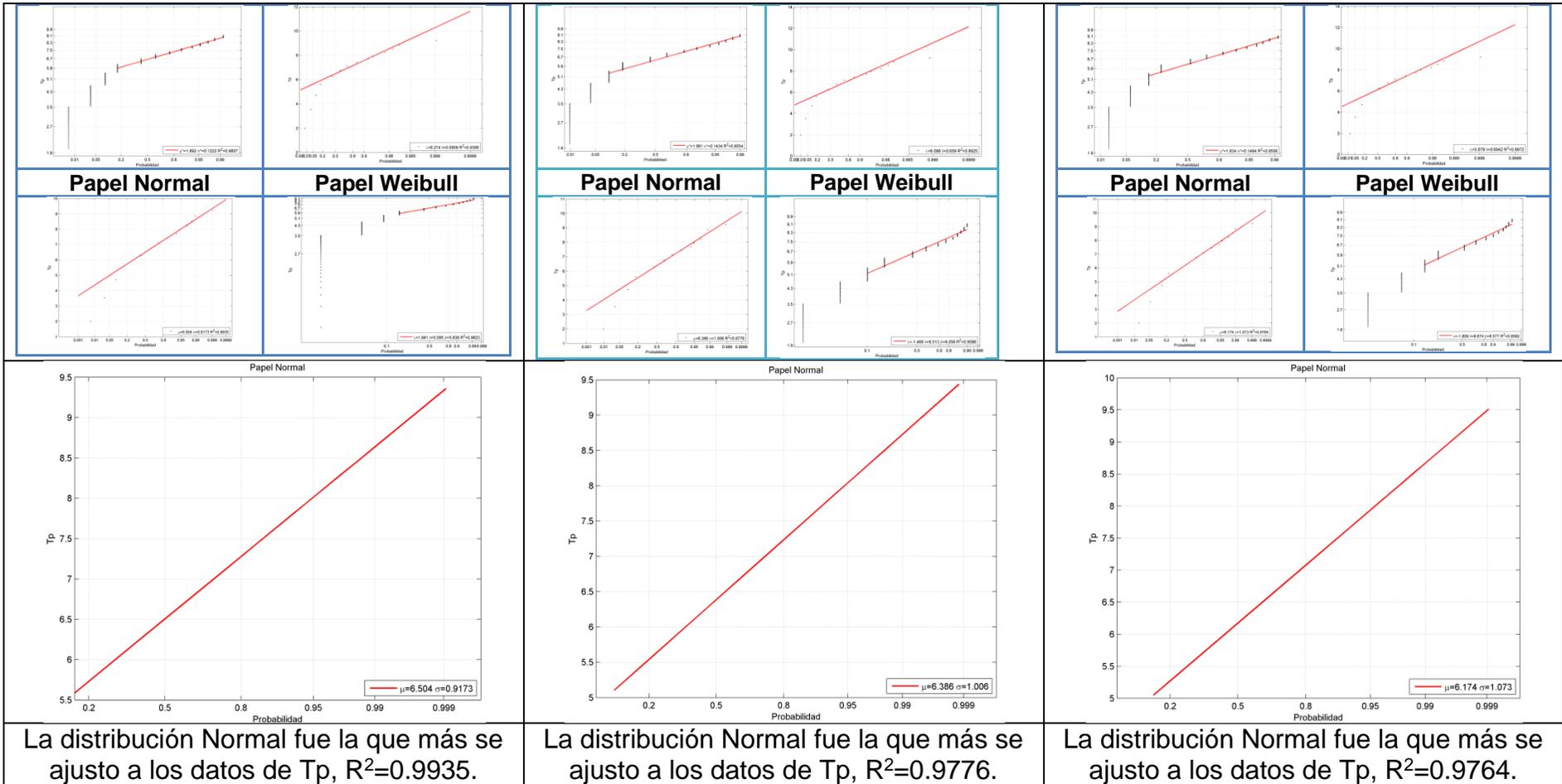


Figura 2.13. Rosa de Periodo para Periodo Pico y Dirección.

Figura 2.14. Probabilidad de no excedencia de Periodo pico(s)					
Ene, Feb, Mar, Abr		May, Jun, Jul, Ago, Sep		Oct, Nov, Dic	
Papel Log-Normal	Papel Gumbel	Papel Log-Normal	Papel Gumbel	Papel Log-Normal	Papel Gumbel



Para la realización de la distribución de probabilidad conjunta, en las rosas de oleaje y de periodo de la figura 2.11. y 2.13 respectivamente, (dada en porcentaje), se suprimió previamente los oleajes en las direcciones de los cuadrantes II y III en coordenadas náuticas, teniendo en cuenta que no afectarían la zona de estudio debido a la orientación de la desembocadura del río Magdalena.

La dirección de propagación del oleaje en el área de Bocas de Ceniza es predominantemente en dirección NEE (figura 2.11.). En todos los meses del año, seguidos de NE y Este en diferentes porcentajes según la época.

ÉPOCA DE ENERO A ABRIL

El 90.3% de las olas provienen de los cuadrantes Noreste (NE), Noreste- Este (NEE) y Este, las olas con mayor altura se observan en el cuadrante NE entre 3.5 – 4 m en un 0,15%; mientras que las alturas predominantes están entre 1.5 - 2.5 m en un 50.3% en las tres direcciones NE, NEE, E. (Anexo A, Tabla A.1.). Existe oleaje en otras direcciones no tan significativas en comparación con las predominantes, en un porcentaje del 7% entre Noroeste, Norte-Noroeste, Norte y Norte-Noreste.

Lo anterior es confirmado en las graficas de la figura 2.12., donde se observa los regímenes medios de altura de ola significativa mejor ajustados a una función de distribución Normal. De la cual obtenemos que la altura de la ola significativa no superada en el 50% del tiempo es de 1.78 m y para una probabilidad del 95% la altura de ola significativa no superada es de 2.84 m y para un 99% la altura de la ola significativa no superada es de 3.3 m.

Para observar la correspondencia entre la altura de ola significativa y periodo de pico se presentan en la Tabla A.2. (Anexo A) la distribución de probabilidad conjunta (dada en porcentaje), sobre la cual podemos decir que el periodo observado con mayor probabilidad varía entre 5 y 9 segundos en casi un 90.4%, el cual hay predominio de la altura de ola entre 1.5 - 2 metros en un 27.7%. Para las mayores alturas encontradas en NE entre 3.5 – 4 m corresponden a periodos de tiempo entre < 5 s (Tabla A.2. Anexo A). Otras direcciones no son tan significativas en comparación con las más predominantes, sin embargo se puede observar que predomina el periodo de 5 – 9 s en todas las direcciones, en el Noroeste, Norte-Noroeste, Norte y Norte-Noreste.

De la figura 2.14. el periodo pico de 6.5 s no es superado el 50% del tiempo y para una probabilidad del 95% el periodo pico no superado es de 8 s y para un 99% el periodo pico no superado es de 8.6 s.

Tabla 2.4. Resumen de la mayor probabilidad de la propagación de oleaje, con los parámetros de altura significativa, periodo pico y dirección entre los meses de Enero a Abril

Parámetros de estados de mar más frecuentes						
Dirección	NE	30.81%	NEE	38.36%	Este	21.13%
Altura (m)	1.5 - 2	9.25%	1.5 - 2	12.18%	1.5 - 2	6.55%
Periodo (s)	5 - 7	15.37%	5 - 7	19.61%	5 - 7	11.09%

La figura 2.15, basada en la Tablas de A.5 a A.7 (Anexo A), confirma la información de la Tabla 2.4

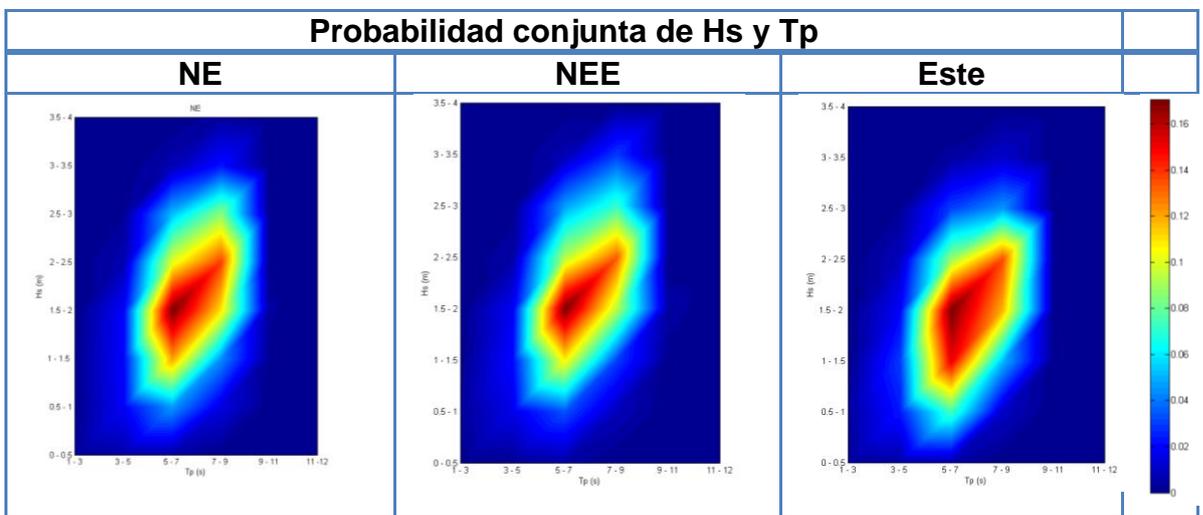


Figura 2.15. Probabilidad conjunta en las direcciones predominantes de Enero a Abril

De la figura 2.12. podemos comparar en la escala de Douglas (figura 2.16), y clasificar la época de enero a abril de acuerdo a las probabilidades de que este tipo de sucesos estén presentes y la peligrosidad para la navegación, condensado en la Tabla 2.5.

GRADO	NOMBRE	INDICACIÓN APROXIMADA PARA PODER CLASIFICAR EL MAR	ALTURA DE LA OLA EN METROS
0	Llana	Mar perfectamente lisa.	Sin olas
1	Rizada	Cuando se empiezan a formar pequeñas olas que no llegan a romper.	0 a 0,10
2	Marejadilla	Cuando se empieza a pronunciar el oleaje que apenas rompe, molestando poco a las embarcaciones menores sin cubierta.	0,10 a 0,5
3	Marejada	Si el oleaje aumenta en términos de ser de algún cuidado el manejo de embarcaciones menores sin cubierta.	0,5 a 1,25
4	Fuerte marejada	Si el tamaño de las olas hace imposible navegar con seguridad a las embarcaciones anteriores. Rociones.	1,25 a 2,5
5	Gruesa	Aumenta aún más el volumen de las olas haciendo peligrosa la navegación de las embarcaciones anteriores. La espuma blanca de las rompientes de las crestas empieza a ser arrastrada en la dirección del viento. Aumentan los rociones.	2,5 a 4
6	Muy gruesa	En las anteriores condiciones aumenta aún más el volumen de las olas. Los rociones dificultan la visibilidad.	4 a 6
7	Arbolada	Aumenta los caracteres anteriores. La espuma se aglomera en grandes bancos y se arrastra en la dirección del viento en forma espesa.	6 a 9
8	Montañosa	Olas excepcionalmente grandes, sin dirección determinada, como puede observarse en el vórtice de un ciclón. Los buques de pequeño y mediano tonelaje se pierden de vista.	9 a 14
9	Enorme	Aumentan las condiciones anteriores.	Más de 14

Figura 2.16. Escala de Douglas (escala internacional de clasificación del mar).

Fuente: www.emaresme.com ³⁹

Tabla 2.5. Probabilidad de ocurrencia y el grado de clasificación en los meses de Enero a Abril.

Porcentaje de probabilidad %	Rango de Hs (m)	Grado según escala Douglas
20%	1 – 1.22	3
60%	1.22 – 2.32	4
19.9%	2.32 – 3.78	5

Durante esta época se presentan las mayores alturas del todo el año, con un 0.26% (Tabla A.2. Anexo A) del tiempo con altura de olas entre 3.5 – 4 m, debido a la intensidad de los vientos alisios, con velocidades que oscilan entre 15 y 21 m/s, especialmente durante el mes de febrero⁴⁰, estas alturas de olas están clasificadas en el grado 5 de la escala de Douglas, debido a la peligrosidad en la navegación y podemos observar en la Tabla 2.5 que el 20% del tiempo hay de probabilidad que esto ocurra, aproximadamente 15 días entre los cuatro meses. Igualmente es de cuidado el grado 4 que maneja el mayor porcentaje 60%, que equivale aproximadamente a 50 días, donde embarcaciones pequeñas tiene riesgos para el tránsito en esta zona.

³⁹ Escala de Douglas. Portal de servicios del Maresme. www.emaresme.com [1 de septiembre de 2009]

⁴⁰ Altura y periodicidad de la ola. IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/files/atlas/metmarina.htm>. [13 de agosto de 2009]

ÉPOCA DE MAYO A SEPTIEMBRE

Esta época es la más extensa contando con 5 meses, al igual que en los meses de enero a abril, predomina el oleaje en la dirección NE, NEE y Este.

El 89.1% de las olas provienen de los cuadrantes Noreste (NE), Noreste- Este (NEE) y Este, las olas con mayor altura tienen entre 3.5 – 4 m, se observan en las tres direcciones en un 0.02%; las alturas predominantes están en un rango de 1.5 - 2.5 m en un 48.9%. Existe oleaje en un 5.38% en otras direcciones como Noroeste, Norte-Noroeste, Norte y Norte-Noreste, lo cual nos es significativo en comparación con las predominantes, como se puede ver en la figura 2.11.

Lo anterior es verificable en la figura 2.12. donde el régimen medio de altura de ola significativa ajustó mejor en la función de distribución Normal. La altura de la ola significativa no es superada el 50% del tiempo en 1.65 m y para una probabilidad del 95% la altura de ola significativa no superada es de 2.69 m y para un 99% la altura de la ola significativa no superada es de 3.14 m.

Para ver la correspondencia entre el periodo del oleaje y la altura significativa tenemos la Tabla A.13 (Anexo A) de distribución de probabilidad conjunta (en términos de porcentaje) de altura de ola significativa y periodo de pico. El periodo observado más probable varía entre 5 y 9 segundos en casi un 88.78%, en donde encontramos las alturas de ola 1.5 - 2 metros en un 28.34%. Las alturas de ola mayores entre 3.5 – 4 m, están en los periodos de 5 – 9 s.

De la figura 2.14 podemos decir que el periodo pico de 6.39 s no es superado el 50% del tiempo y para una probabilidad del 95% el periodo pico no superado es de 8.03 s y para un 99% el periodo pico no superado es de 8.75 s.

Tabla 2.6. Resumen de la mayor probabilidad de la propagación de oleaje, con los parámetros de altura significativa, periodo pico y dirección entre los meses de Mayo a Septiembre.

Parámetros de estado de mar más frecuentes						
Dirección	NE	22.93%	NEE	37.85%	Este	28.34%
Altura(m)	1.5 - 2	6.71%	1.5 - 2	12.48%	1.5 - 2	9.44%
Periodo(s)	5 - 7	12.2%	5 - 7	19.5%	5 - 7	14.8%

La figura 2.17, basada en la Tablas de A.16 a A.18 (Anexo A), confirma la información de la Tabla 2.6.

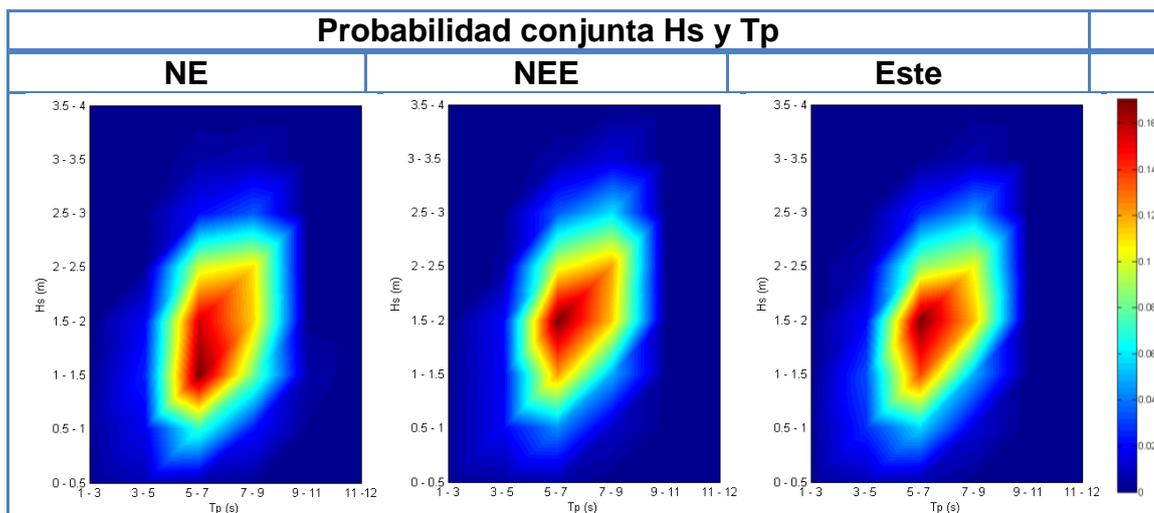


Figura 2.17. Probabilidad conjunta en las direcciones predominantes de Mayo a Septiembre

De acuerdo a lo visto en la época de Enero a Abril, existe una disminución en el máximo valor de la altura de la ola en 16 cm o en un 4.8%. Sin embargo, aumentó la probabilidad de propagación del oleaje en un 7% en dirección Este y disminuyó en un 7.9% en el NE (figura 2.11.), y en NEE prácticamente se mantiene constante.

Tabla 2.7. Probabilidad de ocurrencia y el grado de clasificación en los meses de Mayo a Septiembre.

Porcentaje de probabilidad %	Rango de Hs (m)	Grado según escala Douglas
20%	0.89 – 1.11	3
60%	1.11 – 2.17	4
19.9%	2.17 – 4	5

Al igual que en la época de Enero a Abril, los porcentajes de probabilidad de acuerdo a los grado de clasificación de Douglas (figura 2.16.), se mantienen con la diferencia, que dentro de los rangos se presentan menores alturas de oleaje exceptuando en el grado 5 donde el límite superior es mayor que para la época de enero a abril..

ÉPOCA DE OCTUBRE A DICIEMBRE

A lo largo de todo el año se mantiene el predominio de las direcciones NE, NEE y Este, con algunas variaciones en la altura y periodo de la ola. En esta época se presentan en porcentaje más alto, porque los vientos están en dirección oeste suroeste, asociados más a la Zona de Convergencia Intertropical que a los vientos alisios⁴¹.

El 84.57% de las olas provienen de los cuadrantes Noreste (NE), Noreste- Este (NEE) y Este, las olas con mayor altura se observan en el cuadrante NE con un 0.57% entre 3 – 3.5 m (Tabla A.24 Anexo A); las alturas predominantes están en un rango de 1.5 - 2.5 m en un 40%. Existe oleaje en otras direcciones como Noroeste, Norte-Noroeste, Norte y Norte-Noreste, en un 8.7% no tan significativa en comparación con las predominantes.

Podemos constatar con los regímenes medios de altura de ola significativa, que la mejor función de ajuste fue la distribución Normal. La altura de la ola significativa que no es superada el 50% del tiempo es de 1.47 m y para una probabilidad del 95% la altura de ola significativa no es superada en 2.56 m y para un 99% la altura de la ola significativa no es superada en 3.02 m.

Se ve claramente la correspondencia entre la altura significativa y periodo pico en la distribución de probabilidad conjunta en la Tabla A.22. (Anexo A, en términos de porcentaje), el periodo observado con más frecuencia varía entre 5 y 9 segundos en casi un 84.4%, en este periodo hay un 24.15% de alturas de ola 1.5 - 2 metros, figura 2.13. En otras direcciones como el Noroeste, Norte-Noroeste, Norte y Norte-Noreste, no tan significativas en comparación con las más predominantes, se observa que predomina el periodo de 5 – 9 s.

De la figura 2.14. el periodo pico de 6.19 s no es superado el 50% del tiempo y para una probabilidad del 95% el periodo pico no superado es de 7.94 s y para un 99% el periodo pico no superado es de 8.64 s.

Tabla 2.8. Resumen de la mayor probabilidad de la propagación de oleaje, con los parámetros de altura significativa, periodo pico y dirección entre los meses de Octubre a Diciembre.

Parámetros

⁴¹ i.e. pie de página 23.

Dirección	NE	26.05%	NEE	35.13%	Este	23.39%
Altura(m)	1 -1.5	6.53%	1.5 - 2	11%	1.5 - 2	7.29%
Periodo(s)	5 - 7	14.5%	5 - 7	18.24%	5 - 7	13.55%

La figura 2.18, basada en la Tablas de A.27 a A.29 (Anexo A) confirma la información de la Tabla 2.8.

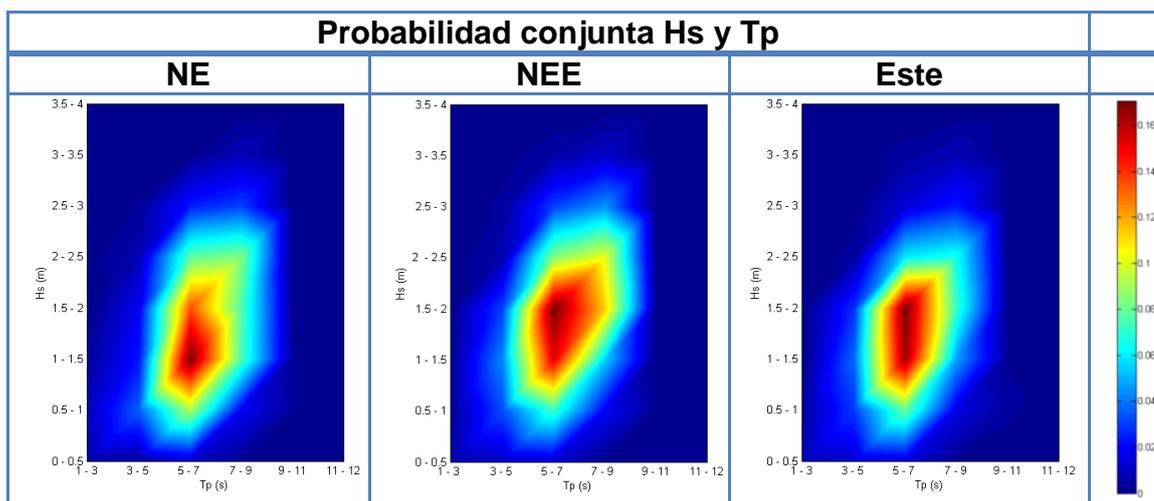


Figura 2.18. Probabilidad conjunta en las direcciones predominantes de Octubre a Diciembre

Tabla 2.9. Probabilidad de ocurrencia y el grado de clasificación en los meses de Octubre a Diciembre.

Porcentaje de probabilidad %	Rango de Hs (m)	Grado según escala Douglas
50%	0.79 – 1.47	3
45%	1.47 – 2.56	4
4.9%	2.56 – 3.51	5

A diferencia de las épocas anteriores en esta, las probabilidades en el tiempo varían, ha disminuido el porcentaje en el grado 5 siendo éste el máximo que alcanzamos en la zona de estudio durante todo el año y aumentando significativamente la probabilidad en la mitad del tiempo en el grado 3. Se puede deducir entonces que la navegabilidad en estos meses es más segura que en el resto del año, salvo porque en esta época se presentan el paso eventos extremos, episodios de huracanes, tormentas tropicales

Concluyendo, entre los meses de Mayo a Septiembre, la altura de ola entre 1 - 2.5 m tiene una probabilidad del 77.08% en el tiempo (Tabla A. 13), la mayor entre las tres épocas, pero con un número muy bajo de olas entre 3.5 – 4 m con un 0.06%, mientras que en la época de Enero a Abril es de 0.23% y entre la época de Octubre a Diciembre no se presentan.

2.5.1.2.1.2. DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE MENSUAL

De forma complementaria a lo realizado en el régimen medio a continuación se presenta, una descripción mensual del comportamiento del oleaje, con la respectiva probabilidad de ocurrencia para cada dirección.

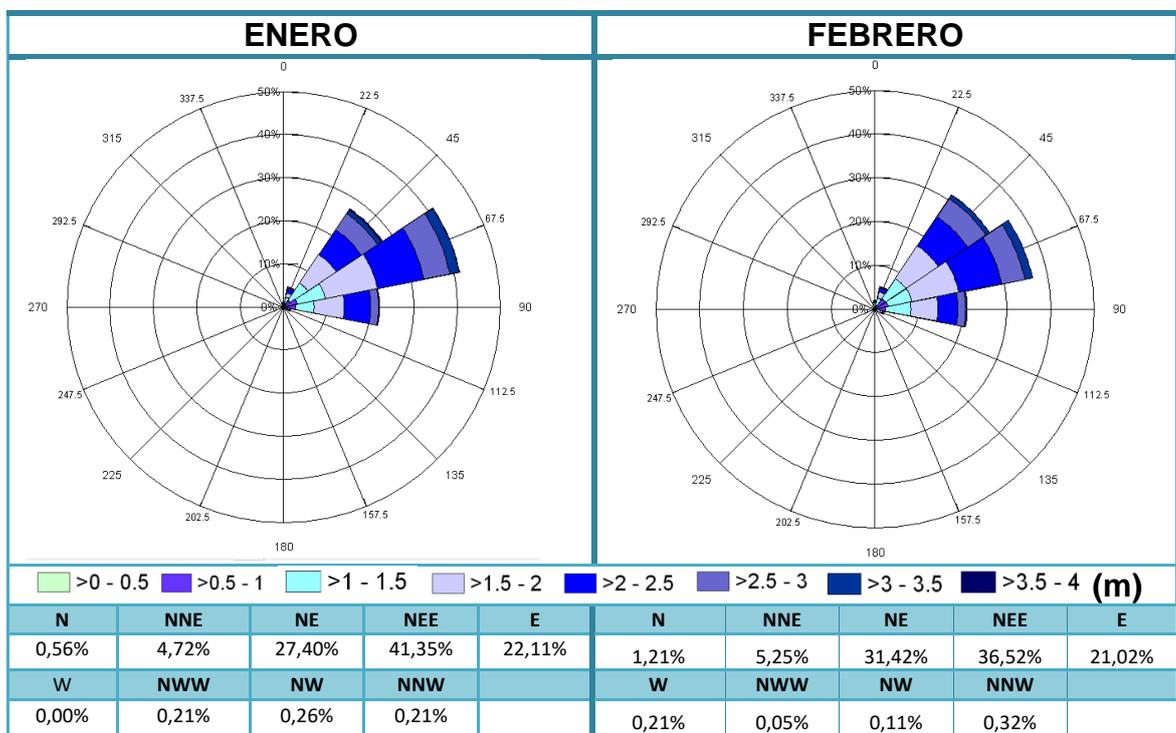


Figura 2.19. Rosas de oleaje de altura de ola y dirección en porcentaje (%) de los meses de Enero y Febrero.

MARZO	ABRIL
-------	-------

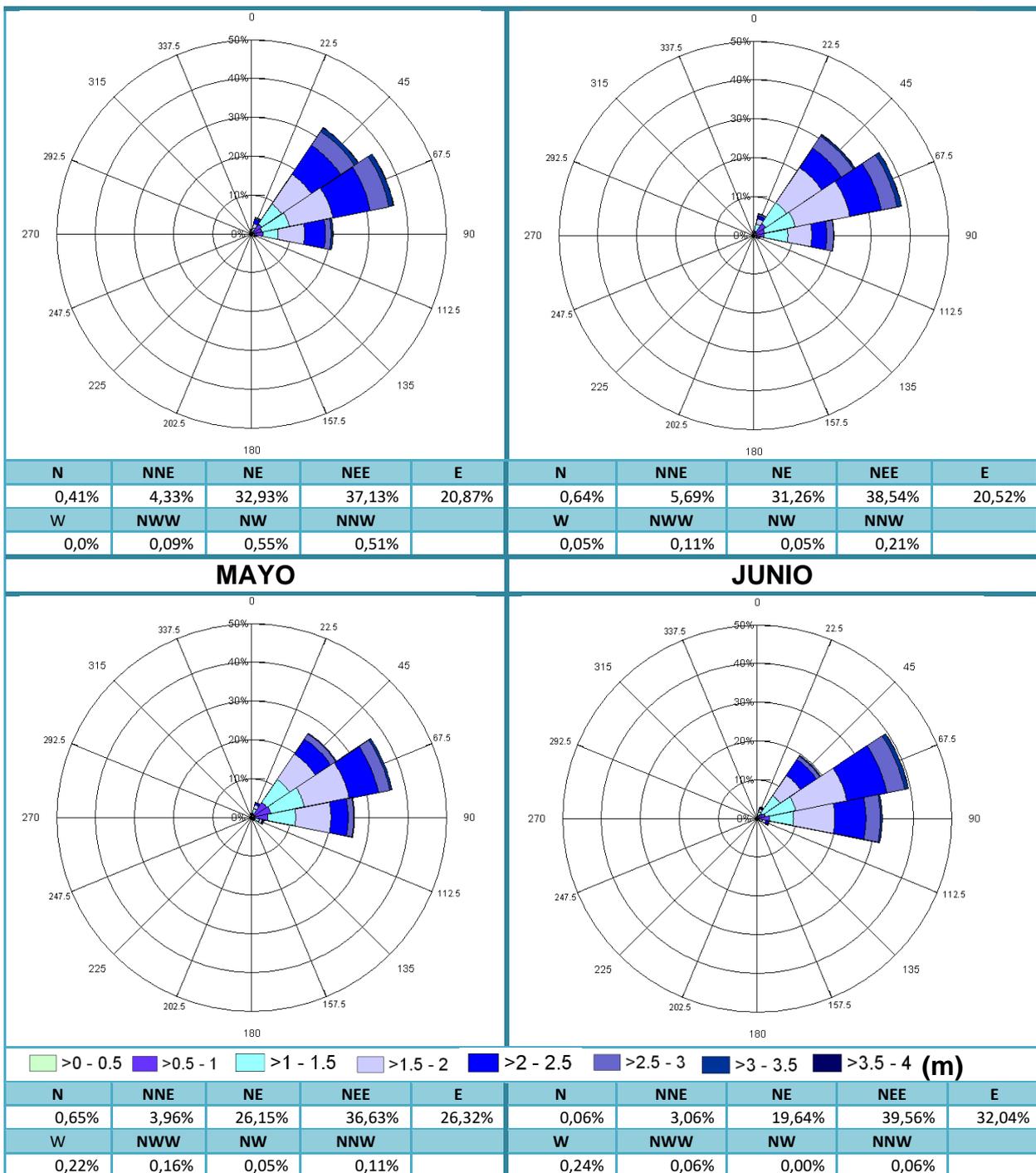


Figura 2.20. Rosas de oleaje de altura de ola y dirección en porcentaje (%) de los meses de Marzo, Abril, Mayo y Junio.

JULIO **AGOSTO**

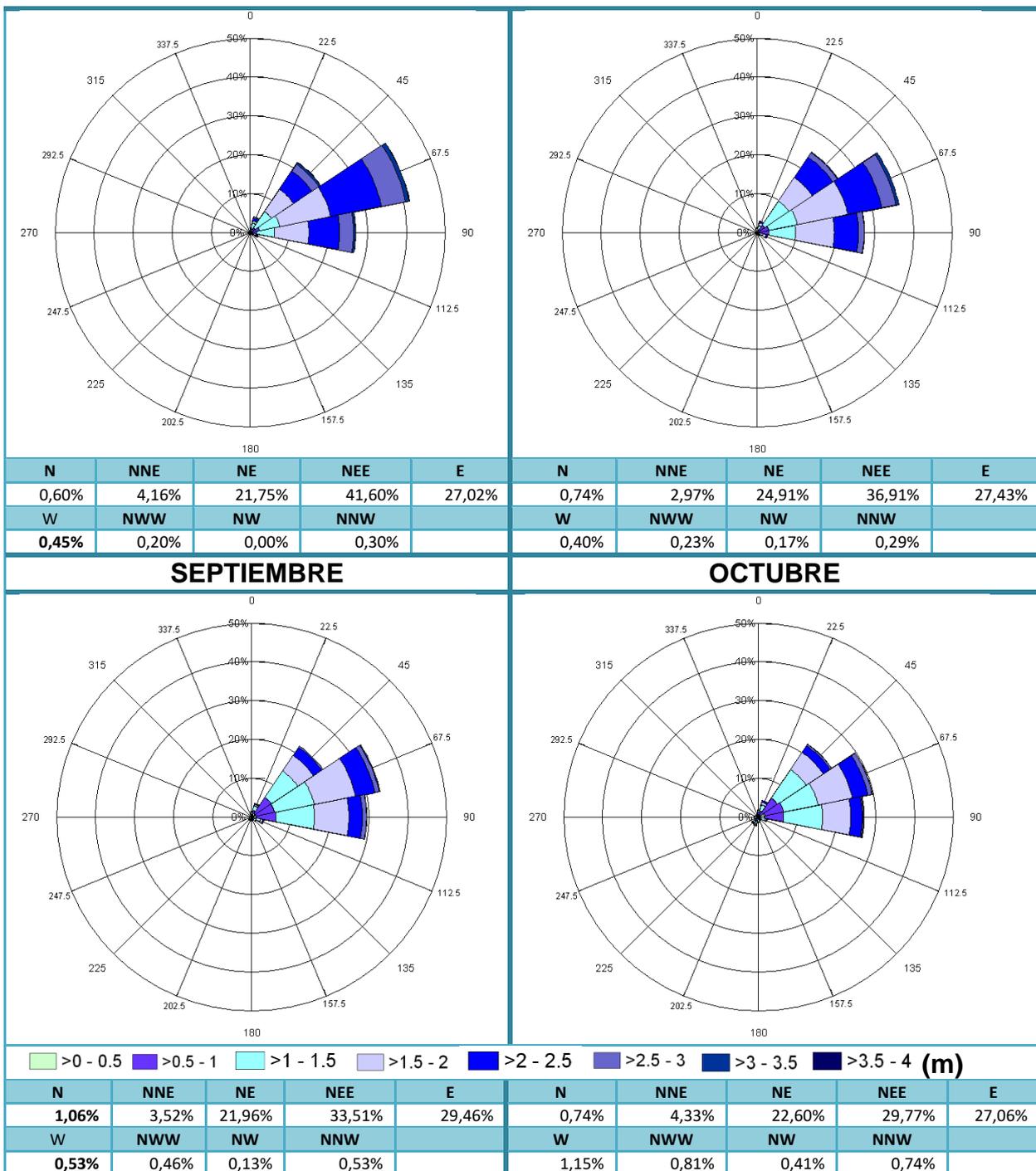


Figura 2.21. Rosas de oleaje de altura de ola y dirección en porcentaje (%) de los meses de Julio, Agosto, Septiembre y Octubre.

NOVIEMBRE **DICIEMBRE**

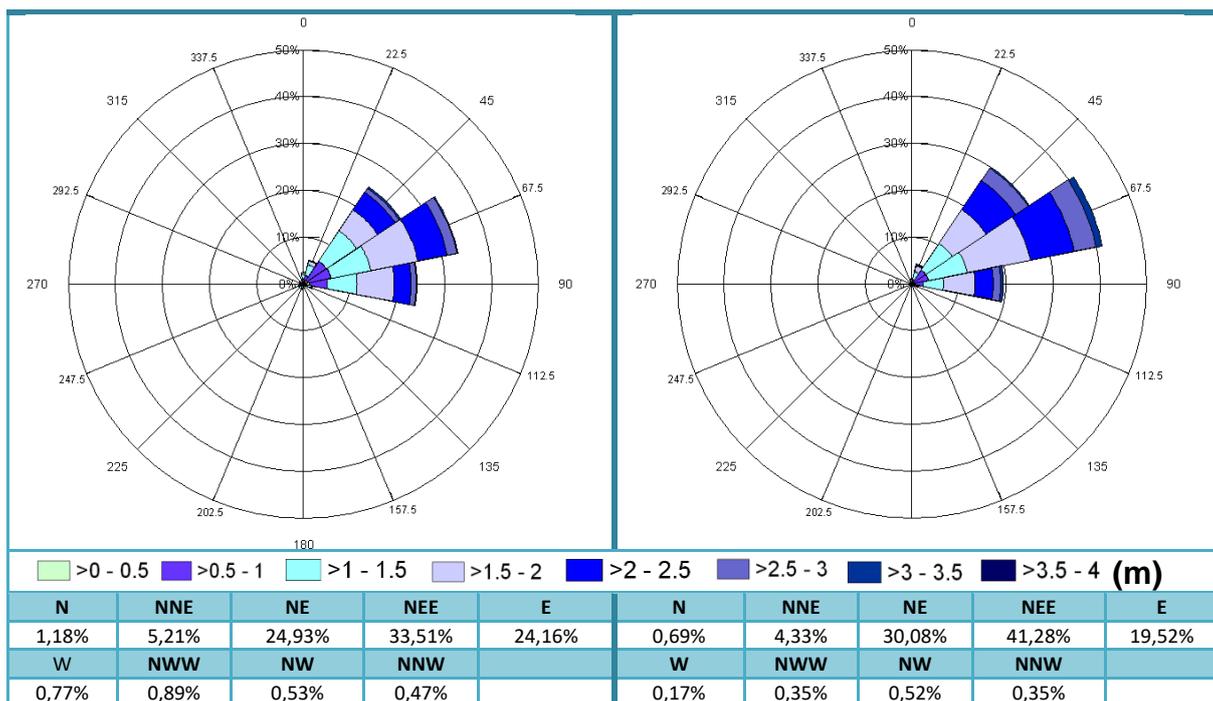


Figura 2.22. Rosas de oleaje de altura de ola y dirección en porcentaje (%) de los meses de Noviembre y Diciembre.

Al igual que el clima de oleaje realizado por épocas, las direcciones predominantes son NE, NEE y Este, con una mayor probabilidad del NEE. La dirección NEE no supera la probabilidad del 41.6%, la dirección E no supera el 32% y el NE el 33% en todo el año.

2.5.1.2.1. RÉGIMEN EXTREMAL

Para el cálculo de régimen extremal, los datos de oleaje visual no son aconsejables debido a que estos no contemplan estados de mar extremos, debido a que la ruta de los barcos cambia cuando hay temporales o no zarpan, por lo tanto se utilizan métodos indirectos para la generación sintética de dichos oleajes.

En el mar Caribe las máximas alturas de oleaje se producen cuando hay tormentas tropicales y huracanes. Estos fenómenos atmosféricos se suelen caracterizar por dos variables: velocidad del viento y presión atmosférica. Agudelo (2005)⁴², a partir del modelo paramétrico de USACE(1984)⁴³, con datos de velocidad de viento y temperatura, halló la altura significativa y periodo

⁴² i.e. pie de página 38.

⁴³ USACE (1984). Shore Protection Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center (CERC), Vicksburg, Mississippi, 2 vols.

pico para la generación de oleaje extremal, mediante las siguientes expresiones:

$$Hs = 5.03e^{\frac{R\Delta P 4700}{9400}} \left[1 + \frac{0.29\alpha V_{fm}}{\sqrt{V_{max}}} \right]$$

$$Tp = 8.6e^{\frac{R\Delta P}{9400}} \left[1 + \frac{0.145\alpha V_{fm}}{\sqrt{V_{max}}} \right]$$

Donde $\Delta P = P_n - P_o$ son diferencia de presiones, V_{fm} es la velocidad de movimiento de la tormenta, R el radio de viento máximo de la misma y la velocidad del viento de la tormenta V_{max} .

En Agudelo (2005)⁴⁴, se relaciona la altura significativa y el periodo pico, lo cual es posible porque los oleajes provocados por tormentas tropicales son generados en la misma cuenca que forma con las Antillas, Centro y Sur América, como vemos en la figura 2.23.

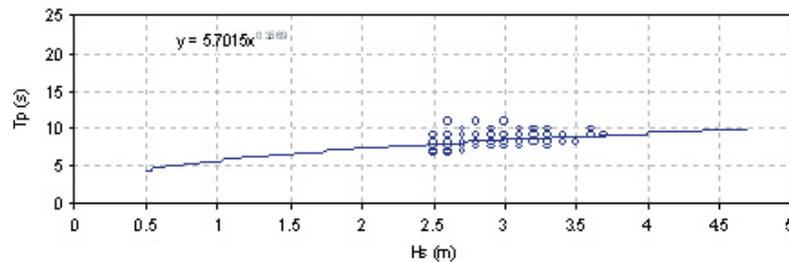


Figura 2.23. Hs vs Tp durante las tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018 relacionadas según la ecuación $Tp = 5.7015 Hs^{0.2669}$. Fuente: Determinación del Clima de oleaje medio y extremal en el Caribe⁴⁵.

Agudelo (2005)⁴⁶, se analizó todos los registros sobre las tormentas tropicales en el Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México, en los últimos 20 años, desde 1985 hasta 2004, obteniendo el ajuste del régimen de Hs y de Tp de temporales en profundidades indefinidas, figura 2.24.

⁴⁴ i.e. pie de página 38.

⁴⁵ i.e. pie de página 38.

⁴⁶ i.e. pie de página 38.

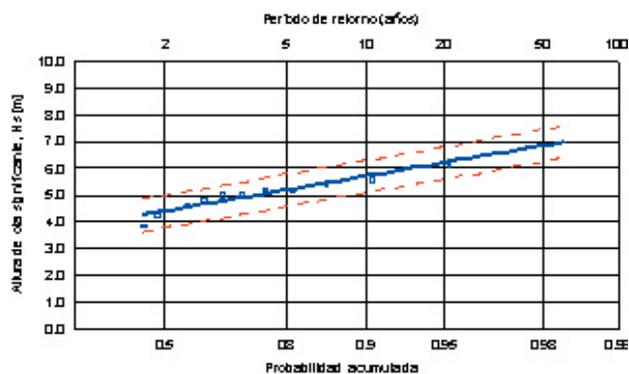


Figura 2.24. Régimen de temporales en profundidades indefinidas.⁴⁷

Los datos fueron validados mediante la modelación numérica dentro del proyecto CARIMOS (2006), de donde se obtuvo, que la altura de ola significativa con un periodo de retorno de 36.57 años es de 6.63 m, mientras que para 50 años es de 6.85 m.

La dirección de los fenómenos que determinan el régimen extremal en el Caribe, como los ciclones, se desplazan al noroeste cuando las aguas cálidas alcanzan temperaturas de 27°C o más, los huracanes generalmente de este a oeste con una ligera tendencia hacia el norte⁴⁸.

Tabla 2.10. Altura significativa y periodo pico basados en la figura 2.18. y 2.19. La dirección es tomada de Ortiz (2006)⁴⁹.

Periodo de retorno (años)	Estado de mar en régimen extremal		
	Hs (m)	Tp (s)	Dir
10	5.75	9.09	Este
20	6.25	9.3	Este
50	6.85	9.6	Este

Para la obtención de la dirección, Ortiz (2006) efectuó de acuerdo a los vientos huracanados, la propagación de oleaje en el Atlántico con el modelo SWAN, y para el análisis en la zona de estudio, simuló como salida una boya virtual, de la cual obtuvo valores numéricos de datos en aguas profundas del modelo. Se tuvo como resultado la dirección en grados verdaderos de 272° o en coordenadas náuticas el Este.

⁴⁷ i.e. pie de página 38.

⁴⁸ Circulación general de la atmosfera en Colombia. [1 de Septiembre de 2009] http://www.cioh.org.co/dev/publicaciones/mostrarpdf.php?nbol=cioh_bcc2403.pdf

⁴⁹ Ortiz, J., Mercado, A.(2006). Estudio preliminar del impacto del oleaje de huracanes en la línea de costera del Departamento del Atlántico. Boletín Científico CIOH No 24.



Capitulo 3
Simulaciones numéricas

3. SIMULACIONES NUMÉRICAS

El estudio del mar se puede hacer desde muchas perspectivas diferentes. La oceanografía busca entender, modelar y prever los procesos y fenómenos de los océanos utilizando modelos matemáticos, la mecánica de fluidos y la termodinámica.

El modelo numérico es el proceso por el cual se obtiene la predicción de un objetivo del estado futuro del océano a corto o largo plazo, mediante la solución de un conjunto de ecuaciones que describen la evolución de un grupo de variables que a su vez definen el estado del mar.

Las características principales en los modelos numéricos en general, son las siguientes:

- Hacer un diagnóstico y pronóstico de los procesos que se van a estudiar a un costo mucho menor que otras técnicas de estudio.
- El estudio de un determinado proceso o fenómeno aislado cada uno de los factores que intervienen en él, como por ejemplo se puede estudiar la influencia de los vientos en la circulación sin considerar otros aspectos como la influencia de las mareas.
- Definición de escenarios tanto reales como hipotéticos para su análisis y toma de decisiones.

Sin embargo a pesar de todas estas características, cabe resaltar que los modelos numéricos no reemplazan a las demás técnicas de estudio, sino que las complementan, ya que para su correcto funcionamiento y obtención de mejores resultados es necesario disponer de la mayor información posible medida en la zona de estudio debidamente procesada, que permita realizar la calibración del modelo y mejorar su validación, de esta manera los resultados serán en extremo confiables

Para llevar a cabo el estudio del impacto que determinada actuación pueda causar en el litoral, uno de los procesos necesarios es el análisis de la hidrodinámica marina en la zona de estudio, en el caso particular de este trabajo, se utilizaron dos modelos matemáticos para evaluar la influencia de las corrientes del río Magdalena en los campos de oleaje: modelo Hidrodinámico Bidimensional (H2D) y Simulating Waves Nearshore (SWAN).

Los resultados obtenidos permitirán establecer el grado de incidencia de las corrientes del río en el oleaje, considerando diferentes escenarios combinados de oleaje y caudal del río.

3.1 MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL (H2D)

Entre los modelos numéricos existentes para el estudio de las condiciones hidrodinámicas de las zonas litorales, los más empleados son los denominados 2D o bidimensionales, siendo el modelo H2D de este tipo. Su uso está especialmente indicado para el análisis de la propagación de marea en ríos, estuarios y otras zonas costeras.

3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO⁵⁰

Las ecuaciones que resuelve el modelo numérico H2D, son las ecuaciones de ondas largas, en las cuales la hipótesis inicial es $L \gg h$, siendo L la longitud de la onda cuya propagación se estudia, y h la profundidad sobre la que se propaga, como se observa en la figura 3.1.

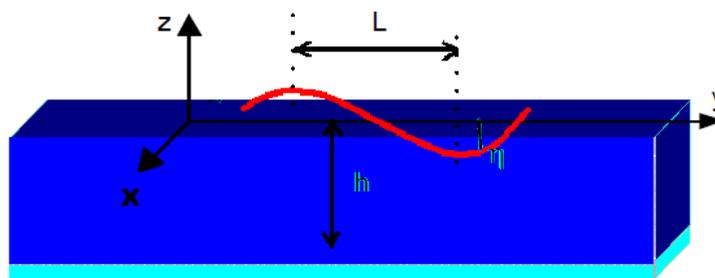


Figura 3.1. Características de una onda en tres dimensiones. Fuente: Manual de referencia de Aqualab. Universidad de Cantabria.

Ecuaciones de Gobierno

Para la determinación de las ecuaciones generales de las ondas largas las ecuaciones a considerar son las de conservación de la cantidad de movimiento y conservación de la masa correspondiente a fluidos incompresibles.

El modelo resuelve las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad, y la ecuación de estado, mediante un algoritmo de diferencias finitas.

La ecuación de cantidad de movimiento se expresa como:

Ecuación (1)

⁵⁰ Manual de referencia. Aqualab, Universidad de Cantabria. España. Página 3.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial(U^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(UVH)}{\partial y} - fVH - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gH^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} [\tau_{xz(\eta)} + \tau_{xz(-h)}] \\ + Hs_h \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] + 2H \frac{\partial s_h}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} + H \frac{\partial s_h}{\partial y} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] \end{aligned}$$

UH = caudal por unidad de anchura en la dirección en x
 VH = caudal por unidad de anchura en la dirección en y

La ecuación de estado, la cual relaciona la densidad del mar en función de la salinidad del agua (S), de la temperatura potencial (θ) y de la presión (p):

$$\rho = \rho(S, \theta, p)$$

La utilizada es la propuesta por la UNESCO en 1982 expresada como:

Ecuación (2)

$$\begin{aligned} \rho_0(T, S) = 999.842594 + 6.793952 * 10^{-2}T - 9.09529 * 10^{-3}T^2 + 1.001685 \\ * 10^{-4}T^3 - 1.120083 * 10^{-6}T^4 + 6.536323 * 10^{-9}T^5 \\ + (0.824493 - 4.0899 * 10^{-3}T + 7.6438 * 10^{-5}T^2 - 8.2467 \\ * 10^{-7}T^3 + 5.3875 * 10^{-9}T^4)S \\ + (-5.72466 * 10^{-3} + 1.0227 * 10^{-4}T - 1.6546 * 10^{-6}T^2)S^{1.5} \\ + 4.8314 * 10^{-4}S^2(kg/m^3) \end{aligned}$$

La resolución numérica de las ecuaciones requiere transformar el dominio continuo en un dominio discreto, formado por una malla compuesta de elementos rectangulares denominados celdas.

El algoritmo emplea un esquema centrado con dos niveles de tiempo, resultando una aproximación de segundo orden en el espacio y en el tiempo.

3.1.2. MALLAS DE CÁLCULO

En la realización de nuestro estudio manejaremos dos mallas, una *base* y la otra anidada la cual denominamos *nest*, con un área menor que la malla *base*, para tener mejor resolución en la zona de estudio.

Para determinar el dominio de la malla para el H2D, se tomó en cuenta el *nest*, siendo esta la malla de estudio con menor tamaño, evitando el desgaste computacional.

El esquema de funcionamiento del H2D⁵¹ se describe como sigue:

1. Creación de la malla de trabajo.
De acuerdo a la batimetría, se delimitó la zona del nest, en coordenadas UTM, y se definió el tamaño de la celda para ingresarla al programa.
2. Definición de las condiciones iniciales y de contorno.
La condición de contorno se definió para los cuatro bordes de la malla la condición de caudal, teniendo en cuenta los caudales típicos del río en el Magdalena, se crearon tres archivos de acuerdo a las tres épocas del año.
3. Definición de los parámetros de ejecución, físicos, ambientales y de obtención de resultados.
El parámetro de ejecución depende del análisis a realizar, para cada escenario de caudal, se ejecutó el nodo numérico. Los parámetros físicos que se incluyeron fueron: el coeficiente de arrastre por viento de 0.002600, valor de Eddy constante, Coriolis y Chezy variable.
4. Visualización e interpretación de los resultados.
Salidas del modelo arroja las componentes de velocidad u y v, de la corriente con un paso de tiempo de 1 hora, por cada escenario de caudal de río considerado.

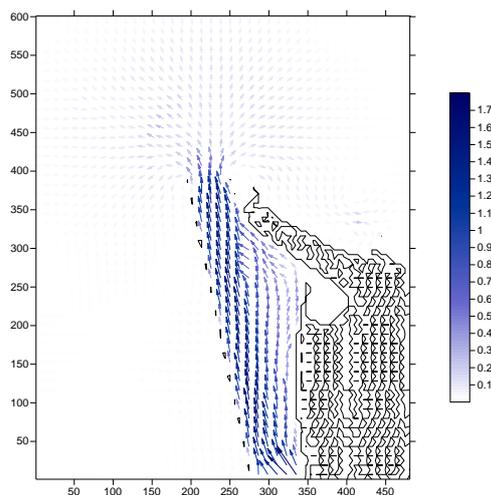


Figura 3.2. Salida grafica del modelo H2D

3.2. SIMULATING WAVES NEARSHORE SWAN

⁵¹ Manual de Usuario. Aqualab, Universidad de Cantabria. España. página 30.

3.2.1. MODELOS ESPECTRALES DE OLAS⁵²

En general, después de aceptado el espectro de energía de ola para describir el océano, la mayoría de modelos espectrales contemporáneos resuelven la ecuación de balance de energía, en agua profunda, sin considerar refracción, fricción, difracción y asomeramiento:

Ecuación (3)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + c_g \frac{\partial F}{\partial x} = S_{tot}$$

donde:

- $F = F(\omega, \theta, x, t)$ es el espectro de energía de ola
- $c_g = c_g(\omega, \theta)$ es la velocidad de propagación del grupo de olas
- $S_{tot} = S_{tot}(\omega, \theta, x, t)$ es la función neta de todos los procesos que agrupan, remueven o distribuyen energía en el espectro de olas
- $\omega = (2\pi f)$ es la frecuencia angular de ola, θ es la dirección de la ola, x es el vector posición de la ola y t es el tiempo.

En aguas someras, el efecto de profundidad, refracción, fricción con corrientes y fondo, se deben tomar en cuenta en la evolución del espectro de ola, por lo que la ecuación de transporte de energía más general es dada por:

Ecuación (4)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (c_g E) + \frac{\partial}{\partial \theta} ((c_g \cdot \nabla \theta) F) = S_{tot}$$

↓

Evolución de la energía de la ola en función del tiempo

↓

Propagación de la energía de la ola espacialmente

↓

Los efectos de la refracción de oleaje

↓

Representa el crecimiento y decaimiento de la energía de ola e interacciones no lineales entre ellas

donde:

⁵² SWAN, User Manual. SWAN Cycle III versión 40.51

Ecuación (5)

$$S_{tot} = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$$

El término S_{in} especifica la energía de entrada al campo de formación de olas desde la atmósfera por el viento. S_{ds} es la disipación de energía de ola por rompimiento de las crestas en agua profunda, fricción con el fondo en aguas someras, fricción con corrientes marinas, somerización, percolación y rompimiento de ola al llegar a la costa. S_{nl} es el término de interacciones no lineal entre ondas que cumplen una condición resonante dada.

Los modelos numéricos que resuelven estas ecuaciones han sido clasificados como:

- Primera Generación
- Segunda Generación
- Tercera Generación

En los modelos de Primera Generación cada componente espectral evoluciona esencialmente independiente de todas las otras componentes. Son manejadas por la función de energía. La interacción no lineal entre ondas es considerada muy débil. En estos modelos entonces, el espectro de energía se representa como un arreglo de paquetes de energía discretizados en dos dimensiones: frecuencia y dirección. Cada uno de los cuales se propaga con su propia velocidad de grupo a lo largo de su propio rayo director, correspondiente al viento que ha contribuido a lo largo de esta trayectoria. Estos son los llamados modelos desacoplados de Primera Generación (SWAMP Group 1985). Se sabe (WANDI Group 1988) que estos modelos sobrestiman la acción del viento y subestiman la fuerza de la transferencia no lineal casi por un orden de magnitud.

En el balance de energía revisada para los modelos de ola de Segunda Generación, la evolución independiente de las componentes individuales de olas es efectivamente proveídos de acoplamiento a través de transferencia de energía no lineal. En estos modelos el “mar de viento” es manejado por una forma espectral independiente de los otros procesos, ajustada con los parámetros de Hasselmann. En estos modelos la parametrización del término S_{nl} fue necesaria porque el cálculo completo en 3 dimensiones no era posible hacerlo con las computadoras existentes en esa época. De esta forma S_{nl} se obtiene por ajuste de una familia de funciones que dependen de una serie de parámetros. Estos modelos son así llamados modelos paramétricos de “mar de viento”. La “marejada de fondo” (o mar de leva) se calcula o se propaga con una forma espectral. Ya que esta es casi independiente del viento, los dos

esquemas funcionan casi independientes. Estos son los llamados modelos híbridos acoplados. Estos modelos tienen problema en la transferencia de “mar de viento” a “marejada de fondo” en un cambio rápido de dirección del viento.

Los modelos de tercera generación no imponen una forma definida del espectro y la ecuación de transporte de energía se calcula completamente, como también los términos no lineales.

3.2.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO⁵³

Modelo SWAN ha sido desarrollado por la Universidad de Delft (1997). SWAN es un modelo de ondas de tercera generación, aunque tiene la opción de funcionar como de primera y segunda generación. Este modelo se basa en el espectro de propagación de la ecuación de balance de acción de olas.

Con corrientes no uniformes, la energía de ola no es conservada debido al intercambio de energía entre olas y la corriente promedio. La acción de ola N en vez del espectro de energía de ola F , es conservada durante la propagación, de manera que la ecuación de balance de acción de ola es dada por:

Ecuación (6)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\Omega N}{\partial \Omega} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\Omega}$$

donde

$$N = N(\Omega, \theta; x, t) = F(\Omega, \theta; x, t)/\omega,$$

Siendo $\Omega = \omega + k \cdot U$ frecuencia
 U (m/s) la velocidad de corriente promedio.

El primer término de la ecuación representa la razón de cambio de la densidad de acción de ola. El segundo y tercer término son la propagación en el espacio de la densidad de acción de ola incluyendo la somerización por profundidad y corrientes. Los últimos dos términos representan la refracción por corrientes y profundidad. Los términos de la derecha son los términos fuente, donde en este caso se incluye la energía suministrada por el viento, la transferencia de energía a través de las interacciones no lineales: cuadruplets y triadas, el decaimiento por rompimiento de las crestas de las olas, la fricción con el fondo

⁵³ SWAN, Scientific and technical documentation. SWAN Cycle III version 40.72A.

y rompimiento de la ola inducida por la profundidad. De los términos fuentes anteriores, argumenta que la refracción/somerización, el rompimiento de olas y las interacciones entre triadas, son los procesos que dominan en aguas someras⁵⁴.

El modelo SWAN Ciclo-2 propaga la densidad de acción de onda para todas las componentes del espectro a través del área computacional usando un esquema implícito. Esto tiene la ventaja de que el tiempo de propagación no está limitado por una condición de estabilidad numérica, como en el caso del modelo WAM, dado que el esquema implícito es incondicionalmente estable en el espacio geográfico y espectral.

3.2.3. MALLAS DE CÁLCULO

La discretización del espacio de dominio, permite que las ecuaciones de gobierno puedan ser resueltas numéricamente con aproximaciones a las ecuaciones de conservación que dan un estimativo de las variables de interés⁵⁵.

Según García (2008), hay dos tipos de mallas; las estructuradas y las no estructuradas. La representación del dominio se realizó con una malla estructurada, que se define como aquella donde cada elemento de control tiene el mismo número de elementos vecinos. La ventaja radica en su simplicidad, lo cual requiere menos memoria de cómputo y se puede controlar el tamaño de cada elemento.

Nuestro dominio ha sido basado en dos mallas, donde esta una anidada en la otra; las llamaremos base y la otra nest.

⁵⁴ Lizano, O., Ocampo, F., Alvarado, L., Vega, R., Puig, J.(2001) Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México. Top. Meteor. Oceanog, 8(1):49-49.

⁵⁵ García, F., Palacio, C., García, U.(2008) Generación de Mallas No estructuradas para la Implementación de Modelos Numéricos . Dyna, Año 76, No 157, pp 17-25. Medellín.

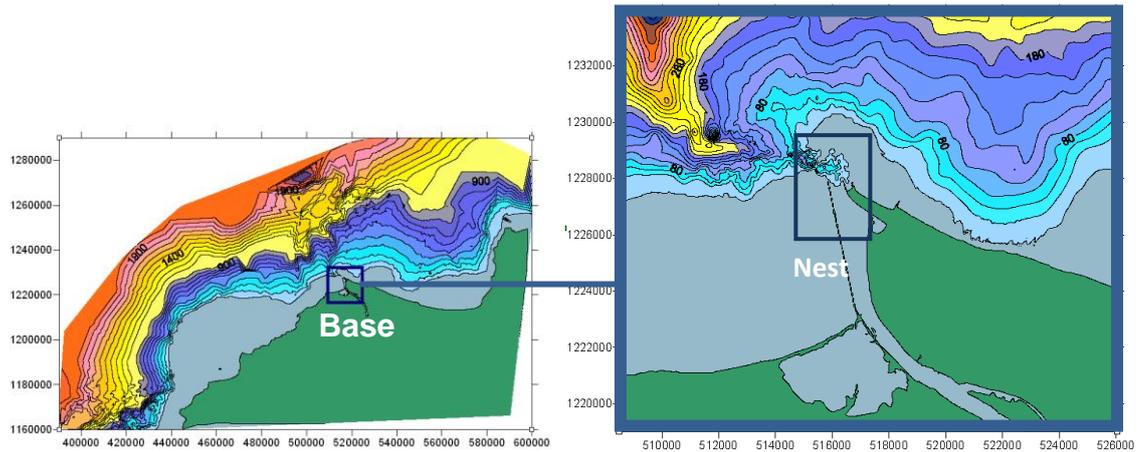


Figura 3.3. Dominios utilizados en el Modelo SWAN

El dominio base y nest, se les delimito el área y el tamaño de celda como se puede ver en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Descripción de las mallas utilizadas

Área	Nombre	Nodos	Resolución (m)	Limites (UTM)
Tramo de la desembocadura del Magdalena	Base	176x 150	100 x 100	X: 508500 – 526000 Y: 1219000 – 1233900
Bocas de Ceniza	Nest	481 x 601	10 x 10	X: 513900 – 518700 Y: 1224000 – 1230000

3.2.4. CONDICIONES INICIALES Y CONTORNO

El modelo SWAN tiene una variedad de entradas para las condiciones iniciales y diferentes comandos para este fin, las cuales son definidas según el área de análisis y los parámetros a manejar:

BOUND SHAPESPEC: define la forma de los espectros tanto en frecuencia como en dirección en la frontera de la red de cálculo según los parámetros de entrada.

Desde un punto de vista ingenieril, se han utilizado tradicionalmente los espectros paramétricos para describir el estado del mar. Estos espectros normalmente son empleados para describir espectros escalares y de menor manera direccionales. Sin embargo, no siempre los espectros paramétricos representan adecuadamente la realidad.

Tenemos el espectro de Pierson-Moskowitz que representa el oleaje completamente desarrollado sobre el océano, las olas desarrolladas en un *fetch* limitado bajo fuertes vientos tienden a mostrar los espectros caracterizados por picos agudos. La forma del espectro ha sido demostrada por un programa de observación de olas conocido con el nombre de *Joint North Sea Wave Project*, el cual produjo una modificación en la ecuación para ampliar artificialmente la densidad espectral alrededor del pico (*Hasselmann et al., 1973*). La forma espectral propuesta es conocida como el espectro JONSWAP y contiene el *fetch* adimensional como parámetro gobernante.

Ecuación (8)

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} e^{-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right) \gamma} \gamma^\delta$$

El parámetro que podemos modificar dentro del SWAN es γ , es el factor de intensificación del pico. *Hasselmann et al. (1973)* mostraron que el valor de γ se encontraba en un rango entre 1 y 7 con una media de 3.3 el cual está por defecto en el SWAN.

Con respecto al espectro JONSWAP, nos basamos en la literatura, ya que el espectro es muy sensible a los valores de γ , por lo cual no es conveniente manejarlos como constantes, sino ajustarlos en función de la altura de la ola, en lo posible con series de tiempo más completas. Teniendo en cuenta el trabajo de Torres y Lonin (2007)⁵⁶, en donde se construye el espectro JONSWAP, a partir de datos de las boyas de oleaje direccional, se condensa en la siguiente tabla:

Tabla 3.2. Valores de Gama para el Espectro JONSWAP en el Caribe. Fuente: Torres (2007)⁵⁷

Boya	Año	Meses	Fp de los datos (prom)	Valores por Iteración (prom)		Ciclos usados (prom)
				Alfa	Gama	
Barranquilla	06-07	9	0.1277	0.036	1.37	10.66
Caribe	06-07	12	0.1305	0.0312	1.1806	7.33

Los valores están asociados a los valores de altura.

⁵⁶ Torres, R., Lonin, S. (2007) Estudio preliminar del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. Boletín Científico CIOH, No 25.

⁵⁷ i.e. pie de página 5.

BOUNDSPEC SIDE: define los parámetros el espectro en la frontera. Consta de dos partes, la primera parte se define el límite lateral o segmento donde los espectros se generarán, la segunda parte se define los parámetros espectrales.

Este comando se puede dar varias veces, para definir los campos de onda incidente sobre distintas partes o segmentos de la frontera.

Los parámetros a ingresar dependen del clima marítimo sobre la dirección del oleaje predominante, y se define la variable como:

Ecuación (9)

$$DSPR^2 = \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 \int_0^{2\pi} \left(2\sin\frac{\theta - \bar{\theta}}{2}\right)^2 D(\theta)d\theta$$

DSPR (directional spreading) = dirección de propagación o dirección de desviación estándar

La distribución direccional de energía de onda incidente se da como:

Ecuación (10)

$$D(\theta) = A(\cos \theta)^m$$

Para todas las frecuencias, en la cual definimos el parámetro de energía m. Para definir el valor de m, nos basamos en lo que propone Torres(2007)⁵⁸, en donde según el espectro de frecuencias y direcciones del oleaje en Barranquilla, tiene un ángulo de aproximadamente 40°, entonces el DSPR (en °)= 19.9.

Tomando en cuenta que se desea ver el espectro variable en diferentes parámetros de oleaje, se lee un archivo que contiene los parámetros con el paso del tiempo definido

Además de los comandos anteriores podemos también tener en cuenta los comandos de procesos físicos de generación y disipación de oleaje de los cuales se tiene en cuenta:

OFF QUADR: Se cancela la opción de resonancia de los quadruplets siempre y cuando no se especifique el viento. Para las áreas locales de poca extensión

⁵⁸ Torres, P., Lonin,S. (2007). Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. Boletín científico CIOH No 25.

horizontal, no se requiere la especificación del viento debido a un fetch limitado, como el área de Bocas de Ceniza.

TRIAD: se activa la triada, interacción onda – onda, la interacción es calculada por *Discret Interaction Approximation (DIA)*, y *Lumped Triad Approximation* (para triadas).

Las propiedades básicas de la interacción onda – onda fueron descubiertos durante la investigación de Phillips (1960) y Hasselman. El significado físico de las interacciones de resonancia establece el intercambio de energía de las olas, a través de la redistribución del espectro. En las aguas profundas e intermedias son importantes las interacciones de onda quadruplets, mientras que en aguas someras las interacciones de onda triadas son importantes por la pendiente de la ola.

La triada realiza transferencia de energía a frecuencias más altas y a menudo resultan en armónicos mayores. La transferencia de energía en este proceso puede tener lugar a una distancia relativamente corta y puede cambiar dramáticamente a un solo espectro máximo en múltiples máximos de espectros

FRICITION: Se activa la fricción de fondo.

La formulación JONSWAP puede aplicarse con un coeficiente de fricción constante o variable que depende de la frecuencia de la difusión direccional.

DIFRACC: Se activa la difracción

La difracción es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentra un obstáculo.

La difracción esta expresada en términos de la tasa de cambio de dirección de la onda, en el espectro de ondas de 2D. La aproximación se basa en la suave pendiente de la ecuación de refracción y difracción.

3.2.5. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de los escenarios se tomaron en cuenta dos factores de influencia en la desembocadura: el oleaje y el caudal del río Magdalena. De acuerdo a esto, primero nos basamos en los caudales típicos en la desembocadura del río:

- Caudales bajos: Enero, Febrero, Marzo, Abril.

- Caudales Medios: Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre.
- Caudales Altos: Octubre, Noviembre, Diciembre.

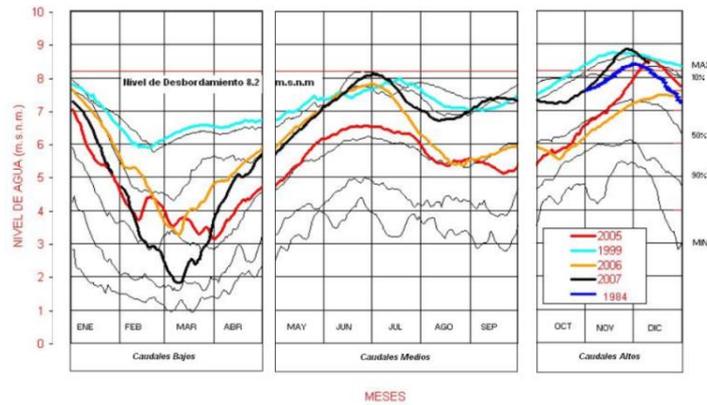


Figura 3.4 .Río Magdalena –Estación de Calamar. Frecuencia de niveles excedidos 1967 – 2007. Fuente: Condiciones generales del puerto de Barranquilla, durante Abril de 2006. CORMAGDALENA. UNIVERSIDAD DEL NORTE. IDEHA.

De la figura 3.4., observamos cómo se conserva la tendencia en las tres secciones identificadas, sin embargo los valores varían de acuerdo al año (marcados con colores), debido a la influencia de diferentes fenómenos como por ejemplo el niño y la niña. Los caudales son concordantes con la climatología del Caribe.

Procedimos entonces al análisis en relación a los puntos más significativos dentro de cada sección y la ecuación de la recta de correlación de nivel del agua y caudales de la figura 2.5., como se consigna en la siguiente tabla:

Tabla 3.3. Relación de los Caudales típicos en 1999-2005-2006-2007 en función del nivel del agua y su respectivo caudal

Caudales Típicos	Años							
	1999		2005		2006		2007	
	m.n.s.n	m ³ /s						
Caudales Bajos	6.375	7704.1			3.25	4051	1.875	2443.6
Caudales Medios			6.5625	7923.3			8.2	9837.5
Caudales Altos					7.125	8580.8	8.875	10626.6

La grafica de la figura 3.5. muestra los puntos tomados para la realización del análisis, en cada sección.

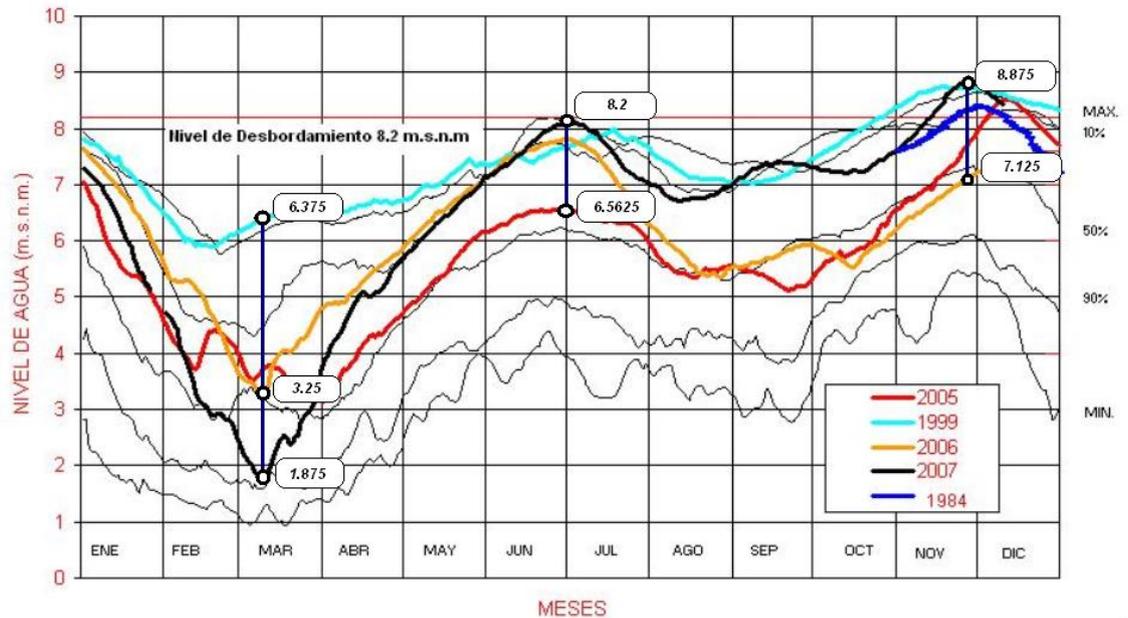


Figura 3.5. Puntos de las curvas de nivel, tomados para el análisis.

Los caudales marcados en la tabla 3.3. son los utilizados para cada sección de caudal típico, de la figura 3.3. Seleccionado bajo el criterio de la frecuencia excedida del 10% y redondeado a valores cerrados:

- Caudales bajos: 7.000 m³/s
- Caudales Medios: 9.000 m³/s
- Caudales Altos: 11.000 m³/s

Los escenarios son las posibles combinaciones de los caudales típicos en los diferentes meses y las direcciones ubicadas entre los cuadrantes I y IV, en coordenadas náuticas. Para cada una de las direcciones, de acuerdo a su respectiva distribución de probabilidad conjunta de Periodo pico y Altura significativa (ver anexo A), se seleccionaron dos valores: el valor de mayor probabilidad y el valor más extremo, donde el más extremo es el de periodo pico y altura significativa mayor (anexo A, tabla A.28). Estos parámetros definen un estado mar, cada estado de mar es un escenario de oleaje de estudio.

Tabla 3.4. Estados de Mar seleccionados, más representativos en cada época.

Enero a Abril - Caudal Bajo (7000 m³/s)						
Dirección	Hs	Tp	%	Hs	Tp	%
Norte	1 - 1.5	5 - 7	21,57	3 - 3.5	5 - 7	0,98
NNE	1 - 1.5	5 - 7	19,34	3 - 3.5	7 - 9	0,25
NE	1.5 - 2	5 - 7	16,88	3.5 - 4	7 - 9	0,37
NEE	1.5 - 2	5 - 7	18,87	3.5 - 4	7 - 9	0,07
Este	1.5 - 2	5 - 7	17,07	3.5 - 4	7 - 9	0,06
Oeste	1 - 1.5	7 - 9	50	1.5 - 2	7 - 9	16,67
NWW	0.5 - 1	5 - 7	44,44	1 - 1.5	5 - 7	33,33
NW	0.5 - 1	5 - 7	30	2 - 2.5	7 - 9	10
NNW	1 - 1.5	5 - 7	32	2 - 2.5	7 - 9	4
Mayo a Septiembre - Caudal Medio (9000 m³/s)						
Norte	1 - 1.5	5 - 7	27,16	2 - 2.5	7 - 9	3,7
NNE	1 - 1.5	5 - 7	20,77	3 - 3.5	7 - 9	0,32
NE	1 - 1.5	5 - 7	17,20	3.5 - 4	5 - 7	0,10
NEE	1.5 - 2	5 - 7	18,32	3.5 - 4	7 - 9	0,03
Este	1.5 - 2	5 - 7	18,41	3.5 - 4	7 - 9	0,04
Oeste	1 - 1.5	3 - 5	21,88	2 - 2.5	3 - 5	3,13
NWW	0.5 - 1	3 - 5	21,05	2 - 2.5	9 - 11	5,26
NW	3 - 3.5	7 - 9	33,33	1 - 1.5	5 - 7	16,67
NNW	0.5 - 1	5 - 7	21,88	2 - 2.5	7 - 9	6,25
Octubre a Diciembre - Caudal Alto (11000 m³/s)						
Norte	0.5 - 1	5 - 7	17,86	2.5 - 3	7 - 9	1,19
NNE	1 - 1.5	5 - 7	24,23	2.5 - 3	7 - 9	1,32
NE	1 - 1.5	5 - 7	18,50	3 - 3.5	7 - 9	0,86
NEE	1.5 - 2	5 - 7	16,79	3 - 3.5	7 - 9	1,08
Este	1.5 - 2	5 - 7	19,55	3 - 3.5	7 - 9	0,87
Oeste	1 - 1.5	5 - 7	27,27	1.5 - 2	5 - 7	3,03
NWW	0.5 - 1	5 - 7	27,27	2 - 2.5	7 - 9	6,06
NW	1 - 1.5	5 - 7	16,67	2 - 2.5	5 - 7	4,7
NNW	0.5 - 1	5 - 7	25	2 - 2.5	7 - 9	7,5

3.2.6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Cada estado de mar lo representamos en una grafica de la altura significativa para hacer visualmente notorio el oleaje en la zona, siendo de nuestro interés conocer la dinámica del comportamiento haciendo uso de las corrientes del río Magdalena, las simulaciones se ejecutaron teniendo en cuenta las corrientes y en ausencia de estas para así, conceptualizar mejor el fenómeno.

Presentaremos los escenarios más probables como sé analizó en el Capítulo 2 del Clima marítimo del Área de Bocas de Ceniza, donde predomina la propagación de oleaje en las direcciones NE, NEE, Este y los estados de mar

de régimen extremal con los periodos de retorno de 10, 20 y 50 años. Por lo cual haremos referencia a los estados de mar en estas direcciones, y retomaremos un estado de mar donde se presenta alguno caso especial, para la realización del análisis. De acuerdo a esto tenemos los tres diferentes corrientes:

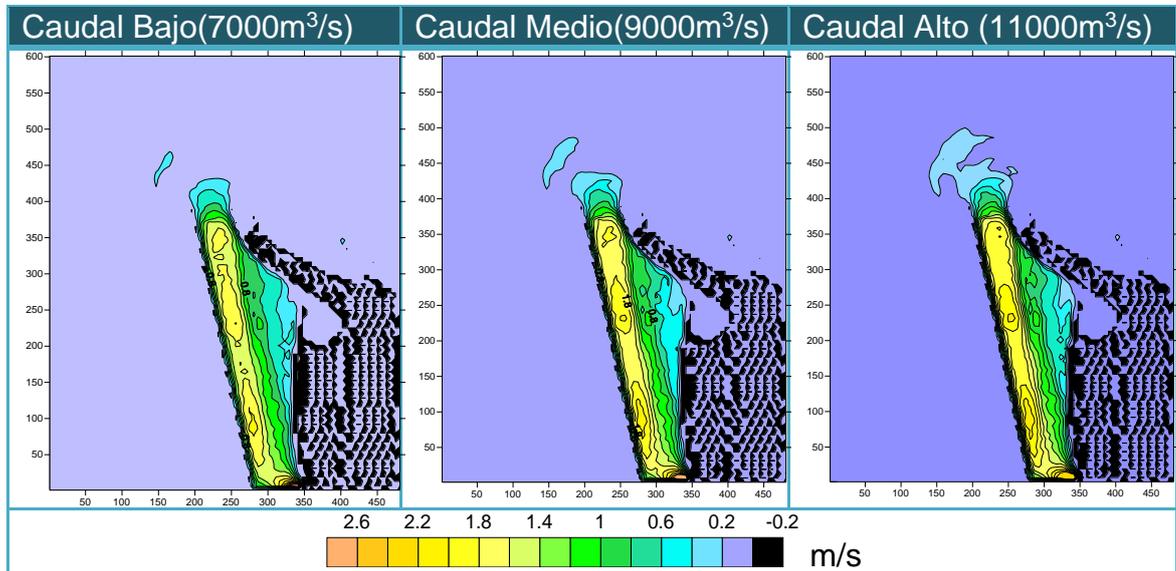


Figura 3.6. Caudales típicos del río Magdalena, según la velocidad de su corriente.

Para las direcciones más probables NE, NEE y Este, se graficaron los estados de mar de la Tabla 3.4, según las diferencias de altura de ola significativa.

La variación de la propagación del oleaje en dirección NE, NEE y Este están afectadas por la corriente incidente. Según esto, se realizaron graficas de oleaje donde, se aprecia el valor de la diferencia entre las alturas de ola H_s , teniendo en cuenta o no, la corriente y de acuerdo a esto podemos analizar, lo siguiente:

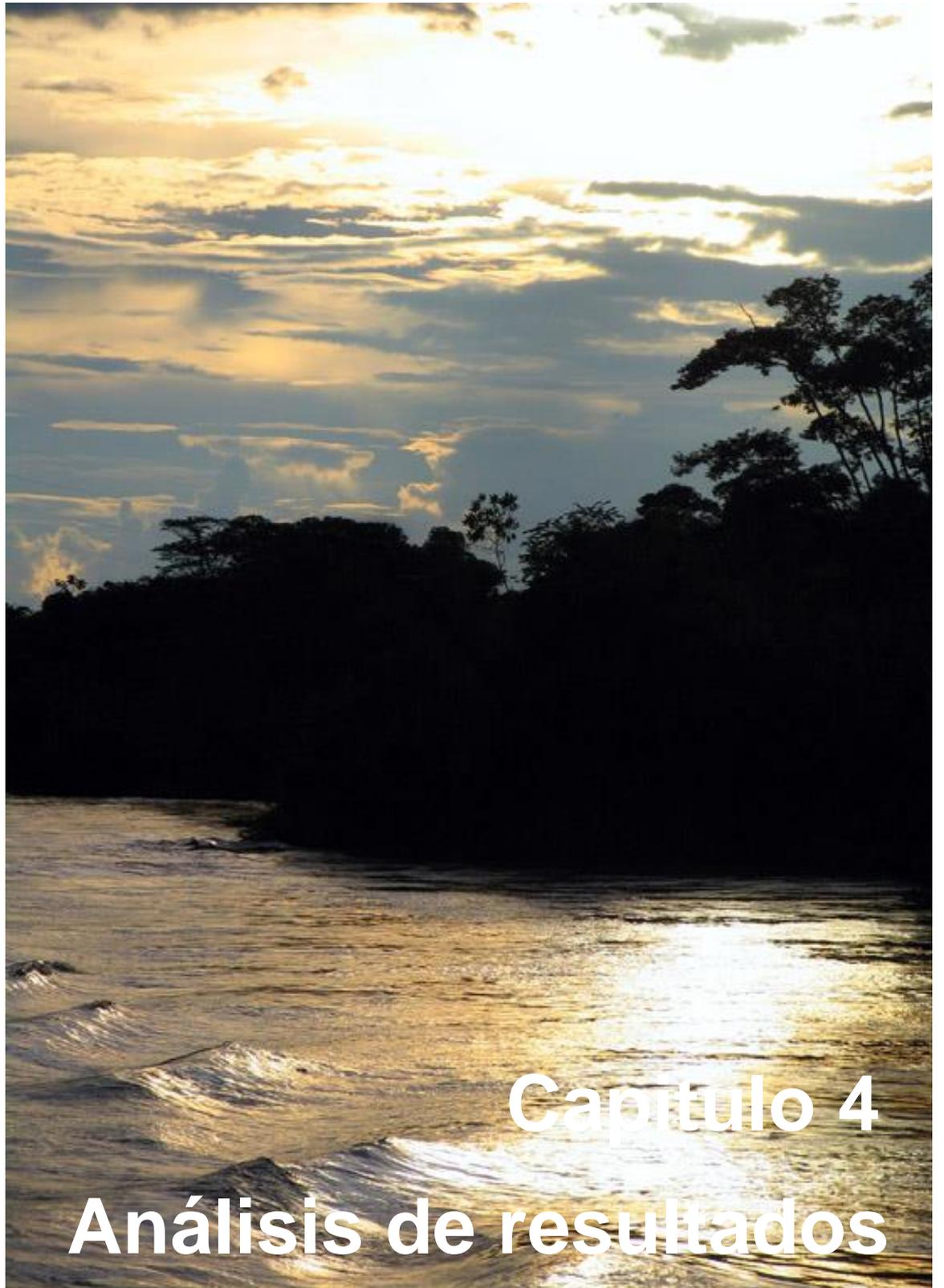
H_{s_c} = Altura de ola significativa, simulada con corrientes.

$H_{s_{sc}}$ = Altura de ola significativa, simulada sin corrientes.

$$\Delta H_s = H_{s_c} - H_{s_{sc}}$$

Donde ΔH_s es positiva, si la altura de ola significativa simulada con corrientes, es mayor que la altura de la ola significativa simulada sin corrientes, o ΔH_s es negativa, si la altura de ola significativa simulada con corrientes, es menor que la altura de la ola significativa simulada sin corrientes.

El valor de la diferencia, varía de acuerdo a la corriente y la dirección como veremos más adelante.



Capítulo 4

Análisis de resultados

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El oleaje incidente en una desembocadura sufre transformaciones a medida que se propaga aguas arriba. Por un lado, la variabilidad espacio temporal de las corrientes así como las variaciones del nivel medio, hacen que el oleaje esté sometido a continuas modificaciones. Generalmente, el oleaje incidente en la desembocadura se propaga aguas arriba, mientras que su energía se va disipando. Sin embargo, durante los caudales altos, la intensidad de la corriente puede llegar a ser de tal magnitud que dé lugar al bloqueo del oleaje, es decir, la corriente en oposición no deja que el oleaje incidente en la desembocadura se propague aguas arriba, haciendo que su peralte aumente y finalmente rompa. En este trabajo se considerarán las variaciones en el campo de oleaje incidente en la desembocadura inducida por variaciones en la intensidad de la corriente. Dicho de otro modo, se asume que el oleaje siempre es capaz de propagarse aguas arriba a medida que su energía se disipa.

Para efectuar el análisis de los resultados de las simulaciones numéricas se tomarán en cuenta las direcciones más probables de propagación del oleaje, con los respectivos escenarios más representativos en el año, de acuerdo con lo descrito en el Capítulo 3.

4.1. ANÁLISIS TEÓRICO INTERACCIÓN OLA – CORRIENTE

Cuando el oleaje se propaga sobre una zona en la que existe una corriente, cambian las características cinemáticas y dinámicas del oleaje. El estudio de la interacción ola-corriente es un problema complejo ya que se trata de analizar la propagación del oleaje en un medio no homogéneo, anisótropo, dispersivo, disipativo y en movimiento.

Cinemática de la interacción⁵⁹

A continuación se presentan las ecuaciones de la dinámica que rigen la interacción ola-corriente, centrando la atención en la modificación de la ecuación de la dispersión.

Para la realización del análisis se toma en cuenta un área donde el flujo de la corriente sea constante.

⁵⁹ Texto tomado y modificado de: Mehaute L.B. (1990) Ocean Engineering Science. Ed. John Wiley & Sons, Inc. y Svendsen I. A. (2006) Introduction to Nearshore Hydrodynamics volume 24. Ed. World Scientific.

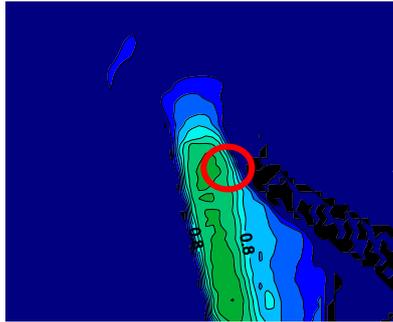


Figura 4.1. Área donde suponemos la corriente constante

De acuerdo a lo anterior la interacción del frente de ola y la corriente se relaciona como se observa en la figura 4.2., según la velocidad de fase de la ola y de la corriente, considerando la corriente con velocidad constante.

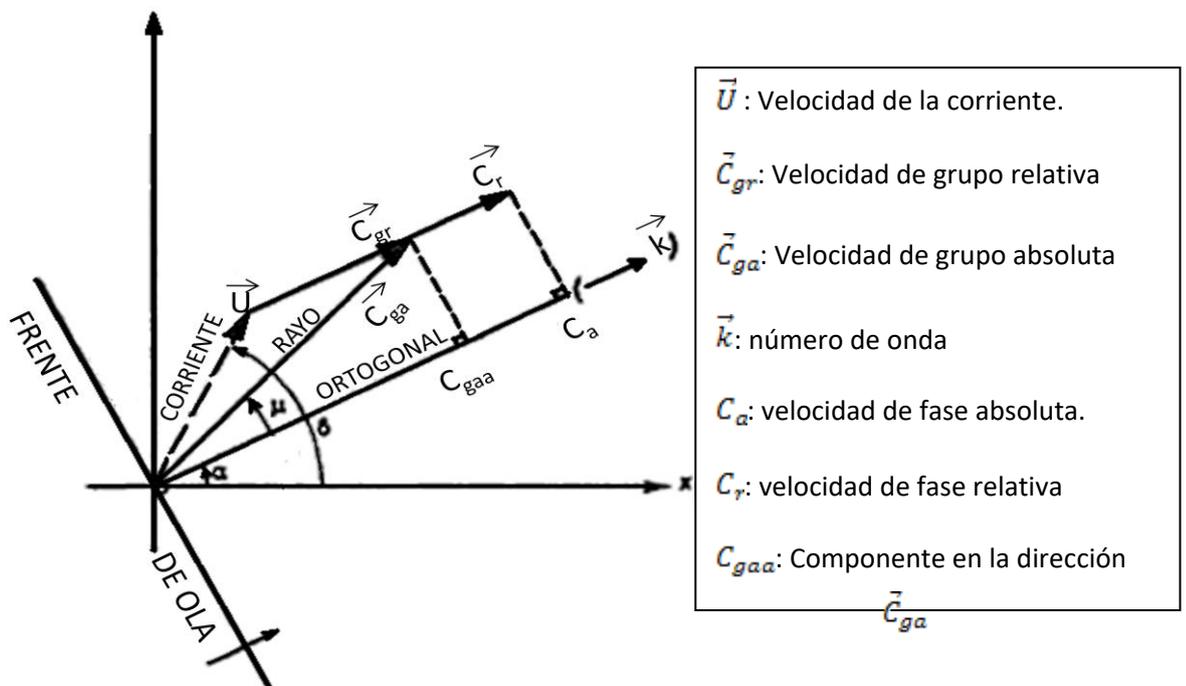


Figura 4.2. Esquema visto en plano horizontal, que muestra el rayo de la ola, la velocidad de grupo C_{ga} , velocidad de fase absoluta C_a y el vector de número de onda k . Modificado de la fuente: Mehaute L.B. Ocean Engineering Science.

La velocidad de la ola es siempre tomada en dirección perpendicular del frente de ola. Cuando la componente de la velocidad de la corriente es paralela al frente de onda no contribuye a la velocidad de la ola.

Ahora, si consideramos la propagación de trenes de ondas con idéntica amplitud y dirección con frecuencias ligeramente diferentes, que se propagan con una celeridad $C=w/k$, que se encuentran moduladas por una onda

envolvente propagándose a una velocidad que se llama velocidad de grupo, $C_g = \Delta w / \Delta k$. De donde se desprende la relación entre la velocidad de la onda y velocidad de grupo depende de la profundidad relativa kh .

En profundidades reducidas cuando $kh \rightarrow \infty$, implica que:

$$C_g = \sqrt{gh} = C \quad (1)$$

Si la ola satisface el número de onda k y la relación de dispersión, donde σ es la frecuencia relativa, que es la frecuencia de la onda sin influencia de corrientes, tenemos:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (2)$$

Ahora, si se observa el movimiento de la velocidad de fase absoluta de la ola (C_a) en dirección k con respecto a la velocidad de la corriente tenemos que:

$$C_a = C_r + U \cos \mu \quad (3)$$

Y el número de onda k , en el marco de referencia para un observador en un punto fijo y un observador moviéndose en el sistema coordenado, es el mismo, tenemos que:

$$w = ck \quad (4)$$

Entonces $w_a = C_a k \quad \sigma = C_r k \quad (5)$

Si reemplazamos (5) en la ecuación de velocidad de fase (3), se obtiene:

$$w_a = \sigma + kU \cos \mu \quad (6)$$

ó

$$\sigma = w_a - kU \cos \mu \quad (7)$$

Esta es llamada la relación Doppler.

Gráficamente como se observa en la figura 4.2. y teniendo en cuenta la ecuación (1), el movimiento de la velocidad de grupo absoluta de la ola (C_{gaa}) en dirección k con respecto a la velocidad de la corriente es:

$$C_{gaa} = C_{gr} + U \cos \mu \quad (8)$$

Siendo C_{gr} , la velocidad de grupo relativa.

Si dividimos la ecuación (7), sobre el número de onda k , tendríamos la ecuación en términos de la velocidad de grupo.

$$\frac{\sigma}{k} = C_{gaa} - U \cos \mu \quad (9)$$

En el caso de $U \cos \mu < 0$ la corriente es opuesta a las olas. Claramente para una fuerte oposición de la corriente, el número k es grande. Por lo tanto la oposición de la corriente reduce la longitud de onda.

De la ecuación (8), analizaremos para los siguientes casos:

Si, la velocidad de grupo absoluta es cero ($C_{gaa}=0$)

$$0 = C_{gr} + U \cos \mu \quad (10)$$

Entonces, despejamos:

$$C_{gr} = -U \cos \mu \quad (11)$$

Podemos decir entonces que existe un bloqueo de las olas, donde la velocidad neta y el flujo de energía se desvanecen, aunque las crestas parecen propagarse aguas arriba, debido que $\sigma/k > 0$ es mayor que cero, donde k es positivo y σ es positivo para la solución de la dispersión para corrientes en contra de la propagación del oleaje y la energía se mantiene constante en el espacio.

Ahora para los casos donde tomamos en cuenta la ecuación (9):

Si,

$$\frac{\sigma}{k} > C_{gaa} > -U \cos \mu \quad (12)$$

Entonces la cresta y la energía se propagan aguas arriba.

Si,

$$\frac{\sigma}{k} > -U \cos \mu > C_{gaa} \quad (13)$$

La energía se mueve con la corriente y las crestas se propagan aguas arriba

Dinámica de la interacción

Las ecuaciones que rigen la interacción son las ecuaciones de conservación de masa, conservación de cantidad de movimiento y la de conservación de acción de onda. La acción de onda se constituye en el parámetro fundamental para la estimación de la altura de ola, y se define como la razón entre la energía total y la frecuencia relativa.

El efecto de la corriente sobre el oleaje se manifiesta como una refracción suplementaria a la que se ve sometido el oleaje si ha de propagarse en un área

donde existe una corriente. De este modo si la corriente fluye en contra de la dirección de propagación del oleaje, se produce una reducción de la celeridad del oleaje y de la longitud de onda como se describió anteriormente. La refracción debida a la corriente del chorro, provoca una focalización del oleaje que tiende a concentrarse contra el chorro⁶⁰.

Las corrientes también se ven alteradas por la presencia del oleaje. El efecto que el oleaje ejerce en la corriente es caracterizado por un aumento de la rugosidad aparente del lecho que puede llegar a aumentar el termino de fricción en un orden de magnitud, de este modo la corriente tenderá siempre a fluir por la zona en la que menor sea el oleaje, o transversalmente al mismo. La corriente tiende a fluir por la zona de menor altura de ola tanto más cuanto mayor sea el gradiente de altura de ola⁶¹.

Para que exista el aumento de la altura de la ola, debe existir un flujo de energía, lo cual probaremos como sigue, tenemos entonces, que la acción de la densidad $N=E/\sigma$ se conserva durante la propagación en la existencia de corriente pero la densidad de energía no.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}}[(\vec{C}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_{\sigma}N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta}N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (14)$$

La razón $\frac{S_{tot}}{\sigma}$ es constante:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}}[(\vec{C}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_{\sigma}N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta}N}{\partial \theta} = 0 \quad (15)$$

De donde tenemos que la variación el primer y tercer término de la ecuación 10, reemplazando $N=E/\sigma$:

$$\frac{\partial E/\sigma}{\partial t} + \frac{\partial c_{\sigma}E/\sigma}{\partial \sigma} = 0 \quad (16)$$

Derivando:

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial E}{\partial t} - \frac{E}{\sigma^2} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial c_{\sigma}E}{\partial \sigma} - c_{\sigma} \frac{E}{\sigma^2} = 0 \quad (17)$$

Luego,

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{E}{\sigma^2} \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{1}{\sigma} \frac{\partial c_{\sigma}E}{\partial \sigma} + c_{\sigma} \frac{E}{\sigma^2} \quad (18)$$

⁶⁰ Documento de referencia, Dinámicas Volumen 1. Diciembre de 2000. Universidad de Cantabria.

⁶¹ i.e. pie de pagina 2.

Los términos de la derecha son positivos, teniendo en cuenta que el flujo de la corriente va en dirección contraria a la propagación de oleaje, siendo σ positivo.

Por lo tanto,

$$\frac{\partial E}{\partial t} > 0 \quad (19)$$

Lo que implica que la variación en el tiempo es positiva, el espectro se mueve a la derecha como se ve en la figura 4.3.:

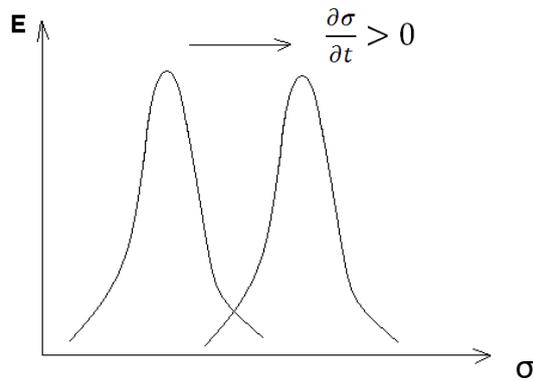


Figura 4.3. Espectro de energía, moviéndose a la derecha.

La energía aumenta, y esta es proporcional a la varianza $\langle \eta^2 \rangle$

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \rho_w g \langle \eta^2 \rangle \quad (20)$$

la cual podemos relacionar con el espectro del momento cero del cual depende directamente la altura de ola:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (21)$$

El mecanismo físico responsable del cambio en la altura de la ola es el cambio de la densidad de energía local en el movimiento ondulatorio, donde la energía se mueve a lo largo del frente de onda creando un flujo de energía neto.

De aquí podemos deducir que cuando el oleaje va en dirección opuesta a la corriente la frecuencia aumenta y por lo tanto la altura de ola varia, incrementándose para conservar el flujo de energía.

4.2. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL EFECTO DE LAS CORRIENTES EN EL OLEAJE.

En los ríos es común encontrar un flujo continuo no uniforme, ya que en tramos relativamente cortos, llamados transiciones, hay un cambio rápido de velocidad y profundidad. La corriente es una masa de agua en movimiento con una inercia al cambio de dirección. El contorno opone una fuerza exterior que produce dicho cambio, en la figura 4.4. se puede apreciar el perfil de la corriente, variando a través de la profundidad.

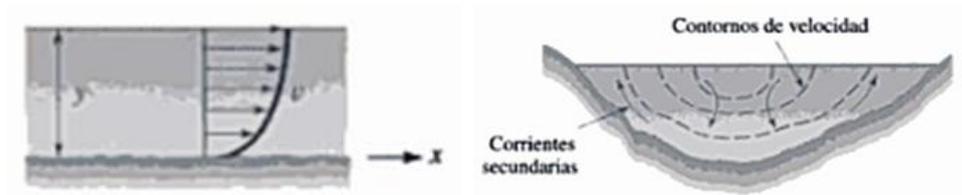


Figura 4.4. Perfil de la corriente. Fuente: Potter, M. C. Mecánica de Fluidos

En la figura 4.5. vemos como varia la intensidad de la corriente según avanza hacia el mar, siendo más fuerte dentro del canal y disminuyendo a la salida.

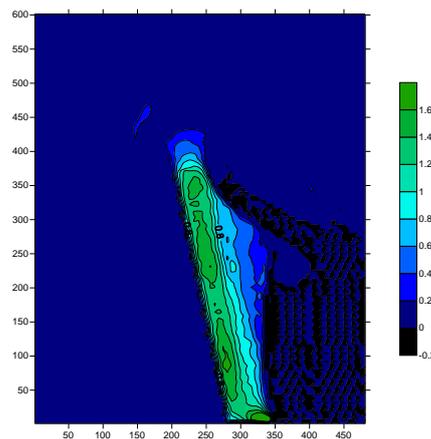


Figura 4.5. Velocidad de la corriente en época de Enero a Abril.

La mayor dificultad en el estudio de estos temas es que las olas y las corrientes interactúan hidrodinámicamente de forma no lineal, de manera que los flujos resultantes no son una suma lineal de sus comportamientos. La principal interacción es la modificación de la velocidad de fase y longitud de onda.

Para la descripción del efecto que tiene la influencia de la corriente en el oleaje, tomaremos una propagación del oleaje en la desembocadura del río Magdalena, y lo dividiremos por zonas como se observa en la figura 4.6.

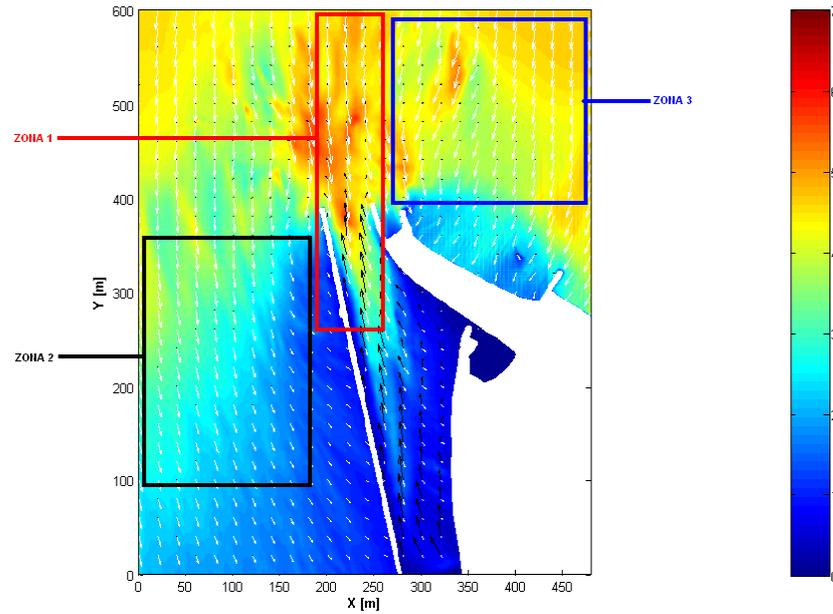


Figura 4.6. Propagación del oleaje en la desembocadura del río Magdalena (flechas blancas) y dirección de las corrientes (flechas negras).

Tomando en cuenta lo descrito en el numeral 4.1., del presente capítulo, sobre el efecto de la corriente en el oleaje según la dirección del corriente, podemos analizar qué:

Zona 1: (Desembocadura). En esta se observa que hay una mayor concentración de energía, representada en incremento de la altura de la ola, lo cual se debe a diferentes efectos, por los cuales el oleaje se transforma, fundamentalmente hay variaciones de altura de ola y dirección de propagación.

Esta zona se ve afectada por el cambio de la profundidad, cuando el oleaje se acerca a la desembocadura del río, empieza a incrementarse su altura y a reducirse su longitud de onda, debido al asomeramiento. Este fenómeno se manifiesta independientemente de las corrientes, pero se intensifica en la influencia de estas. La influencia generada por las corrientes, la podemos observar, en el sentido de la dirección de la corriente (flechas negras), la cual forma un ángulo mayor de 90° con el frente de la ola (flechas blancas), por lo cual se define como opuesta al oleaje (según lo visto en el numeral 4.1.), y permite la sobre elevación de la altura de la ola, principalmente en la entrada a la desembocadura, donde la magnitud de la corriente provoca en la variación de la frecuencia y disminución de la longitud de la onda.

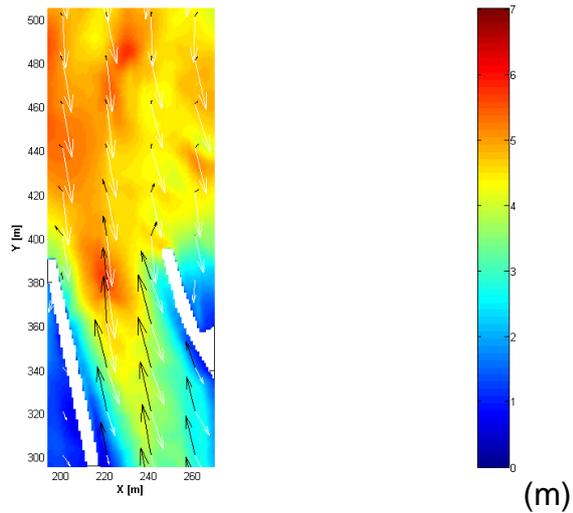


Figura 4.7. Zona 1, Relación de la dirección de las corrientes (flechas negras) y la propagación del oleaje (flechas blancas)

En una grafica de perfil longitudinal es posible ver más claramente, el incremento de altura de la ola en la zona de la salida del tajamar, como se muestra en la figura 4.8.

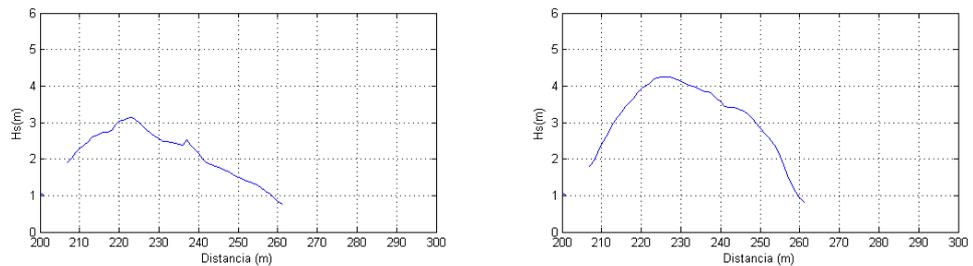


Figura 4.8. Perfil longitudinal de la altura de la ola significativa en la salida de los tajamares sin la influencia de la corriente (izquierda) y con la influencia de la corriente (derecha).

Zona 2: (Margen occidental de la desembocadura). La corriente no tiene mucha influencia en la zona debido que la magnitud de la corriente es muy pequeña, y su dirección es menor a 90° , por lo que la componente ortogonal de la corriente va en la misma dirección del oleaje, figura 4.9.

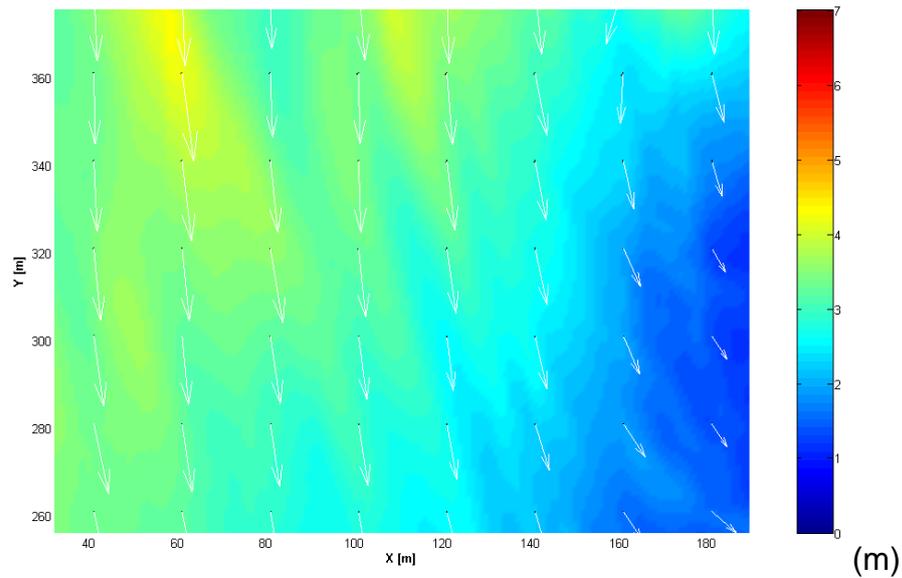


Figura 4.9. . Zona 2, Relación de la dirección de las corrientes (flechas negras) y la propagación del oleaje (flechas blancas)

Zona 3: (Margen oriental de la desembocadura) El oleaje se propaga en aguas profundas desde aproximadamente una profundidad de 2400 m, hasta llegar a nuestra zona de estudio con una profundidad aproximada de 10 m. En esta zona, parte del frente de ola que se propaga en aguas profundas viaja con una celeridad mayor que la parte que se encuentra en menor profundidad, dando lugar a un giro del frente (refracción) como puede apreciarse en la figura 4.10., el cual también puede ser producido por la presencia de una corriente. Otro de los efectos que se encuentra en esta zona, es el efecto de asomeramiento, debido al cambio de profundidad, el cual no es muy marcado en el aumento de la altura de ola. El efecto de la corriente, tampoco es muy fuerte, porque la magnitud de la corriente es muy pequeña y aunque la dirección sea mayor a 90° , favoreciendo al aumento de altura de ola no es la principal dinámica en la zona.

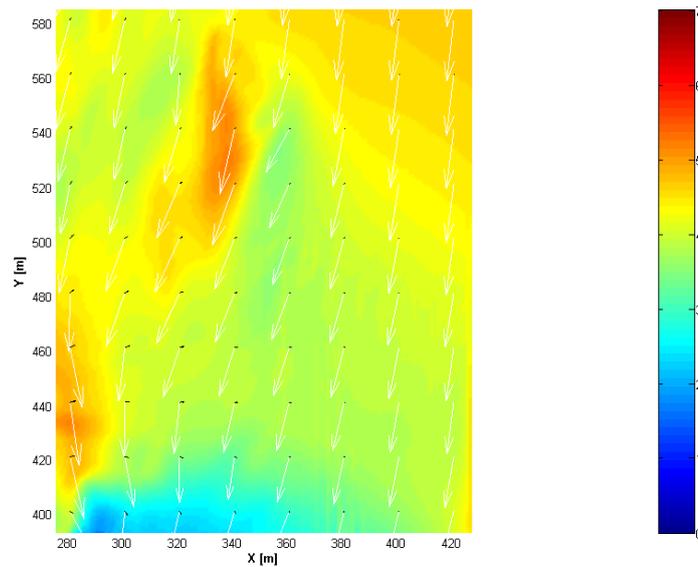


Figura 4.10. . Zona 3, Relación de la dirección de las corrientes (flechas negras) y la propagación del oleaje (flechas blancas).

4.3. ANÁLISIS DESCRIPTIVO POR DIRECCIONES DE PROPAGACIÓN DEL OLAJE.

Del análisis del clima de oleaje realizado para el área de Bocas de Ceniza en el capítulo 2, se identificaron que las direcciones predominantes de propagación del oleaje son NE, NEE y Este, a las cuales se le asignaron los caudales típicos de acuerdo a la variabilidad estacional del río Magdalena correspondientes a: 7000 m³/s, 9000 m³/s, 11000 m³/s. Tomando en cuenta la anterior información se construyeron diferentes escenarios de simulación para evaluar el comportamiento del oleaje sin la influencia de las corrientes y con la influencia de ella Para los cuales se simulo la propagación del oleaje con la influencia de las corrientes y sin ellas; se grafico la diferencia de altura del oleaje entre las dos simulaciones, para observar la influencia de la corriente en los campos de oleaje. Este efecto de la corriente varia, de acuerdo a la dirección de propagación del oleaje, por lo cual se analiza las direcciones propuestas como escenarios posibles en la desembocadura como se describe en el capítulo 3, seleccionando las direcciones donde la probabilidad sea mayor o igual 1% de ocurrencia en el mes, para que pueda ser relevante.

DIRECCIÓN NORTE

La propagación de oleaje en dirección Norte, no es muy frecuente aunque se presenta en todos los meses del año, en porcentajes muy bajos que oscilan entre 0.41% a 1.21% en cada mes. Los meses en los que se presentan porcentajes mayores al 1%, siendo esta la probabilidad de que ocurra el evento con un número mayor a siete horas en el mes, son febrero, septiembre y noviembre, a los cuales les corresponde un caudal típico, como se consigna en la tabla 4.1.:

Tabla 4.1. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección Norte, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

MESES	FEB	SEPT	NOV
%	1.21%	1.06%	1.18%
HORAS	9	8	8.5
Caudal	BAJO	MEDIO	ALTO

Para observar la influencia de la corriente en la propagación del oleaje del Norte, se tomó en cuenta la tabla 4.1., para la cual se graficó, en la figura 4.11. la diferencia de altura de ola, de los escenarios más probables para esta condición de dirección y caudal correspondiente a los meses seleccionados, de acuerdo a los estados de mar definidos en el capítulo 3.

CAUDAL BAJO	CAUDAL MEDIO	CAUDAL ALTO
Hs=1.5 m Tp = 6 s	Hs=1.5 m Tp = 6 s	Hs=1 m Tp = 6 s

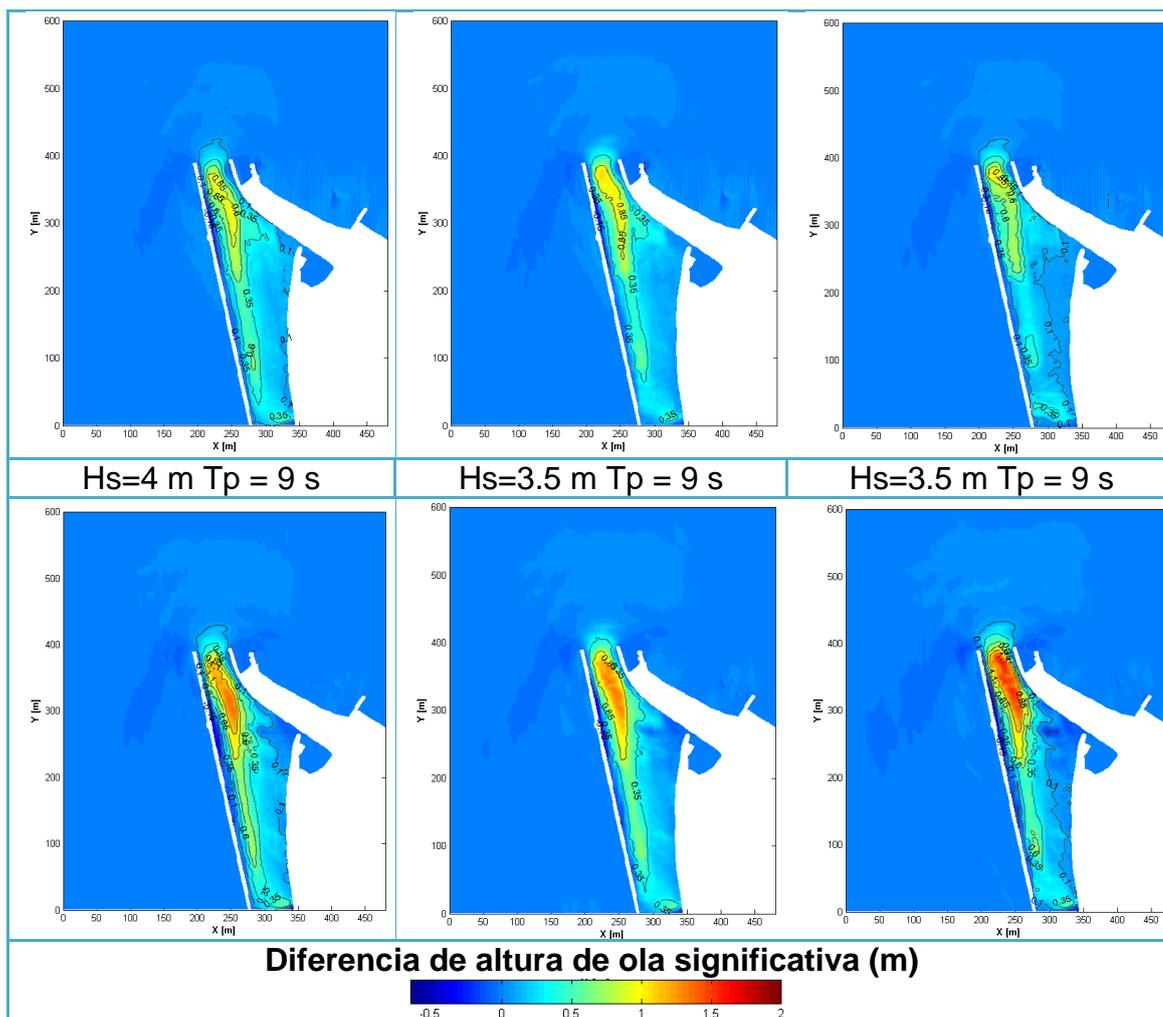


Figura 4.11. Grafica de diferencias de altura de oleaje en dirección N, para diferentes estados de mar y caudales.

Es de interés conocer las diferencias que presenta las dos simulaciones, en valores cuantificables, como se consigna en la tabla 4.2. donde se relaciona la diferencia de altura máxima encontrada para cada estado de mar o el máximo incremento de altura de ola, correspondiente a cada altura de ola propagada en el modelo SWAN con su respectivo caudal.

Tabla 4.2. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección N.

	CAUDAL BAJO	CAUDAL MEDIO	CAUDAL ALTO
Hs = 1 m			1 m
Hs = 1.5 m	1 m	1.11 m	
Hs = 3.5 m		1.36 m	1.6 m

Hs = 4 m	1.38 m		
-----------------	--------	--	--

De las graficas de la figura 4.10, podemos apreciar una zona de mayor concentración de energía y por lo tanto de mayor incremento de altura de oleaje, localizada en la desembocadura del río Magdalena, donde la variación máxima para una propagación de altura de ola significativa de 1 a 1.5 m, son de aproximadamente de 1 m, como se muestra en tabla 4.2., lo cual afecta a los pronósticos realizados en la zona, por el proyecto SPOA, como hemos mencionado anteriormente, porque no tiene en cuenta la corriente del río Magdalena . Este efecto a su vez, se incrementa para mayores alturas de oleaje propagado como se observa en la tabla 4.2. con alturas significativas de 3.5 a 4 m, donde el incremento máximo de altura en promedio sube 1.4 m, aunque es una elevación mayor, el incremento no es predecible por que no es un efecto lineal y depende también de otros factores.

La pluma que genera la corriente y se registra en las graficas de la figura 4.10. varía de acuerdo al caudal, tornándose más amplia en caudales más altos, debido a que el flujo de la corriente al pasar por la desembocadura se dispersa con mayor fuerza, en dirección de la propagación del oleaje en este caso está dirigida hacia el norte. La corriente se ve afectada por el oleaje, ya que esta tiende a fluir donde haya menos oleaje, es decir tiende a la dirección del cañón.

En la Zona 2 descrito en el numeral 4.2. se presenta una franja de disminución en la altura del orden de 0.05 m, debido a la dirección que toma la corriente es la misma que la del oleaje, por lo cual en esta zona la altura del oleaje en la simulación con corrientes no es mayor que sin la presencia de ella, sino menor; al igual que la pluma del oleaje esta también aumenta o disminuye el área según el caudal del río.

Febrero: Es un mes donde empieza la época seca y como se muestra en la curva de nivel del agua en la estación de calamar de la figura 2.4. del capítulo 2, se observa que para este mes, tiende a estabilizar la curva en los niveles más bajos.

El estado de mar en dirección de propagación Norte, no es muy frecuente como se vio anteriormente pero es importante porque la dirección del oleaje y la corrientes van en sentido contrario favoreciendo a el aumento de altura de oleaje, en la entrada de el tajamar, y disipándose aguas arriba, como se muestra en la figura 4.12. claramente la intensidad del oleaje va disminuyendo conforme va entrando en el canal.

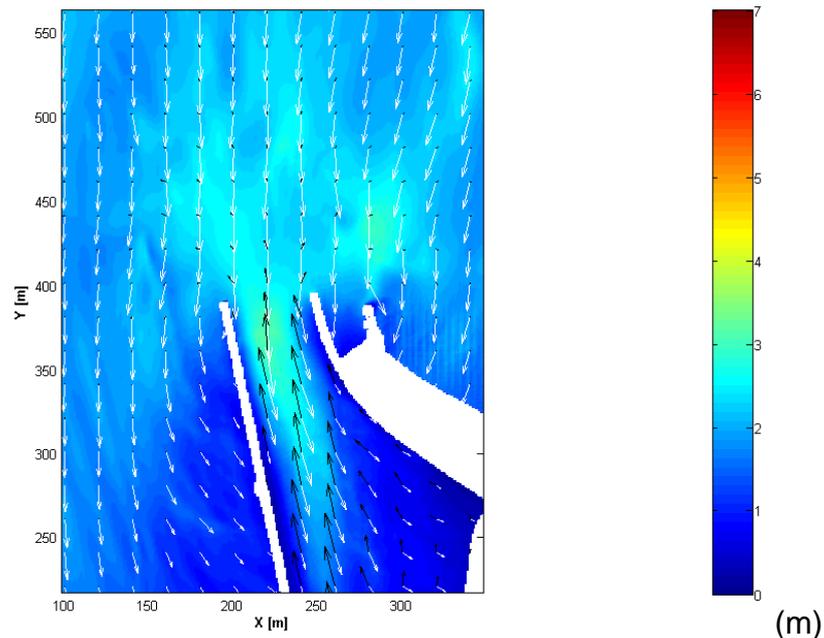


Figura 4.12. Simulación de la propagación un estado de mar en dirección N, con la dirección de la propagación del oleaje (blanco) y la corriente (negro).

Septiembre: Es un mes estable con respecto al nivel del agua en la estación de calamar, con una leve tendencia al final del mes a subir de nivel, de acuerdo a la figura 2.4. del capítulo 2, al igual que en febrero el aumento de caudal, intensifica la zona de altura de oleaje, con una diferencia entre el caudal bajo y medio de 0.1 m.

Noviembre: Es un mes con los pico más altos de nivel, por lo que la altura de ola significativa puede aumentar representativamente en este mes. Además de que este mes es parte de la época donde tiende a presentarse tormentas tropicales y huracanes.

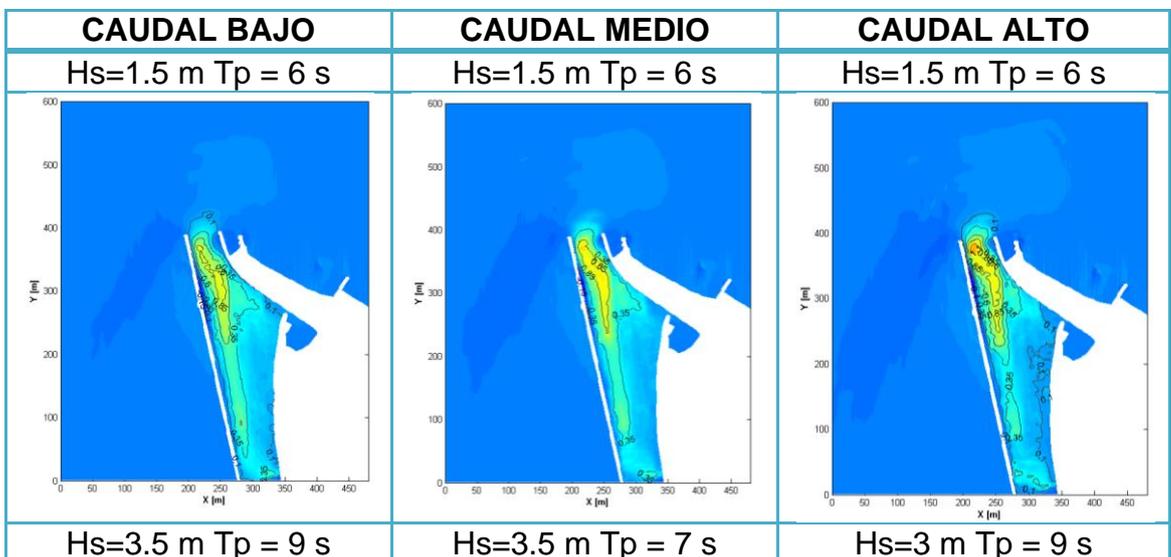
DIRECCIÓN NORTE NORESTE (NNE)

La propagación de oleaje en dirección NNE, no es muy frecuente aunque se presenta en todos los meses del año, en porcentajes muy bajos que oscilan entre 2.97% a 5.25% en cada mes. En todos los meses del año se presenta porcentajes mayores al 1%, siendo esta la probabilidad de que ocurra el evento con un número mayor a siete horas en el mes, a los cuales les corresponde un caudal típico, como se consigna en la tabla 4.3.:

Tabla 4.3. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección NNE, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
%	4.72%	5.25%	4.33%	5.69%	3.96%	3.06%
HORAS	34	38	31	41	31	28.5
Caudal	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO
MESES	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
%	4.16%	2.97%	3.52%	4.33%	5.21%	4.33%
HORAS	30	21	25	31	37.5	31
Caudal	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTO

Para observar la influencia de la corriente en la propagación del oleaje del Norte, se tomo en cuenta la tabla 4.3., para la cual se grafico en la figura 4.13. la diferencia de altura de ola, de los escenarios más probables para esta condición de dirección y caudal correspondiente a los meses seleccionados, de acuerdo a los estados de mar definidos en el capítulo 3.



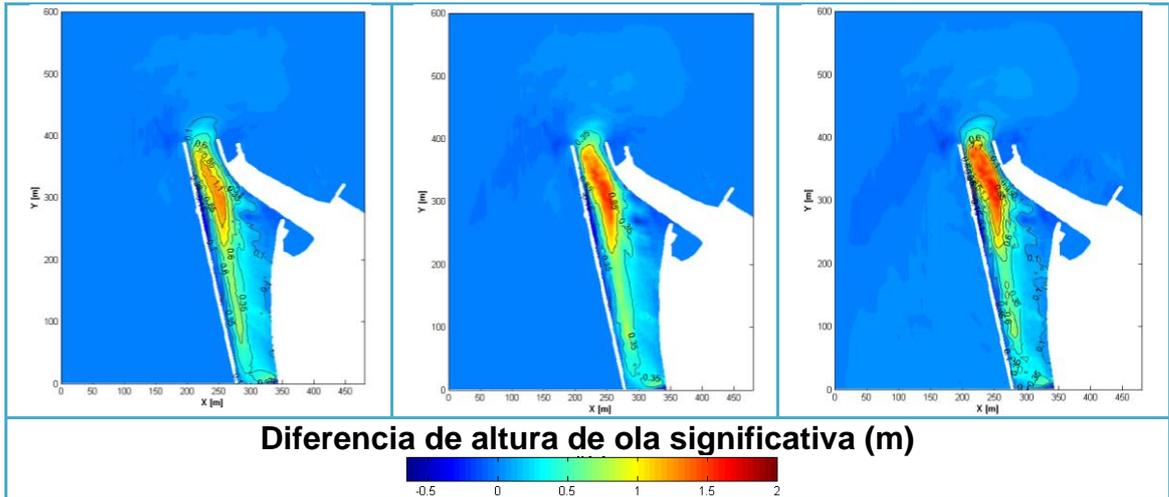


Figura 4.13. Grafica de diferencias de altura de oleaje en dirección NNE, para diferentes estados de mar y caudales.

Es de interés conocer las diferencias que presenta las dos simulaciones, en valores cuantificables, como se consigna en la tabla 4.4. donde se relaciona la diferencia de altura máxima encontrada para cada estado de mar o el máximo incremento de altura de ola, correspondiente a cada altura de ola propagada en el modelo SWAN con su respectivo caudal

Tabla 4.4. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección NNE, según la altura de ola significativa propagada.

	CAUDAL BAJO	CAUDAL MEDIO	CAUDAL ALTO
Hs = 1.5 m	0.93 m	1.1 m	1.3 m
Hs = 3m			1.6 m
Hs = 3.5 m	1.33 m	1.6 m	

De las graficas de la figura 4.13, podemos apreciar una zona de mayor concentración de energía y por lo tanto de mayor incremento de altura de oleaje, localizada en la desembocadura del río Magdalena en el lado oeste, donde la variación máxima para una propagación de altura de ola significativa de 1.5 m, son de aproximadamente de 1.1 m, como se muestra en tabla 4.3., lo cual afecta a los pronósticos realizados en la zona, por el proyecto SPOA, como hemos mencionado anteriormente, porque no tiene en cuenta la corriente del río Magdalena . Este efecto a su vez, se incrementa para mayores alturas de oleaje propagado como se observa en la tabla 4.4. con alturas significativas de 3 a 3.5 m, donde el incremento máximo de altura en promedio sube 1.5 m,

aunque es una elevación mayor, el incremento no es predecible por que no es un efecto lineal y depende también de otros factores.

La pluma que genera la corriente y se registra en las graficas de la figura 4.13. varía de acuerdo al caudal, tornándose más amplia en caudales más altos, debido a que el flujo de la corriente al pasar por la desembocadura se dispersa con mayor fuerza, en dirección de la propagación del oleaje en este caso está dirigida hacia el NNE. La corriente se ve afectada por el oleaje, ya que esta tiende a fluir donde haya menos oleaje, es decir tiende a la dirección del cañón.

En la Zona 2 descrito en el numeral 4.2. se presenta una franja de disminución en la altura del orden de 0.05 m, debido a la dirección que toma la corriente es la misma que la del oleaje, por lo cual en esta zona la altura del oleaje en la simulación con corrientes no es mayor que sin la presencia de ella, sino menor; al igual que la pluma del oleaje esta también aumenta o disminuye el área según el caudal del río.

Enero a Diciembre: En todos los meses se presenta un promedio de horas correspondientes entre un día a dos. La propagación del NNE, en la salida de la desembocadura es la más afectada por la interacción de la corriente y el oleaje, figura 4.14, debido a que en la dispersión del caudal cuando sale de la desembocadura, toma varias direcciones y parte van dirigidas hacia NNE, las cuales se encuentran con el frente de ola propagada en esa misma dirección, pero en sentido contrario. Como se presenta en todos los meses del año, en aproximadamente una misma proporción, debemos tener en cuenta para en la navegación, ya que en la salida de la desembocadura en esta dirección presenta mayores incrementos de la ola, y tomar rutas alternas que nos permitan buscar zonas más calmadas, para entrar al canal.

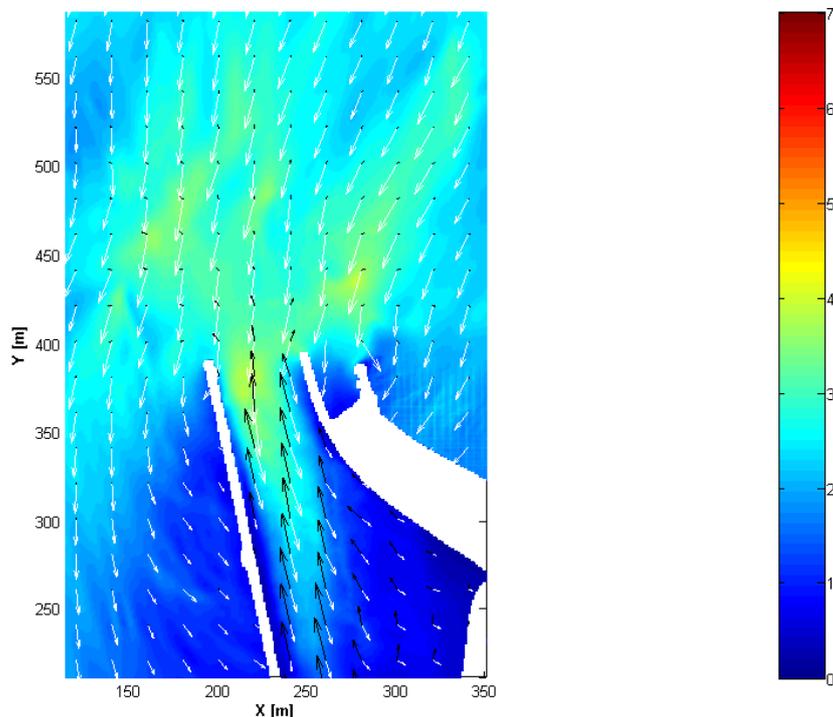


Figura 4.14. Simulación de la propagación un estado de mar en dirección NNE, con la dirección de la propagación del oleaje (blanco) y la corriente (negro).

DIRECCIÓN NORESTE (NE)

La propagación de oleaje en dirección NE, es frecuente en todos los meses del año, en porcentajes altos que oscilan entre 21.96% a 32.93% en cada mes, como se consigna en la tabla 4.5.:

Tabla 4.5. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección NE, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
%	27.40%	31.42%	32.93%	31.26%	26.15%	19.64%
HORAS	197	226	237	225	188	141
Caudal	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO
MESES	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
%	21.75%	24.91%	21.96%	22.60%	24.93%	30.08%
HORAS	195.5	179	158	163	179.5	216.5
Caudal	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTO

Para observar la influencia de la corriente en la propagación del oleaje del Norte, se tomo en cuenta la tabla 4.5., para la cual se grafico en la figura 4.15. la diferencia de altura de ola, de los escenarios más probables para esta condición de dirección y caudal correspondiente a los meses seleccionados, de acuerdo a los estados de mar definidos en el capítulo 3.

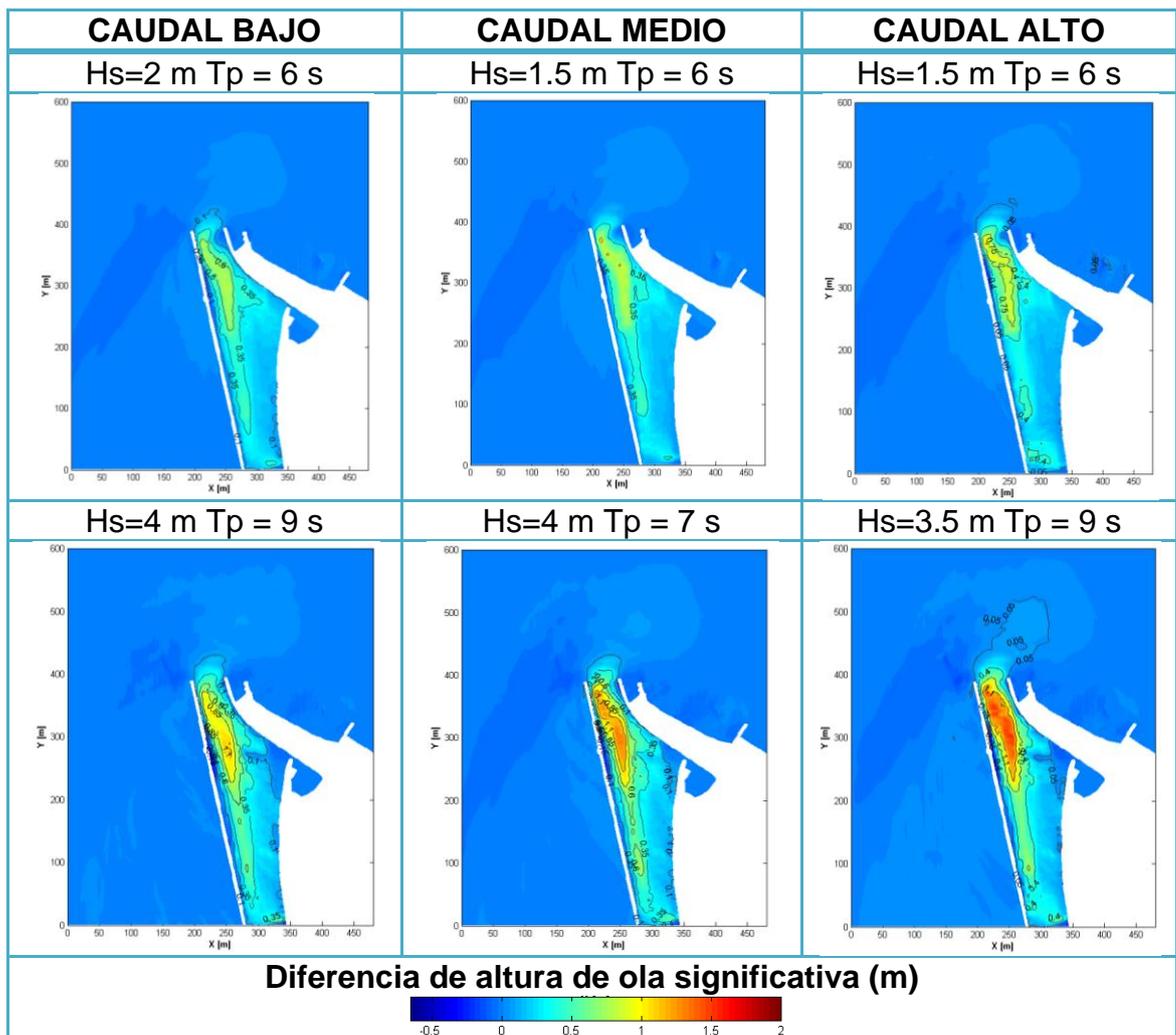


Figura 4.15. Grafica de diferencias de altura de oleaje en dirección NE, para diferentes estados de mar y caudales.

Es de interés conocer las diferencias que presenta las dos simulaciones, en valores cuantificables, como se consigna en la tabla 4.6. donde se relaciona la diferencia de altura máxima encontrada para cada estado de mar o el máximo incremento de altura de ola, correspondiente a cada altura de ola propagada en el modelo SWAN con su respectivo caudal

Tabla 4.6. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección NE.

	CAUDAL BAJO	CAUDAL MEDIO	CAUDAL ALTO
Hs = 1.5 m		0.93 m	1.1 m
Hs = 2 m	0.8 m		
Hs = 3.5 m			1.55 m
Hs = 4 m	1.14 m	1.35 m	

De las graficas de la figura 4.15, podemos apreciar una zona de mayor concentración de energía y por lo tanto de mayor incremento de altura de oleaje, localizada en la desembocadura del río Magdalena en el lado oeste, donde la variación máxima para una propagación de altura de ola significativa de 1.5 a 2 m, son de aproximadamente de 0.85 m, como se muestra en tabla 4.6., lo cual afecta a los pronósticos realizados en la zona, por el proyecto SPOA, como hemos mencionado anteriormente, porque no tiene en cuenta la corriente del río Magdalena . Este efecto a su vez, se incrementa para mayores alturas de oleaje propagado como se observa en la tabla 4.6. con alturas significativas de 3.5 a 4 m, donde el incremento máximo de altura en promedio sube 1.3 m, aunque es una elevación mayor, el incremento no es predecible por que no es un efecto lineal y depende también de otros factores.

La pluma que genera la corriente y se registra en las graficas de la figura 4.15. varía de acuerdo al caudal, tornándose más amplia en caudales más altos, debido a que el flujo de la corriente al pasar por la desembocadura se dispersa con mayor fuerza, en dirección de la propagación del oleaje en este caso está dirigida hacia el NE. La corriente se ve afectada por el oleaje, ya que esta tiende a fluir donde haya menos oleaje, es decir tiende a la dirección del cañón.

En la Zona 2 descrito en el numeral 4.2. se presenta una franja de disminución en la altura del orden de 0.05 m, debido a la dirección que toma la corriente es la misma que la del oleaje, por lo cual en esta zona la altura del oleaje en la simulación con corrientes no es mayor que sin la presencia de ella, sino menor; al igual que la pluma del oleaje esta también aumenta o disminuye el área según el caudal del río.

Enero a Diciembre: Se presenta en todos los meses en alrededor de 6 a 10 días en un mes, en el mes que mayor se presenta es marzo y en el que menos junio. Marzo presenta los caudales más bajos del año, por lo cual la altura de

ola significativa no se ve sometida a grandes cambios. Junio es un mes de caudal medio y con tendencia a subir de nivel, el cual puede presentar incrementos de altura, como los vistos en la tabla 4.6. Los efectos de la influencia de la corriente alcanzan hasta fuera de la de los tajamares, como se alcanza a notar en la figura 4.16. con pequeñas magnitudes en comparación con el oleaje.

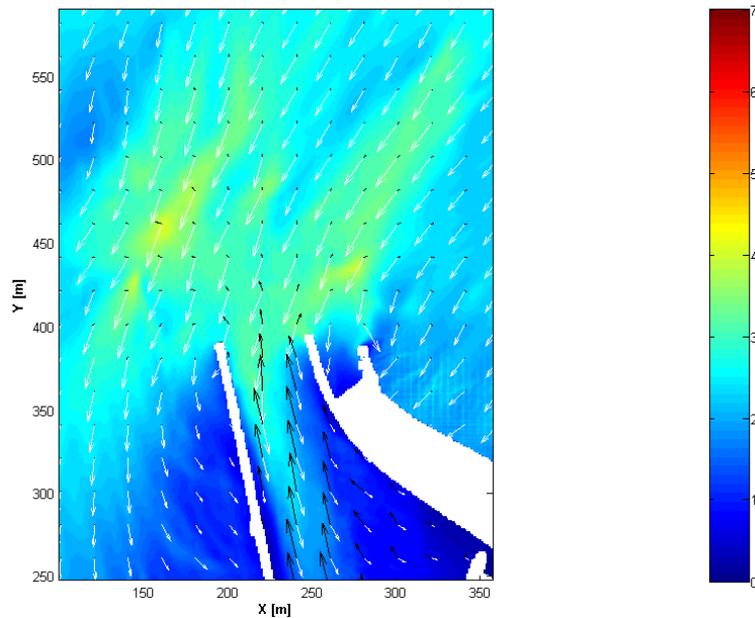


Figura 4.16. Simulación de la propagación un estado de mar en dirección NE, con la dirección de la propagación del oleaje (blanco) y la corriente (negro).

La propagación del NE, al igual que en la dirección NNE, el frente de la ola se encuentra con la corriente que va dirigida en esta dirección, pero esta tiene menores incrementos de altura de ola en el canal de acceso del río Magdalena, que en la dirección anterior. La corriente y el oleaje se ven más afectados en esta dirección, en el área de la salida de la desembocadura, donde se presenta mayor concentración de alturas en el lado oeste y una bajante en el este, como apreciamos en la figura 4.17.:

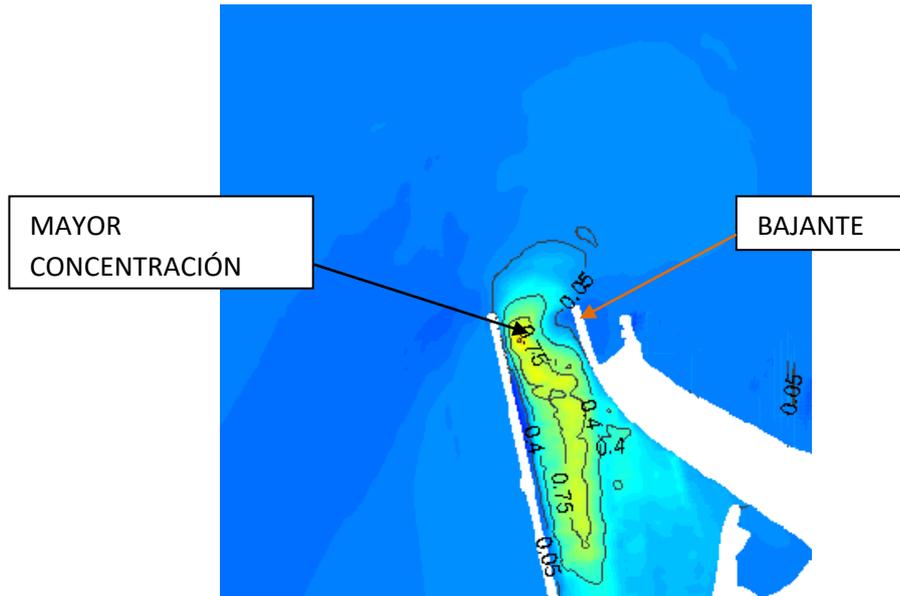


Figura 4.17. Salida de la desembocadura con una propagación de la ola en dirección NE

Este efecto se ve acentuado con respecto al caudal, lo cual nos daría un margen para que las embarcaciones tomaran el este de la salida para no tener inconvenientes con el aumento de la ola.

DIRECCIÓN ESTE NORESTE (NEE)

La propagación de oleaje en dirección NEE, es muy frecuente se presenta en todos los meses del año, en porcentajes altos que oscilan entre 29.77% a 41.60% en cada mes, como se consigna en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección NEE, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
%	41.35%	36.52%	37.13%	38.54%	36.63%	39.56%

HORAS	298	263	268	277.5	264	285
Caudal	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO
MESES	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
%	41.60%	36.91%	33.51%	29.77%	33.51%	41.28%
HORAS	300	266	241	214	241	297
Caudal	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTO

Para observar la influencia de la corriente en la propagación del oleaje del Norte, se tomo en cuenta la tabla 4.7., para la cual se grafico en la figura 4.18. la diferencia de altura de ola, de los escenarios más probables para esta condición de dirección y caudal correspondiente a los meses seleccionados, de acuerdo a los estados de mar definidos en el capítulo 3.

CAUDAL BAJO	CAUDAL MEDIO	CAUDAL ALTO
Hs=2 m Tp = 6 s	Hs=2 m Tp = 6 s	Hs=2 m Tp = 6 s

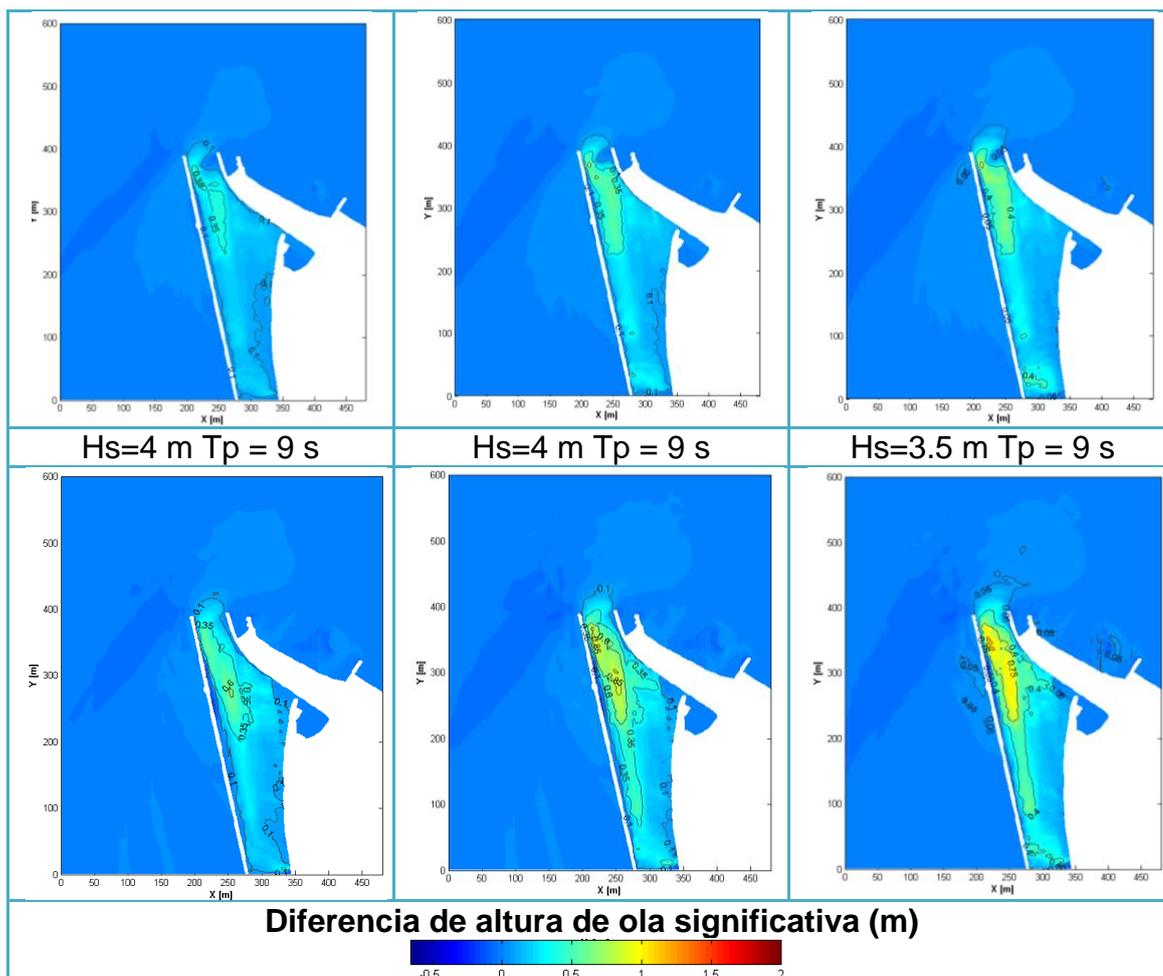


Figura 4.18. Grafica de diferencias de altura de oleaje en dirección NEE, para diferentes estados de mar y caudales.

Es de interés conocer las diferencias que presenta las dos simulaciones, en valores cuantificables, como se consigna en la tabla 4.8. donde se relaciona la diferencia de altura máxima encontrada para cada estado de mar o el máximo incremento de altura de ola, correspondiente a cada altura de ola propagada en el modelo SWAN con su respectivo caudal

Tabla 4.8. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección NEE.

	CAUDAL BAJO	CAUDAL MEDIO	CAUDAL ALTO
Hs = 2 m	0.43 m	0.64 m	0.8 m
Hs = 3.5 m			1.2 m
Hs = 4 m	0.62 m	0.93 m	

De las graficas de la figura 4.18, podemos apreciar una zona de mayor concentración de energía y por lo tanto de mayor incremento de altura de oleaje, localizada en la desembocadura del río Magdalena en el lado oeste, donde la variación máxima para una propagación de altura de ola significativa de 2 m, son de aproximadamente de 0.62 m, como se muestra en tabla 4.8., lo cual afecta a los pronósticos realizados en la zona, por el proyecto SPOA, como hemos mencionado anteriormente, porque no tiene en cuenta la corriente del río Magdalena . Este efecto a su vez, se incrementa para mayores alturas de oleaje propagado como se observa en la tabla 4.8. con alturas significativas de 3.5 a 4 m, donde el incremento máximo de altura en promedio sube 0.9 m, aunque es una elevación mayor, el incremento no es predecible por que no es un efecto lineal y depende también de otros factores.

La pluma que genera la corriente y se registra en las graficas de la figura 4.18. varía de acuerdo al caudal, tornándose más amplia en caudales más altos, debido a que el flujo de la corriente al pasar por la desembocadura se dispersa con mayor fuerza, en dirección de la propagación del oleaje en este caso está dirigida hacia el NEE. La corriente se ve afectada por el oleaje, ya que esta tiende a fluir donde haya menos oleaje, es decir tiende a la dirección del cañón.

En la Zona 2 descrito en el numeral 4.2. se presenta una franja de disminución en la altura del orden de 0.05 m, debido a la dirección que toma la corriente es la misma que la del oleaje, por lo cual en esta zona la altura del oleaje en la simulación con corrientes no es mayor que sin la presencia de ella, sino menor; al igual que la pluma del oleaje esta también aumenta o disminuye el área según el caudal del río.

Enero a Diciembre: Esta dirección se presenta en todos los meses entre 9 y 13 días, con mayor probabilidad en el mes de julio y menos en el mes de octubre. El mes de julio se presenta caudales medios, en los primeros días tiene un mayor nivel y disminuye al finalizar el mes. Es un mes inestable, aunque la dirección no favorece mucho al aumento de altura de oleaje, con incrementos menores a las anteriores direcciones.

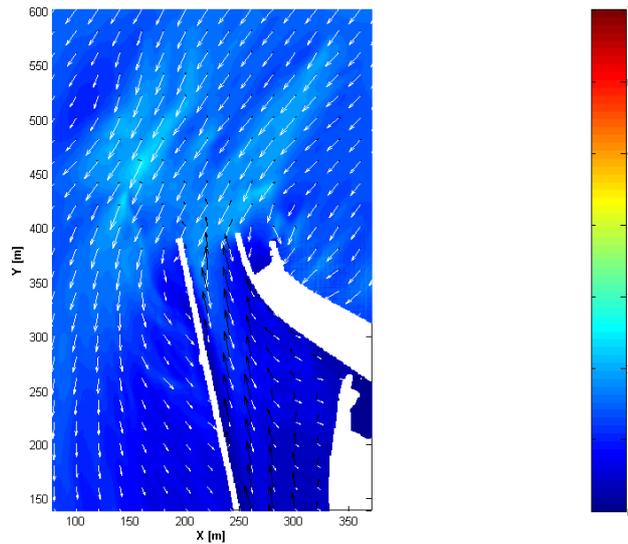


Figura 4.19. Simulación de la propagación un estado de mar en dirección NEE, con la dirección de la propagación del oleaje (blanco) y la corriente (negro).

La propagación NEE, en esta dirección la propagación ya no tiene un encuentro directo con la dirección de la corriente del río como se aprecia en la figura 4.19, y en la zona donde interactúan directamente la velocidad es muy baja. Al igual que en la dirección NE, se presenta una mayor concentración en el oeste de la salida y un bajante al este, pero es más pronunciado que en la dirección NE, y el incremento del altura de ola, no es muy grande, esto nos llevaría a la misma conclusión con respecto a la navegación que en la dirección anterior. Esta dirección es interesante porque es la que más se presenta en todo el año, y tiene un área donde se afecta aproximadamente de 200 m, entrando a la desembocadura del río Magdalena, el cual es más bien homogéneo con respecto al incremento de la ola.

DIRECCIÓN ESTE

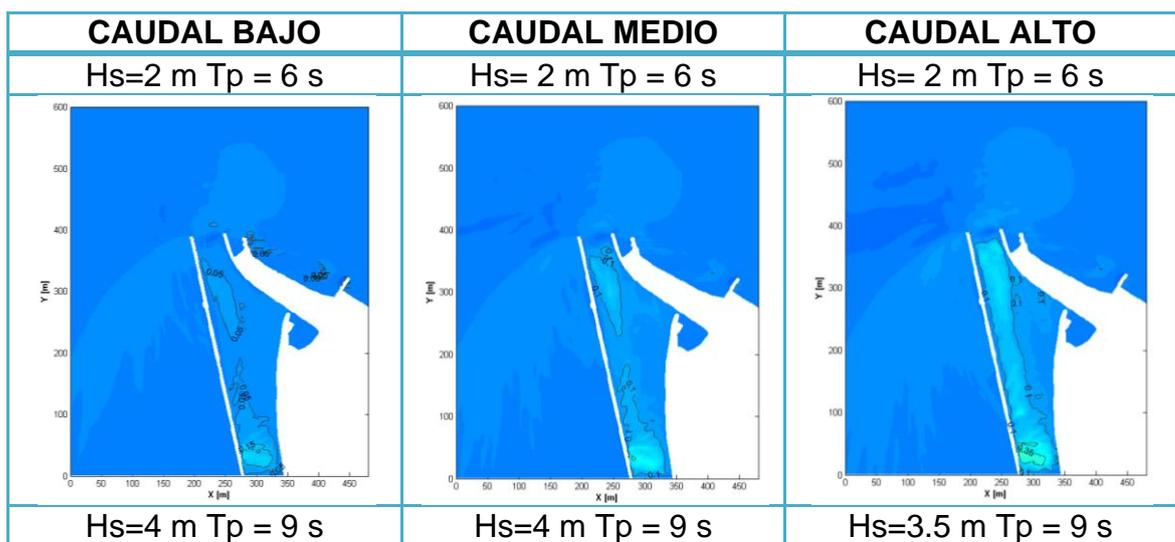
La propagación de oleaje en dirección E, es muy frecuente se presenta en todos los meses del año, en porcentajes altos que oscilan entre 29.77% a 41.60% en cada mes.

Tabla 4.9. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección E, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

%	22.11%	21.02%	20.87%	20.52%	26.32%	32.04%
HORAS	159	151	150	148	189.5	230
Caudal	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO
MESES	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
%	27.02%	27.43%	29.46%	27.06%	24.16%	19.52%
HORAS	194	197.5	212	195	174	140.5
Caudal	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTO

Para observar la influencia de la corriente en la propagación del oleaje del Norte, se tomo en cuenta la tabla 4.9., para la cual se grafico en la figura 4.20. la diferencia de altura de ola, de los escenarios más probables para esta condición de dirección y caudal correspondiente a los meses seleccionados, de acuerdo a los estados de mar definidos en el capítulo 3.



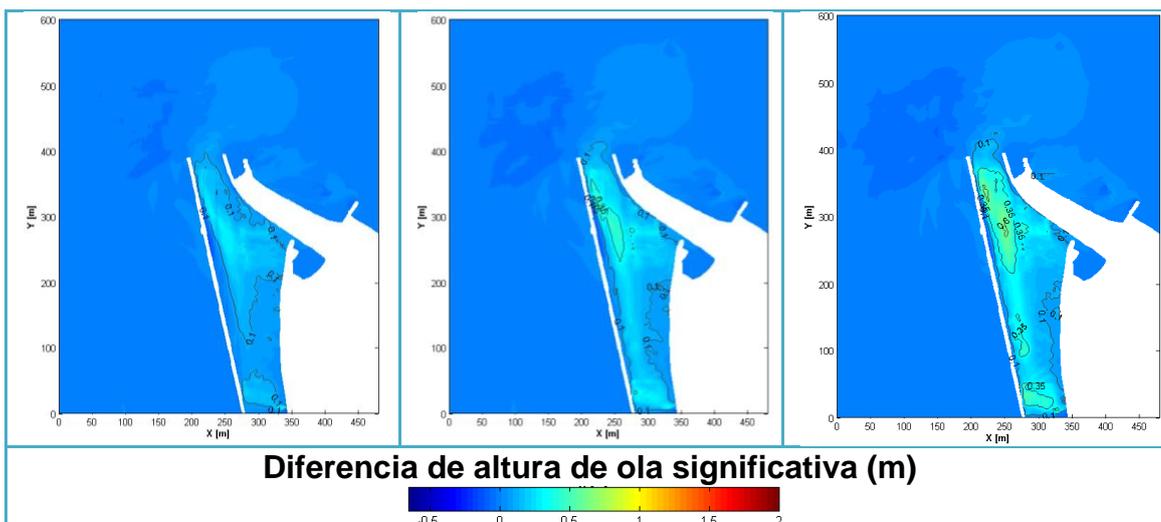


Figura 4.20. Grafica de diferencias de altura de oleaje en dirección E, para diferentes estados de mar y caudales.

Es de interés conocer las diferencias que presenta las dos simulaciones, en valores cuantificables, como se consigna en la tabla 4.10. donde se relaciona la diferencia de altura máxima encontrada para cada estado de mar o el máximo incremento de altura de ola, correspondiente a cada altura de ola propagada en el modelo SWAN con su respectivo caudal

Tabla 4.10. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección E.

	CAUDAL BAJO	CAUDAL MEDIO	CAUDAL ALTO
Hs = 2 m	0.24 m	0.39 m	0.53 m
Hs = 3.5 m			0.65 m
Hs = 4 m	0.32 m	0.46 m	

La propagación E, esta dirección presenta las diferencias de alturas más bajas; presentado en la salida de la desembocadura una bajante de lado a lado, como se observa en la figura 4.21., debido a la dirección del oleaje en ese sector, donde prácticamente quedan la dirección de la corriente y oleaje perpendiculares, y poco puede entrar al canal pasando la mayor parte del oleaje, sobre la desembocadura, este escenario es muy frecuente en todos los meses del año, a pesar de los cambio de caudal, la diferencia de altura de ola, no es muy alta.

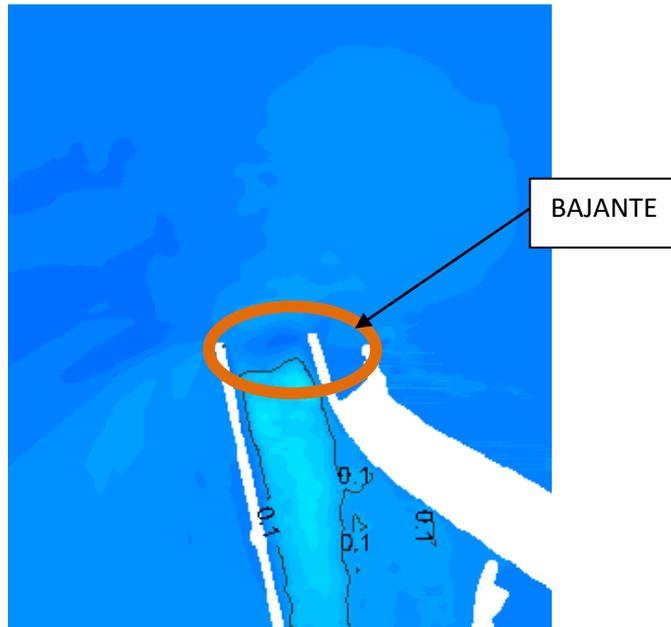


Figura 4.21. Grafica de la desembocadura en un estado de mar en dirección E.

De las graficas de la figura 4.20, podemos apreciar una zona de mayor concentración de energía y por lo tanto de mayor incremento de altura de oleaje, localizada en el canal de la desembocadura del río Magdalena, donde la variación máxima para una propagación de altura de ola significativa de 2 m, son de aproximadamente de 0.39 m, como se muestra en tabla 4.10., lo cual afecta a los pronósticos realizados en la zona, por el proyecto SPOA, como hemos mencionado anteriormente, porque no tiene en cuenta la corriente del río Magdalena . Este efecto a su vez, se incrementa para mayores alturas de oleaje propagado como se observa en la tabla 4.10 con alturas significativas de 3.5 a 4 m, donde el incremento máximo de altura en promedio sube 0.48 m, aunque es una elevación mayor, el incremento no es predecible por que no es un efecto lineal y depende también de otros factores.

La pluma que genera la corriente y se registra en las graficas de la figura 4.20. varía de acuerdo al caudal, tornándose más amplia en caudales más altos, debido a que el flujo de la corriente al pasar por la desembocadura se dispersa con mayor fuerza, y la pluma abre en la dirección de la propagación del oleaje en este caso está dirigida hacia el E. La corriente se ve afectada por el oleaje, ya que esta tiende a fluir donde haya menos oleaje, es decir tiende a la dirección del cañón.

En la Zona 2 descrito en el numeral 4.2. se presenta una franja de disminución en la altura del orden de 0.05 m, debido a la dirección que toma la corriente es la misma que la del oleaje, por lo cual en esta zona la altura del oleaje en la

simulación con corrientes no es mayor que sin la presencia de ella, sino menor; al igual que la pluma del oleaje esta también aumenta o disminuye el área según el caudal del río.

Enero a Diciembre: Se presenta en todos los meses entre 6 a 10 días, es una dirección desfavorable en el incremento de altura de la ola, figura 4.22., debido a que el frente de onda y la dirección de las corrientes en la mayor parte de la zona quedan perpendiculares y por lo tanto no hay efecto de las corrientes sobre el oleaje, en el canal sin embargo entra parte de el oleaje y este interactúa pero es de magnitud muy baja, para ejercer una elevación de altura de ola. Es la dirección de menor incremento en las direcciones del primer cuadrante. Se presenta en forma más frecuente en junio y en menor proporción en diciembre. Junio es un mes inestable donde se incrementa el nivel a través del tiempo, terminando en niveles más altos que con los que comenzó. El mes de diciembre arranca con picos altos de nivel y va descendiendo.

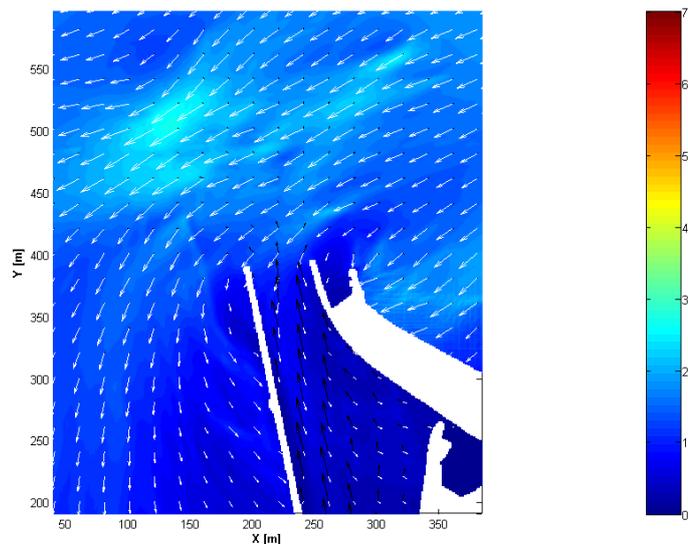


Figura 4.22. Simulación de la propagación un estado de mar en dirección E, con la dirección de la propagación del oleaje (blanco) y la corriente (negro).

DIRECCIÓN OESTE

La propagación de oleaje en dirección W, no es muy frecuente aunque se presenta en todos los meses del año, en porcentajes muy bajos que oscilan entre 0.05% a 1.15% en cada mes. En el mes del año en que se presenta con un porcentaje mayor al 1%, siendo esta la probabilidad de que ocurra el evento con un número mayor a siete horas en el mes, es octubre, al cual le corresponde un caudal típico, como se consigna en la tabla 4.11.:

Tabla 4.11. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar con dirección W, de acuerdo a los meses del año en términos de porcentaje y número de horas, con el respectivo caudal propuesto como típico en la variabilidad mensual.

MES	OCT
%	1.15%
HORAS	8
Caudal	ALTO

Para observar la influencia de la corriente en la propagación del oleaje del W, se tomo en cuenta la tabla 4.11., para la cual se grafico en la figura 4.23. la diferencia de altura de ola, de los escenarios más probables para esta condición de dirección y caudal correspondiente a los meses seleccionados, de acuerdo a los estados de mar definidos en el capítulo 3.

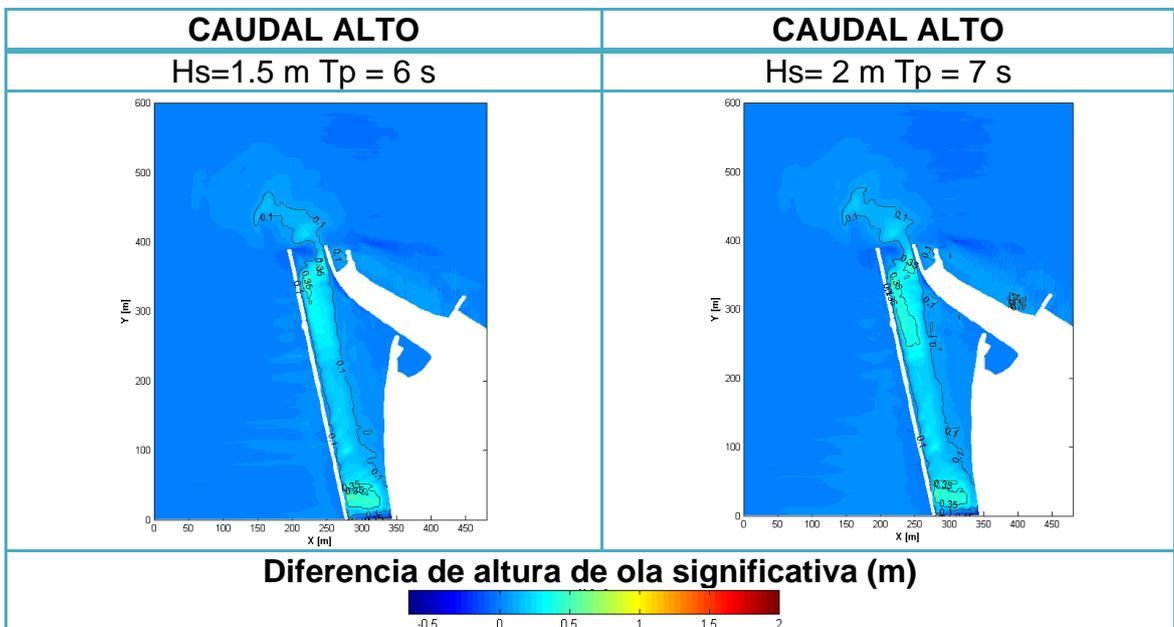


Figura 4.23. Grafica de diferencias de altura de oleaje en dirección W, para diferentes estados de mar y caudales.

Es de interés conocer las diferencias que presenta las dos simulaciones, en valores cuantificables, como se consigna en la tabla 4.12. donde se relaciona la diferencia de altura máxima encontrada para cada estado de mar o el máximo incremento de altura de ola, correspondiente a cada altura de ola propagada en el modelo SWAN con su respectivo caudal

Tabla 4.12. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la dirección W.

	CAUDAL ALTO
Hs = 1.5 m	0.35 m
Hs = 2 m	0.38 m

De las graficas de la figura 4.23, podemos apreciar una zona de mayor concentración de energía y por lo tanto de mayor incremento de altura de oleaje, localizada en la desembocadura del río Magdalena en el lado este, donde la variación máxima para una propagación de altura de ola significativa de 1.5 m, son de aproximadamente de 0.35 m, como se muestra en tabla 4.12., lo cual afecta a los pronósticos realizados en la zona, por el proyecto SPOA, como hemos mencionado anteriormente, porque no tiene en cuenta la corriente del río Magdalena . Este efecto a su vez, se incrementa para mayores alturas de oleaje propagado como se observa en la tabla 4.12. con altura significativa de 2 m, donde el incremento máximo de altura en promedio sube 0.38 m, aunque es una elevación mayor, el incremento no es predecible por que no es un efecto lineal y depende también de otros factores.

La pluma que genera la corriente y se registra en las graficas de la figura 4.23. varía de acuerdo al caudal, tornándose más amplia en caudales más altos, debido a que el flujo de la corriente al pasar por la desembocadura se dispersa con mayor fuerza, en dirección de la propagación del oleaje en este caso está dirigida hacia el W.

En la Zona 3 descrito en el numeral 4.2. se presenta una franja de disminución en la altura del orden de 0.05 m, debido a la dirección que toma la corriente es la misma que la del oleaje, por lo cual en esta zona la altura del oleaje en la simulación con corrientes no es mayor que sin la presencia de ella, sino menor; al igual que la pluma del oleaje esta también aumenta o disminuye el área según el caudal del río. Esta dirección es favorable para el incremento de altura de ola, en la pluma que se genera con la corriente, debido que el ángulo que forma la velocidad de grupo de la ola y la corriente aumenta, con la tendencia de estar en oposición.

Octubre: es un mes donde el nivel va aumenta en el tiempo, esto nos indica no es estable en el tiempo, pero al igual que en la dirección E, la dirección del frente de ola no perpendicular en la mayoría de los casos o muy pequeña en comparación con la corriente, por lo que es insuficiente para hacer crecer la ola en como en otras direcciones, como se observa en la figura 4.24.

La propagación Oeste, tiene un efecto en la pluma más marcado que en las otras direcciones vistas anteriormente, pero al igual que en la dirección E, no

entra mucho el oleaje en el canal de acceso al río Magdalena y por eso es bajo el incremento de la altura de la ola, aunque esta dirección es poco probable se presentaría mayormente en el mes de octubre con caudales altos, en el cual se debería tomar precauciones en la pluma generada porque se podría sentir más el efecto de las corrientes.

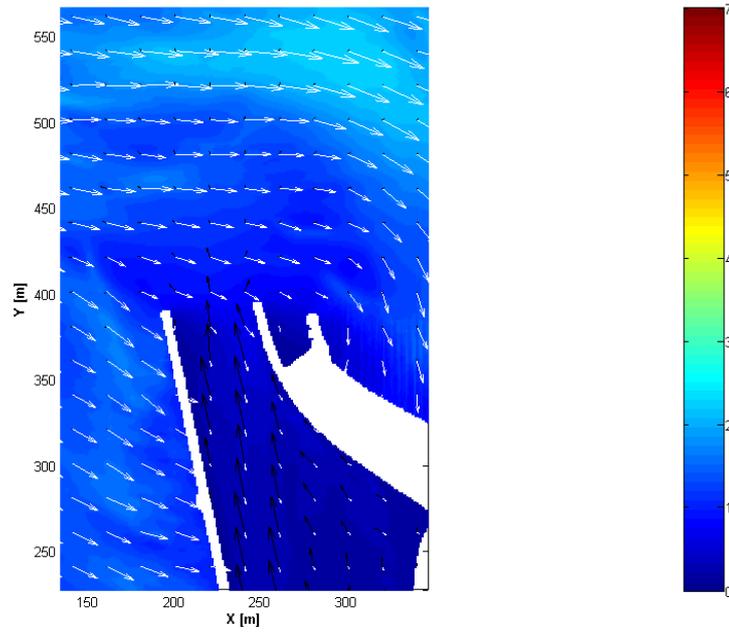


Figura 4.24. Simulación de la propagación un estado de mar en dirección W, con la dirección de la propagación del oleaje (blanco) y la corriente (negro).

EXTREMAL

La temporada de huracanes, comienza en los meses de junio hasta noviembre siendo octubre y noviembre las más recurrentes. Esto nos permite construir el peor escenario en la desembocadura, y observar el efecto de las corrientes, bajo estas circunstancias. Los estados de mar fueron definidos en el capítulo 2, en las consideraciones tomadas para el régimen extremal, figura 4.25.

Caudal Medio	Caudal Alto
Hs= 5.8 m Tp = 9.1 Dir = 0° Periodo de retorno 10 años	

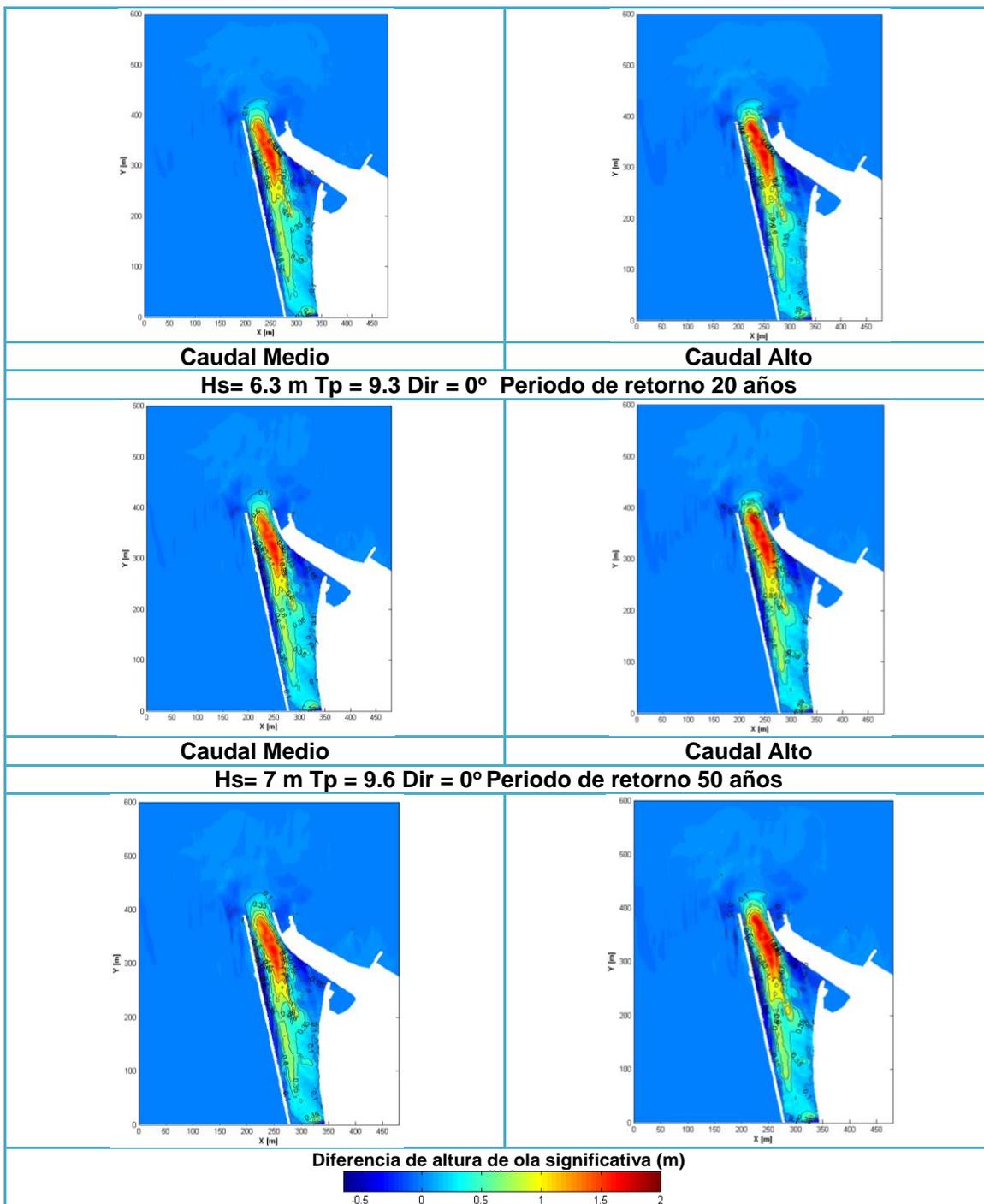


Figura 4.25. Grafica de diferencias de altura de oleaje en dirección N, para diferentes estados de mar y caudales, en condiciones extremas.

Es de interés conocer las diferencias que presenta las dos simulaciones, en valores cuantificables, como se consigna en la tabla 4.13. donde se relaciona la diferencia de altura máxima encontrada para cada estado de mar o el máximo incremento de altura de ola, correspondiente a cada altura de ola propagada en el modelo SWAN con su respectivo caudal

Tabla 4.13. Valores de incremento máximo en la altura de ola significativa en la régimen extremal.

	CAUDAL MEDIO	CAUDAL ALTO
Hs = 5.8 m	1.67	1.83
Hs = 6.3 m	1.66	1.83
Hs = 7 m	1.65	1.84

Octubre – Noviembre: En el rango de estos meses, se considera caudales altos y según la tabla 4.13. el incremento es bastante significativo con una tendencia a estabilizarse, debido que la ola propagada llega al canal de acceso del río Magdalena prácticamente en las mismas condiciones de altura de ola, debido a la disipación que sufre en la propagación de aguas profundas a aguas someras. La pluma generada por la corriente se mantiene en dirección de la propagación del oleaje. La concentración de energía está en la desembocadura.

Junio- Septiembre: Este rango de meses está dentro de los caudales medios, el incremento es significativo e igual que para los meses de octubre a noviembre el incremento de la altura de ola tiende a estabilizarse, por las condiciones de disipación de aguas profundas a aguas someras.

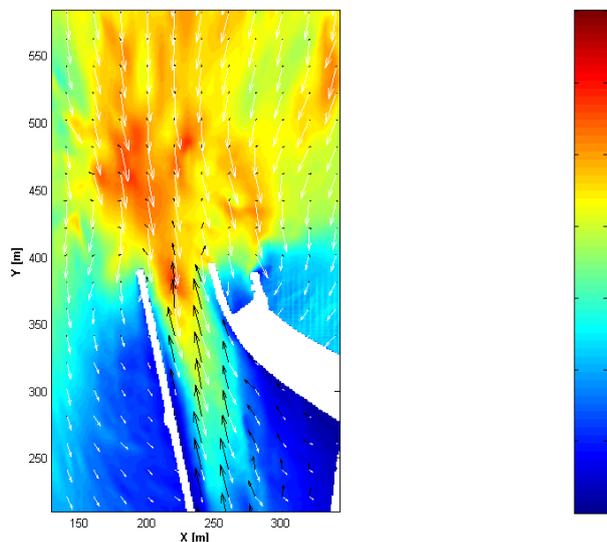
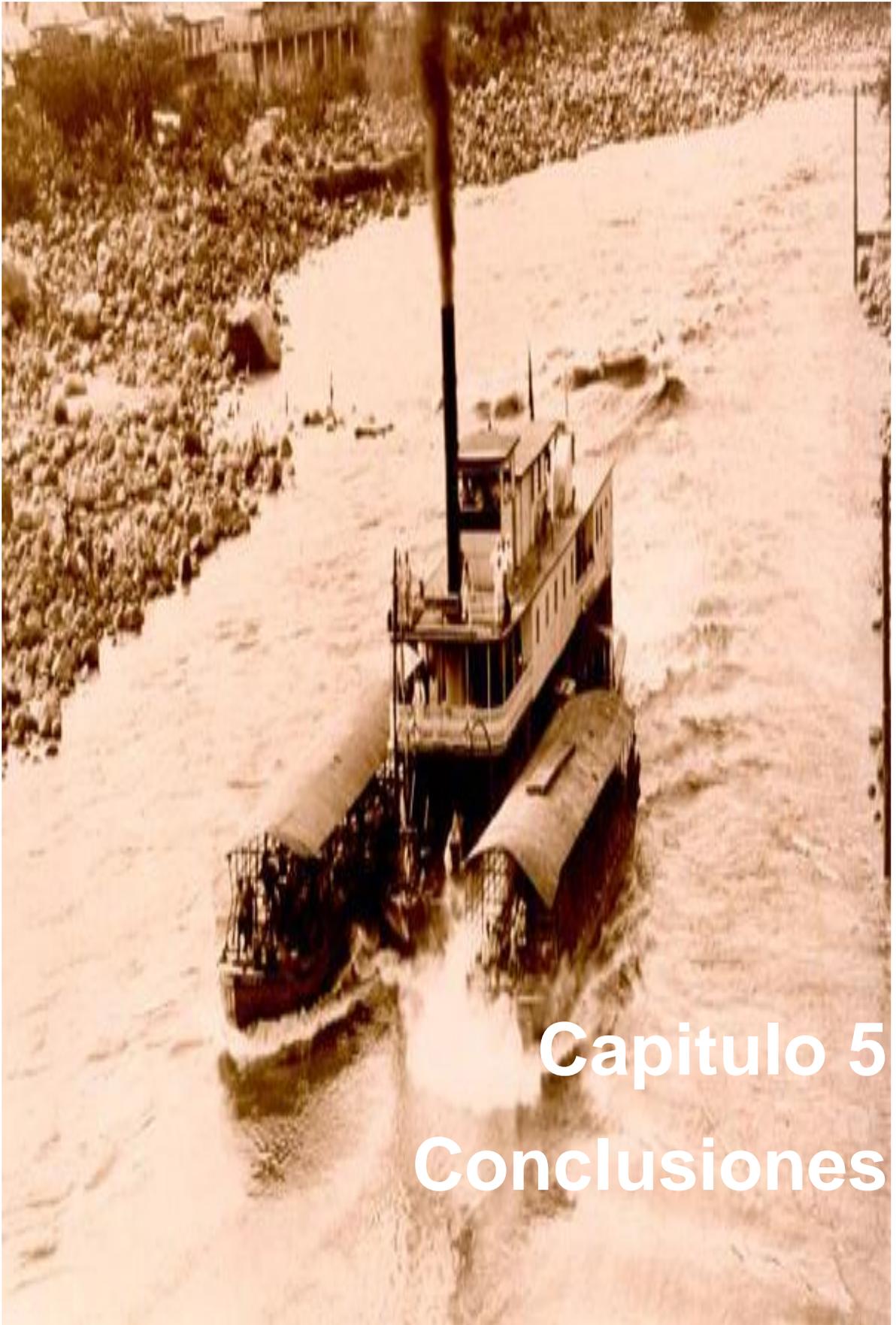


Figura 4.21. Simulación de la propagación un estado de mar Extremal (blanco), con la corriente (negro).



Capitulo 5
Conclusiones

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como fue mencionado en el capítulo 4, la mayor dificultad en el estudio de la influencia de las olas y las corrientes en el oleaje, es que interactúan hidrodinámicamente de forma no lineal, de manera que los flujos resultantes no son una suma lineal de sus comportamientos.

Para lograr una comparación válida de los escenarios propuestos de acuerdo a la climatología del oleaje en el área de Bocas de Ceniza, se utilizó el modelo SWAN que simula correctamente todos los procesos de transformación que afecta al oleaje en la zona de estudio, tales como difracción, asomeramiento, refracción y disipación de energía, y toma en cuenta el efecto de las corrientes en los campos de oleaje.

Teniendo en cuenta que el fenómeno es anisotrópico, se realizó el análisis por direcciones teniendo en cuenta los diferentes caudales y según su variabilidad mensual. De los resultados de las simulaciones numéricas, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los caudales altos inducen una mayor altura de ola en Bocas de Ceniza. La corriente del río que viaja en sentido contrario al oleaje produce un cambio en la longitud de las ondas, aumentando la altura de ola y reduciendo el periodo.
- Las simulaciones con el modelo SWAN indican que las olas procedentes del Norte penetran más en Bocas de Ceniza y por lo tanto representan la condición más desfavorable para las estructuras en esta zona, y la seguridad marítima.
- La concentración de las mayores diferencias de altura de ola, están localizadas en el canal de acceso en un tramo de 200 m aproximadamente desde la entrada en los tajamares, la velocidad de la corriente en este tramo oscila en 1.2 a 1.8 m/s, en tanto que afuera oscila entre 0.1 - 0.2 m/s.
- El modelo SWAN actualmente implementado para el puerto de Barranquilla en el sistema de pronósticos oceanográficos y atmosféricos (SPOA), no abarca el canal del río Magdalena, por lo tanto no toma en cuenta la corriente del río. Si se toma en cuenta la batimetría del río sin considerar las corrientes lo cual puede generar un error en el cálculo de la altura significativa de la ola dentro del canal de acceso, con un error máximo que oscila entre 0.24 m a 1 m en condiciones de bajo caudal,

entre 0.39 m a 1.11 m en caudal medio y 0.53 a 1.3 m en caudal alto, en estados de mar más probables.

- El oleaje proviene del Norte, tiene incrementos de ola más altos en condiciones de caudal bajo y propagación de ola de 1.5 m, que en las otras direcciones de propagación en las mismas condiciones, debido al efecto de la corriente en sentido contrario al oleaje, por lo cual es importante tener en cuenta los meses donde se presenta.
- El oleaje proveniente del NNE, tiene mayores incrementos de altura de ola, en la salida de la desembocadura hacia el tajamar oriental, a diferencia de las otras direcciones de propagación, de este cuadrante. Este efecto se intensifica con el incremento de caudal, por lo que para los meses de octubre a diciembre se puede representar mayores inconvenientes en las embarcaciones que entren en esta dirección al río Magdalena.
- El oleaje proveniente del NE, en esta dirección se acentúa la concentración de energía debido a la corriente en el lado oeste de la salida de la desembocadura, y empieza el área abarcar toda la desembocadura con el incrementando del caudal del río Magdalena.
- El oleaje proveniente del NEE, en la dirección que más se presenta en todo el año, el incremento de altura no es mayor que en la dirección NE, NNE y Norte, y si es mayor que la del Este. Prácticamente se reduce a la mitad el incremento de altura de ola con respecto a la dirección NE.
- El oleaje proveniente del E, en la dirección de menor altura de ola entre todas las direcciones de propagación simuladas. Con el aumento de caudal de bajo a alto, se intensifica el incremento de la altura de oleaje en un rango de 0.15 m, entre caudales. En la entrada de la desembocadura no presenta incremento.
- El oleaje proveniente del W, esta dirección es la de menor probabilidad de ocurrencia, esta presenta la mayor variación en incremento de altura de ola en la pluma que genera la corriente, y se presenta en el mes de octubre donde predomina el caudal alto.
- En escenarios donde se consideran condiciones extremas, el efecto de la corriente y el oleaje, varía con el caudal, pero en condiciones de un mismo caudal, se varía con la propagación de oleaje, la ola que proviene de aguas profundas al disiparse llega prácticamente a la

desembocadura en las mismas condiciones de altura de ola para los periodos de retorno, por lo cual en el canal de acceso la diferencia de altura de ola no se incrementa significativamente.

- Los escenarios extremos son utilizados en los cálculos para obras hidráulicas en el canal del río, el pronóstico varía si se tiene en cuenta la corriente, como lo vimos anteriormente, en condiciones extremas la diferencia de altura puede llegar hasta 1.8 m, que pueden ser decisivos para los cálculos que se deban realizar.
- Es recomendable que en el sistema de pronósticos oceanográficos y atmosféricos (SPOA), incluya el efecto de la corriente del río Magdalena, para mejorar los pronósticos en el área de Bocas de Ceniza, como herramienta útil para los navegantes.
- El modelo SWAN, de acuerdo a sus limitantes se debe complementar con otro modelo, para la simulación de las corrientes, y para la realización de un estudio más profundo entre la interacción de oleaje – corriente, se deben tener en cuenta herramientas numéricas que consideren el efecto en el oleaje en las corrientes, para observar no solo la influencia de la corriente en el oleaje, sino la influencia del oleaje en la corriente.

