

**ESTUDIO y SIMULACIÓN DEL HURACÁN JOAN EN LA COSTA CARIBE
COLOMBIANA EN 1988**

**ERNESTO DIAZ ESTRADA
FERNANDO ENRIQUE LOPEZ MARTINEZ
LUIS FELIPE BACCA ARANGO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
MAESTRIA EN CIENCIAS COMPUTACIONALES
CAMPUS UNITECNOLÓGICA
CARTAGENA DE INDIAS
2005**

**ESTUDIO y SIMULACIÓN DEL HURACÁN JOAN EN LA COSTA CARIBE
COLOMBIANA EN 1988**

**Trabajo de grado, presentado para optar al título de Magíster en Ciencias
Computacionales**

**ERNESTO DIAZ ESTRADA
FERNANDO ENRIQUE LOPEZ MARTINEZ
LUIS FELIPE BACCA ARANGO**

**Director
Dr. JUAN CARLOS ORTIZ ROYERO
Docente investigador tiempo completo
Universidad del Norte**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
MAESTRIA EN CIENCIAS COMPUTACIONALES
CAMPUS UNITECNOLÓGICA
CARTAGENA DE INDIAS**

2005

Nota de aceptación

Firma de presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del jurado

Cartagena, Octubre 10 de 2005

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCION.....	10
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION	16
3. MARCO TEORICO	21
3.1. MODELOS DE SIMULACION DE HURACANES	21
3.2 MODELO HURWIN.....	28
3.2.1 Ecuaciones Físicas del Modelo HURWIN.....	29
3.3 MODELO DE OLAS SWAN	38
4. DESCRIPCION DEL AREA GEOGRAFICA DE SIMULACION	46
4.1 DIAGNÓSTICO DE LAS ZONAS MARINAS Y COSTERAS COLOMBIANAS.....	46
4.2 OLAS Y MAREAS	47
4.3 CLIMA	50
4.3.1. Época Seca O Época De Verano.	51
4.3.2. Época Húmeda O Época De Invierno.	52
4.3.3. Época de Transición.....	52
4.4 VIENTOS	53
4.5 CORRIENTES	55
4.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS TERRITORIOS MARINOS Y COSTEROS.....	55
4.6.1. Ecosistemas Marinos y Costeros de la Costa Caribe Colombiana.....	55
4.6.2 Amenazas Naturales de la Costa Colombiana.....	58
4.6.2.1. Ascenso del nivel del Mar	58
4.6.2.2. Tsunami.	58
4.6.2.3. Ciclones Tropicales.....	59
4.6.2.4 Ondas Tropicales.....	61
4.6.2.5 Marejadas	62
4.6.2.6 Mar de Leva	63
4.6.2.7. La Erosión Costera.	64
4.6.2.8 Los Bienes de Uso Público.....	65
5. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS.....	67
5.1 HURACÁN OPAL.....	68

5.1.1. <i>Proceso de Configuración del Modelo HURWIN</i>	68
5.2. MALLAS COMPUTACIONALES	69
5.2.1. <i>Malla Computacional HURWIN para el huracán OPAL</i>	69
5.2.2. <i>Implementación del modelo HURWIN para el Huracán OPAL</i>	70
5.2.3 <i>Implementación del modelo SWAN para el Huracán OPAL</i>	72
5.2.3.1. <i>Malla Computacional SWAN</i>	72
5.3 DATOS EXPERIMENTALES.....	76
5.4 DATOS OBSERVADOS Y DATOS PREDECIDOS HURACÁN OPAL	82
6. ANALISIS DE RESULTADOS	86
6.1 ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD DEL HURACÁN OPAL.....	86
6.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DATOS OBSERVADOS Y PREDECIDOS DEL HURACÁN OPAL.....	88
6.2.1 <i>Altura de ola significativa</i>	88
6.2.2 <i>Periodo pico de ola</i>	91
6.3 ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES ESTADÍSTICOS.....	93
6.4. ANÁLISIS DEL CAMPO DE VIENTOS DEL MODELO HURWIN PARA EL HURACÁN OPAL	96
6.5. ANÁLISIS DE LAS GRAFICAS DE LOS CAMPOS DE OLAS DEL MODELO SWAN PARA EL HURACÁN OPAL.....	97
6.6. MALLA COMPUTACIONAL JOAN.....	98
6.7. UBICACIÓN DE LAS BOYAS VIRTUALES PARA JOAN	99
6.8. ANALISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL HURACÁN JOAN.....	101
6.8.1. <i>Análisis del campo de olas del huracán JOAN</i>	101
CONCLUSIONES.....	111
RECOMENDACIONES.....	114
REFERENCIAS	115

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EFECTOS SINÓPTICOS DEL HURACÁN JOAN SOBRE EL NORTE DE COLOMBIA EN EL CARIBE.....	11
FIGURA 2. FUERTES LLUVIAS Y VIENTOS EN PANAMÁ.....	12
FIGURA 3. SISTEMA DE MALLAS ANIDADAS.....	37
FIGURA 4. ZONAS COSTERAS COLOMBIANA.....	46
FIGURA 5. TRAYECTORIA DEL HURACÁN OPAL 1995.....	68
FIGURA 6. TRAYECTORIA DEL HURACÁN JOAN 1988.....	69
FIGURA 7. MALLA COMPUTACIONAL HURWIN.....	70
FIGURA 8. FLUJO GRAMA DE LA ESTRUCTURA DEL SIMULADOR.....	71
FIGURA 9. MALLA COMPUTACIONAL SWAN.....	72
FIGURA 10. MEDICIONES MALLA BATIMETRICA.....	74
FIGURA 11. BOYA 42001 DE LA NOAA.....	78
FIGURA 12. BOYA 42001 DE LA NOAA – UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	79
FIGURA 13. BOYA 42003 DE LA NOAA.....	80
FIGURA 14. BOYA 42003 DE LA NOAA – UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	80
FIGURA 15. ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD BOYA 42001.....	87
FIGURA 16. ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD BOYA 42003.....	88
FIGURA 17. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA – BOYA 42001.....	90
FIGURA 18. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA – BOYA 42003.....	90
FIGURA 19. PERIODO PICO – BOYA 42001.....	92
FIGURA 20. PERIODO PICO – BOYA 42003.....	93
FIGURA 21. CAMPOS DE VIENTOS DEL MODELO HURWIN PARA OPAL.....	96
FIGURA 22. GRAFICAS DE LOS CAMPOS DE OLAS DEL MODELO SWAN PARA OPAL.....	98
FIGURA 23. MALLA COMPUTACIONAL PARA JOAN.....	99
FIGURA 24. UBICACIÓN DE LAS BOYAS VIRTUALES JOAN.....	100
FIGURA 25. GRAFICAS DE LOS CAMPOS DE OLAS DEL MODELO SWAN PARA EL HURACÁN JOAN.....	102

FIGURA 26. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA BOYA GUA1 (GUAJIRA).....	103
FIGURA 27. PERIODO PICO BOYA GUA1 (GUAJIRA).....	104
FIGURA 28. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA BOYA GUA2 (GUAJIRA).....	104
FIGURA 29. PERIODO PICO DE OLA- BOYA GUA2 (GUAJIRA).....	105
FIGURA 30. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA- BOYA STM1 (SANTA MARTA).....	105
FIGURA 31. PERIODO PICO DE OLA- BOYA STM1 (SANTA MARTA).....	106
FIGURA 32. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA- BOYA BAQ1 (BARRANQUILLA).....	106
FIGURA 33. PERIODO PICO DE OLA- BOYA BAQ1 (BARRANQUILLA).....	107
FIGURA 34. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA- BOYA CTG1 (CARTAGENA).....	107
FIGURA 35. PERIODO PICO DE OLA- BOYA CTG1 (CARTAGENA).....	108
FIGURA 36. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA- BOYA GMOR1 (GOLFO DE MORROSQUILLO)	108
FIGURA 37. PERIODO PICO DE OLA- BOYA GMOR1 (GOLFO DE MORROSQUILLO).....	109
FIGURA 38. ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA- BOYA GUR1 (GOLFO DE URABA).....	109
FIGURA 39. PERIODO PICO DE OLA- BOYA GUR1 (GOLFO DE URABA).....	110

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. IMPORTANCIA DE LOS PROCESOS FÍSICOS EN LA SIMULACIÓN.....	39
TABLA 2. ESCALA BEAUFORT.....	48
TABLA 3. PARÁMETROS MULTIANUALES	53
TABLA 4 DESCRIPCIÓN DE LA MALLA COMPUTACIONAL	73
TABLA 5. DESCRIPCIÓN DE LA BOYA OCEANOGRÁFICA DE NOAA 42001	79
TABLA 6. DESCRIPCIÓN DE LA BOYA OCEANOGRÁFICA DE NOAA 42003	81
TABLA 7. DATOS OBSERVADOS Y PREDECIDOS BOYA 42001	82
TABLA 8. DATOS OBSERVADOS Y PREDECIDOS BOYA 42003.....	84

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS HURWIN Y SWAN – OPAL

ANEXO B. PREPARACIÓN Y EJECUCIÓN DE LOS MODELOS HURWIN Y SWAN – JOAN

ANEXO C. CONTENIDO DEL CD

INTRODUCCION

El estudio de los huracanes, es un área que cada día tiene más importancia para las distintas organizaciones que controlan y predicen estos fenómenos naturales en todo el mundo. El desorden climático, motivado por el recalentamiento del planeta favorece sus frecuentes apariciones y formaciones en distintas latitudes. Las zonas costeras, se ven afectadas, en especial, aquellas cuyas aguas del océano son relativamente cálidas (temperatura alrededor de 28° C), los huracanes en estas áreas geográficas se caracterizan por la intensidad de sus vientos, causales de daños potenciales que van desde inundaciones, debilitación de estructuras de ingeniería costeras, destrucción de viviendas y perdidas de vidas humanas.

En el Atlántico, Caribe y en el golfo de México, la temporada de huracanes comienza el 1 de junio y se extiende hasta el 30 de noviembre. Los huracanes que afectan la costa caribe colombiana se forman en la costa este africana y se desplazan hacia el oeste-noroeste pasando por las Antillas menores y mayores. Dependiendo de la potencia del huracán y las condiciones climáticas, puede llegar hasta los estados costeros del Atlántico y el Golfo de México de EE.UU. El desplazamiento hacia el oeste (debido a la rotación de la tierra) disminuye las

probabilidades de que los huracanes del Pacífico arriben a las costas centroamericanas y menos a Panamá. Es más probable que su desplazamiento cause efectos en Japón y Filipinas.

La posición del huracán y el grado de desarrollo que tenga en su recorrido, definen la influencia o efectos en el estado del tiempo, así las condiciones meteorológicas y marítimas se deterioran. Los vientos y las fuertes bandas de lluvia producen abundantes precipitaciones en la vertiente del Caribe debido a la interacción con la orografía; sin embargo, en la vertiente del Pacífico se observa, por el contrario, cielo despejado, debido al efecto de subsidencia, Fig. 1. Ejemplo de este comportamiento, se reflejó con el huracán JOAN durante su paso por el Caribe.



Figura 1. Efectos sinópticos del huracán JOAN sobre el norte de Colombia en el Caribe

EFFECTOS DE LAS TORMENTAS

Los huracanes constituyen uno de los fenómenos naturales más destructivos. Entre los factores meteorológicos dañinos más importantes que producen tenemos:

La fuerza de los vientos del huracán proyecta o derriba objetos, imprime movimiento a las aguas de los océanos, así como ejerce fuertes presiones sobre superficies y es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad del viento

La marea de tormenta es una elevación temporal del nivel del mar cerca de la costa, que se forma por el paso del área central del huracán, la cual es debida a los fuertes vientos que soplan hacia la tierra y a la diferencia de presión atmosférica entre el ojo del huracán y los alrededores. Esta marea puede alcanzar una altura de 6 metros para huracanes fuertes.

Las precipitaciones intensas que acompañan a un ciclón tropical pueden causar deslaves y provocar inundaciones, Fig. 2



Figura 2. Fuertes lluvias y vientos en Panamá

La destrucción causada por los huracanes en el Caribe y Centro América es una fuerza que ha modificado la historia y que lo seguirá haciendo en el futuro de la región. El peligro nace de una combinación de factores que caracterizan a las tormentas ciclónicas tropicales: elevación del nivel del mar, vientos violentos, y fuerte precipitación. En la cuenca mayor del Caribe de 1960 a 1988 (excluyendo a los Estados Unidos y sus territorios) los huracanes causaron más de 20.000 muertes, afectaron a 6 millones de personas y destruyeron propiedades por un valor más de US\$9.500 millones (OFDA, 1989). La mayor parte de estos daños fueron causados en los países isla del Caribe, cuyas modestas economías eran las menos capaces de resistir tales impactos.

Los datos sobre daños de huracanes han sido recogidos desde que se descubrió América, y las más recientes estadísticas muestran que las medidas de mitigación ciertamente han significado una diferencia desde la década de los años 1930. Mientras que la ferocidad de las tormentas no ha disminuido con el correr de los años y las poblaciones han aumentado sustantivamente en el área, las tasas de víctimas han disminuido como resultado de la incorporación de medidas de mitigación y de la mayor efectividad de las actividades de preparativos. Esta disminución en el número de muertes se ha visto contrarrestada por un marcado aumento en los daños a las propiedades. Esta es una clara indicación que las medidas de daños estructurales no progresan mano a mano con el rápido aumento de desarrollo en áreas vulnerables.

Los estudios de huracanes, en Colombia se hacen cada vez más necesarios debido a la gran cantidad de actividades marinas desarrolladas en las zonas costeras que pueden sufrir grandes pérdidas, en caso de que se presente un evento de tales características. El análisis de estos fenómenos requiere de un gran compromiso por parte de los investigadores ya que las áreas del conocimiento involucradas, tales como, la física computacional, análisis estadístico, cálculo numérico computacional, dan como resultado un trabajo serio de verificación y validación de resultados, mediante la utilización de modelos matemáticos ya desarrollados que permiten simular las variables físicas involucradas. La implementación de dos modelos numéricos de dominio público que son adaptables a las condiciones computacionales de la región: HURWIN (*HURricane WIND model*) y SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), serán utilizados en esta investigación.

Dado que el Caribe colombiano no está exento de ser impactado por fenómenos de este tipo como la historia lo indica (Bret 1993, JOAN 1988), se estudiarán las respuestas de estos dos modelos para brindar una fuente de información válida para la creación de técnicas de pronóstico de huracanes y de oleaje en la costa Caribe colombiana.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar y simular las características físicas del paso del huracán JOAN sobre la costa del Caribe Colombiano durante 1988.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Implementar y verificar los modelos de simulación HURWIN y SWAN que simulen el comportamiento del huracán JOAN en la costa caribe colombiana.
2. Comprobar los resultados de la simulación con datos reales para comprobar el grado de precisión de los resultados obtenidos.
3. Diagnosticar el impacto del comportamiento del huracán en su radio de influencia sobre la Costa Caribe Colombiana.

2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

En Colombia como en la mayoría de los países del mundo, existen diversas instituciones, en el ámbito nacional, departamental y municipal, responsables de aportar información necesaria, para el establecimiento de políticas de prevención y atención de desastres, aunque la operatividad y eficiencia de los mismos solo se ve en situaciones extremas de emergencias. En Colombia la baja asignación de recursos de investigación ha dejado un gran vacío en estos temas, aunque se ha avanzado notablemente en esta última década, aún se está muy lejos de alcanzar un sistema y una información básica para el establecimiento de políticas y programas en este ámbito.

Algunas de las acciones más concretas en las que el país ha trabajado, se podrían establecer a partir de la Ley 338 de 1997, en la que se reglamenta, el estudio de amenazas y riesgos para la realización de los esquemas y planes de ordenamiento territorial POT de los diferentes municipios; pese a ello, los resultados obtenidos en la gran mayoría, no reúnen la calidad técnica ni científica, para constituirse en verdaderas herramientas para la elaboración de políticas, incluso se observa en la mayoría de los POT de los municipios costeros, que el tema de amenazas y riesgos, no tuvo un tratamiento especial o diferente al del resto de los municipios del país, sin tenerse en cuenta que por poseer una franja

costera y por ende mayor complejidad por su interacción tierra - mar – atmósfera, exige una visión mucho mas integral de la problemática a la que se verían enfrentadas en general las zonas costeras del país.

Son muchas las amenazas y riesgos a las que se ven sometidas las zonas costeras de Colombia, sin embargo antes de continuar es necesario definir a que se refieren cada uno de estos riesgos en particular: Amenaza, se entiende como el fenómeno o acontecimiento peligroso o arriesgado, natural o antrópico, que puede causar daño físico, perdidas económicas o poner en peligro la vida humana y el bienestar social y económico de una región. Las amenazas creadas por el hombre, pueden derivar de procesos tecnológicos, actividades humanas con el medio ambiente o relaciones dentro o entre las comunidades; Riesgo se entiende como el número total de perdidas de vidas humanas, bienes económicos y sociales esperados, tras la ocurrencia de un fenómeno dañino de cierta magnitud; Desastre se entiende como el daño o alteración grave de las condiciones normales de vida en un área geográfica determinada, causada por fenómenos naturales y por efectos catastróficos por acción del hombre en forma accidental que requiere por ello de la atención de los organismos del estado y de otras entidades de carácter humanitario o de servicio social.

Entre los principales fenómenos de la naturaleza que crean situaciones de riesgo para la población costera se encuentran:

- maremotos y Huracanes.
- terremotos, erupciones volcánicas y deslizamientos.
- fenómenos como inundaciones y sequías.

Actualmente en el país, específicamente en la Universidad del Norte de Barranquilla se están realizando algunos esfuerzos encaminados a tratar de entender el comportamiento de este tipo de fenómenos con la simulación de algunos modelos computacionales de huracanes que permitirían predecir la forma como se verían afectadas por el oleaje las instalaciones portuarias y las comunidades en las regiones costeras del caribe colombiano.

El estudio y simulación del huracán JOAN, tiene su origen en estudios realizados por la Universidad del Norte de Barranquilla, coordinados por el Dr. Juan Carlos Ortiz, a través del grupo de investigación en física aplicada y cuyo fin es simular numéricamente la dinámica de dicho huracán, dentro de la plataforma continental Colombiana.

Los resultados obtenidos a través de los modelos utilizados en este proyecto, permitirán obtener un estimado de las variables físicas que caracterizan el paso de un evento de esta naturaleza. El campo de vientos, la altura de ola generada, el período pico, el espectro de energía de las olas en función de la frecuencia y

dirección serán algunos de los parámetros físicos que se obtendrán. El estudio de los huracanes y del oleaje generado es tema de investigación de prioridad en universidades europeas y americanas. La Universidad de Costa Rica, ha realizado trabajos de investigación de interacción océano-atmósfera, usando la simulación del oleaje con modelos numéricos y su comparación con datos de radares de apertura sintética para el caso del oleaje generado por huracanes en el mar Caribe [Torres et al, 2000].

Los investigadores responsables de este proyecto son los doctores Francisco Javier Ocampo Torres, del Departamento de Oceanografía Física (DOF), del CICESE y Omar Lizano Rodríguez, del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI). En México a través de la división de oceanología del CICESE, se desarrollan trabajos en esta área, la división concentra el grupo de investigación en las ciencias del mar, este es una de las divisiones más consolidada de México y representa la única división de Oceanología en los Centros Públicos de Investigación. El CICESE es una de las instituciones oceanográficas de más reconocimiento en Latinoamérica, la investigación que desarrolla incide en la mayoría de los mares de México, la región costera del noroeste de Baja California, el Sistema de la Corriente de California, el Golfo de California y sus islas, el Pacífico Tropical mexicano, el Golfo de Tehuantepec, la región del Caribe mexicano y el Golfo de México. Mientras que la participación del personal adscrito a la división y sus estudiantes genera actividades de colaboración con un gran número de instituciones nacionales y extranjeras, existe cooperación en la

investigación científica que se desarrolla, con académicos e instituciones de la mayoría de los países de Latinoamérica (Incluyendo Colombia con la Universidad del Norte), un gran número de países de Europa, y de Estados Unidos, Canadá, y Japón, entre otros [CICESE, 2003].

En Colombia se cuentan con algunos estudios sobre prevención y manejo de desastres naturales, realizados por la Universidad Nacional, pero poco se ha investigado sobre el fenómeno de huracanes y las consecuencias que ellos tendrían en nuestro territorio.

El desarrollo de modelos de simulación para el estudio de huracanes, toma importancia con los continuos daños y pérdidas que ocasiona, en su paso por las costas del caribe, y en especial por los Estados Unidos, con estos modelos se han realizado: observaciones de superficie, observaciones de radio vientos máximo, pronósticos numéricos generados por distintos modelos, análisis de mejor trayectoria y pronósticos oficiales de trayectoria emitidos por el Centro Nacional de Huracanes (*National Hurricane Center, o NHC*) del Servicio Meteorológico Nacional de EE.UU. (*United States National Weather Service*).

El presente proyecto de simulación tiene un efecto importante dentro del estudio del impacto en la infraestructura costera en la costa Norte Colombiana ya que establecería una visión del comportamiento dinámico de este fenómeno natural que pasó muy cerca de la costa Atlántica durante en el mes de octubre de 1988.

3. MARCO TEORICO

3.1. MODELOS DE SIMULACION DE HURACANES

Una simulación es el proceso mediante el cual se reproduce un sistema a partir de un modelo. Un modelo es una abstracción de la realidad que captura la esencia funcional del sistema real, con el detalle suficiente como para que pueda representarlo en una aplicación concreta. En el caso que nos ocupa, la finalidad de la simulación de un huracán es aumentar la comprensión sobre los procesos físicos que gobiernan su comportamiento.

Si el conocimiento que requerimos del sistema es cualitativo podríamos recurrir a los denominados modelos físicos, basados en la representación del sistema a escala a través de una maqueta que se introduce en túneles de viento, tanques u otro tipo de dispositivos en condiciones de similitud. Si el conocimiento que necesitamos del sistema es cuantitativo podremos recurrir a un modelo matemático. Estos modelos están basados en la representación del comportamiento del sistema a través de la solución del conjunto de ecuaciones que lo gobiernan. Los modelos matemáticos de tipo analítico permiten obtener soluciones exactas, lo que en la práctica implica, bien que el sistema a modelar es

extremadamente simple, o bien que las ecuaciones planteadas sólo lo representan de forma simplificada. Un modelo numérico se basa en la utilización de técnicas numéricas para la resolución computacional aproximada, del conjunto completo de ecuaciones que describen el sistema. En casi todas las situaciones reales que se plantean a la hora de simular los huracanes, deberemos optar por la segunda opción, es decir, por un modelo matemático numérico que posibilite la resolución de las ecuaciones simultáneas, no lineales en derivadas parciales que describen la atmósfera.

Los modelos numéricos de predicción de huracanes simulan dos aspectos fundamentales, la dinámica del medio y los distintos procesos físicos que tienen lugar en su seno. La dinámica de un modelo concreto queda recogida a través de las ecuaciones de movimiento, mientras que la física de éste está representada a partir de distintas relaciones entre variables.

Las ecuaciones de movimiento determinan cómo las parcelas de aire se mueven de un lugar a otro como respuesta a las aceleraciones a las que se ven sometidas por la acción de diferentes fuerzas (gradiente de presión, Coriolis, etc.). Este conjunto de ecuaciones simultáneas, no lineales en derivadas parciales no tiene solución analítica, por lo que debe ser resuelto de forma aproximada.

El resultado de la predicción numérica no deja de ser una matriz de números, en la práctica, un conjunto de números en los cientos de miles de puntos en los que hemos discretizado el sistema a simular. Esta cantidad ingente de información debe ser correctamente formateada, tratada y almacenada para que sea de utilidad al predictor o analista humano [Gaztelumendi, 1998].

Para la simulación de huracanes se cuentan con diferentes modelos que procesan variables físicas, tales como: valor máximo de la velocidad del viento, velocidad de traslación de la tormenta, radio de vientos máximo, latitud, presión en el centro de la tormenta, presión climatológica ambiental, generando resultados que se pueden extrapolar a otros modelos para seguir simulando otros comportamientos, por ejemplo, el oleaje generado por el huracán.

Los modelos de simulación de huracanes se pueden clasificar en modelos estadísticos y modelos dinámicos, los modelos estadísticos toman como datos de entrada, información de localización de la tormenta, el tiempo y año de la observación, el programa ubica dentro de una base de datos, tormentas ocurridas en condiciones similares y en la misma época, del año, La predicción se fundamenta en la historia de esas tormentas, lo que ellas hicieron al mismo tiempo de año en las mismas condiciones.

Al programa no se le proporciona información acerca de factores de tiempo actuales que pueden influir en el sistema a predecir.

Entre los modelos estadísticos de huracanes podemos mencionar, el CLIPER, usado para predecir la climatología y persistencia del huracán, para la predicción se especifica la latitud inicial y longitud de la tormenta, los componentes del vector de movimiento de tormenta, o la dirección en que se está moviendo, el día del año, y la intensidad inicial de la tormenta. Las predicciones de CLIPER se usan para normalizar y comparar el rendimiento de los otros modelos de predicción.

CLIPER, Consiste en un juego de ecuaciones que separadamente predicen el futuro zonal (el este-oeste) y meridional (norte-sur), los movimientos de un ciclón tropical con intervalos de 12 HR hasta 72 HR. La predicción incluyen la posición, y moviendo de la tormenta antes de 12-HR, el día del año, y el viento de la superficie máximo. El movimiento inicial de la tormenta (la persistencia) es la predicción más importante para este modelo. La eficiencia y confiabilidad de modelos de predicción más complejos se compara a menudo con CLIPER. Cualquier modelo que no puede demostrar la confiabilidad suficiente de climatología y persistencia comparado con CLIPER está descartado.

NHC98: Éste es el sexto en una serie de modelos que son una combinación de modelos estadísticos y dinámicos que usan el rendimiento de CLIPER, en la combinación con los vientos verticalmente promediados a través de la atmósfera y las presiones atmosféricas de atmósfera superiores al del AVN , modelo de huracanes que se corre para el NCEP, o Centros Nacionales para la Predicción Medioambiental MR,. El modelo AVN usa observaciones sintéticas del centro de la tormenta construyendo una estimación de la presión central, el valor del radio de vientos máximos, y presión de la isobara cerrada más externa.

En NHC98, se estratifican las tormentas basado en su latitud y su movimiento actual, con ecuaciones diferentes usadas para el desplazamiento de la tormenta hacia el oeste y el este. Esta estratificación se usa para registrarlas observaciones de los desplazamientos hacia el este que tiende a mover y dirigir el flujo de la tormenta a la derecha, mientras que las tormenta dentro de su línea de flujo, hacia el este, tienden a moverse a la izquierda.

Los modelos dinámicos, usan toda la información posible de la tormenta y las condiciones que la rodean. Estos modelos usarán la información en tiempo real. Los modelos dinámicos emplean todas las leyes básicas de la física, en la atmósfera para predecir el curso futuro de la tormenta. Estos modelos empiezan con seis (6) ecuaciones básicas. Hay tres (3) ecuaciones hidrodinámicas que usan la segunda ley de Newton de movimiento para encontrar los movimientos

horizontales y verticales de aire causadas por las diferencias de presión atmosférica, gravedad, fricción, y la rotación de la tierra. Hay dos (2) ecuaciones termodinámicas que calculan los cambios en la temperatura causadas en la evaporación de agua en el vapor de agua, el vapor que se condensa en el líquido, y así sucesivamente. La última ecuación es conocida como la ecuación de continuidad. Esta ecuación calcula el volumen de aire que entra y sale de un área especificada.

El modelo dinámico mas sencillo, genera como resultado una matriz (grilla) tridimensional de la atmósfera, formada por puntos aislados en la superficie de la tierra. Para tales fines, se toman lecturas que incluyen vientos, presión atmosférica, humedad y temperatura. Estas lecturas se alimentan entonces en la computadora y el modelo creará una previsión de movimiento futuro basado en el rendimiento de la interacción de la tormenta con estas condiciones atmosféricas, representado en puntos dentro de la matriz. Obviamente, entre mas ancha sean las celdas de la matriz, mas exactos serán las aproximaciones de las variables predichas, también, si los datos se toman a varios niveles en la atmósfera la exactitud crece más aun. Los modelos dinámicos toman toda esta información entonces y lo procesan para producir las aproximaciones. La anidación de los resultados en las grillas es un factor clave en las aproximaciones, entre más fino sea este anidamiento de datos, más confiable es la predicción del modelo. Las limitaciones que se tienen en estos modelos es su robustez, y los tiempos de

maquina que consumen en los cálculos, que no permiten generar resultados inmediatos.

Un ejemplo de este problema, se vería si se toma una buena fineza de los resultados los cuales abarcarían una área de la rejilla, proporcional a la cantidad de datos usados, esta sería una salida muy detallada del modelo y el resultado que se obtiene sería la aproximación más exacta posible, pero tomaría 7 días, o una semana, producir una aproximación de una secuencia de 24 horas.

Entre los modelos dinámicos de simulación de huracanes tenemos el modelo HURWIN (*tropical storm planetary boundary layer wind model*) desarrollado por Cardone y Greenwood [Cardone et al, 1992], basado en un modelo numérico de ecuaciones primitivas. HURWIN calcula el estrés superficial, la velocidad del viento y la dirección en las capas planetarias límites de un ciclón tropical en movimiento.

Este modelo es bastante flexible y aproxima bastante los procesos físicos que se dan en los huracanes, opcionalmente también puede ser usado para estimar vientos superficiales, en la tierra o turbulencias en lagos, ciénagas, planicies, bosques y ciudades, los resultados que se obtienen pueden ser usados posteriormente como entradas para modelos de olas. Otro modelo utilizado es el

modelo del National Hurricane Center diseñado por el experto en huracanes Hugo Willoughby.

3.2 MODELO HURWIN

El modelo HURWIN del módulo de modelamiento de ondas espectrales del sistema de modelamiento de costas (CMS, *Coastal Modeling System*) calcula la tensión de la superficie, la velocidad y dirección de los vientos en la capa de frontera planetaria de un ciclón tropical [Abel et al, 1989]. La información de los vientos es calculada a partir de parámetros meteorológicos de tormentas disponibles de huracanes históricos y suministrados para un huracán de categoría específica. El historial completo de tiempo, de la superficie de un campo de viento es descrito por líneas de interpolación en el tiempo utilizando una serie de “snapshots” (instantáneas) de campos de viento característicos. Las instantáneas se calculan a intervalos discretos en la historia de una tormenta, asumiendo que la tormenta puede ser representada como una serie de configuraciones de etapas constantes.

El modelo, desarrollado por Cardone, Greenwood, y Greenwood (1992) y actualizado por Cardone, et al. (1994), se basa en una ecuación numérica de un modelo de capas planetarias adyacentes de un ciclón tropical en movimiento. Una formulación de arrastre de superficie, esta basada en el modelo de Arya (1977), el

cual complementa los parámetros de aspereza para una superficie de agua consistente con la ley de Cardone (1969). Así mismo, se proveen opciones para estimar vientos de superficie sobre terrenos de aspereza definida, tales como lagos, pantanos, planos, arbustos y ciudades.

El modelo HURWIN es flexible y representa con una buena aproximación los procesos físicos en un huracán. Ha sido utilizado extensamente en los Estudios de Información de Olas (*WIS, Wave Information Studies*) para simular huracanes históricos a través de las costas de los estados unidos [Abel et al, 1989].

3.2.1 Ecuaciones Físicas del Modelo HURWIN: El modelo básico, se fundamenta en un modelo de vórtice desarrollado por Chow (1971) y modificado por Cardone, Greenwood y Greenwood (1992). El modelo básico fue modificado aún más por Cardone et al. (1994) para incluir opciones para una resolución espacial más detallada y una especificación más general de la variación de presión radial. El modelo de Chow se aplica únicamente a la capa de frontera planetaria (PBL, *Planetary Boundary Layer*) y resuelve la convergencia horizontal y el campo de viento en la PBL de un ciclón tropical en movimiento a partir de las ecuaciones de movimiento. El campo de presión en la capa de frontera es predefinido y fijo, así que no hay ondas de gravedad atmosférica presentes en la solución numérica. Esto facilita la utilización de un sistema coordenado anidado, que permite espacios de cuadrícula tan pequeños como 2 Km cerca de la región interna del huracán sin sacrificar la eficiencia total de los cálculos.

El modelo se basa completamente en la ecuación de movimiento horizontal, promediada verticalmente a través de la profundidad de la PBL, escrita en coordenadas fijas a la tierra así:

$$\frac{d\hat{\vec{V}}}{dt} + f\vec{k} \times \hat{\vec{V}} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \left(K_H \nabla \hat{\vec{V}} \right) - \frac{C_D}{h} \left| \hat{\vec{V}} \right| \hat{\vec{V}} \quad (1)$$

Donde,

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \hat{\vec{V}} \cdot \nabla$$

$\frac{\partial}{\partial t}$ = Cambio en el tiempo, local para las coordenadas fijas

\wedge = Coordenadas fijas

$\hat{\vec{V}}$ = Velocidad horizontal promediada verticalmente

∇ = Operador bi-dimensional

f = Parámetro Coriolis

\vec{k} = Vector unitario en la dirección vertical

ρ = Densidad media del aire

p = presión

K_H = Coeficiente de viscosidad de torbellino horizontal

C_D = Coeficiente de arrastre

h = profundidad de la PBL

Se asume que la advección vertical del momentum es pequeña comparada con la advección horizontal y puede ser despreciada.

1. La presión se prescribe como la suma de p_c y \bar{P}

$$p = p_c + \bar{P} \quad (2)$$

Donde

p_c = Campo de presión que representa al ciclón tropical; no necesariamente asimétrico al eje; se asume que se traslada con la tormenta a una velocidad especificada \vec{V}_c .

\bar{P} = Campo de presión a gran escala, el cual puede ser especificado por la correspondiente constante de flujo geostrofico \vec{V}_g como:

$$f\vec{K} \times \hat{V}_g = -\frac{1}{r} \nabla \bar{P} \quad (3)$$

La ecuación (1) puede ser expandida como vectores en dos ecuaciones que involucren los componentes escalares x e y de la velocidad. Después de una reorganización de términos, las ecuaciones se pueden resolver como:

$$\frac{du}{dt} = fv - P_u + H_u - F_u \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - P_v + H_v - F_v \quad (5)$$

Donde

u, v = componentes de velocidad \hat{V}

$$P_u = fv_g + \frac{1}{r} \frac{\partial P_c}{\partial x}$$

Términos de presión y Coriolis

$$P_v = -fu_g + \frac{1}{r} \frac{\partial P_c}{\partial y}$$

x, y = coordenadas horizontales

H, F = operadores funcionales definidos como

$$H = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \cdot}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \cdot}{\partial y} \right)$$

Términos de difusión

$$F = \frac{C_D}{h} \left[(u + u_c)^2 + (v + v_c)^2 \right]^{\frac{1}{2}} (\cdot + \cdot_c) \quad \boxed{\text{Términos de fricción}}$$

La formulación general se completa con la especificación de la forma de C_D , K_H y las condiciones de frontera más externa de la grilla.

Muchas opciones están disponibles para especificar el campo de presión. La más sencilla y más utilizada es un campo de presión simétrico al eje y definido por la bien conocida ley de presión exponencial. Esta expresión, esta dada por:

$$p_c(r) = p_0 + \Delta p e^{\frac{-R_p}{r}} \quad (6)$$

Donde

p_0 = presión central de la tormenta

Δp = definida como presión anómala de la tormenta

R_p = factor de escala radial

r = distancia radial desde el ojo del huracán

La presión anómala se expresa de la forma:

$$\Delta p = p_\infty - p_0 \quad (7)$$

Donde p_∞ = presión (campo lejano) ambiental asimétrico

Algunas tormentas no se representan bien por medio de la ecuación (6), aún cuando los parámetros se varíen por cuadrante. Algunas opciones para especificaciones más generales de la variación de la presión simétrica radial se introdujeron por Cardone et al. (1994). Una forma más general de la ecuación (6), que ha sido exitosamente probada en la descripción de algunas tormentas (Holland, 1980), esta dada por:

$$P_c(r) = P_0 + \Delta P e^{\left(\frac{-R_p}{r}\right)^B} \quad (8)$$

Donde B es una constante en el rango general de 0.5 a 2.5.

Evidencias de campos que han sido acumulados en años recientes, sugiere que el contorno del radio de presión en el núcleo interno de algunas tormentas es tan irregular que aún la ecuación (8) provee una pobre aproximación. Willoughby (1990) y Black y Willoughby (1992) describen la tendencia de los anillos concéntricos en la distribución radial de los vientos a ser una característica bastante típica de los ciclones tropicales intensos. Los anillos parecen estar íntimamente relacionados a la evolución de la intensidad de la tormenta. Puede añadirse la capacidad para modelar distribuciones radiales de vientos con doubles alcances máximos, extendiendo la generalización de la ecuación (8) a una forma exponencial doble (Cardone et al. 1994)

$$P_c(r) = P_0 + \sum_{i=1}^2 dp_i e^{\left(\frac{-R_p}{r}\right)^{B_i}} \quad (9)$$

Donde

dp_i = Anomalía de presión para el i -ésimo componente

R_{pi} = Escala de radio para el i -ésimo componente

B_i = Coeficiente B de Holland para el i -ésimo componente donde los valores de dp_i están restringidos por la relación

$$\sum_{i=1}^2 dp_i = p_{\infty} - p_0 \quad (10)$$

Únicamente deben especificarse los valores de Δp y dp_1 para determinar el valor de dp_2 .

La profundidad de la capa de frontera h fue investigada por Cardone, Greenwood y Greenwood (1992) para dos huracanes históricos (Camila y Carla). Concluyeron que una profundidad apropiada para la capa de frontera es de aproximadamente 500m.

En conclusión, las variables independientes más importantes son:

P_o = Presión Central

Δp = Presión anómala de la tormenta

R_p, R_{pi} = Escala de valores de radio

B, B_i = Coeficientes B de Holland (1980)

dp_i = Anomalía de presión para los componentes internos

u_c, v_c = Componentes de la velocidad de avance de la tormenta

h = profundidad de las capas de frontera

En el caso de analizar regiones con mayor resolución, la malla computacional puede descomponerse en un sistema de celdas rectangulares anidadas, dentro de las cuales, la malla del ojo es constante. La figura 3 muestra las tres anidaciones internas en un cuadrante del sistema de rejillas. El tamaño de la malla se dobla con cada anidación sucesiva, y cada malla extiende diez espacios de malla desde el centro. El número de anidaciones es como mucho siete y por lo menos cinco. Si se utilizan cinco anidaciones y el tamaño de la malla de la anidación más interna es de cinco Km, los tamaños de la segunda a la quinta malla serán 10, 20, 40 y 80 Km, respectivamente, y la malla entera cubre un área de 1600 Km cuadrados de lado. Si se utilizan siete anidaciones, y la resolución de la anidación más interna es refinada a 2 Km, los otros tamaños de malla (anidaciones dos a siete) son 4, 8, 16, 32, 64, y 128 Km, y la cuadrícula cubre un área de 2560 Km cuadrados.

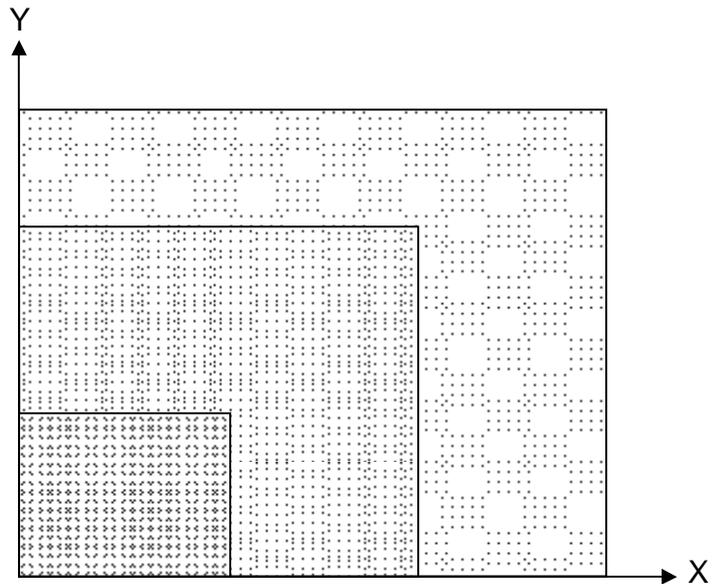


Figura 3. Sistema de mallas anidadas

Los detalles de la formulación de las diferencias finitas y del esquema computacional están dados por Chow (1971). Básicamente, se utiliza una combinación de diferencias diagonales y flujos ordinarios para las derivadas espaciales, con el fin de reducir los errores computacionales en el cálculo de los términos de la advección y en los límites internos de la malla. El cómputo comienza con un campo inicial supuesto consistente en los componentes del gradiente del viento (calculado de p_c). En cada punto de la cuadrícula, las ecuaciones (4) y (5) se integran hacia delante en el tiempo hasta que la aceleración $(\partial \vec{V} / \partial t)_c$ sea tolerablemente pequeña. El escalón de tiempo computacional, en segundos, se toma como diez veces el tamaño de malla computacional más fino, en kilómetros, por ejemplo, si el tamaño de cuadrícula en

la malla más interna es 5 Km, el escalón de tiempo es 50 seg. Chow encontró que 800 iteraciones (equivalente a 13h y 20m si el escalón de tiempo es 60s) son suficientes para alcanzar una solución de estado estático. Cardone et al. (1994) recomienda 3200 iteraciones cuando se utiliza la especificación generalizada de presión.

3.3 MODELO DE OLAS SWAN

Las aplicaciones para los resultados de los modelos de olas se han extendido a proveer información climatológica para el público en general y a documentar procesos de transporte de sedimentos, erosión de playas y diseño de infraestructura costera [Ortiz, 2003], variedades de modelos se han propuesto para aplicarlos en situaciones específicas, donde los criterios para elegir el modelo apropiado requieren un entendimiento de la importancia relativa de los procesos físicos activos en cada dominio de simulación. Tal clasificación de una forma modificada aparece en la tabla 1.

(Young, 1999), divide la predicción de olas en cuatro dominios físicos:

Aguas profundas: Donde la influencia del fondo oceánico puede despreciarse.

Aguas continentales: Zona entre las aguas profundas y la zona de 'shoaling'.

Aguas costeras: Área donde el 'shoaling' es importante.

Puertos: Representan zonas costeras donde se presenta la interacción entre las olas y las estructuras.

Aunque los trabajos de modelaje de olas han sido numerosos a través de toda la historia, fue desde la segunda guerra mundial cuando tomó un verdadero impulso el pronóstico de oleaje.

Tabla 1. Importancia de los procesos físicos en la simulación

Proceso físico	Aguas profundas	Aguas continentales	Aguas costeras	Puertos
Difracción	Despreciable	Despreciable	Menor importancia	Dominante
Refracción	Despreciable	Significativa	Dominante	Significativa
Interacciones entre 4 olas	Dominante	Dominante	Menor importancia	Despreciable
Interacciones entre 3 olas	Despreciable	Menor importancia	Significativa	Menor importancia

Proceso físico	Aguas profundas	Aguas continentales	Aguas costeras	Puertos
Acción del viento	Dominante	Dominante	Menor importancia	Despreciable
Rompimiento por fondo	Despreciable	Menor importancia	Dominante	Menor importancia
Rompimiento en aguas profundas o 'whitecapping'	Dominante	Dominante	Menor importancia	Despreciable
Fricción de fondo	Despreciable	Dominante	Significativa	Despreciable

Relativa importancia de los procesos físicos en cada dominio de simulación. (Young, 1999)

Los primeros modelos de oleaje se limitaron al cálculo analítico de la altura significativa y su período mediante el uso de gráficas y técnicas tabulares con los trabajos de Sverdrup y Munk en 1947. La necesidad de conocer información

adicional sobre la dirección del oleaje, además del cálculo de la altura de ola, promovió el desarrollo de los modelos numéricos. Estos modelos resuelven una o más ecuaciones discretizando las variables mediante el uso de diferencias finitas o elementos finitos.

En general, los modelos de predicción de oleaje pueden dividirse en dos grandes grupos, aquellos que predicen tanto la amplitud como la fase de olas individuales llamados en inglés '*phase resolving models*' (modelos de Boussinesq) y aquellos que predicen los promedios de cantidades tales como el espectro o sus propiedades integrales como la altura significativa llamados '*phase averaging models*' (modelos espectrales). Ambos modelos son importantes y no podría decirse si uno es superior al otro. En contraste con los primeros, los modelos espectrales resuelven una sola ecuación y a través de la complejidad de su representación pueden diferir significativamente [Ortiz, 2003]

En SWAN, las olas se describen en términos de la densidad del espectro o acción N :

$$N(s, q) = \frac{F(s, q)}{s} \quad (11)$$

$$s = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (12)$$

donde, la acción N se define como la razón entre el espectro F y la frecuencia intrínseca s (la cual es la observada en un marco de referencia moviéndose con la corriente). La ecuación (12) es llamada comúnmente relación de dispersión, además θ es la dirección de propagación del oleaje. La ecuación del balance de la acción suele representarse en coordenadas esféricas de la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + (\cos f)^{-1} \frac{\partial}{\partial f} (k \cos f N) + \frac{\partial}{\partial l} (k N) + \frac{\partial}{\partial w} (w N) + \frac{\partial}{\partial q} (q N) = \frac{S}{s} \quad (13)$$

f y l son la latitud y la longitud respectivamente, k es el número de onda, U es la corriente, R es el radio de la tierra y w es la frecuencia absoluta, es decir en un marco de referencia fijo.

El primer término del lado izquierdo de la ecuación (13) representa el cambio local de la densidad de energía en el tiempo, el segundo y tercer término representan la propagación en espacio horizontal (l y f), el cuarto término representa el efecto de las variaciones con profundidad y corrientes en el espacio de frecuencias, el quinto término representa la refracción debida al fondo y a las corrientes, el término de la derecha es la razón del término fuente neto y la frecuencia intrínseca. El término S describe aquellos procesos que suministran y disipan la energía, entre los cuales se cuenta: La acción del viento, el rompimiento de olas en aguas profundas o

'whitecapping', la fricción de fondo, las interacciones no lineales entre olas, rompimiento de olas inducidas por el fondo entre otras. Además, la ecuación de la conservación de la acción, permite considerar la interacción olas-corriente.

Los modelos espectrales se han clasificado comúnmente como de primera, segunda y tercera generación, de acuerdo a la manera como se presenta el término fuente de la ecuación (11). El pionero en resolver numéricamente la ecuación (11) fue Gelci et al. 1957 y el término fuente neto se consideró como la suma de la acción del viento y el rompimiento en aguas profundas conocido en inglés como 'whitecapping'; Modelos de este tipo son llamados de primera generación. El crecimiento del viento se toma basado en la suma de un término lineal (Phillips, 1957) y uno exponencial (Miles, 1957).

Cuando el estudio JONSWAP (*The Joint North Sea Wave Project, Hasselman et. al., 1973*) demostró la importancia de las interacciones no lineales entre 4 olas en el término fuente neto, nacieron los modelos de segunda generación. El proyecto JONSWAP fue el principal esfuerzo internacional para investigar la evolución de las olas durante un 'fetch' limitado.

Young 1988, incluyó la representación de las interacciones no lineales entre cuatro olas lo cual resultó ser un avance importante en el mejoramiento de los resultados sobre todo para oleaje extremo producido por huracanes. El proyecto SWAMP

(Sea Wave Modeling Project, SWAMP Group, 1985) reveló que todos los modelos de segunda generación adolecen de limitaciones en la parametrización del término relacionado a las interacciones no lineales entre cuatro olas. Esta colaboración internacional resultó en el modelo conocido como WAM (WAve Modeling). Variantes de la estructura básica de este modelo fueron desarrolladas por Tolman (1991), con la creación del modelo WAVEWATCH I, WAVEWATCH II en 1992 y más recientemente WAVEWATCH III en 1999. Por su parte Booij et al. 1999, inician la era del modelo SWAN.

El término fuente neto del modelo de olas de tercera generación es esencialmente el mismo que para el de segunda generación, la suma del viento, rompimiento de olas en aguas profundas, fricción de fondo y las interacciones no lineales, pero los detalles del término fuente son significativamente diferentes. El modelo SWAN se validó por el grupo en Delft University en tres lugares cerca de las costas de Holanda en el mar del Norte.

Estudios más específicos recientes usando los modelos espectrales, se desarrollaron en los últimos años para analizar el acoplamiento de los modelos WW3 (WAVEWATCH III), WAM y SWAN. Un trabajo reciente de Wornom et al. 2001, demuestra el proceso de mallas anidadas utilizando WAM en aguas profundas para obtener las condiciones de frontera de mallas anidadas y así usar SWAN en aguas llanas. Este trabajo resume esencialmente la importancia del uso

de SWAN en zonas costeras, ya que los resultados del mismo, demostraron ser más precisos que los resultados del modelo WAM, en estas zonas.

El estado colombiano es considerado un estado ribereño, por poseer costas marítimas, una sobre el océano Pacífico y otra sobre el mar Caribe, Tiene en estos espacios marinos fronteras con Panamá, Costa Rica, Ecuador, Venezuela, Nicaragua, República Dominicana, Haití, Jamaica y Honduras.

El Estado colombiano posee 1300 Km. de zona costera en el Pacífico, 1600 Km. en el Caribe y territorio insular que se distribuyen en los departamentos de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Guajira, Magdalena, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Antioquia, Chocó, Valle del Cauca, Cauca y Nariño, en un total de 47 municipios (18 en el Pacífico, 27 en el Caribe y 2 en la región Insular).

La superficie marítima del país, es de aproximadamente 928.600 Km.² que representa aproximadamente el 44.8% de la extensión total del territorio colombiano.

4.2 OLAS Y MAREAS

En el Mar Caribe Colombiano, las olas normalmente no son de gran tamaño, las marejadas y oleajes son producidas por vientos, con velocidades que se miden con la escala Beaufort, la cual es utilizada por marinos y meteorólogos. Esta escala fue diseñada en 1805 por el hidrógrafo irlandés Francis Beaufort. Sus

denominaciones originales fueron modificadas más tarde; la escala que se usa en la actualidad es la dada en la tabla 2.

Tabla 2. Escala Beaufort

Nº de escala	m/s	Km/h	Mi/h	Denominación
0	0-0.5	0-1	0-1	Calma
1	0.6-1.7	2-6	2-3	ventolina
2	1.8-3.3	7-12	4-6	suave
3	3.4-5.2	13-18	7-10	leve
4	5.3-7.4	19-26	11-14	Moderado
5	57.5-9.8	27-35	15-19	Regular
6	9.9-10.4	36-44	20-24	Fuerte
7	12.5-15.2	45-54	25-30	muy fuerte
8	15.3-18.2	55-65	31-35	Temporal
9	18.3-21.5	66-77	36-41	temporal fuerte
10	21.6-25.1	78-90	42-48	temporal muy

				fuerte
11	25.2-29	91-104	49-56	Tempestad
12	más de 29	más de 104	más de 56	Huracán

- La apariencia del mar es el mejor índice para estimar la fuerza del viento verdadero. La siguiente tabla relaciona los números de la escala Beaufort con las apariencias del mar y con los números de la escala del Estado del Mar.
- Se supone la embarcación en aguas abiertas y profundas y que la dirección del viento y su fuerza hayan permanecido prácticamente constantes por un período de tiempo suficiente como para que la superficie del mar se encuentre en equilibrio, por así decirlo con el viento.

Los estados de mar comprendidos en la escala Beaufort entre 3 y 7 son los más frecuentes, en la región Caribe colombiana, la marea es mixta con una amplitud, generalmente inferior a los 0.5 m por lo que se caracteriza como microtidal, se destaca la predominancia de la componente armónica diurna.

En la plataforma del Caribe Colombiano el efecto de la marea con relación al oleaje es, por consiguiente, despreciable. Sin embargo, no se debe subestimar la superposición de la onda de marea con la ola generada en el Sureste. ("mar de leva").

En período seco la dirección del oleaje es Norte-Noreste; en período de transición y lluvias cambia constantemente entre Noreste y Sureste, en la isla de Salamanca se da una amplia zona de rompientes con 5 a 6 rompientes; las olas que rompen al Oeste de Tasajera tienen alturas de 0.6 a 1 m; al Este de Tasajera tienen alturas entre 15 y 40 cm. (Martínez y Molina, 1992). Las mareas son irregulares y débiles, con rango micromareal semidiurno y una amplitud entre 20 y 30 cm. [Von Erffa, 1992].

4.3 CLIMA

Por su situación geográfica en el área Suroeste del Caribe, el régimen climático de la región donde se encuentra Cartagena de Indias, está bajo la influencia de los desplazamientos Norte - Sur de la Zona de Convergencia Intertropical (Z.C.I.).

La Zona de Convergencia Intertropical (Z.C.I.), es un cinturón semicontinuo de bajas presiones localizado entre las regiones Subtropicales de los hemisferios

Norte y Sur; este cinturón es conocido igualmente como Cresta Ecuatorial, Frente Intertropical y Frente Ecuatorial.

El movimiento de la Z.C.I., en dirección Norte o Sur es una resultante de los fenómenos físicos Subtropicales. Además, el sector está influenciado por la circulación atmosférica de los vientos Alisios (vientos del Norte y Noreste), procedente de los Centros de Alta Presión del Atlántico Nororiental. La incidencia de los vientos de Este - Sureste, también es notable en determinada época del año. El clima se caracteriza como tropical semiárido.

En el área, se identifican dos períodos climáticos principales, llamados Época Seca (verano) y Época Húmeda (invierno) y una época de Transición.

4.3.1. Época Seca O Época De Verano. Se extiende desde Diciembre hasta Abril, caracterizándose por vientos fuertes del sector Norte - Noreste y lluvias débiles y escasas.

En esta época pueden presentarse los denominados "mares de leva", ocasionados por la incursión en aguas del Mar Caribe de Frentes Polares provenientes del Hemisferio Norte, cuando alcanzan a llegar a los 15 grados de latitud Norte (unas 150 millas náuticas al norte de la Guajira).

4.3.2. Época Húmeda O Época De Invierno. Época de lluvias que se extiende desde Agosto a Noviembre. Se caracteriza por vientos débiles, de orientación variable y por un régimen de lluvias abundantes. En esta época suelen presentarse los denominados Ciclones Tropicales (Huracanes), los cuales pueden aumentar el régimen de lluvias en todo el Caribe colombiano.

4.3.3. Época de Transición. Comprendida entre Mayo y Julio. También denominado Veranillo de San Juan. Esta época se caracteriza por vientos uniformes y fuertes de dirección Norte y Noreste. El inicio de esta época marca también el comienzo de la temporada de Huracanes en el área del Océano Atlántico Norte, Golfo de México y Mar Caribe que se extiende hasta el mes de Noviembre.

La evolución de los parámetros hidrológicos e hidrodinámicos de la región está en estrecha relación con los tres períodos climáticos identificados.

Las variaciones climáticas estacionales definen la dirección e intensidad de las corrientes regionales y locales, la dirección e intensidad del oleaje y el régimen de precipitaciones.

Se establece una temperatura media anual de 28 °C para el área de estudio. Las variaciones observadas en la temperatura media no superan los 2 °C, esto se

debe principalmente a que la temperatura de la superficie del océano presenta fluctuaciones mínimas durante todo el año.

4.4 VIENTOS

Los vientos alisios del NE constituyen el factor macroclimático más importante, aplacando fenómenos como lluvias de tipo convectivo y vientos del SW. Los alisios dominan de noviembre a marzo [Von Erffa ,1992], período seco. El resto del año hay influencia de vientos del suroeste, que en los meses más húmedos llegan a dominar y en sus mayores frecuencias constituyen los llamados "vendavales" (Ver tabla 3).

Tabla 3. Parámetros Multianuales

MES	TEMP. °C	HUMEDAD REL. %	PRECIPITACION (mm)	BRILLO SOLAR (hrs. décimos)	VIENTO nudos
ENERO	27.0	82	4.5	242.0	NORTE / NORESTE 15-20
FEBRERO	26.8	81	0.0	206.2	NORTE / NORESTE

					15-20
MARZO	27.1	82	1.6	194.1	NORTE / NORESTE 15-20
ABRIL	27.5	82	22.6	183.9	NORTE / NORESTE 15-20
MAYO	28.1	83	67.3	183.7	VARIABLES 5-10
JUNIO	28.3	83	80.4	181.9	NORTE / ESTE 15- 20
JULIO	28.2	83	73.8	209.9	NORTE / ESTE
AGOSTO	28.2	83	85.2	193.4	VARIABLES 5-10
SEPTIEMBRE	28.3	83	111.6	178.8	VARIABLES 5-10
OCTUBRE	27.8	85	180.8	165.7	VARIABLES 5-10
NOVIEMBRE	27.8	85	93.8	196.5	VARIABLES 5-10
DICIEMBRE	27.3	84	29.5	218.1	NORTE / NORESTE 15-20

MAREA MAXIMA: 50 cms.

MAREA MEDIA: 30 cms.

MAREA MINIMA: -12 cms.

TEMPERATURA MAXIMA: 34°C

TEMPERATURA MEDIA: 27.2°C

TEMPERATURA MINIMA: 22.4°C

4.5 CORRIENTES

De acuerdo con Lorin et al (1973) la corriente oceánica más importante al frente de la costa Caribe colombiana es la llamada "corriente litoral oceánica" o contracorriente, que va desde las costas de Panamá hasta casi la península de la Guajira. En época de alisios se le superponen corrientes opuestas que tan solo afectan una capa superficial de las aguas y que constituyen la deriva litoral del área hacia el occidente durante la mayor parte del año (Martínez y Molina, 1992). De acuerdo con Von Erffa (1973) las corrientes transportan sedimentos erosionados de un delta más antiguo y los depositan en la desembocadura del Río Magdalena, donde gran parte va hacia los fondos submarinos. Al frente de la llanura deltaica del Magdalena son especialmente importantes las corrientes de resaca.

4.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS TERRITORIOS MARINOS Y COSTEROS

4.6.1. Ecosistemas Marinos y Costeros de la Costa Caribe Colombiana. En las zonas costeras y marinas colombianas se encuentran los siguientes ecosistemas:

Arrecifes de coral: son ecosistemas de gran biodiversidad, elevada productividad y elevados recursos pesqueros y belleza escénica (Garzón-Ferreira, 1997. En: INVEMAR, 2004), están formados principalmente por ciertos invertebrados marinos que al agregarse forman estructuras duras firmemente consolidadas en el lecho marino, principalmente pertenecientes al grupo de los corales. Muchas poblaciones costeras han subsistido tradicionalmente de las pesquerías en áreas arrecifales, de donde se extraen recursos de gran valor como langostas, cangrejos, pulpos, caracoles, pargos, meros, chernas, etc. (INVEMAR, 2004).

Praderas de pastos marinos: son comunidades de plantas en el caribe, que están totalmente sumergidas en aguas marinas o salobres de poca profundidad; cumplen funciones en la producción de fuentes directas e indirectas de alimento, la circulación de nutrientes y la estabilización de sedimentos de la línea de costa.

Bosques de manglar: son comunidades de árboles (mangles) con adaptaciones especiales (raíces en zancos, tolerancia a la sal), que se ubican en las zonas de transición entre el mar y la tierra. Los ecosistemas de manglar captan aguas de escorrentía del continente y actúan como filtros y al mismo tiempo suministran materia orgánica a los ecosistemas adyacentes como pastos marinos y corales, además actúan como amortiguadores de inundaciones y protegen la línea de costa de la erosión disipando la energía del mar y el viento.

Acantilados y playas: son el área de transición entre la zona emergida y sumergida, en la cual se llevan a cabo proceso de intercambio, la zona de transición entre el mar y la tierra es de gran interés para obras de infraestructura portuaria y para asentamientos humanos; es de resaltar que ésta es un área muy dinámica afectada por fenómenos de acreción o erosión y que en algunos casos el no tener en cuenta esta consideración ha desencadenado problemas de invasión del mar sobre áreas construidas (Punta Arboletes y Cristo Rey y algunas áreas de la Isla de San Andrés).

Fondos sedimentarios: Los fondos de la plataforma continental son aquellos que están ubicados por debajo de cinco metros de profundidad, hasta el punto de quiebre de la plataforma, sin incluir la zona intermareal de playas ni los fondos vegetados (Steer, *et al.*, 1997). Son ecosistemas conformados por la acumulación de arenas, arcillas, cienos y/o limos. Es el ecosistema más extenso que ocupa el área marina en la plataforma continental colombiana (Arias, 1994 En: INVEMAR 2000).

4.6.2 Amenazas Naturales de la Costa Colombiana

4.6.2.1. Ascenso del nivel del Mar. Un evento de amenaza a las comunidades e infraestructuras costeras ocasionado por el cambio climático, es el ascenso en el nivel del mar, aunque es un evento a largo plazo (100 años) es importante que el país comience a considerar el tema dentro de la planificación territorial, las ciudades más afectadas en una proyección de 30 cm. son Santa Marta, Cartagena y Turbo en el caribe y Tumaco en el Pacífico en una proyección de 100 cm, [Invemar,2003], además de las anteriores se afectarían gravemente Buenaventura y Barranquilla.

4.6.2.2. Tsunami. Por la proximidad a la zona de subducción del Pacífico, donde colisionan la placa de Nazca y la placa de Suramérica, existe una alta probabilidad en la ocurrencia de terremotos, maremotos y por tanto tsunamis en la zona litoral del Pacífico sur colombiano; se destaca el caso de los tsunamis de 1906 y 1979 en las costas de Nariño y Cauca, el primero de los cuales destruyó la totalidad del casco urbano del municipio de Tumaco por el nivel de exposición de la comunidad y la falta de sistemas de alerta temprana. La Comisión Colombiana del Océano

convoca y ejerce la secretaria técnica permanente del Comité Técnico Nacional de Alerta por Tsunami – CTNAT- el cual emprendió la tarea de formular el Plan Nacional para la Gestión del Riesgo por Tsunami-PNGRT. Actualmente ya se está implementando el Plan Local de Emergencia y Contingencia por Sismo, Licuación y Tsunami en el Municipio de Tumaco, cuya primera fase de socialización culminó con la realización del ejercicio de simulacro en gran parte de la cabecera municipal. No se descarta la formación de tsunamis en el Caribe dada la actividad volcánica del arco de las Antillas y la presencia de la falla septentrional que une la placa del Caribe con la placa del Atlántico Norte, cerca a la fosa de Puerto Rico.

4.6.2.3. Ciclones Tropicales. La temporada de Huracanes para el Mar Caribe se inicia desde el primero de Junio y se extiende hasta el mes de Noviembre; siendo por datos estadísticos los meses de Agosto y Octubre los más intensos. No obstante lo anterior, se han presentado Ciclones Tropicales en muy bajo porcentaje en el mes de Mayo.

En las Islas del Caribe, la acción del oleaje asociado a los Ciclones, causa más daño que la marejada ciclónica, debido a que las costas isleñas no tienen la protección que ofrecen las plataformas continentales con inclinación gradual; como resultado las olas llegan a tierra sin que su poder destructor se disminuya.

La probabilidad de que estos sistemas afecten el territorio continental colombiano es bastante reducida en comparación con otras áreas del Caribe. La Sierra Nevada de Santa Marta, sistema montañoso de 5600mts sobre el nivel del mar, al noreste de Cartagena de Indias, es un escudo natural que actúa favorablemente cuando un sistema de éstos se acerca por el Este de la región, haciendo que la tormenta se desvíe ligeramente hacia el mar Caribe, protegiendo a la ciudad de sus vientos huracanados. Los mayores daños asociados a estos Sistemas son ocasionados por vientos fuertes, abundantes lluvias y marejadas en la Costa.

Siendo estos sistemas de origen natural, es casi imposible diagnosticar su ingreso a territorio Colombiano.

Algunos de los Huracanes más recordados en territorio colombiano son el JOAN (octubre de 1988) que atravesó la península de la Guajira, y se desplazó por Sur del Archipiélago de San Andrés y Providencia; el ROXANNE (octubre de 1995) desarrollado al Norte del Archipiélago; CESAR (julio de 1996) que efectuó su desplazamiento por el Norte de la península de la Guajira; el MICHT que se generó a unas 100 millas náuticas al norte de Cartagena de Indias; y el más reciente y caprichoso de todos el LENNY (Noviembre de 1999), que se generó a 120 millas náuticas al noroeste de Cartagena de Indias desplazándose por el mar Caribe en dirección Oeste - Este.

4.6.2.4 Ondas Tropicales. Estos sistemas hacen referencia a perturbaciones que se mueven en dirección Este - Oeste desde las costas del continente Africano. Son típicas de los meses comprendidos entre Mayo y Noviembre, ya que concuerda con la estación de verano del Hemisferio Norte y es cuando la gran porción de tierra que comprende el continente Africano con su desierto del Sahara incluido, se encuentra bajo gran calentamiento, dando paso a la formación de bajas térmicas que son desplazadas hacia el Oeste por los vientos predominantes del área (Alisios).

Estos sistemas, como cualquier sistema atmosférico, vienen abasteciéndose durante su trayectoria oceánica de vapor de agua, que lo hace más intenso y cualquier alteración del flujo de aire que lo acompaña, hace que el viento empiece a girar hacia un centro común, lo que conlleva al incremento de una circulación ciclónica. Este incremento de la circulación ciclónica es precisamente lo que puede originar un Ciclón Tropical en cualquiera de sus estados (Depresión, Tormenta, Huracán).

Se entiende por perturbación atmosférica, un sistema nuboso compuesto principalmente por aglomerados de nubes de tipo Cumulonimbos, las cuales alteran las condiciones atmosféricas de los lugares que encuentran a su paso. Una sola nube de este tipo puede producir vientos fuertes, lluvias intensas

acompañadas de tormentas eléctricas y las consecuencias que de éstas se derivan, como alteración del estado del mar y reducción de la visibilidad. Dentro de los continentes estas nubes son las responsables de la generación de tornados que arrasan grandes cultivos y en áreas oceánicas originan trombas marinas.

4.6.2.5 Marejadas. Es un sistema de olas que se mueven fuera de las áreas de generación hacia una región de vientos más débiles, de calma o de vientos contrarios; la marejada viaja en un intervalo de dirección de 20° con respecto a los vientos, aunque no sea siempre el mismo caso. El Mar de Fondo es una marejada.

En presencia de una tormenta, frente atmosférico o sistema sinóptico de baja presión en el Caribe, la velocidad del viento aumenta, los esfuerzos de fricción son mayores y se desarrolla una complicada mezcla de olas rizadas superpuestas, llamada Marejada.

Cuando cesa el viento, las olas siguen alejándose de su zona de origen. Una vez fuera de ella, se modifican haciéndose más regulares. Estas olas largas y regulares observadas fuera de la zona de origen se llama " Mar de Fondo o de Leva".

4.6.2.6 Mar de Leva. El fenómeno conocido como "Mar de Leva", consiste en el aumento anormal de la altura del oleaje, aumento que es ocasionado por el efecto de fricción entre la superficie del mar y la masa de aire atmosférico en movimiento en forma de viento, el cual es intensificado con el paso de sistemas atmosféricos de mal tiempo (bajas presiones) que empujan las aguas oceánicas hacia la costa causando oleaje fuerte. El tamaño de las olas formadas depende de la velocidad y el tiempo que persista la misma velocidad de viento.

La incidencia de los efectos de este fenómeno sobre cualquier tipo de embarcación es mucho más fuerte en las áreas costeras ya que la altura de la ola aumenta en la medida que encuentre cambios en el nivel de la línea de costa. También se causan daños en la costa, provocando inundaciones en sectores aledaños a las playas y originando además diferentes grados de erosión que algunas veces ocasiona daños en las construcciones cercanas tales como estructuras de muelles menores y viviendas que por su ubicación se expongan a los efectos directos del fenómeno.

En Colombia el fenómeno afecta la Costa Caribe Colombiana. Es típico de la época seca o de vientos (diciembre - abril), aunque las estadísticas muestran que casi siempre se presenta en Enero y Febrero y en algunas ocasiones se extiende a Marzo. Su duración es de aproximadamente 48 horas siendo su inicio más intenso que su final, pero su fuerza se ve reforzada por la acción de los Vientos

Alisios que por la época soplan del Norte - Noreste y son más intensos en horas de la tarde, lo cual hace del fenómeno mas dañino en esas horas. Se calcula que el fenómeno puede repetirse hasta cuatro veces en un solo mes y afecta a toda la costa del Mar Caribe Colombiano. El Sistema de mal tiempo que normalmente origina este fenómeno en el Caribe es el relacionado con la incursión del Frente Polar, que en su desplazamiento inicial hacia el Sureste alcanza latitudes de 15° Norte o menos. Esta Incursión Polar o Frente, llevan consigo un sistema de olas y vientos generados por su mal tiempo asociado y el cual comienza a viajar a través del Mar Caribe, con destino final las costas de Venezuela y Colombia, donde se traduce en el fenómeno de Mar de Leva.

4.6.2.7. La Erosión Costera. La erosión costera es un proceso natural que consiste en que la acción del oleaje erosiona la línea costera que va retrocediendo hacia el continente, generando riegos sobre los predios invadidos por el mar. En Colombia no se ha planificado el manejo de la erosión costera en varios municipios que padecen de este fenómeno, como lo son Paso Nuevo, Punta Arboletes, El Uvero, Damaquiel, Zapata, Necoclí y Turbo en el Caribe y Palo Secal, Pavasita, Pavasa, Punta Abaquía Puchricha, bocas del Baudó, el Concho y Dotenedó en el pacífico [Ingeominas et al, 1997], lo cual genera obstáculos al desarrollo económico y social.

4.6.2.8 Los Bienes de Uso Público. Uno de los aspectos que mayores esfuerzos requiere, por parte de la Autoridad Marítima, es la vigilancia y control de las zonas costeras, específicamente de las playas y terrenos de bajamar, con el fin de evitar la construcción, en materiales temporales y permanentes, de viviendas o establecimientos comerciales. Es indiscutible la experiencia del Gobierno Nacional y de la Autoridad Marítima al respecto, específicamente en casos como el de Tumaco, en desarrollo de las previsiones del proyecto de reorientación del crecimiento urbano, ejecutado como parte del convenio-ALA/93/51- República de Colombia - Unión Europea; empero, los requerimientos de carácter jurídico y la dificultad que supone la coordinación interinstitucional con las entidades territoriales para acometer acciones preventivas y correctivas, hace necesario adoptar una serie de medidas.

Las cifras que maneja la Autoridad Marítima acerca de ocupaciones ilegales de bienes de uso público sobre la franja costera, son un claro indicio de la baja aplicabilidad de las herramientas con que dispone el estado para recuperar estos terrenos. Como soporte de lo enunciado, se evalúa un total de 258 de aperturas de investigaciones administrativas por ocupaciones ilegales de bienes de uso público y 538 denuncias ante las autoridades policivas correspondientes, por parte de los Capitanes de Puerto y hasta la fecha solamente, se han recuperado 69 espacios con el concurso de las administraciones locales, responsables de llevar a cabo las diligencias de restitución [Dimar, 2004].

Cabe anotar, que la figura de concesión, permite el uso exclusivo por parte de particulares de estas zonas de uso público, sin embargo, estas concesiones no reportan en la actualidad ningún beneficio económico directo para el Estado.

Existen playas y terrenos de bajamar que han sido usurpados por numerosas comunidades que atraviesan problemas sociales que desbordan la capacidad de atención del estado, conformando barrios y asentamientos, donde se percibe que el mismo Estado nunca podrá recuperar, no sólo por las limitaciones financieras, sino porque dichos terrenos han sido intervenidos, modificando su naturaleza. Como ejemplo, cabe citar los barrios San Francisco, Inmaculada, Bellavista y Juan 23 en Buenaventura, El Obrero, Unión Victoria y Viento Libre en Tumaco, la Boquilla y Marlinda en Cartagena y el municipio de Pueblo viejo en Magdalena [Dimar, 2004].

5. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS

Una forma de analizar y observar el comportamiento de un huracán, es usar modelos matemáticos que incluyen variables físicas como la presión atmosférica y el comportamiento de los campos de vientos, los cuales permiten realizar estimaciones con las observaciones realizadas acerca de los vientos máximos, altura de olas, periodos picos de las olas, dirección de los vientos y otros parámetros. Estos modelos también pueden ser usados para definir comportamientos estándar de una tormenta que ayuden en un momento determinado a realizar cálculos muy aproximados para la construcción de estructuras marítimas.

En este trabajo se presentan los resultados de la implementación de dos modelos numéricos del dominio público y que son adaptables a las condiciones computacionales de la región: HURWIN para la simulación de huracanes y SWAN para la simulación de oleaje. La utilización de este tipo de modelos requiere de una gran integración entre equipo computacional, tamaño de área y tamaño de malla utilizada para el cálculo numérico.

5.1 HURACÁN OPAL

5.1.1. Proceso de Configuración del Modelo HURWIN. El huracán OPAL - 1995, Golfo de México, es tomado como referencia en la investigación, para la implementación y validación de los modelos, porque presenta características físicas similares que JOAN. OPAL presentó vientos máximos de 209 km/h, mientras que JOAN presento vientos máximos de 201 km/h, y ambos alcanzaron a ser de categoría 4. Las figuras 5 y 6 muestran la trayectoria de ambos huracanes. (Tomado de <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/1995/index.html>)

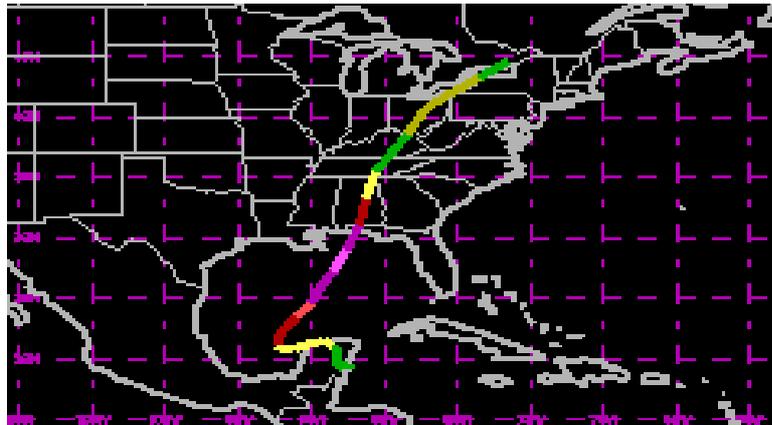


Figura 5. Trayectoria del huracán OPAL 1995

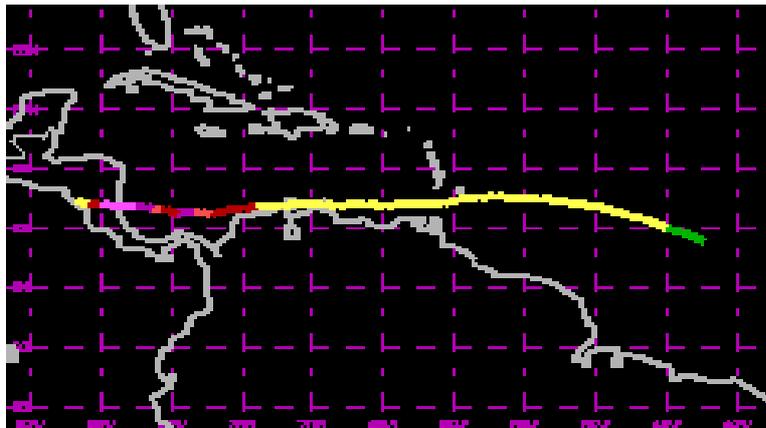


Figura 6. Trayectoria del huracán JOAN 1988.

Los parámetros de entrada para las corridas del modelo HURWIN, los cuales producen los campos de vientos que a su vez servirán como archivos de entrada para el modelo de olas SWAN, pueden observarse en los anexos del documento.

5.2. MALLAS COMPUTACIONALES

5.2.1. Malla Computacional HURWIN para el huracán OPAL. La malla computacional sobre la que corre el modelo se extiende desde los 84° Oeste hasta los 92° Oeste y desde los 21° Norte hasta los 31° Norte, (Ver Figura 7). La malla computacional viene definida de la siguiente forma:

1. La localización geográfica del origen de la malla computacional en el eje X del sistema de coordenadas es 92.
2. La localización geográfica del origen de la malla computacional en el eje Y del sistema de coordenadas es 21.

3. Resolución de la malla en latitud y longitud es de 0,166667 grados

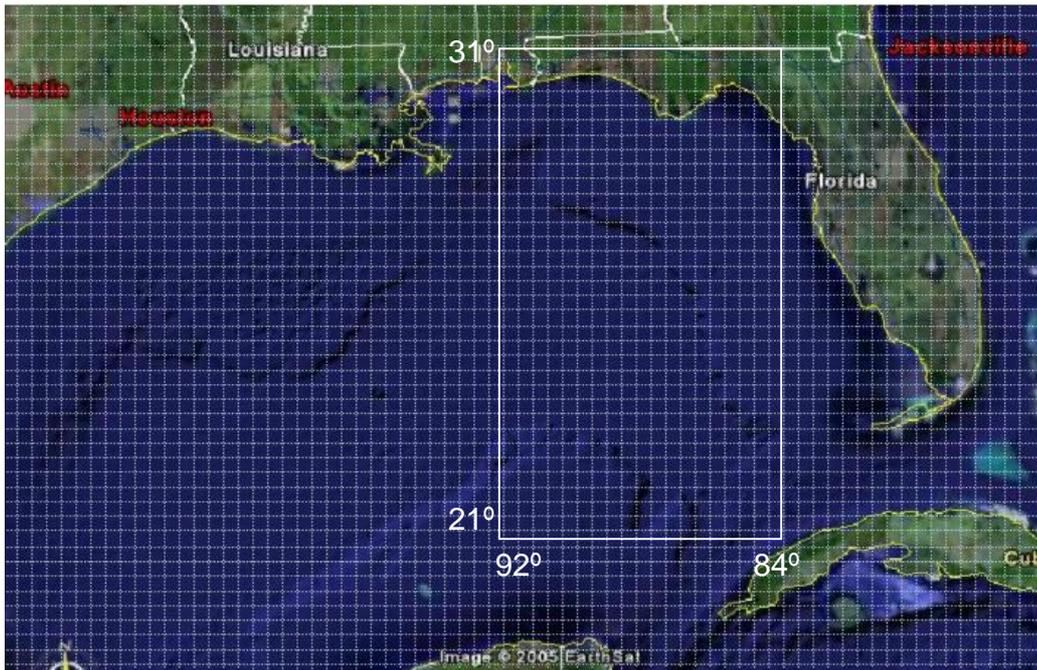


Figura 7. Malla computacional HURWIN

5.2.2. Implementación del modelo HURWIN para el Huracán OPAL. El modelo de simulación HURWIN esta compuesto principalmente por tres elementos, primero los archivos de entrada que alimentan la simulación, estos dos archivos tienen la extensión (.POS y .PAR) que definen los parámetros de entrada del huracán y la posición del huracán en un momento determinado. El segundo elemento es el código de la aplicación que debe ejecutarse y que se encuentra escrito en Fortran 77 (Archivo de extensión .f) y por último una serie de archivos de post-procesamiento que son los que se utilizan para analizar los resultados, estos archivos tienen las extensiones (.RES, .WIN, .UVS). En la Figura 8 se

describe mediante un diagrama de flujo la estructura de los elementos del simulador.

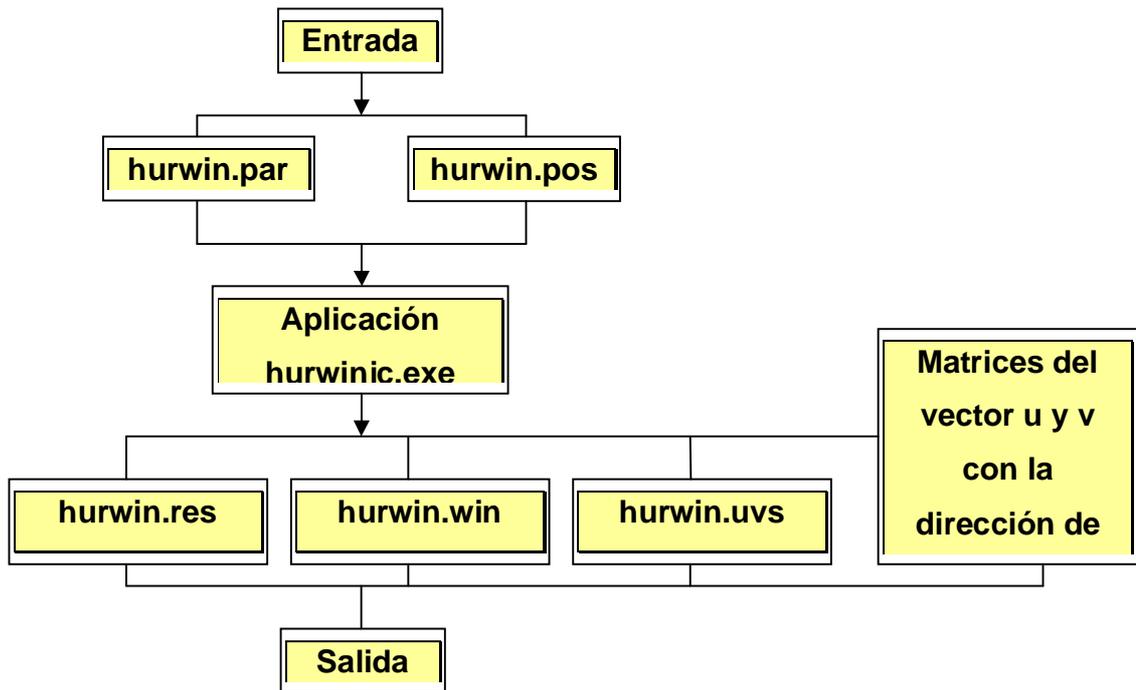


Figura 8. Flujo grama de la estructura del simulador

Para mayores detalles del modelo en su configuración ver anexos del documento.

5.2.3 Implementación del modelo SWAN para el Huracán OPAL

5.2.3.1. Malla Computacional SWAN. El modelo de generación de olas SWAN pertenece a la categoría de los llamados modelos espectrales discretos, ya que ellos calculan el espectro en función de la frecuencia y la dirección de la energía de las olas en cada punto de la malla computacional escogida. (Ver Figura 9). Se define la malla computacional del modelo de la siguiente forma:

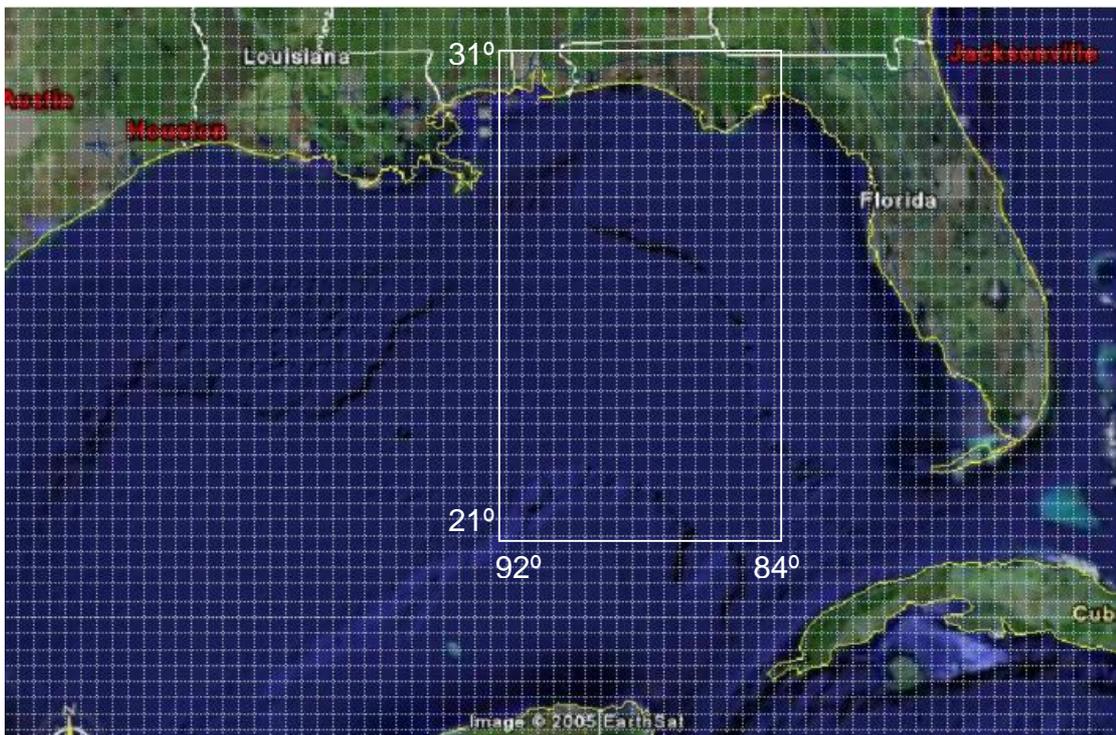


Figura 9. Malla computacional SWAN

La tabla 4 describe los parámetros de la malla computacional del modelo SWAN para el huracán OPAL.

Tabla 4 Descripción de la Malla Computacional

Descripción	Valores de la Malla
Longitud máx./min	92/84
Latitud máx./min	31/21
Número de Celdas	96 x 120
Frecuencia máx./min	0,333/0,0460

Una descripción más detallada del funcionamiento del modelo SWAN se hace necesaria ahora para resumir gran parte de lo anteriormente descrito. Un archivo de entrada llamado INPUT recoge toda la información que utiliza el modelo SWAN. Ver Anexos.

El nivel del mar en la región de simulación, dirección del norte geográfico con respecto al eje X de la malla, aceleración de la gravedad y el sistema de coordenadas utilizado para la corrida, es de los primeros parámetros incluidos en este archivo.

Simulación en una o dos dimensiones así como el modo estacionario o no estacionario de la corrida se describirán después. La descripción de la malla computacional junto a sus límites geográficos, la resolución espacial, direccional y

de frecuencia le sigue. Los campos de batimetría y de vientos son proporcionados después de la malla computacional.

La batimetría es la ciencia que mide las profundidades marinas para determinar la topografía del fondo del mar, actualmente las mediciones son realizadas por GPS diferencial para una posición exacta, y con sondadores hidrográficos mono o multihaz para determinar la profundidad exacta como se ilustra en la figura 10, todo ello se va procesando en un ordenador de abordo para confeccionar la carta batimétrica. Una Carta batimétrica es un mapa que representa la forma del fondo de un cuerpo de agua, normalmente por medio de líneas de profundidad, llamadas isobatas.

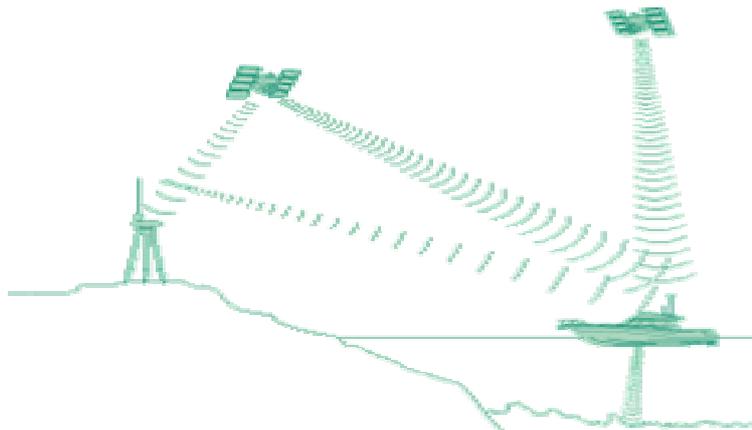


Figura 10. Mediciones con sondadores hidrográficos mono o multihaz

En este trabajo las corridas se hicieron en el modo no estacionario, ya que en modo estacionario se genera una matriz general de resultados y no se pueden obtener las mallas para cada periodo de tiempo que es lo que permite ver el comportamiento y dinámica del huracán en los distintos intervalos de tiempo, con la precaución de comenzar las simulaciones por lo menos unos 3 días antes de la fecha que se quiere simular, con el objetivo de alcanzar un estado del océano mas real para las fechas en que pasó el huracán por las boyas.

El campo de batimetría es estacionario y los vientos son dados cada 6 horas. Si es necesaria una mejor resolución en espacio y tiempo, el modelo SWAN interpola el campo de vientos según la necesidad de la corrida. Se presentan diferentes opciones para suministrar las condiciones de contorno de la malla computacional en SWAN.

Si se suministra al modelo las condiciones de contorno, de manera tal que una serie de puntos a lo largo de la frontera especifican la altura significativa, el período, la dirección promedio del oleaje, el modelo SWAN permite escoger la forma del espectro para cada uno de estos puntos. Espectros de JONSWAP, de Pierson-Moskowitz, y Gaussiano son opciones disponibles en el modelo.

En este trabajo no se utilizaron las condiciones de frontera para la malla descritas anteriormente, por el contrario, para obtener información de un estado inicial de la cuenca completa, el modelo puede calcular las condiciones de la región por medio del comando INITIAL DEFAULT. Este comando calcula el espectro inicial de los valores de la velocidad del viento en cada punto de la malla, el promedio del incremento espacial es usado como 'fetch' para el viento local. La forma del espectro es la de JONSWAP por defecto.

COMPUTATION es el comando que activa la corrida de acuerdo a la notación utilizada para las fechas de simulación así como el incremento del tiempo para la corrida. En este trabajo se usó el formato ISO para las fechas, la misma es: yyyyymmdd.hhmmss, por ejemplo 19951001.000000 quiere decir 1 de Octubre del año 1995 a las 00 horas, 00 minutos y 00 segundos.

Las corridas del modelo se hicieron en una Intel® Pentium® 2 3.00GHz, Sistema Operativo Microsoft® Windows® XP Professional, Memoria 1 Gbyte, Disco Duro 80GB.

5.3 DATOS EXPERIMENTALES

La manera más eficaz de tener cierto grado de certidumbre en los resultados de una simulación, es poseer una base de datos experimentales que permita

establecer criterios de comparación para verificar los valores que se obtienen numéricamente.

En este trabajo se ha utilizado SWAN para simular oleaje en áreas geográficas de escalas oceánicas donde a través de muchos años modelos como WAM y WAVEWATCH III han tenido dominio absoluto, y a HURWIN para simular los campos de vientos producidos por un Huracán. Es por ello que verificar y validar los datos obtenidos con SWAN en mar abierto, es un requisito prioritario antes de poder llevarlo a las costas del caribe Colombiano.

La NOAA tiene a disposición una serie de boyas oceanográficas en puntos ubicados en el Atlántico Norte. Muchos de estos instrumentos se han colocado cerca de la costa del este y sur de Norteamérica, por esta razón representan una excelente alternativa para comparar los resultados producidos con el modelo SWAN ya que se encuentran situadas dentro de la trayectoria del Huracán OPAL, que es donde precisamente se quiere validar y verificar el comportamiento del modelo. Toda la información referente a estas estaciones experimentales puede encontrarse en la dirección del Internet: <http://www.ndbc.noaa.gov> en el así llamado 'National Data Buoy Center' de NOAA.

Las boyas oceanográficas utilizadas para la comparación de los resultados de SWAN en mar abierto son:

- 1) En la Figura 11. se puede observar la estación 42001 situada en la posición 89.66° Oeste y 25.84° Norte.



Figura 11. Boya 42001 de la NOAA

La zona de ubicación geográfica de la boya 42001 es mostrada en la Figura 12, encargada de registrar los datos de las variables físicas del huracán, usados para confrontar los resultados arrojados por el modelo HURWIN.

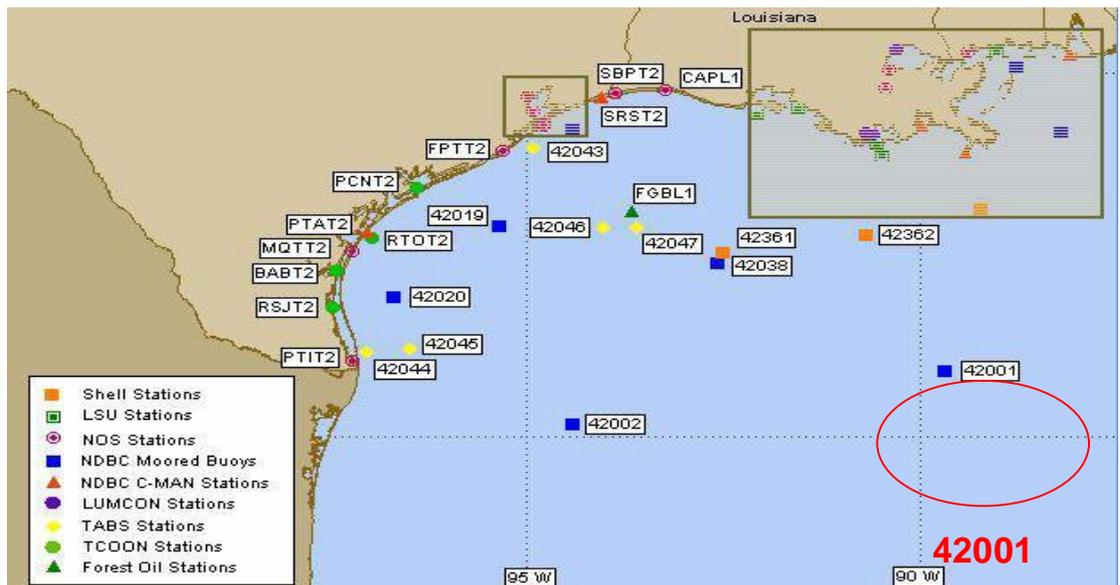


Figura 12. Boya 42001 de la NOAA – Ubicación geográfica

Un resumen completo de la ubicación y características de la boya pueden verse en la Tabla 5.

Tabla 5. Descripción de la boya oceanográfica de NOAA 42001

Descripción	Valor
Ubicación	25.84 N 89.66 W (25°50'30"N 89°39'30"W)
Site elevation	sea level
Air temp height	10 m above site elevation
Anemometer height	10 m above site elevation
Barometer elevation	sea level
Sea temp depth	1 m below site elevation
Water depth	3,246.0 m
Watch circle radius	3,134 yards

Un resumen completo de la ubicación y características de la boya pueden verse en la Tabla 6.

Tabla 6. Descripción de la boya oceanográfica de NOAA 42003

Descripción	Valor
Ubicación	26.01 N 85.91 W (26°00'32"N 85°54'50"W)
Site elevation	sea level
Air temp height	10 m above site elevation
Anemometer height	10 m above site elevation
Barometer elevation	sea level
Sea temp depth	1 m below site elevation
Water depth	3,164.0 m
Watch circle radius	3,095 yards

5.4 DATOS OBSERVADOS Y DATOS PREDECIDOS HURACÁN OPAL

En las tablas 7 y 8 , se comparan los datos predecidos por el modelo HURWIN para el huracán OPAL, con los datos medidos por las boyas 42001 y 42003, el paso de tiempo del modelo es de 1.5 HR.

Tabla 7. Datos Observados y Predecidos Boya 42001

HR-SIM	Datos Observados		Datos Predecidos - 1,5 HR		
	No	WVHT	DPD	DPD	
	1	2.90	9.10	0.91624	3.6574
	3	2.80	10.00	1.14422	3.6574
	6	2.80	10.00	1.31312	4.9225
	9	3.50	10.80	1.43912	4.9225
	12	3.20	10.00	1.51294	4.9225
	15	3.10	10.00	1.48861	5.4349
	18	2.90	8.30	1.42329	6.0006
	21	2.90	9.10	1.40420	6.0006
	24	2.80	8.30	1.38934	6.0006
	27	2.50	8.30	1.34097	6.0006
	30	2.50	8.30	1.33278	6.0006
	33	2.50	7.10	1.35324	6.0006
	36	2.40	7.10	1.33054	6.0006
	39	2.20	6.70	1.26522	6.0006

42	2.50	6.70	1.23069	6.0006
45	2.40	7.70	1.26007	6.0006
48	2.40	7.10	1.31045	6.0006
51	2.60	6.20	1.38945	7.3148
54	2.60	10.00	1.55600	7.3148
57	2.90	10.00	1.83887	8.0761
60	2.90	10.00	2.20423	8.9168
63	3.40	10.00	2.64942	8.9168
66	3.50	12.10	3.18974	9.8449
69	4.30	9.10	3.98459	10.8696
72	5.50	12.10	5.19323	12.0010
75	6.70	12.90	6.51603	13.2502
78	8.30	12.90	7.29258	13.2502
81	5.20	11.40	6.96008	13.2502
84	7.70	12.90	6.00488	13.2502
87	6.70	12.10	5.05354	12.0010
90	6.30	12.90	4.20311	12.0010
93	5.20	12.10	3.24950	8.9168
96	4.80	12.10	2.49149	8.0761

Tabla 8. Datos Observados y Predecidos Boya 42003

HR-SIM	Datos Observados		Datos Predecidos - 1,5Hr		
	No	WVHT	DPD	WVHT	DPD
	1	2.70	8.30	0.48956	3.0003
	3	2.80	7.70	0.62528	3.0003
	6	2.70	9.10	0.77507	3.0003
	9	2.30	7.10	0.89912	3.3126
	12	1.80	6.70	0.95573	3.6574
	15	1.60	6.70	1.01671	4.0381
	18	1.50	6.20	1.07861	4.4584
	21	1.40	6.70	1.11648	4.9225
	24	1.50	7.10	1.05302	4.9225
	27	1.50	6.70	0.97911	6.0006
	30	1.40	6.70	0.87828	6.0006
	33	1.10	5.60	0.78813	6.0006
	36	1.10	6.20	0.71694	6.0006
	39	1.20	5.60	0.65872	6.0006
	42	1.10	6.20	0.60476	6.0006
	45	1.00	5.60	0.55854	5.4349
	48	1.10	5.60	0.51892	5.4349
	51	1.10	5.60	0.48920	5.4349
	54	1.40	5.00	0.47353	4.9225
	57	1.70	5.60	0.46437	4.9225
	60	1.80	6.20	0.45181	6.0006
	63	1.80	6.70	0.44516	6.0006

66	1.80	6.20	0.50209	6.0006
69	2.00	7.10	0.73334	5.4349
72	2.50	7.10	1.14229	5.4349
75	2.70	7.70	1.76855	6.0006
78	3.50	8.30	2.70485	7.3148
81	5.30	8.30	4.15234	14.6294
84	6.30	12.90	6.16718	14.6294
87	6.90	10.00	8.10843	14.6294
90	5.30	11.40	9.05341	14.6294
93	5.40	11.40	8.29100	14.6294
96	4.60	10.80	6.57516	13.2502

6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD DEL HURACÁN OPAL

El análisis de sensibilidad realizado, tiene el propósito de verificar que paso de tiempo resulta mas conveniente en la ejecución del modelo de olas SWAN ,el cual se alimenta , con los campos de vientos que genera, el modelo HURWIN de huracanes, se seleccionaron pasos de tiempos de 15min 1,5 hrs y 3 hrs, obteniéndose para cada caso ,resultados de altura de ola significativa que al ser graficados, mostraron que con 1,5 hrs, se generan campos espectrales de olas, que presentan alturas con un buen grado de aproximación a las obtenidas con los datos provenientes de la boyas 42001 y 42003 (ver figuras 15 y 16).

Los campos de viento que alimentan al modelo SWAN son dados cada 6 horas, como el paso de tiempo es menor el modelo interpola entre cada matriz. Estas interpolaciones, solo se detienen cuando expira o finaliza una nueva matriz, si este intervalo de tiempo es muy grande el numero de interpolaciones es mayor y los resultados que se generan para el espectro de olas pueden resultar poco precisos. SWAN, en la generación de sus mallas utiliza interpolación bilineal en el espacio e interpolación lineal en el tiempo [Wornom et al, 2002],

Las interpolaciones tienen un fin claro: predecir un valor a partir de una serie de datos [Triana, 1997], la interpolación bilineal es de amplio uso en modelos de digitalización de imágenes, las cuales se obtienen por la generación de puntos o píxeles a partir de interpolación bilineal, quedando representada la superficie del terreno, en una malla de resolución que es almacenada en la memoria de las computadoras en una estructura de datos previamente seleccionada. La interpolación lineal permite predecir dentro de un rango de valores un valor desconocido el cual se aproxima convenientemente como parte de la colección de datos empíricos

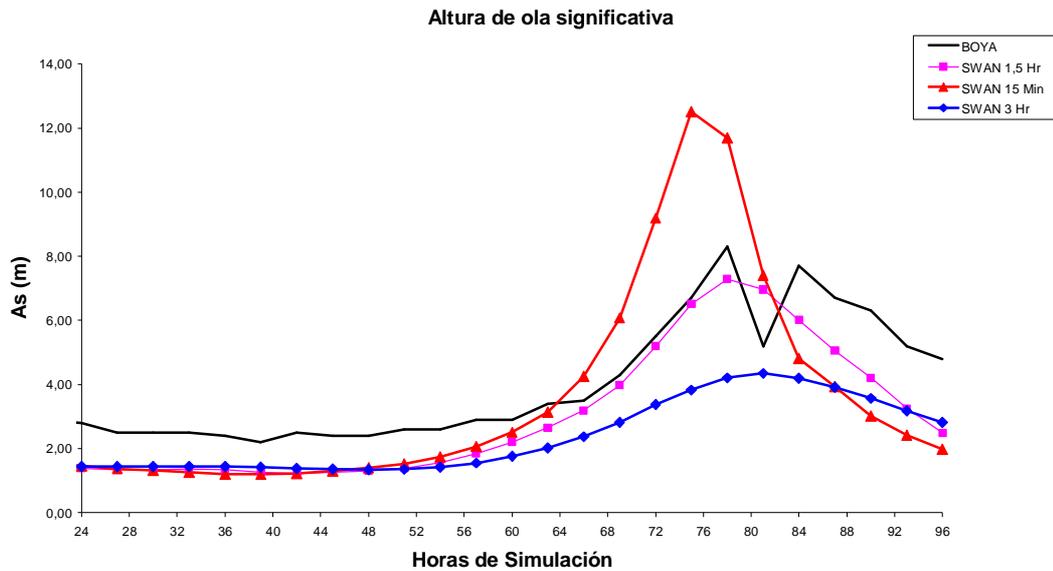


Figura 15. Análisis de sensibilidad Boya 42001

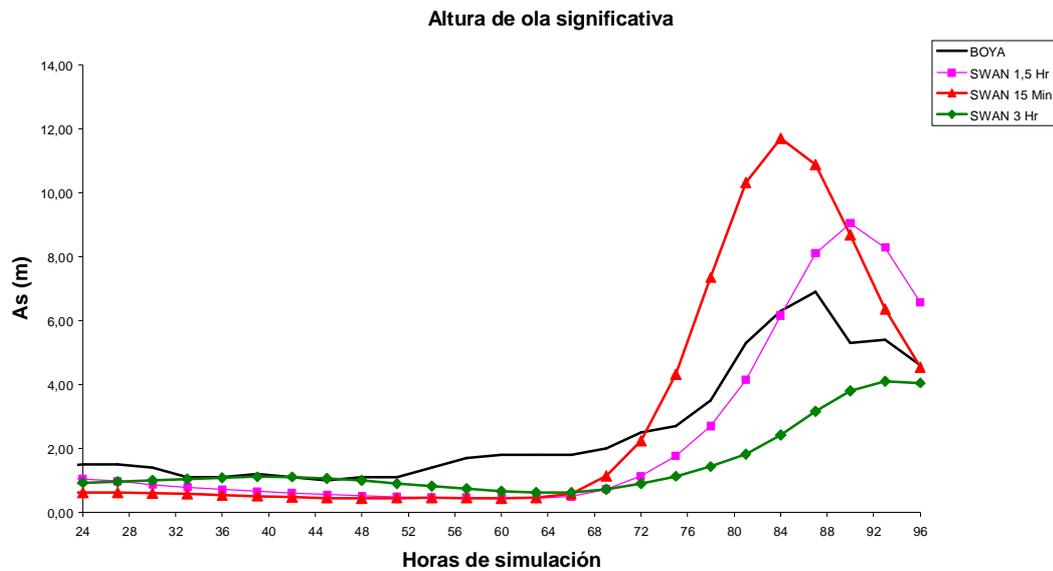


Figura 16. Análisis de sensibilidad Boya 42003

6.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS DATOS OBSERVADOS Y PREDECIDOS DEL HURACÁN OPAL.

6.2.1 Altura de ola significativa. La grafica de altura de ola significativa para la estación 42001(Ver figura 17), muestra que los resultados del modelo subestiman los datos observados, entre la hora 24 y la hora 65 de simulación, este comportamiento se presenta porque el modelo de olas no trabaja con las especificaciones locales de vientos, la curva que representa los datos medidos por la estación 42001, en este mismo intervalo de tiempo, dan a entender que el radio de influencia del ojo del huracán todavía esta distante, se puede también

observar que desde la hora 68 hasta la hora 78 aproximadamente, el incremento en la altura de la ola es significativo encontrándose la boya 42001 en el radio de influencia del ojo del huracán, este comportamiento es aproximado correctamente por el modelo SWAN, mostrando una gran coincidencia en las aproximaciones con los datos medidos.

En la curva que representa a los datos medidos por la estación 42001, en el intervalo de tiempo de 78 a 86 horas aproximadamente se encuentra una caída abrupta en las mediciones motivadas posiblemente por fallas en los sensores o en los dispositivos de lectura. De acuerdo al modelo la altura significativa máxima, en el punto de la boya, fue de 7.3 metros.

La grafica de altura de ola significativa de la estación 42003 (Ver Figura 18), en el intervalo de tiempo, de 24 Horas hasta 65 Horas , muestra el mismo intervalo de datos subestimados que la boya anterior, a partir de la hora 66, se observa una convergencia de los datos predecidos por el modelo con los datos medidos por la boya, en el intervalo de tiempo que va desde la hora 84 hasta la hora 96, se observa un desfase en ambas curvas, esta vez en la altura de ola predecida, con la altura de ola medida, en 2 metros aproximadamente, sin embargo, este error se puede considerar muy bajo, comparado con las dimensiones del huracán que puede llegar a generar olas descomunales.

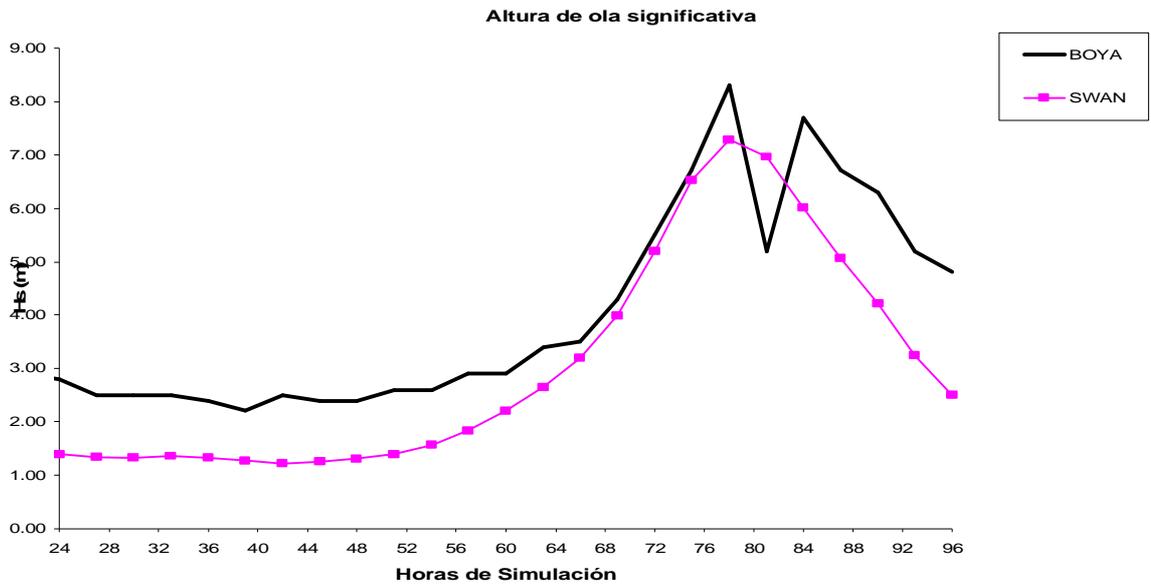


Figura 17. Altura de Ola Significativa – Boya 42001

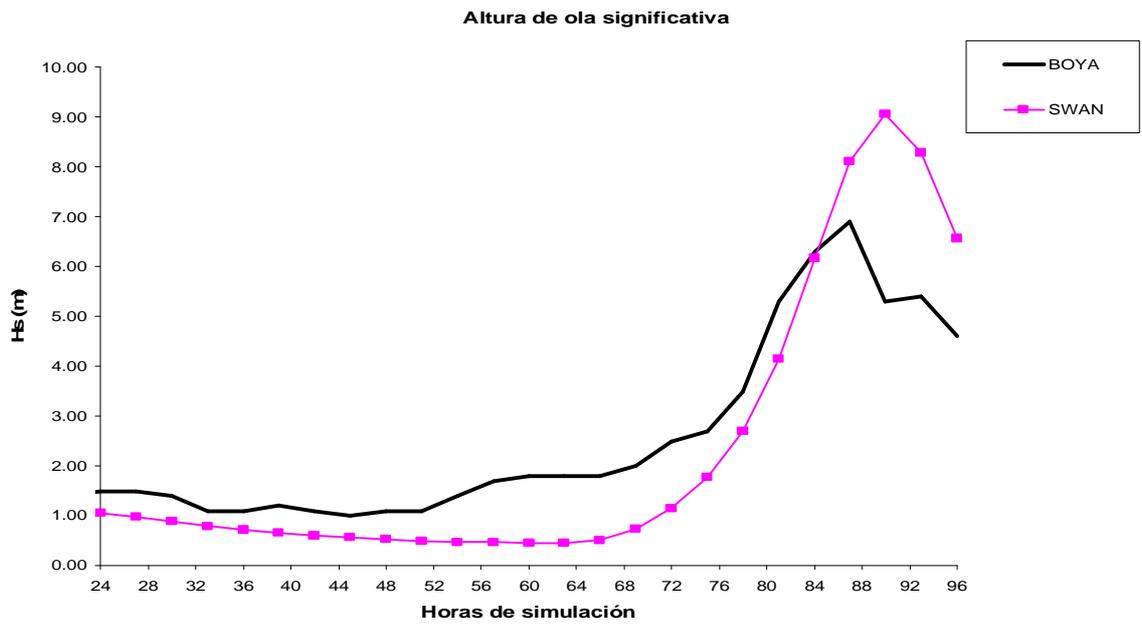


Figura 18. Altura de Ola Significativa – Boya 42003

6.2.2 Periodo pico de ola. El periodo pico de ola predecido por el modelo, para la estación 42001, en el intervalo de tiempo que va desde las 28 hasta las 48 horas presenta un comportamiento constante de sus valores (Ver figura 19) , esto nos lleva a concluir que el oleaje mantiene su frecuencia encentrándose fuera de la influencia del campo de vientos del huracán, este análisis coincide con los valores de período medidos por la boya, que en la grafica, presenta este mismo comportamiento, la frecuencia varia posteriormente en forma ascendente, tanto en la curva de los datos predecidos como en la curva de los datos medidos, en donde muestra una buena convergencia hasta el intervalo de tiempo que va de las 72 hasta las 78 horas aproximadamente, en este momento el campo de vientos del huracán ejerce su influencia, llevando la frecuencia del oleaje a su valor máximo el cual se estabiliza en 13 segundos aproximadamente.

El periodo pico de ola para la estación 42003, presenta en la grafica (Ver Figura 20), un comportamiento similar tanto en la curva de los datos predecidos como en la curva de datos medidos por la boya, las predicciones del modelo para el periodo pico de ola son muy buenas en el intervalo de tiempo que va desde las 28 hasta las 52 horas, manteniéndose el período, en ambos casos, estable en un periodo de 5 segundos, indicando con esto que el ojo del huracán se encuentra todavía distante del punto de localización de la boya, en el intervalo de tiempo comprendido entre las 54 y 84 horas aproximadamente, el campo de vientos del

huracán ejerce su máxima influencia trayendo como consecuencia que la frecuencia del oleaje aumente hasta alcanzar su valor máximo, dato que la boya registra en 13 segundos y el modelo calcula en 15 segundos aproximadamente, considerándose este valor una buena estimación, del valor real reportado por la estación 42003.

Es importante señalar que los dos parámetros más importantes en el estudio del oleaje son la altura significativa que relaciona directamente la energía que conduce la ola y el período pico, que permite identificar el tipo de oleaje que llega a un lugar determinado.

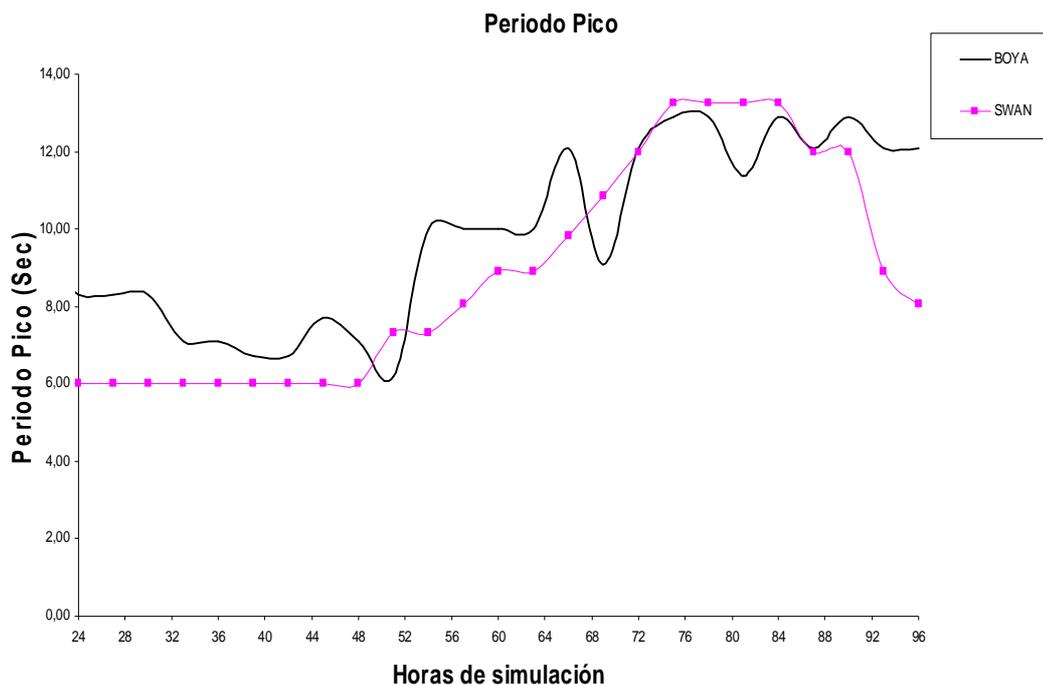


Figura 19 . Periodo Pico – Boya 42001

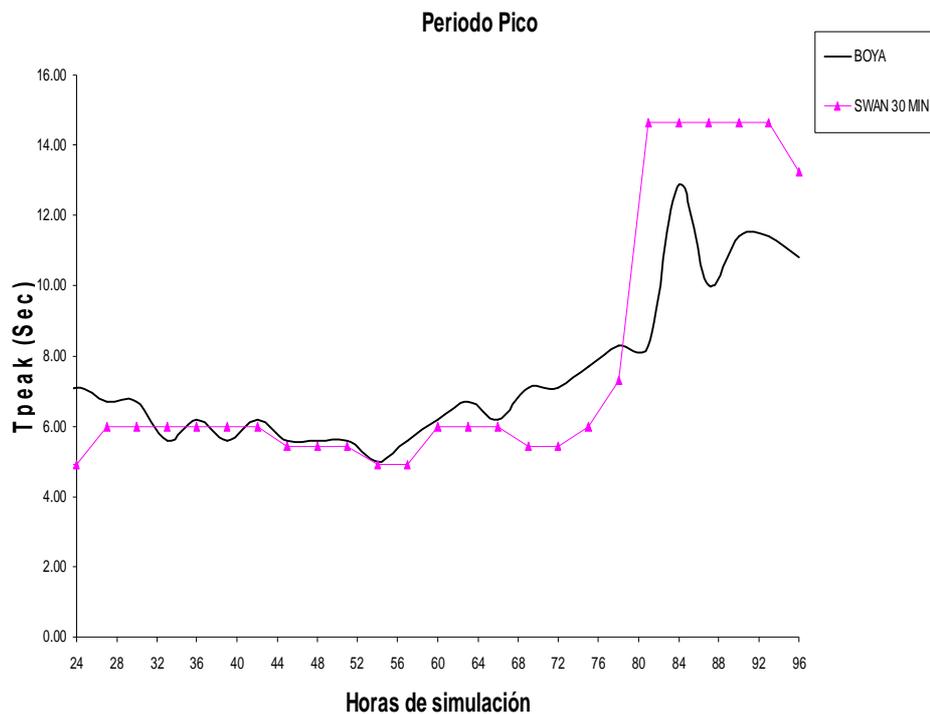


Figura 20. Periodo Pico – Boya 42003

6.3 ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES ESTADÍSTICOS

Los datos aproximados y medidos, serán confrontados usando dos índices estadísticos usados especialmente para este tipo de simulaciones, utilizaremos el índice de Willmott y el *bias* (tendencia).

El índice Willmott, es muy sensible a los errores generados en una simulación [Wornon et al 2002], cuando el valor del índice es cercano a cero se tiene una

discrepancia alta en los datos predecidos, si el valor del índice es cercano a uno las aproximaciones son buenas, el índice Willmott se expresa como:

$$D = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (P_n - O_n)^2}{\sum_{n=1}^N (|P_n - O| + |O_n - O|)^2}$$

Donde:

P_n = Valores predecidos

O_n = valores observados

O = promedio de los valores

Si el cálculo del índice *bias*, es igual a cero se dice que se tiene una buena aproximación de los resultados del modelo, un índice *bias* negativo indica que el modelo subestima los datos observados en un porcentaje equivalente al valor del índice o por el contrario lo sobre estima en ese mismo porcentaje, el índice *bias* es calculado usando la siguiente formula:

$$bias = \frac{\sum_1^n (P_n - O_n)}{\sum_1^N O_n}$$

Los índices de Willmott, calculados, con los datos predecidos por el modelo SWAN y los datos medidos por la estación 42001, es cercano a uno, para la altura

de ola significativa y el periodo pico de ola, lo cual indica que los datos estimados, no distan mucho de las mediciones realizadas por la boya, considerándose los resultados del modelo como una buena aproximación de los datos reales.

Los índices *bias* de la boya 42001, indica que los datos predecidos por el modelo SWAN, se encuentran por debajo de los datos reales en un 31% para la altura de ola significativa y en un 19.4% para el periodo pico de ola, aunque el porcentaje pareciera alto, hay que tener en cuenta que una parte de la serie de tiempo, donde se subestima el oleaje por el modelo, influye mucho en los mismos, más sin embargo en el período en que el oleaje entró al área geográfica de las boyas el modelo y los datos son consistentes.

Los índices de Willmott, calculados, para la altura de ola significativa, y el periodo pico de ola, con los datos predecidos por el modelo SWAN y los datos medidos por la estación 42003, también son muy cercanos a uno, indicando, una buena aproximación de los datos predecidos a los datos medidos por la boya, para mayor información ver anexos del documento.

Los índices *bias* de la boya 42003, para la altura de ola significativa y periodo pico de ola, indican que los resultados arrojados por el modelo se encuentran por debajo de los valores observados, en un 20.3% y 9% respectivamente.

6.4. ANÁLISIS DEL CAMPO DE VIENTOS DEL MODELO HURWIN PARA EL HURACÁN OPAL

Una forma de observar como genera el campo de oleaje el modelo HURWIN, es analizando la figura 21. Aquí se puede observar la estructura del campo de vientos generado por el modelo: una región de cero vientos en el centro del ojo, los vientos más intensos en la pared del ojo y el decaimiento de los mismos en zonas alejadas del ojo.

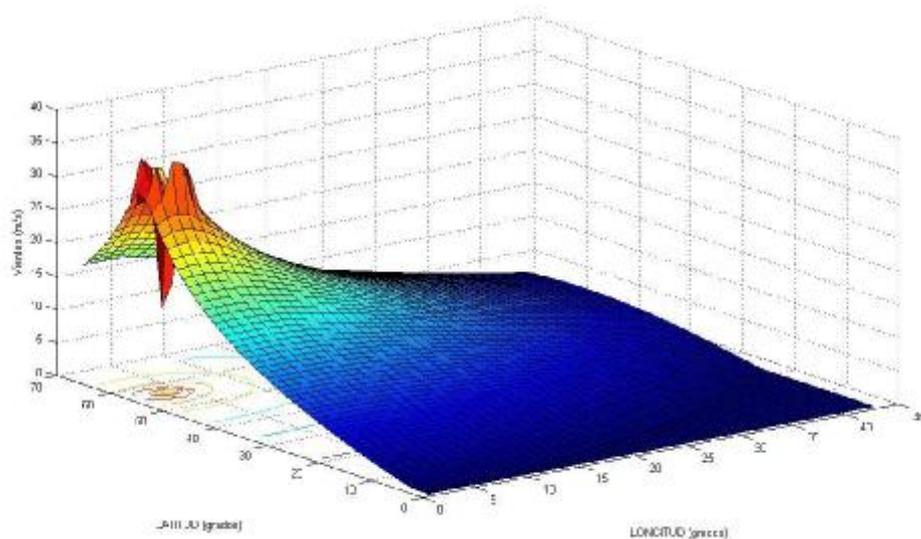
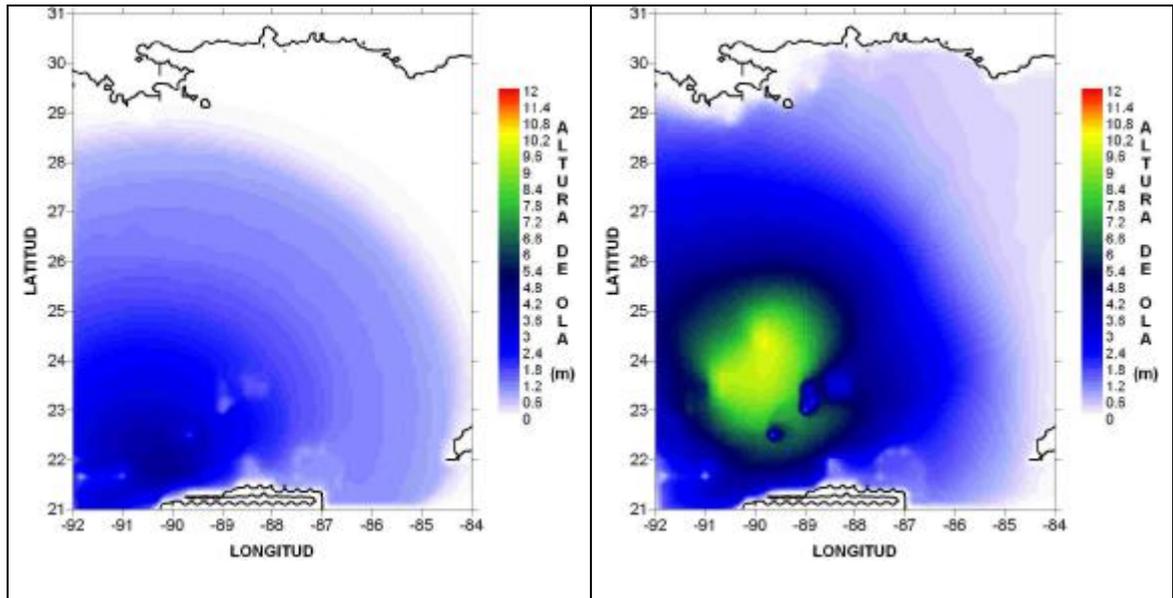


Figura 21. Campos de vientos del modelo HURWIN para el huracán OPAL.

6.5. ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS DE LOS CAMPOS DE OLAS DEL MODELO SWAN PARA EL HURACÁN OPAL

En la figura 22 se muestra la evolución del campo de olas generado por el huracán OPAL durante su travesía por el Golfo de México. Se puede observar como poco a poco las condiciones marítimas se van deteriorando en el área de simulación. Olas de hasta 12 metros fueron obtenidas por el modelo en la región cercana al ojo. También se observa un sistema de oleaje bien formado debido a la organización típica de un huracán categoría 4.



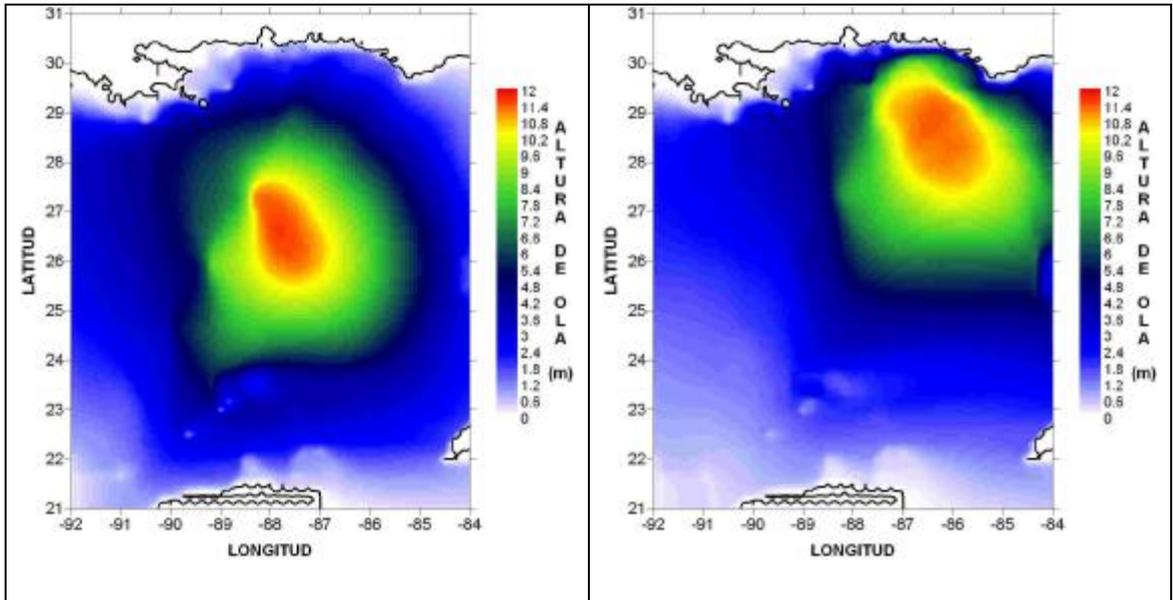


Figura 22. Graficas de los campos de olas del modelo SWAN para el huracán OPAL.

6.6. MALLA COMPUTACIONAL JOAN

La malla computacional sobre la que corren los modelos HURWIN y SWAN, para el huracán JOAN, se extiende desde los 70° Oeste hasta los 78° Oeste y desde los 8° Norte hasta los 15° Norte, (Ver Figura 23). La malla computacional viene definida de la siguiente forma:

1. La localización geográfica del origen de la malla computacional en el eje X del sistema de coordenadas es 78°.

2. La localización geográfica del origen de la malla computacional en el eje Y del sistema de coordenadas es 8° .
3. Resolución de la malla en latitud y longitud es de $0,166667$ grados



Figura 23. Malla Computacional para JOAN

6.7. UBICACIÓN DE LAS BOYAS VIRTUALES PARA JOAN

Una de los problemas que presenta la costa norte colombiana y el caribe en general, es la ausencia de boyas que registren los datos de los huracanes que se forman, cerca de nuestras latitudes, luego de verificar la precisión de los modelos

HURWIN y SWAN con el huracán OPAL, procedemos a la simulación del huracán JOAN utilizando un conjunto de boyas virtuales, ubicadas a lo largo de la costa caribe colombiana de la siguiente forma:

- Boya GUA1 (Guajira) – Ubicación 70.9° Oeste 12° Norte
- Boya GUA2 (Guajira) – Ubicación 71.98° Oeste 12.46° Norte
- Boya STM1 (Santa Marta) – Ubicación 74.33° Oeste 11.36° Norte
- Boya BAQ1 (Barranquilla) – Ubicación 74.98° Oeste 11.13° Norte
- Boya CTG1 (Cartagena) – Ubicación 75.68° Oeste 10.43° Norte
- Boya GMOR1 (Golfo de Morrosquillo)–Ubicación 75.93° Oeste 9.63° Norte
- Boya GUR1 (Golfo de Urabá) – Ubicación 77.12° Oeste 8.77° Norte



Figura 24. Ubicación de las boyas Virtuales JOAN

Las latitudes para la ubicación de las boyas son tomadas de Google Earth, encontrándose encerradas dentro de la malla computacional definida para el modelo HURWIN y SWAN. Los datos de batimetría usados en las simulaciones, para correr el modelo SWAN de olas y que definen las características de la costa caribe Colombiana, son tomados de ETOPO2.

6.8. ANALISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL HURACÁN JOAN

6.8.1. Análisis del campo de olas del huracán JOAN. En la figura 25 se muestra la evolución del campo de olas generado por el huracán JOAN durante su paso por el Caribe Colombiano. Un sistema no muy definido de oleaje atraviesa casi toda la costa durante su paso, precisamente debido a que el sistema en ese momento era una tormenta tropical, donde los vientos no tienen una estructura fuertemente definida. Aquí no se generaron olas mayores a los 5 metros cerca de la pared del ojo.

Sin embargo se observa luego una reorganización del campo de oleaje a medida que se aleja el sistema de la malla computacional. Se incrementa el oleaje hasta alcanzar, incluso, 10 metros de altura. Esta situación coincide perfectamente con el hecho que la tormenta se ha convertido en huracán y ha encontrado aguas más

cálidas que han intensificado su poder. Esto hace que se incremente el oleaje de fondo para el área de Urabá.

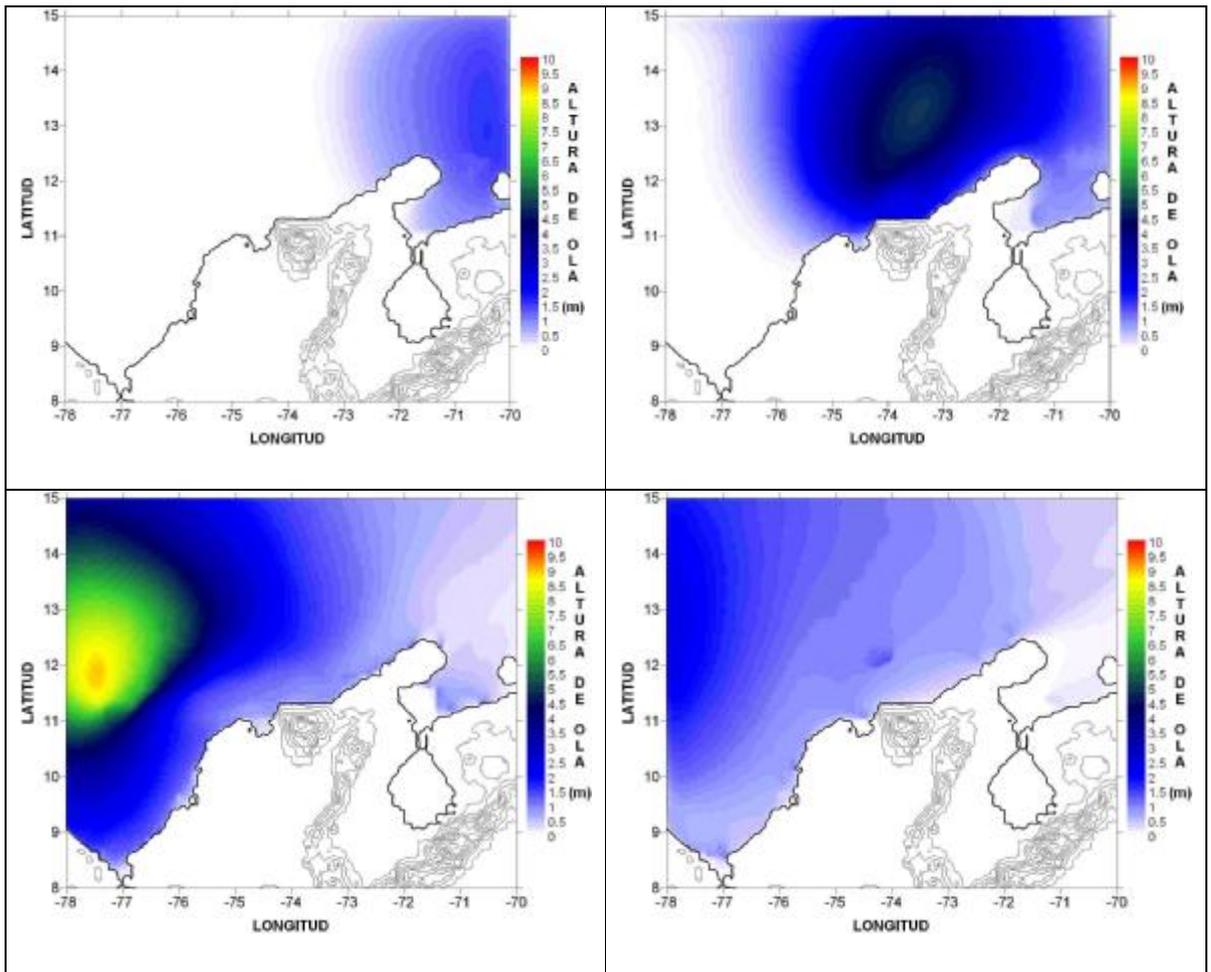


Figura 25. Graficas de los campos de olas del modelo SWAN para el huracán JOAN.

De las graficas realizadas para cada una de las ubicaciones de las boyas se encuentra que el impacto más fuerte del huracán JOAN en la Costa Caribe Colombiana, se registro en la península de la Guajira, en donde se obtuvieron olas

de 2 y 3 m de altura con períodos comprendidos entre 4 y 8 seg, en este lugar JOAN alcanzo la categoría de tormenta tropical. Similar comportamiento, se presentó en Santa Marta y Barranquilla con olas cercanas a los tres metros, pero con un periodo pico de ola, mas amplio que en la guajira, en Cartagena, se observa una disminución del fenómeno, en cuanto a su oleaje, se registraron alturas menores a 2 metros aunque su frecuencia fue amplia, en el golfo de Morrosquillo su efecto disminuye aun mas con olas menores a un metro ,presentado también, frecuencias de oleaje bastante amplias y al pasar por la región de Urabá se observa que retoma su fuerza, incrementándose gradualmente la altura de ola significativa y presentado los periodos picos de olas mas altos, en todo su recorrido, por nuestra costa caribe.

Boya GUA1 (Guajira) – Ubicación 70.9° Oeste 12° Norte

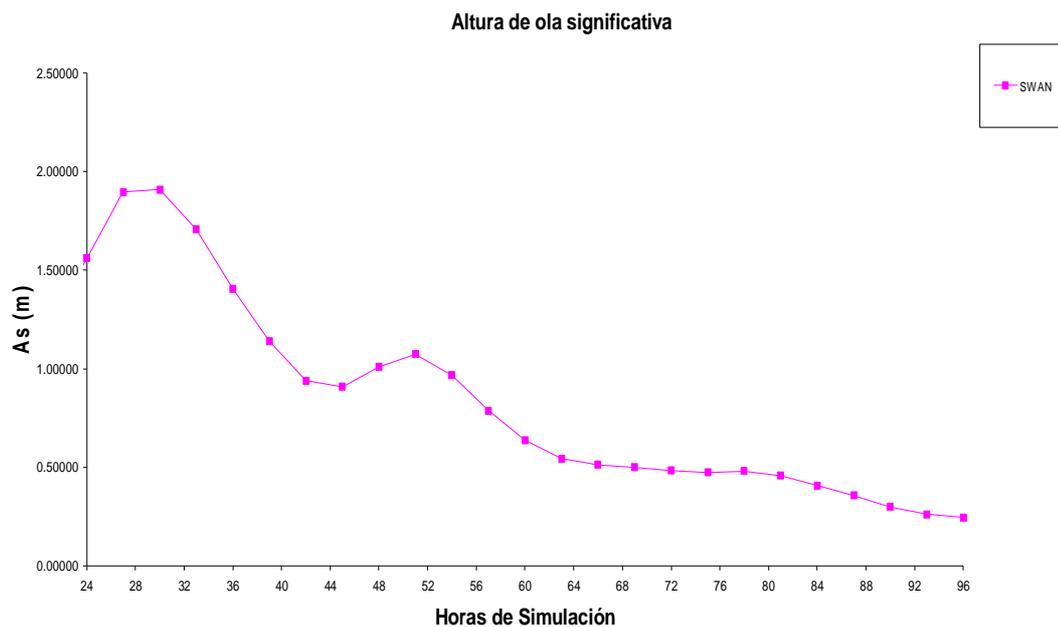


Figura 26. Altura de ola significativa Boya GUA1 (Guajira)

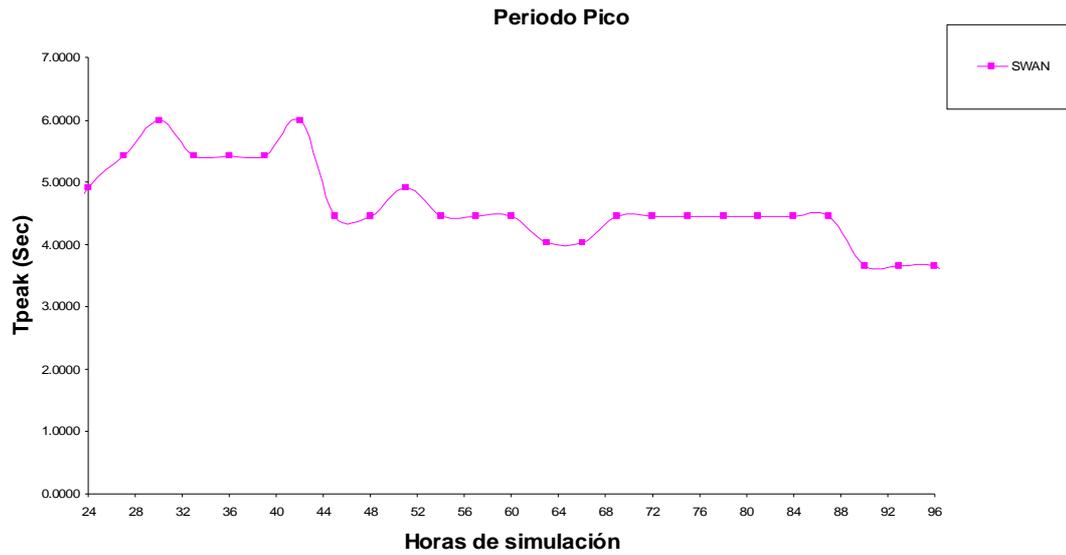


Figura 27. Periodo Pico Boya GUA1 (Guajira)

Boya GUA2 (Guajira) – Ubicación 71.98° Oeste 12.46° Norte

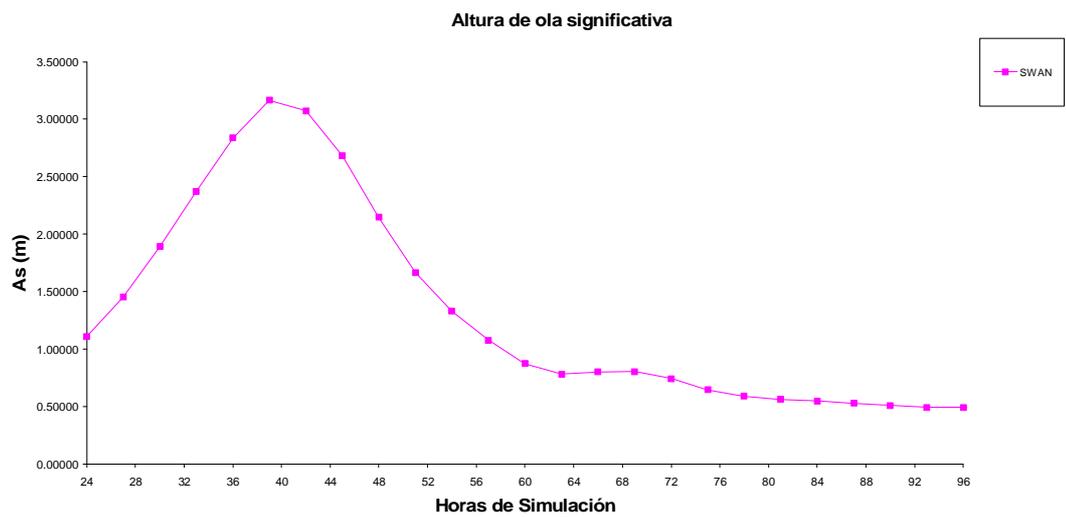


Figura 28. Altura de ola significativa Boya GUA2 (Guajira)

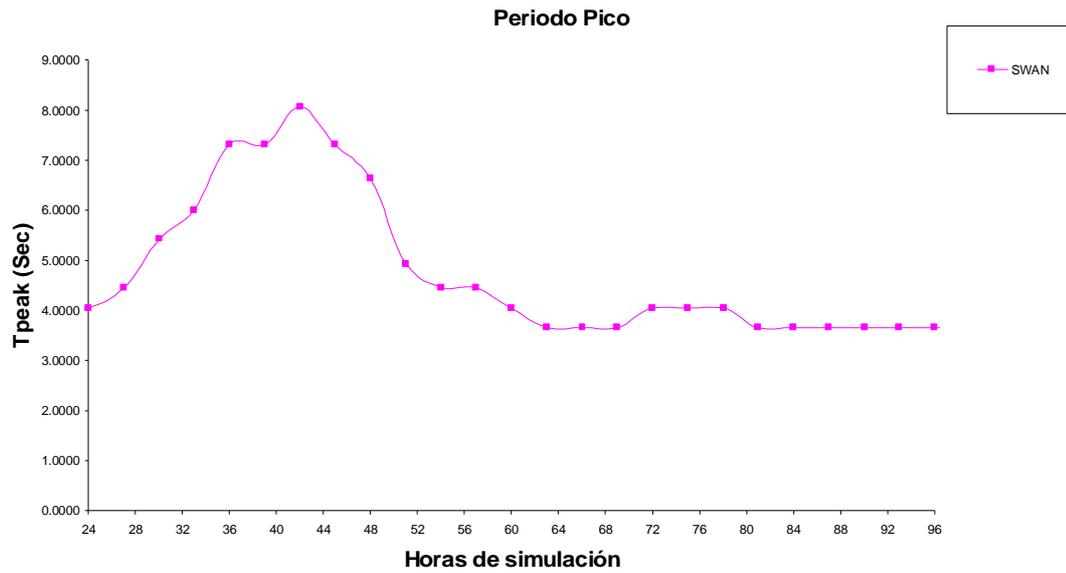


Figura 29. Periodo Pico de ola- Boya GUA2 (Guajira)

Boya STM1 (Santa Marta) – Ubicación 74.33° Oeste 11.36° Norte

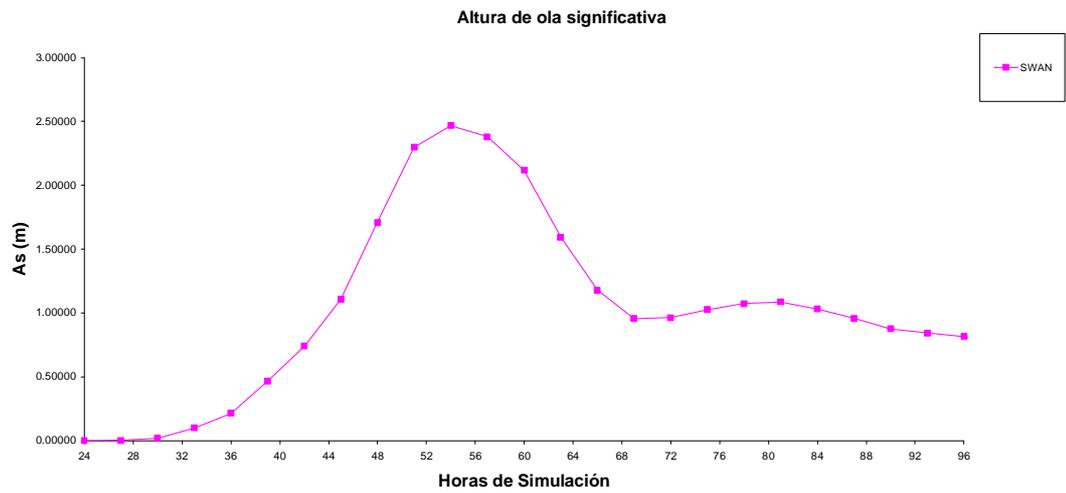


Figura 30. Altura de ola significativa- Boya STM1 (Santa Marta)

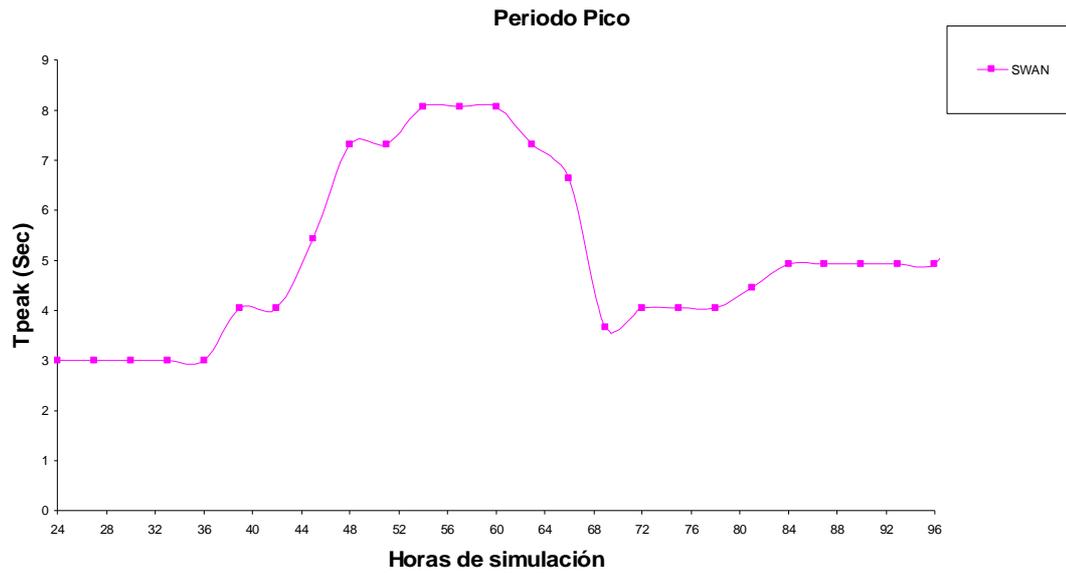


Figura 31. Periodo Pico de ola- Boya STM1 (Santa Marta)

Boya BAQ1 (Barranquilla) – Ubicación 74.98° Oeste 11.13° Norte

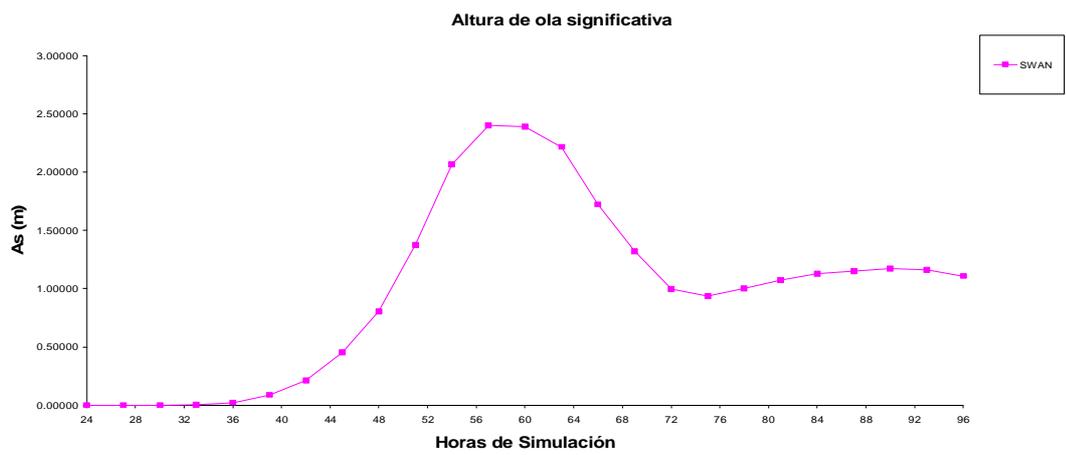


Figura 32. Altura de ola significativa- Boya BAQ1 (Barranquilla)

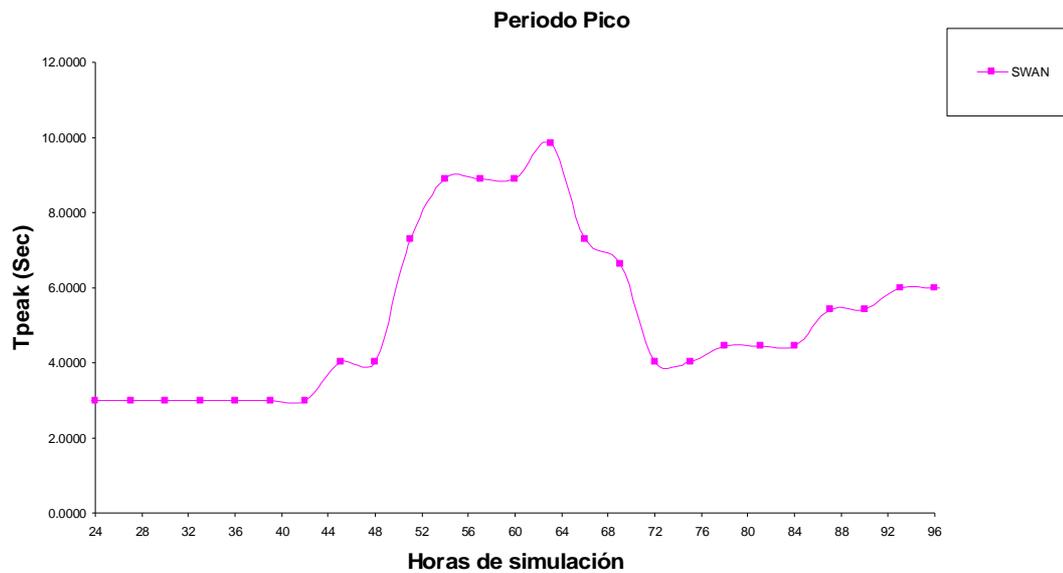


Figura 33. Periodo Pico de ola- Boya BAQ1 (Barranquilla)

Boya CTG1 (Cartagena) – Ubicación 75.68° Oeste 10.43° Norte



Figura 34. Altura de ola significativa- Boya CTG1 (Cartagena)

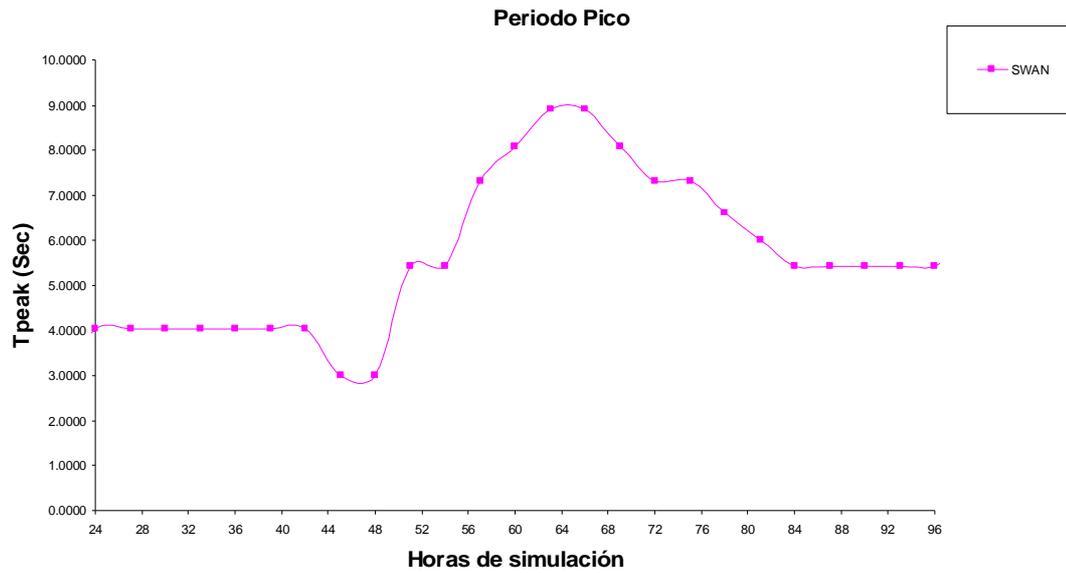


Figura 35. Periodo Pico de ola- Boya CTG1 (Cartagena)

Boya GMOR1 (Golfo de Morrosquillo) – Ubicación 75.93° Oeste 9.63° Norte



Figura 36. Altura de ola significativa- Boya GMOR1 (Golfo de Morrosquillo)

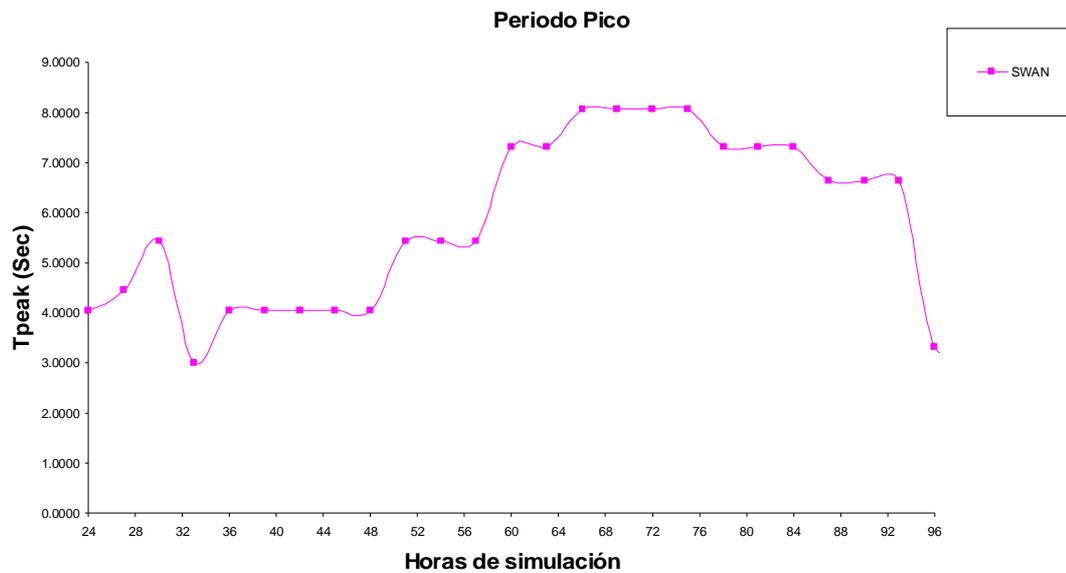


Figura 37. Periodo Pico de ola- Boya GMOR1 (Golfo de Morrosquillo)

Boya GUR1 (Golfo de Urabá) – Ubicación 77.12° Oeste 8.77° Norte

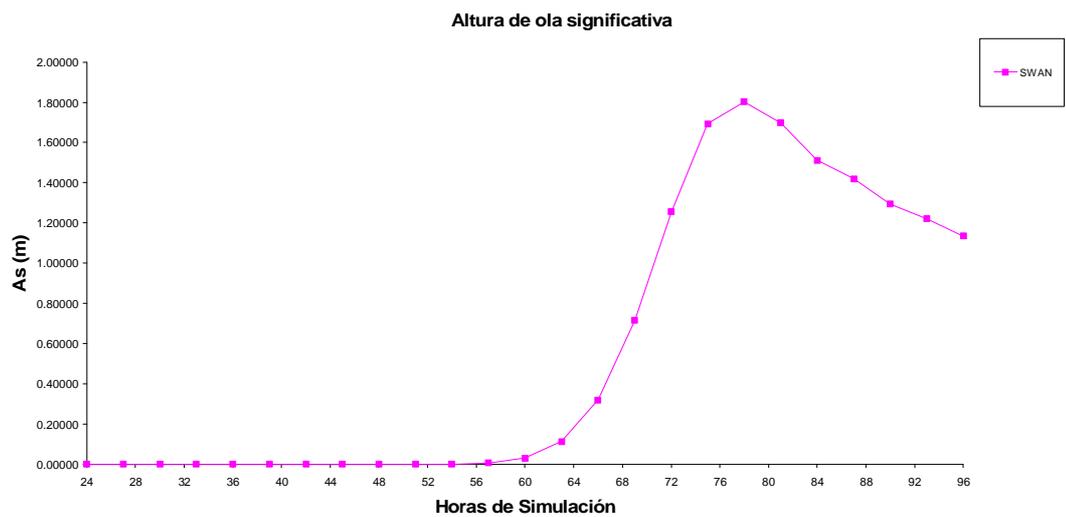


Figura 38. Atura de ola significativa- Boya GUR1 (Golfo de Uraba)

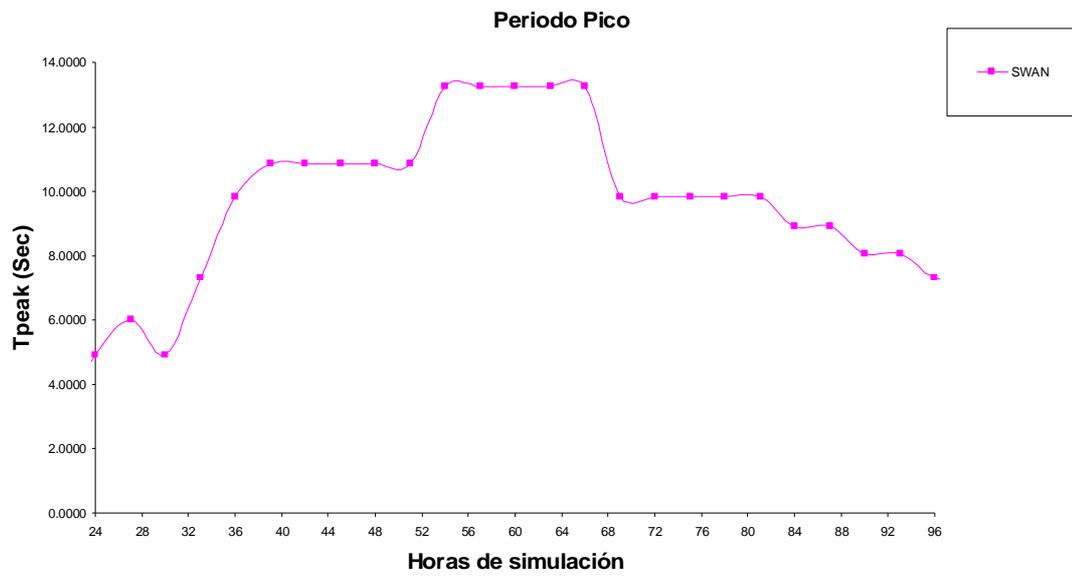


Figura 39. Periodo pico de ola- Boya GUR1 (Golfo de Uraba)

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la aplicabilidad del modelo HURWIN y SWAN a escalas oceánicas para el estudio de huracanes. Los modelos fueron validados positivamente con el huracán OPAL en el Golfo de México, donde los resultados fueron consistentes con los datos medidos por las boyas de la NOAA. Este procedimiento nos permitió obtener un estimado del impacto del huracán JOAN sobre la costa Colombiana durante su paso en Octubre de 1988.

Algunos resultados específicos obtenidos del presente trabajo son resumidos como sigue:

1. Inconsistencias entre los resultados de los modelos y los datos experimentales de las boyas pueden explicarse por las siguientes razones: (1) oleaje de viento local que no fue simulado por el modelo, pudo estar presente durante el tiempo que los instrumentos tomaron los datos. (2) Los modelos espectrales aún adolecen de una buena parametrización para los procesos no lineales.
2. Aunque JOAN, durante su paso por la Costa Colombiana era una tormenta tropical, alcanzó a generar olas de hasta 5 metros en las regiones cercanas al ojo.

3. Las áreas de la costa potencialmente más afectadas por el oleaje generado por JOAN fueron la península de la Guajira y el Golfo de Urabá con olas de 3.3 metros en aguas profundas cercanas a la línea costera.
4. En las costas cercanas a Santa Marta, Barranquilla y Cartagena se obtuvieron olas de mar profundo de no más de 2.4 metros. Esto debido a la configuración de la línea costera de estas áreas que se encuentra más resguarda del paso de JOAN.
5. Las aguas cálidas cercanas a Panamá intensificaron los vientos de JOAN, lo que produjo un incremento del oleaje a partir de este punto, lo que puede sugerirnos que el oleaje generado en aguas cercanas a la Isla de San Andrés pudo ser importante. En este estudio el área de San Andrés no fue considerada, por no tener una batimetría definida en el momento de la simulación.
6. El análisis de sensibilidad sugiere 1,5 horas para el paso de tiempo del modelo SWAN.
7. De acuerdo a las demandas computacionales, podemos concluir que se hace necesario el uso de computadoras de alto rendimiento en procesamiento, memoria y almacenamiento de información.

8. La altura del oleaje simulada compara muy bien con la observada para el caso del huracán JOAN. Esto indica que estas técnicas de pronóstico podrían ser usadas para generar información valiosa en la planificación de operaciones marinas, así como también para el desarrollo de estructuras marítimas.

RECOMENDACIONES

1. Un análisis más detallado del impacto de este oleaje generado en aguas profundas y su propagación a la línea de costa se hace necesaria. Lo que a su vez hace necesario el levantamiento batimétrico de las zonas de más vulnerabilidad.
2. La utilización de estos modelos podría realizarse en otros lugares de interés para suministrar características de altura del oleaje, periodo y dirección requeridas para la planificación de actividades marinas.
3. Debido a que SWAN trabaja actualmente con una versión en paralelo, podría usarse esta ventaja del algoritmo, para su implementación en equipos que soporten este modo de operación, se ganaría en velocidad de proceso, y precisión en los resultados.
4. La implementación de estos modelos en plataformas computacionales de software de tercera generación (Java, C++), permitiría obtener mayor precisión en los cálculos y mejor manipulación grafica de los resultados.

REFERENCIAS

1. Ocampo,Torres, F. J., y P. W. Vachon, *Wind and wave fields under hurricane conditions as observed by SAR, CERSAT NEWS*, Special Issue No. 11, Ocean Winds, Sci. Topic No. 24, Nov. 2000.
2. Planeación cicese. *Trabajos de simulación de huracanes en América*, Informes, 1sem del 2003.
3. Gaztelumendi, S.,Director Área de meteorología EUVE, Copyright © 1998, Eusko Ikaskuntza
4. Cardone, V., Greenwood, C., Greenwood, J., 1992. *Unified program for the specification of hurricane boundary layer winds over surfaces of specified roughness*. Contract report CERC-92-1, US Army Engineering Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
5. Ortiz, J. C. 2003. *Oleaje en la costa norte de Puerto Rico: Simulación, Climatología y Pronóstico*. Tesis Ph.D. Universidad de Puerto Rico – Recinto de Mayagüez.
6. Von Erffa. *Procesos Costeros*, IDEAM, 1992

7. INVEMAR 2003. Programa Holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caril continental, Caribe insular y pacífico) y medidas para su adaptación. VII Tomos, resumen Ejecutivo y CD-Atlas digital. Programa de Investigación para la Gestión marina y Costera – GEZ. Santa Marta, Colombia.
8. INGEOMINAS 1997 e IDEAM 1997 En: INVEMAR, Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2003.
9. DIRECCION NACIONAL MARITIMA Y PORTUARIA (DIMAR). La calidad Ambiental, Marina y Costera en Colombia, Año.
10. Triana, Hervis. Matemática aplicada e Ingeniería, la Interpolación bilineal en la digitalización de imágenes, Noviembre 17, 1997.
11. Vilches, Jose. Evaluación de la exactitud de modelos de elevación digital (MED) de malla regular, generados a partir de curvas de nivel, Enero, 2000

12. Wornom, S., Welsh D. 2002: *An MPI quasi time-accurate approach for nearshore wave prediction using SWAN code. Part I.*, Coastal engineering Journal, **44**, 3, 247-256., Part II., Coastal engineering Journal, **44**, 3, 257-280.