

01159



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Verificación de un modelo de tercera generación para estimar  
oleaje en la vertiente atlántica mexicana

T E S I S

Como requisito para obtener el título de

Maestra en Ingeniería Civil  
(Hidráulica)

Presenta

DULCE MARÍA PÉREZ ROMERO

DIRECTOR DE TESIS

DR. RODOLFO SILVA CASARÍN



MÉXICO, D.F.

MAYO 2005

m343895



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Con amor para mi madre*

## *Agradecimientos*

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que siga egresando profesionistas comprometidos con el país.

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por la formación que recibí.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, su ayuda fue indispensable para realizar mis estudios de posgrado.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM por el apoyo para realizar mis estudios.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por su exitosa labor en la formación de recursos humanos.

A Puertos del Estado de España por haber proporcionado el modelo y la asesoría para su implementación. En particular quisiera expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. Juan Carlos Carretero, porque su disposición para transmitir sus conocimientos y sobre todo su paciencia para resolver mis dudas hicieron posible este trabajo.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín por su confianza y enseñanzas a lo largo de estos años que he formado parte de su grupo, y por despertar en mí el interés por la investigación.

Al Ing. Víctor Franco por su apoyo y consejos.

A ti Alberto, mi gran amor y motivación.

## ÍNDICE

<b>Índice</b>	<b>I</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>III</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>V</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>IX</b>
<i>Motivación del trabajo</i>	<i>IX</i>
<i>Objetivo de la tesis</i>	<i>XI</i>
<i>Organización de la tesis</i>	<i>XI</i>
<b>1 GOLFO DE MÉXICO</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Aspectos generales</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Importancia económica</i>	<i>1</i>
1.2.1 <i>Actividad petrolera</i>	<i>2</i>
1.2.2 <i>Actividad portuaria</i>	<i>2</i>
1.2.3 <i>Actividad turística</i>	<i>4</i>
1.2.4 <i>Actividad pesquera</i>	<i>4</i>
1.3 <i>Ocurrencia de fenómenos meteorológicos</i>	<i>4</i>
1.3.1 <i>Huracanes</i>	<i>4</i>
<b>2 ANÁLISIS ESPECTRAL DEL OLEAJE</b>	<b>9</b>
2.1 <i>Introducción</i>	<i>9</i>
2.2 <i>Espectro unidimensional</i>	<i>9</i>
2.2.1 <i>Parámetros espectrales</i>	<i>11</i>
2.2.2 <i>Modelos espectrales</i>	<i>14</i>
2.3 <i>Espectro direccional</i>	<i>18</i>
<b>3 VIENTO Y OLEAJE</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Introducción</i>	<i>23</i>
3.2 <i>Generación de oleaje por la acción del viento</i>	<i>23</i>
3.2.1 <i>Parametrización del flujo de cantidad de movimiento</i>	<i>24</i>
3.2.2 <i>Edad del oleaje</i>	<i>26</i>
<b>4 MODELOS DE GENERACIÓN DE OLEAJE</b>	<b>31</b>
4.1 <i>Antecedentes</i>	<i>31</i>
4.2 <i>Modelo WAM</i>	<i>32</i>
4.2.1 <i>Aporte del viento</i>	<i>33</i>
4.2.2 <i>Interacciones no lineales</i>	<i>34</i>
4.2.3 <i>Disipación de energía</i>	<i>34</i>

4.2.4	Extensión para aguas someras	35
4.3	<i>Estadística para la validación de modelos</i>	36
<b>5</b>	<b>CASOS DE APLICACIÓN</b>	<b>41</b>
5.1	<i>Huracán GILBERTO (1988)</i>	45
5.1.1	Generalidades	45
5.1.2	Verificación del campo de vientos	45
5.1.3	Validación de resultados	46
5.1.4	Distribuciones espaciales	48
5.2	<i>Huracán MITCH (1998)</i>	50
5.2.1	Generalidades	50
5.2.2	Verificación del campo de vientos	50
5.2.3	Validación de resultados	51
5.2.4	Distribuciones espaciales	53
5.3	<i>Huracán ISIDORE (2002)</i>	56
5.3.1	Generalidades	56
5.3.2	Verificación del campo de vientos	57
5.3.3	Validación de resultados	57
5.3.4	Distribuciones espaciales	59
5.4	<i>Comentarios</i>	60
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>65</b>
	<i>Futuras líneas de investigación</i>	66
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL DEL MODELO WAM</b>	<b>77</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1 Puertos mexicanos en el Golfo de México, SCT Anuario 2003.	3
Tabla 1-2 Obras de protección en los puertos del Golfo de México, SCT Anuario 2003.	3
Tabla 1-3 Manejo de carga en toneladas, SCT Anuario 2003.	3
Tabla 1-4 Escala Saffir-Simpson	5
Tabla 4-1 Parámetros estadísticos para la validación, tomados de Bolaños (2004)	37
Tabla 5-1 Localización de las boyas utilizadas para la validación del modelo	43
Tabla 5-2 Errores calculados para la velocidad de viento al paso del huracán <i>Gilberto</i>	46
Tabla 5-3 Errores calculados para la altura de ola significativa y periodo medio al paso del huracán <i>Gilberto</i>	48
Tabla 5-4 Errores calculados para la velocidad de viento al paso del huracán <i>Mitch</i>	51
Tabla 5-5 Errores calculados para la altura de ola significativa y periodo medio al paso del huracán <i>Mitch</i>	53
Tabla 5-6 Errores calculados para la velocidad de viento al paso del huracán <i>Isidore</i>	57
Tabla 5-7 Errores calculados para la altura de ola significativa y periodo medio al paso del huracán <i>Isidore</i>	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura i-1 Red Mareográfica de la Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR)	X
Figura i-2 Estaciones mareográficas del CICESE en el Pacífico mexicano	X
Figura 1-1 Golfo de México, tomado de Encarta 2003	1
Figura 1-2 Distribución de puertos y terminales marítimas en la República Mexicana	2
Figura 1-3 Trayectorias que los huracanes han presentado en los últimos 50 años en el Atlántico, el Pacífico y el Caribe (Silva et. al, 2002)	5
Figura 2-1 Estructura del oleaje aleatorio, Pierson et al.	9
Figura 2-2 Análisis de Fourier	10
Figura 2-3 Definición de $S^1(f)$ y $S^2(f)$ (Chakrabarti 1987). Tomado de CEM, (2001)	11
Figura 2-4 Comparación entre un espectro ancho y un espectro estrecho	12
Figura 3-1 Perfil de velocidad del viento. Tomado de CERC, (2003)	24
Figura 5-1 Batimetría obtenida de <i>BODC</i> con un minuto de resolución	41
Figura 5-2 Boyas propiedad del “ <i>Data Bouy Center</i> ” situadas en el Golfo de México	43
Figura 5-3 Malla con resolución de $\frac{1}{4}^\circ$ en latitud y longitud	44
Figura 5-4 Trayectoria del huracán <i>Gilberto</i> en la zona de estudio así como la localización del las boyas para la validación	45
Figura 5-5 Velocidad de viento medido y predicción del NCEP/NCAR, huracán <i>Gilberto</i>	46
Figura 5-6 Series de tiempo y predicción de altura de ola significativa $H_s$ , huracán <i>Gilberto</i>	47
Figura 5-7 Series de tiempo y predicción de periodo medio $T_m$ , huracán <i>Gilberto</i>	47
Figura 5-8 Campos de viento <i>NCEP/NCAR Reanalysis Project</i> al paso del huracán <i>Gilberto</i>	48
Figura 5-9 Distribuciones espaciales de altura de ola al paso del huracán <i>Gilberto</i>	49
Figura 5-10 Trayectoria del huracán <i>Mitch</i> en la zona de estudio así como la posición de la boyas para la validación	50
Figura 5-11 Velocidad de viento medido y predicción del NCEP/NCAR, huracán <i>Mitch</i>	51
Figura 5-12 Series de tiempo y predicción de altura de ola significativa $H_s$ , huracán <i>Mitch</i>	52
Figura 5-13 Series de tiempo y predicción de periodo medio $T_m$ , huracán <i>Mitch</i>	52
Figura 5-14 Campos de viento <i>NCEP/NCAR Reanalysis Project</i> al paso del huracán <i>Mitch</i>	54
Figura 5-15 Distribuciones espaciales de altura de ola al paso del huracán <i>Mitch</i>	55
Figura 5-16 Trayectoria del huracán <i>Isidore</i> y posición de las boyas para la validación	56
Figura 5-17 Velocidad de viento medido y predicción del NCEP/NCAR, huracán <i>Isidore</i>	57
Figura 5-18 Series de tiempo y predicción de altura de ola significativa $H_s$ , huracán <i>Isidore</i>	58
Figura 5-19 Series de tiempo y predicción de periodo medio $T_m$ , huracán <i>Isidore</i>	58
Figura 5-20 Campos de viento <i>NCEP/NCAR Reanalysis Project</i> al paso del huracán <i>Isidore</i>	59
Figura 5-21 Distribuciones espaciales de altura de ola al paso del huracán <i>Isidore</i>	60
Figura a-1 Diagrama de flujo del funcionamiento general del modelo <i>WAM</i>	79

$U_*$	Velocidad de fricción
$X_{mod}$	Valor estimado por el modelo
$X_{obs}$	Valor medio observado
$\alpha$	Parámetro
$\beta$	Función relacionada con el crecimiento exponencial del oleaje
$\varepsilon$	Anchura espectral función épsilon
$\phi$	Latitud
$\phi_{PM}$	Función de Pierson-Moskowitz
$\phi_J$	Factor de forma del espectro JONSWAP
$\eta_{rms}$	Variación cuadrática media de la superficie libre
$\eta(t)$	Variación de la superficie libre en el tiempo
$\kappa$	Constante de von Kármán
$\lambda$	Longitud
$\nu$	Anchura espectral
$\theta$	Dirección de propagación del oleaje
$\theta_D$	Refracción por la influencia del fondo
$\rho_a$	Densidad del aire
$\rho_w$	Densidad del agua de mar
$\sigma^2$	Varianza
$\tau$	Esfuerzo cortante en superficie
$\omega$	Frecuencia angular
$\Gamma$	Función gama

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Amplitud
$f$	Frecuencia
$f_p$	Frecuencia pico
$g$	Aceleración de la gravedad
$k$	Número de onda
$m_n$	Momento espectral de orden n
$m_0$	Momento espectral de orden cero
$t$	Tiempo
$x$	Longitud del fetch
$z$	Elevación sobre la superficie libre para medir la velocidad de viento
$z_{ch}$	Escala de rugosidad propuesta por Charnock para un estado de mar
$z_{ob}$	Escala de rugosidad para ondas capilares
$z_0$	Escala de rugosidad
$B$	BIAS
$C$	Celeridad de onda
$C_D$	Coefficiente de arrastre
$D$	Profundidad
$D(f, \theta)$	Función de dispersión angular
$E$	Energía total
$E_a$	Error medio absoluto
Edad	Edad del oleaje
$E_{rms}$	Media de la raíz cuadrada del error
$F$	Función de densidad espectral
$Hm_0$	Altura de ola de momento de orden cero
$H_{rms}$	Altura de ola cuadrática media
$H_s$	Altura de ola significativa
$Q_p$	Agudeza de pico
$S$	Término fuente/sumidero
$SI$	Índice de dispersión
$S_{ds}$	Disipación de energía
$S_{in}$	Aporte del viento
$S_{nl}$	Interacciones no lineales entre componentes
$S^2(f)$	Espectro de energía simétrico al origen
$S(f)$	Función de densidad espectral
$S(f, \theta)$	Función de densidad espectral direccional
$T_m$	Periodo medio
$U$	Velocidad de viento
$U_{10}$	Velocidad de viento medida a 10m la superficie libre
$U(z)$	Velocidad de viento a una altura z sobre la superficie

# **INTRODUCCIÓN**

## Motivación del trabajo

México por estar limitado por el Océano Pacífico y el Golfo de México es un país con gran cantidad de recursos marítimos, sin embargo la forma en que se aprovechan está lejos de poder considerarse adecuada. Para que el uso de los recursos sea racional, rentable y sustentable es imprescindible contar con mecanismos de planeación y control basados en el conocimiento pleno de cada uno de los fenómenos naturales (físicos, químicos y biológicos) que ocurren en el océano.

Especial atención merecen los fenómenos hidrometeorológicos extremos, como son por ejemplo los huracanes, que por sus vientos intensos, oleaje de gran magnitud, precipitaciones y marea de tormenta, entre otros efectos, pueden llevar al límite la resistencia de la infraestructura y la seguridad de la población. La caracterización climática es una herramienta fundamental que permite entre otras cosas, evaluar los efectos de un fenómeno previamente a su incidencia.

La caracterización del clima marítimo de una zona requiere de dos actividades fundamentales: la medición en campo y la modelación numérica. En Ingeniería Marítima, la modelación del oleaje ha sido una de las principales líneas de investigación, gran parte de los esfuerzos se han orientado al desarrollo de modelos numéricos para reproducir la generación del oleaje por la acción del viento y su propagación hacia la costa. Dada la complejidad del estudio del oleaje, casi la totalidad de los modelos han optado por manejarlo como un fenómeno semi-aleatorio, mediante estadística y/o análisis espectral.

En las últimas décadas, el acelerado progreso de los sistemas de cómputo ha permitido el desarrollo de modelos de oleaje muy robustos, tal es el caso del *WAM (Wave Model)*, que es el último paso en el estado del arte de la predicción de oleaje generado por viento. Es ampliamente aceptado y utilizado a nivel mundial en todo tipo de actividades relacionadas con la predicción de oleaje, por ejemplo, en la determinación de rutas de navegación, planeación de las actividades costa afuera, protección civil, etc.

El nivel de caracterización del clima marítimo de México es deficiente, ya que la instrumentación disponible en las costas es escasa e inadecuada. Existe una red de mareógrafos importante operados por instituciones como la Secretaría de Marina Armada de México, el Instituto de Geofísica de la UNAM y el *CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada)* (ver Figura i-1 y Figura i-2), pero también se necesitan otros instrumentos, como boyas oceanográficas que permitan monitorear más variables, de tal forma que se disponga de información suficiente para las actividades normales y para la validación de los modelos numéricos que se implementen. A pesar del escenario descrito, no deben dejar de reconocerse los esfuerzos que hacen instituciones como el *CICESE*, que cuenta con una red importante de mareógrafos y otros instrumentos de medición de variables oceanográficas en las costas del Pacífico Mexicano, cuya información es abierta al público a través de su página de Internet. Por su parte la

UNAM actualmente realizar esfuerzos para rehabilitar la red mareográfica que tiene a su cargo.

En lo que respecta a la predicción de oleaje en nuestro país el panorama tampoco es alentador, ya que las predicciones hechas o al menos las que se hacen públicas, consisten en gran medida en extrapolaciones de estudios hechos en y para Estados Unidos. La implementación en México de un modelo de predicción de oleaje como el *WAM*, que es para uso público sin ningún tipo de cargo, permitirá, entre otras cosas, tener predicciones más adecuadas.

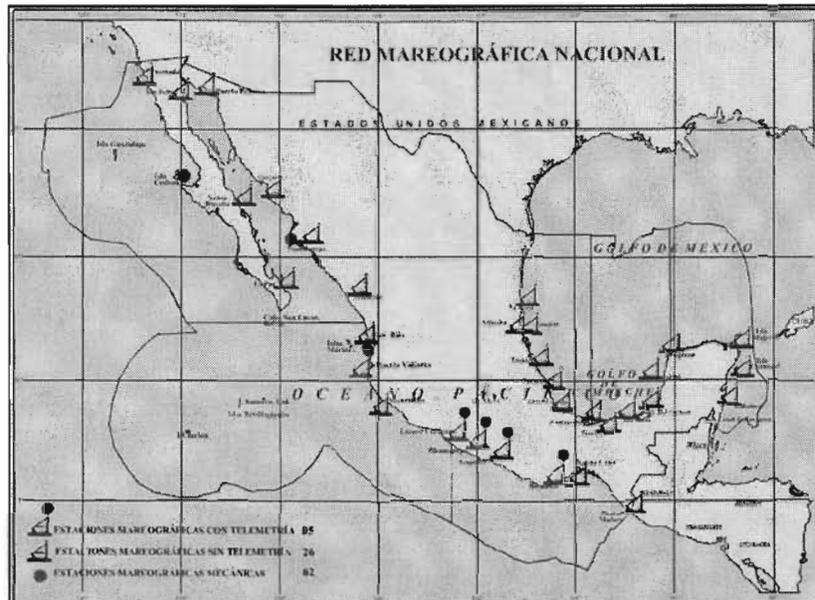


Figura i-1 Red Mareográfica de la Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR)

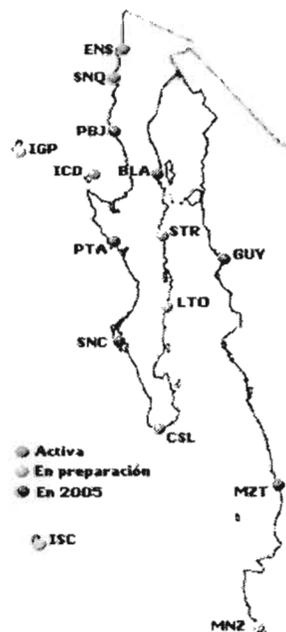


Figura i-2 Estaciones mareográficas del CICESE en el Pacífico mexicano

## Objetivo de la tesis

En consecuencia con el panorama anteriormente descrito, este trabajo tiene como objetivo principal presentar al modelo *WAM* como una opción para la implementación en México de un sistema de predicción y retro-análisis de oleaje, que sería sumamente útil como herramienta de caracterización del clima marítimo de nuestro país. Al tratarse de un modelo desarrollado en otro sitio, un segundo objetivo consiste en establecer los mecanismos necesarios para su correcta implementación tomando en cuenta para ello las características de nuestro país, y sobre todo, usar las fuentes de información disponibles. A todo ello debe agregarse también la intención de puntualizar sus ventajas y desventajas.

Los objetivos particulares son:

- Presentar de forma general los conceptos básicos y antecedentes para la modelación del oleaje generado por la acción del viento.
- Describir en forma general el modelo *WAM (WAve Model)*: los procesos que considera y las ecuaciones que resuelve.
- Establecer las fuentes de información disponibles y los mecanismos de adaptación de datos para implementar el modelo en México.
- Verificar el comportamiento del modelo propuesto ante eventos meteorológicos extremos como huracanes utilizando como zona de estudio el Golfo de México.

## Organización de la tesis

Para cumplir con las expectativas planteadas en el objetivo, este trabajo se organizó de la forma siguiente:

### Capítulo 1. GOLFO DE MÉXICO

Se presentan aspectos generales del Golfo de México, su importancia económica y la incidencia de fenómenos meteorológicos extremos como lo son los huracanes, todo ello con la finalidad de justificar la importancia que tiene el disponer de un modelo de predicción de oleaje, herramienta fundamental para apoyar las actividades que ahí se realizan.

## **Capítulo 2. ANÁLISIS ESPECTRAL DEL OLEAJE**

El análisis espectral es la base de los modelos de generación de oleaje, por eso en este capítulo se describen en forma general los conceptos básicos del análisis espectral del oleaje y se presentan los principales modelos espectrales existentes.

## **Capítulo 3. VIENTO Y OLEAJE**

Se describen los conceptos básicos de la generación de oleaje por la acción del viento. Se presentan algunas de las parametrizaciones existentes para describir la transferencia de cantidad de movimiento entre el viento y el mar.

## **Capítulo 4. MODELOS DE GENERACIÓN DE OLEAJE**

En este capítulo se hace una breve reseña de los principales modelos de generación de oleaje que han existido, se incluye por supuesto la presentación del modelo *WAM*.

## **Capítulo 5. CASOS DE APLICACIÓN**

Se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo *WAM* al paso de tres huracanes por el Golfo de México: *Gilberto* (septiembre de 1988), *Mitch* (octubre de 1998) e *Isidore* (septiembre de 2002). Además se presenta un análisis de los resultados obtenidos que incluye las virtudes y deficiencias observadas durante la realización del trabajo.

## **CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO**

Se presentan las conclusiones derivadas tanto de la implementación del modelo como de los resultados obtenidos de su aplicación, se hacen recomendaciones para futuros análisis y se presentan las futuras líneas de investigación que ayudarán a mejorar la calidad y confiabilidad de los estudios.

**CAPÍTULO 1.**  
**GOLFO DE MÉXICO**

## 1.1 Aspectos generales

El Golfo de México es un mar semi-cerrado, extensión del Océano Atlántico, que limita al norte con los Estados Unidos, al este con Cuba y al sur y al oeste con el territorio mexicano (ver Figura 1-1). Tiene una extensión de 1 942 500 km<sup>2</sup> aproximadamente, que lo convierte en el noveno cuerpo de agua de mayor extensión en el mundo. Se une con el Atlántico por el estrecho de Florida y con el mar Caribe mediante el canal de Yucatán. En él desembocan alrededor de 33 ríos de gran escala entre los que destacan el río Bravo y el río Mississippi y el río Grijalva-Usumacinta.

Para los tres países que lo comparten, el Golfo de México es una zona de gran importancia económica. A México le corresponden (incluyendo al mar Caribe) aproximadamente 3200 km de litoral, donde lleva a cabo una gran cantidad de actividades pilares de la economía. Alrededor del 50% de la pesca de camarón se obtiene del Golfo de México, en él se encuentran localizados tres de los cinco puertos más importantes de México y la producción petrolera que ahí se desarrolla es una de las más importantes a nivel mundial.



Figura 1-1 Golfo de México, tomado de Encarta 2003

## 1.2 Importancia económica

De las 32 entidades federativas que conforman la República Mexicana 17 cuentan con litoral. De éstas, 11 colindan con el Océano Pacífico y las 6 restantes: Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo, colindan con el Golfo de México y Mar Caribe. Estos seis Estados contribuyen en conjunto con aproximadamente el 13 % del PIB del país. A continuación se hace un breve recuento de las principales actividades económicas que se realizan en el Golfo de México.

## 1.2.1 Actividad petrolera

En México más del 80% de la extracción de hidrocarburos se realiza en el Golfo de México, siendo el Litoral Tabasco y la Sonda de Campeche las más importantes.

La infraestructura con la que cuenta Petróleos Mexicanos (PEMEX) en el Golfo de México para la explotación de hidrocarburos que consiste en: 207 plataformas marinas fijas, 2 053 km de tuberías, de los cuales 953 km son oleoductos, 539 km son oleogasoductos, 480 km son gasodutos y 81 km se destinan a otros servicios (Informe PEMEX, 2001). Con esta infraestructura PEMEX produce del orden de 3.4 millones de barriles de crudo y 1500 millones de pies cúbicos de gas diariamente. Estos niveles de producción hacen que el Golfo de México sea una de las regiones de mayor producción en el ámbito mundial.

## 1.2.2 Actividad portuaria

Según datos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México cuenta con 90 puertos marítimos de los cuales 43 están localizados en el Golfo de México y Mar Caribe. Se cuenta también con 18 terminales marítimas, 11 de las cuales se localizan en el Golfo y Mar Caribe, esta información se resume en la Tabla 1-1.

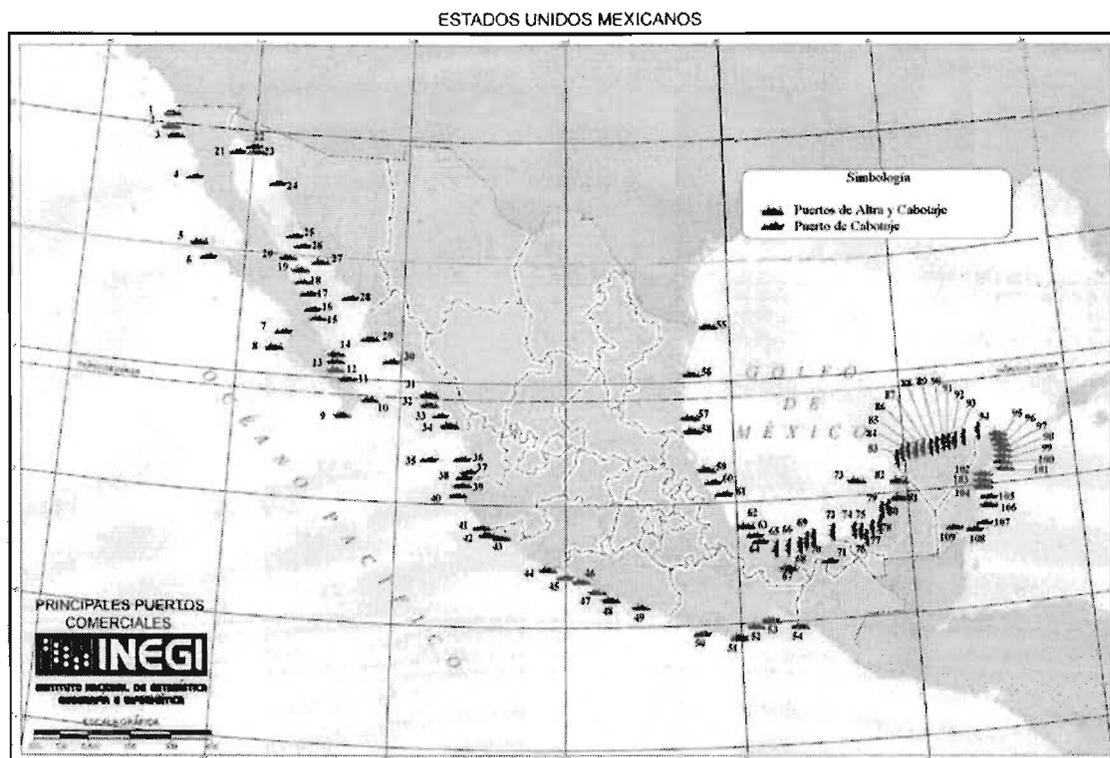


Figura 1-2 Distribución de puertos y terminales marítimas en la República Mexicana

Tabla 1-1 Puertos mexicanos en el Golfo de México, SCT Anuario 2003.

Litoral y entidad federativa	Total	Puertos	Terminales	Tráfico <sup>1</sup>		Actividad preponderante			
				Altura	Cabotaje	Com.	Pesq.	Tur.	Petro.
<b>Total</b>	<b>108</b>	<b>90</b>	<b>18</b>	<b>64</b>	<b>108</b>	<b>39</b>	<b>39</b>	<b>22</b>	<b>8</b>
Golfo de México y Mar Caribe	54	43	11	29	54	20	25	5	4
Campeche	10	6	4	4	10	1	7	0	2
Quintana Roo	15	11	4	11	15	8	2	5	0
Tabasco	5	4	1	2	5	2	2	0	1
Tamaulipas	4	4	0	4	4	3	1	0	0
Veracruz	9	9	0	5	9	4	4	0	1
Yucatán	11	9	2	3	11	2	9	0	0

<sup>1</sup> Todos los puertos y terminales se consideran de cabotaje y solo algunos de ellos se clasifican adicionalmente como de altura. Com = Comercial; Pesq = Pesquera; Tur = Turística; Petro = Petrolera.

Las obras de protección con la que cuentan los puertos del Golfo de México se muestra en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2 Obras de protección en los puertos del Golfo de México, SCT Anuario 2003.

Obras	Golfo de México	%
Obras de protección (m)	66,923	100
Rompeolas	9,235	13.8
Escolleras	21,542	32.1
Espigones	7,048	10.5
Protecciones marginales	29,098	43.6

Aproximadamente el 70% del movimiento de carga nacional, importaciones y exportaciones se realiza a través de los puertos situados en el Golfo de México (ver Tabla 1-3).

Tabla 1-3 Manejo de carga en toneladas, SCT Anuario 2003.

Litoral	Altura	%	Cabotaje	%	Total	%
Pacífico	38217226	19.9	46099056	65.5	84316282	32.1
Golfo de México y Mar Caribe	154298514	80.1	24231552	34.5	178530066	67.9
<b>Total</b>	<b>192515740</b>	<b>100</b>	<b>70330608</b>	<b>100</b>	<b>262846348</b>	<b>100</b>

Los puertos que presentan mayor actividad son Altamira en Tamaulipas, Veracruz, Pajaritos y Tuxpan en localizados en el Estado de Veracruz, Dos Bocas en Tabasco, Puerto del Carmen en Campeche y Puerto Progreso en Yucatán.

### 1.2.3 Actividad turística

Para la mayoría de los Estados de la República que poseen litoral, el turismo es una de las principales actividades económicas, que además juega un papel fundamental en la entrada de divisas al país. Según las estadísticas del INEGI a México llegan alrededor de 10 millones de turistas al año, de éstos al menos 6 de cada 10 visitan el litoral y casi el 35% del total tiene como destino único alguna playa. Tan sólo el litoral del Estado de Quintana Roo genera alrededor de 600 millones de dólares al año.

### 1.2.4 Actividad pesquera

La actividad pesquera en el Golfo de México es muy intensa, casi el 20% de la producción del país la realizan los Estados de Veracruz, Tabasco y Campeche. En los Estados de Tamaulipas y Yucatán se pescan especies de alto valor comercial como son: el camarón, la langosta, el pulpo etc. Existen alrededor de 20 puertos pesqueros en el Golfo de México, y esta actividad emplea aproximadamente 90 000 personas (P. Sánchez-Gil et. al, 2004).

## 1.3 Ocurrencia de fenómenos meteorológicos

La ocurrencia de fenómenos meteorológicos, como Huracanes o Nortes, en el Golfo de México constituye un riesgo potencial para la población que habita cerca de la costa y para las actividades que ahí se realizan. Este tipo tormentas consisten en vientos de alta intensidad, lluvias torrenciales e inundaciones, provocando el cierre de puertos, cese de actividades en la costa, y en muchas ocasiones daños humanos y materiales en poblaciones.

### 1.3.1 Huracanes

Un ciclón tropical es el término genérico para un sistema de baja presión sobre aguas tropicales. Los ciclones tropicales con vientos sostenidos en la superficie mayores a 33 m/s se denominan *huracanes* en la zona del Atlántico y Noreste del Pacífico, *tifones* en la zona Noroeste del Pacífico y en el Pacífico Sur, y *ciclones* en el Océano Índico.

Temperaturas mayores a 26 °C en las aguas oceánicas son las condiciones propicias para el desarrollo de un huracán, en la medida que la temperatura disminuya o si el huracán entra a tierra éste perderá su fuente de energía y se disipará rápidamente, sin embargo este proceso de disipación puede tardar hasta más de dos semanas.

La clasificación de los huracanes se basa en la intensidad de la tormenta que generan, la escala más utilizada en el mundo es la propuesta por H. Saffir y R. G. Simpson (ver Tabla 1-4). Esta clasificación se basa en la intensidad de los vientos sostenidos de la tormenta y la presión barométrica.

Tabla 1-4 Escala Saffir-Simpson

Categoría	Clave	Velocidad del viento (km/h)	Presión central (mb)	Nivel de daño
Depresión tropical	DT (1)	37 a 64	-	Bajo
Tormenta tropical	TT (2)	64 a 118	-	Bajo
Huracán clase 1	H1 (3)	118 a 154	Mayor o igual a 980	Bajo
Huracán clase 2	H2 (4)	154 a 178	965 a 979	Moderado
Huracán clase 3	H3 (5)	178 a 210	945 a 964	Extenso
Huracán clase 4	H4 (6)	210 a 250	920 a 944	Extremo
Huracán clase 5	H5 (7)	más de 250	Menos a 920	Catastrófico

México por su ubicación geográfica es un país con gran incidencia de este tipo de fenómenos meteorológicos, se estima que anualmente se presentan alrededor de 23 huracanes, de los cuales la mayoría ocurre en el Pacífico.

La Figura 1-3 muestra las trayectorias de los 714 huracanes que se han originado en el Atlántico Norte y Pacífico Norte en los últimos 50 años.

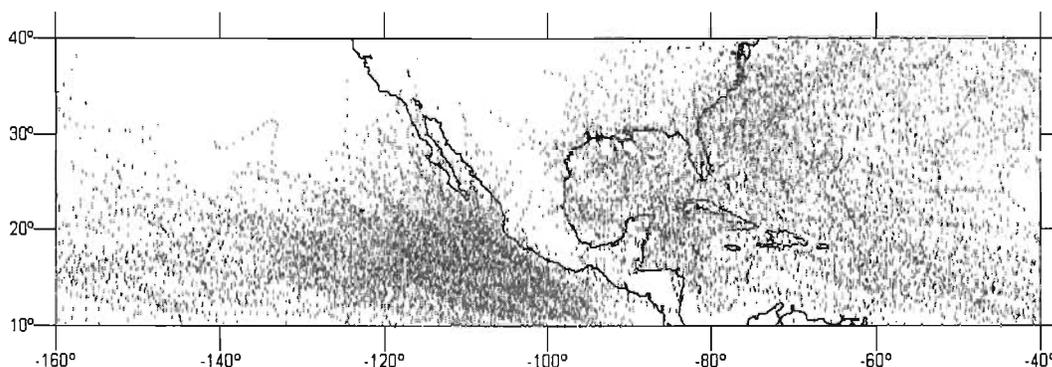


Figura 1-3 Trayectorias que los huracanes han presentado en los últimos 50 años en el Atlántico, el Pacífico y el Caribe (Silva et. al, 2002)

Las consecuencias de la incidencia de huracanes en México son cuantiosas, basta recordar el paso de *Gilberto* en las costas del Mar Caribe y Golfo de México, cuyos efectos se tradujeron en la muerte de más de 200 personas, además de pérdidas millonarias en infraestructura.

## **CAPÍTULO 2.**

# **ANÁLISIS ESPECTRAL DEL OLEAJE**

## 2.1 Introducción

Al estar formado por una gran variedad de olas con diferentes alturas, periodos y direcciones de propagación, el oleaje puede ser considerado como un fenómeno de carácter aleatorio, y para su estudio es necesario recurrir a métodos estadísticos que permitan obtener parámetros para caracterizarlo. Un método útil para identificar cada una de las componentes del oleaje en la superficie oceánica es el análisis espectral, que permite analizar la distribución de la energía de las olas en el dominio de la frecuencia y de la dirección de propagación. Por su gran potencia, el análisis espectral es la base de las principales teorías de modelación de la generación de oleaje por la acción del viento y su evolución en el tiempo.

## 2.2 Espectro unidimensional

El análisis espectral parte de la hipótesis de considerar al oleaje como una superposición lineal de ondas regulares, es decir, una suma de ondas sinusoidales, cada una con distinta amplitud, frecuencia y dirección (ver Figura 2-1). El motor es el análisis de Fourier, que es una formulación matemática capaz de identificar la amplitud y frecuencia de las ondas sinusoidales que sumadas dan una señal igual a la original (Figura 2-2). Esto permite a fin de cuentas calcular la función que relaciona la energía contenida en cada frecuencia,  $S(f)$ , llamada espectro de energía. Si, además, se considera la distribución de la energía no sólo en las distintas frecuencias sino también en las distintas direcciones lo que se obtiene es el espectro direccional de energía  $S(f, \theta)$ . Este espectro resulta de mucha utilidad en el estudio del oleaje ya que permite estimar la dirección en la que se mueve la energía.

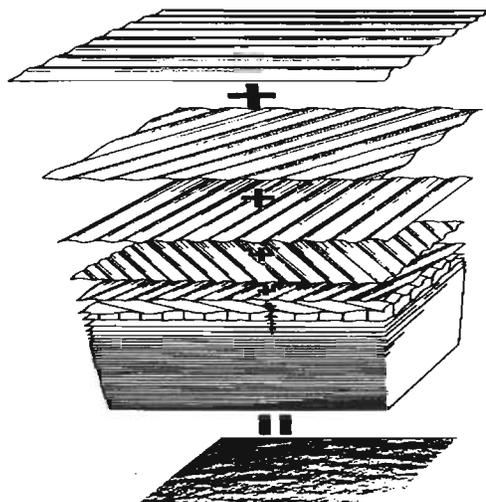


Figura 2-1 Estructura del oleaje aleatorio, Pierson et al.

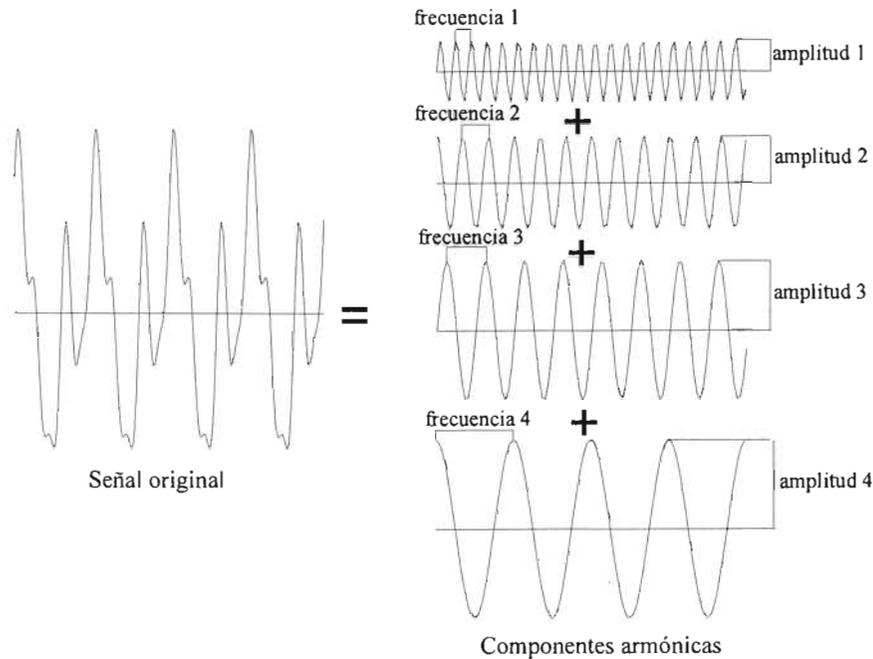


Figura 2-2 Análisis de Fourier

Si se tiene el registro de la variación de la superficie libre en el tiempo,  $\eta(t)$ , y se asume que es una muestra discreta de un proceso continuo se puede hacer uso del análisis de Fourier. El espectro de energía se obtiene aplicando a  $\eta(t)$  la Transformada Rápida de Fourier (TRF).

Si se considera una onda sinusoidal con amplitud  $a$  y frecuencia  $\omega$  la superficie libre se expresa como

$$\eta(t) = a \operatorname{sen}(\omega t) \quad (2.1)$$

La varianza de esa onda con respecto a la frecuencia  $1/2\pi$  es igual a,

$$\sigma^2 = \overline{[\eta(t)]^2} = 2 \int_0^{\infty} S^1(f) df = \int_0^{\infty} S^2(f) df \quad (2.2)$$

Donde  $S^2(f)$  es un espectro simétrico al origen que considera las frecuencias negativas y positivas para el rango de  $[-\infty, \infty]$ , sin embargo se acostumbra presentar el espectro sólo del lado positivo  $S^1(f)$ , lo que hace necesario multiplicar por 2 para obtener la energía en las frecuencias tanto positivas como negativas (CEM, 2001).

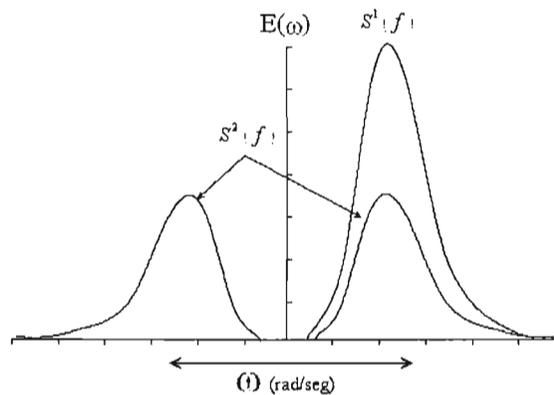


Figura 2-3 Definición de  $S^1(f)$  y  $S^2(f)$  (Chakrabarti 1987). Tomado de CEM, (2001)

Para una serie de tiempo que se convierte en una suma infinita de ondas sinusoidales la varianza se puede expresar como,

$$\sigma_{\eta}^2 = \int_0^{\infty} S(f) df = m_0 \quad (2.3)$$

donde el momento cero ( $m_0$ ), que es el área bajo la curva  $S(f)$ , representa la varianza del registro.

Los demás momentos de la función de densidad espectral se obtienen a partir de,

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (2.4)$$

donde  $S(f)$  es la función densidad espectral y  $f$  es la frecuencia.

## 2.2.1 Parámetros espectrales

### 2.2.1.1 Anchura espectral

La anchura espectral cuantifica el rango de frecuencias en las que se encuentra distribuida la energía, es decir, que si un registro temporal se compone por ondas simples de un amplio rango de frecuencias el espectro será ancho (ver Figura 2-4).

Existen dos parámetros que permiten determinar la anchura del espectro de frecuencias  $\nu$  y  $\varepsilon$ , sus valores oscilan en el intervalo  $[0,1]$  y se calculan a partir de los diferentes momentos.

Cartwright y Longuet-Higgins (1956) proponen describir la anchura espectral con la siguiente expresión

$$\varepsilon = \left[ 1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

Si el espectro es de banda angosta  $\varepsilon$  tiende a 0; si por el contrario, el espectro es de banda ancha  $\varepsilon$  tiende a 1.

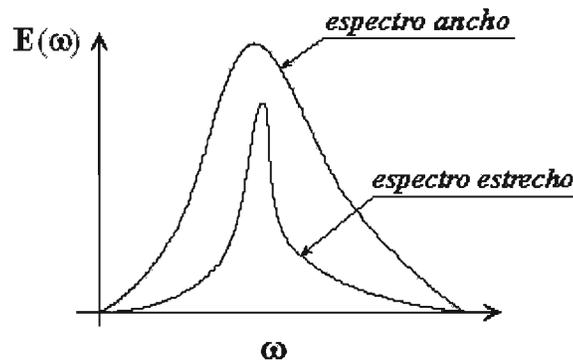


Figura 2-4 Comparación entre un espectro ancho y un espectro estrecho

Debido a que la estimación del momento de cuarto orden es muy sensible a los valores que se tienen en las altas frecuencias, en espectros que definen un estado de mar este parámetro no es representativo, ya que puede inducir a fuertes errores. Para hacer más claro este problema, Longuet-Higgins propuso otro parámetro de anchura espectral, el cual depende de los momentos de orden inferior (Silva 2003).

$$\nu = \left[ \frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

### 2.2.1.2 Agudeza de pico

Otro parámetro que permite determinar las características del espectro es la agudeza de pico. Este parámetro lo que indica es que tan concentrada está la energía en alguna frecuencia. Goda (1974) propone un parámetro para determinar la agudeza del pico que depende solamente del momento de orden cero,

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \int_0^{\infty} f(S(f))^2 df \quad (2.7)$$

En general si  $\varepsilon$  es pequeño la agudeza del pico es grande y viceversa.

### 2.2.1.3 Relación entre parámetros espectrales y parámetros temporales

A continuación se presentan relaciones entre los parámetros temporales y espectrales más utilizadas en el análisis estadístico del oleaje:

Para la estimación del período medio de las olas a partir del espectro se tienen dos ecuaciones:

$$T_m = \frac{m_0}{m_1} \quad (2.8)$$

$$T_m = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.9)$$

En cuanto a parámetros asociados a la superficie libre, se tienen las siguientes relaciones:

Variación cuadrática media de la superficie libre

$$\eta_{rms} = \sqrt{m_0} \quad (2.10)$$

Altura de ola significativa

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.11)$$

Altura de ola cuadrática media

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0} \quad (2.12)$$

Altura de ola de momento de orden cero

$$H_{m_0} = 4.004\sqrt{m_0} \quad (2.13)$$

Para el caso particular de un espectro de banda estrecha con una distribución de alturas de ola tipo Raleigh, la altura de ola significativa es igual a la altura de ola de momento de orden cero,  $H_s = H_{m_0}$

Con la experiencia se han identificado algunas características espectrales de ciertos estados de mar, por ejemplo, bajo la acción de vientos intensos los espectros suelen tener un pico central muy marcado. Esto se examinó con detalle en una serie de observaciones en el Mar del Norte que trajo consigo la creación de un modelo espectral denominado JONSWAP. En el caso de oleaje tipo SWELL (aquel que se propaga fuera de la zona de generación llamada *fetch*) el espectro por lo regular presenta un sólo pico agudo. Si se trata de oleaje en aguas poco profundas cerca de la zona de rotura, el espectro presenta un pico grande y una serie de picos más pequeños (CEM, 2001).

A continuación se presentan algunas de las formulaciones correspondientes a los modelos espectrales unidimensionales más utilizados en la actualidad.

## 2.2.2 Modelos espectrales

A través del análisis de una gran cantidad de espectros de oleaje se ha encontrado que éstos presentan características similares que pueden ser relacionadas mediante el empleo de parámetros físicos, como son: velocidad y duración del viento, *fetch* y profundidad sobre la cual se propaga el oleaje. Un espectro de oleaje puede ser generado sintéticamente por medio de los parámetros que caracterizan su desarrollo. Los modelos espectrales están basados generalmente en uno o más parámetros (Silva, 2003). A continuación se describen los modelos más comunes.

### 2.2.2.1 Estado de saturación

El crecimiento de las olas generadas por la acción de viento no es infinita, el viento transmite energía a la superficie libre generando oleaje, pero esa energía está balanceada por procesos de disipación como la rotura y por las interacciones entre olas. En aguas profundas, la disipación toma la forma de espuma (*white caps*) de menor escala que la longitud de onda. Dicho fenómeno sucede cuando dos crestas son superpuestas o cuando ondas más cortas pasan sobre ondas más largas.

El crecimiento del oleaje está limitado también por la formación de olas capilares, las cuales obtienen energía de las crestas de ondas primarias con gran curvatura. Es conveniente mencionar que la capa superficial de la corriente producida por el esfuerzo cortante del viento incrementa la rotura de las olas, produciendo una gran reducción de su amplitud. La ocurrencia de cualquiera de los mecanismos anteriormente descritos es un indicador de que se ha llegado al estado de saturación de las componentes del oleaje, donde se produce un balance entre la energía suministrada por el viento y las pérdidas debidas a la disipación, dicho estado se caracteriza porque existe un límite superior para la densidad de la energía espectral (Silva, 2003).

### 2.2.2.2 Modelo de Phillips

En 1958 Phillips determinó que el espectro puede ser definido a partir de la frecuencia, la gravedad, la velocidad del viento y el *fetch*, el cual es expresado por:

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} \quad (2.14)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\alpha$  depende del *fetch* y del viento.

Es importante remarcar que este modelo ha sido la base de las principales formulaciones para la predicción de oleaje a través de información meteorológica.

### 2.2.2.3 Espectro Pierson - Moskowitz

Uno de los espectros de oleaje más populares es el propuesto por Pierson y Moskowitz en 1964, que con base en la teoría de Phillips (1958) y Kitaigorodskii (1962) desarrollaron una expresión que representa estados de mar completamente desarrollados (aquellos que han alcanzado su estado de saturación) generados por el viento. Es decir, su modelo no depende del *fetch*, sino únicamente de la velocidad del viento.

La expresión propuesta para generar el espectro es la siguiente:

$$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} (2\pi)^{-4} g^2 f^{-5} e^{-0.24(2\pi U_{19.5} f / g)^4} \quad (2.15)$$

donde  $U_{19.5}$  es la velocidad del viento estimada a 19.5 metros sobre la superficie del mar.

Si se emplea la frecuencia de pico espectral, puede ser representado por

$$S(f) = 8.1 \times 10^{-3} g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} e^{-\frac{5}{4} \left( \frac{f_p}{f} \right)^4} \quad (2.16)$$

En este caso la frecuencia de pico espectral  $f_p$ , está dada por:

$$f_p = \frac{0.0805g}{\pi H_s} \quad (2.17)$$

Dado que normalmente la velocidad del viento se reporta sobre una altura de 10 metros sobre el nivel del mar, la siguiente relación puede ser de mucha utilidad:

$$U_w = U_{10} (y/10)^{1/7} \quad (2.18)$$

donde  $y$  es la distancia vertical sobre el nivel medio del mar (snmm) y  $U_{10}$  es la velocidad del viento a una altura de 10 m snmm.

### 2.2.2.4 Espectro JONSWAP

En 1973 Hasselman *et al.* con base en los resultados obtenidos de un proyecto de medición de oleaje conocido como JONSWAP por sus siglas en inglés (Joint North Sea Wave Project) que se realizó a finales de los sesentas, desarrollaron un modelo espectral para estados de mar con *fetch* limitado y para una profundidad de agua indefinida. La expresión que representa este espectro es:

$$S_J(f) = S_p(f) \phi_{PM} \left( \frac{f}{f_p} \right) \phi_J(f, f_p, \gamma, \sigma) \quad (2.19)$$

donde  $S_P(f)$  es la ecuación de Phillips dada por la (2.14);  $\phi_{PM}(f/f_P)$  es la función de forma de Pierson-Moskowitz dado por

$$\phi_{PM}\left(\frac{f}{f_P}\right) = e^{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_P}\right)^4} \quad (2.20)$$

$\phi_J$  es el factor de forma del espectro JONSWAP

$$\phi_J = \gamma e^{\left(\frac{-(f-f_P)^2}{2\sigma^2 f_P^2}\right)} \quad (2.21)$$

donde

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_A & f_P \leq f \\ \sigma_B & f_P > f \end{cases} \quad (2.22)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ec. (2.19), se tiene

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} e^{-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_P}\right)^4} \gamma e^{\left(\frac{-(f-f_P)^2}{2\sigma^2 f_P^2}\right)} \quad (2.23)$$

Los valores medios de los parámetros que se utilizan para generar el espectro JONSWAP son los siguientes:

$\gamma$  conocido como el factor de forma pico del espectro, el cual normalmente tiene un valor de  $\gamma = 3.3$ ,  $\sigma$  representa el ancho de la base del espectro antes ( $\sigma_A$ ) y después ( $\sigma_B$ ) de la frecuencia pico. Los valores más habituales son  $\sigma_A = 0.07$  y  $\sigma_B = 0.09$ ,  $\alpha$  se conoce como el factor de escala y está asociado con la energía total del espectro. El parámetro  $\alpha$  es función directa del *fetch* y de la velocidad del viento, como se puede observar en las expresiones siguientes:

$$\alpha = 0.076 (\bar{x})^{-0.22} \quad (2.24)$$

De igual forma se ha observado que la frecuencia pico del espectro está relacionada también con el *fetch* y la velocidad del viento, tal que:

$$f_P = 3.5 \left( \frac{g}{U_{10}} \right) (\bar{x})^{-0.33} \quad (2.25)$$

donde

$$\bar{x} = \frac{gx}{U_{10}^2} \quad (2.26)$$

$x$  longitud del *fetch*

$U_{10}$  velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie.

El espectro JONSWAP es uno de los más utilizados alrededor del mundo dada la posibilidad de modificar la forma en la cual se distribuye la energía.

### 2.2.2.5 Espectro TMA

En 1985 Bows et al. hacen una extensión del modelo espectral tipo JONSWAP para aguas poco profundas y proponen la expresión siguiente

$$S_{TMA} = S_J \phi(\omega_H) \quad (2.27)$$

Se supone que dentro de  $\phi(\omega_H)$  se encuentran implícitos varios efectos de aguas someras, como son la fricción de fondo, rompiente y refracción, por lo tanto  $\phi(\omega_H)$  en aguas profundas tiende a 1.

$$\phi(\omega_H) = \tanh^2(kh) \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \quad (2.28)$$

donde  $h$ , es la profundidad del agua y  $kh$  puede ser obtenido para cada  $\omega_H$  dado, por medio de

$$\omega_H = 2\pi f \left( \frac{h}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.29)$$

donde  $k$  y  $f$  se relacionan a partir de la relación de dispersión

$$(2\pi f)^2 = gk \tanh kh \quad (2.30)$$

Goda advierte que este tipo de espectro debe utilizarse con reservas, ya que está formulado para oleaje en crecimiento dentro del área de generación.

### 2.2.2.6 Espectro de Bretschneider

Bretschneider (1959) obtuvo la siguiente expresión para su modelo espectral asumiendo que las alturas y períodos de ola individuales siguen una distribución tipo Rayleigh

$$S(f) = 0.1687 H_s^2 \frac{f_s^4}{f^5} \exp \left[ -0.675 \left( \frac{f_s}{f} \right)^4 \right] \quad (2.31)$$

donde  $f_s = 1 / T_s$ .

De dicho modelo es posible deducir que:

$$T_s = 0.946 T_p \quad (2.32)$$

donde  $T_p$  es el período pico espectral. Esta expresión hace que este modelo sea igual al propuesto por Pierson y Moskowitz.

Las relaciones entre la altura de ola, periodo de ola y velocidad de viento presentadas por Bretschneider para un estado de mar desarrollado son

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0.282 \quad (2.33)$$

$$\frac{gT_s}{U} = 6.776 \quad (2.34)$$

## 2.3 Espectro direccional

La superficie del océano se compone de una serie de olas propagándose en distintas direcciones. Para incluir dentro del análisis la variación de la energía a lo largo de las diferentes direcciones de propagación es necesario trabajar con un espectro bidimensional  $S(f, \theta)$  en donde se analice la forma en que se distribuye la energía, de forma simultánea, sobre distintas frecuencias y direcciones de propagación.

Los registros para obtener un espectro direccional involucran la medición de la variación de la superficie libre pero ahora, en distintos puntos relativamente cercanos (de uno a diez metros) o la medición en un sólo punto, de distintos parámetros como la presión y las componentes de la velocidad. Estos registros se correlacionan a través de un análisis espectral y se obtiene el espectro direccional (CEM, 2001).

La forma clásica para representar al espectro direccional está dada por la ecuación siguiente:

$$S(f, \theta) = S(f)D(f, \theta) \quad (2.35)$$

donde  $S(f)$  es el espectro de energía que puede ser estimado a partir de un registro de superficie libre y se relaciona con el espectro direccional por medio de

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (2.36)$$

donde  $D(f, \theta)$  es la función de dispersión angular, que debe satisfacer las dos propiedades siguientes:

$$D(f, \theta) \geq 0 \quad \text{entre } [0, 2\pi]$$

$$\int_0^{2\pi} D(f, \theta) d\theta = 1 \quad (2.37)$$

La primera condición indica que la función de dispersión angular es no negativa, mientras que la segunda es consecuencia de la definición del espectro direccional. Entonces, el problema del análisis direccional consiste en estimar el espectro y su función de dispersión angular asociada.

Existen varias formulaciones para determinar la función de dispersión angular asociada  $D(f, \theta)$ . La forma más simple la propone St. Denis & Pierson (1953) considerando esta función independiente de la frecuencia  $f$  tal que,

$$D(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta \quad \text{para } \theta < \frac{\pi}{2} \quad (2.38)$$

Por su parte Longuet Higgins en 1962 propone

$$D(\theta) = C(s) \cos^{2s} \frac{\theta - \bar{\theta}}{2} \quad (2.39)$$

$$C(s) = \frac{\sqrt{\pi}}{2\pi} \frac{\Gamma(s+1)}{\Gamma\left(s + \frac{1}{2}\right)} \quad (2.40)$$

donde  $\theta$  corresponde a la dirección principal del oleaje,  $s$  es un parámetro que determina la agudeza del pico de la función de dispersión angular,  $C(s)$  es una constante y  $\Gamma$  la función gama.

Para oleaje generado por viento Mitsuyasu et al. (1975) proponen para el parámetro  $s$ , las formulaciones siguientes

$$s = \begin{cases} s_{\max} \left( \frac{f}{f_p} \right)^5 & \text{para } f \leq f_p \\ s_{\max} \left( \frac{f}{f_p} \right)^{-2.5} & \text{para } f > f_p \end{cases} \quad (2.41)$$

donde  $s_{\max}$  y  $f_p$  están definidos de la siguiente manera

$$s_{\max} = 11.5 \left( \frac{2\pi f_p U_{10}}{g} \right)^{-2.5}$$

$$\frac{2\pi f_p U_{10}}{g} = 18.8 \left( \frac{gx}{U_{10}^2} \right)^{-0.33}$$

$U_{10}$  es la velocidad del viento medida a 10m por encima de la superficie libre y  $x$  es la longitud del *fetch*.

# **CAPÍTULO 3.**

## **VIENTO Y OLEAJE**

### 3.1 Introducción

La generación de oleaje no se puede atribuir a la acción de una única fuerza en particular, la superficie del mar está sujeta a la acción de fuerzas con distintas características que alteran su equilibrio formando oleaje con distintas frecuencias y amplitudes, desde ondas con periodos del orden de segundos, como las ondas capilares, hasta ondas con periodos de varias horas como las inducidas por fuerzas de atracción planetaria (Massel, 1996).

Sin embargo, el oleaje generado por la acción de viento es el principal agente que afecta el aprovechamiento de los recursos marítimos y es también, el principal parámetro a tomar en cuenta en el diseño de estructuras en la costa y costa afuera. De ahí la importancia de entender los mecanismos de generación de oleaje cuando la energía del viento actúa sobre la superficie libre del mar.

Básicamente, el viento transmite su energía al mar a partir de variaciones en la presión y por medio del esfuerzo tangencial que se produce en la interfase de los dos fluidos. No obstante, el conjunto atmósfera-océano es un sistema termodinámico, donde la respuesta de uno de los fluidos a las fuerzas impuestas por el otro forzosamente se traduce en un cambio sustancial en las condiciones de la interfaz (Massel, 1996). Entonces, como la superficie del mar no está en reposo, analizar el flujo atmosférico sobre ésta, es bastante complejo.

### 3.2 Generación de oleaje por la acción del viento

Los vientos se generan principalmente por la radiación no uniforme del sol a la atmósfera. Este calentamiento no uniforme, ocasiona cambios de densidad y gradientes de presión que producen movimientos horizontales de las masas de aire. Como cualquier otro movimiento de gran escala, los vientos también están sujetos a los efectos de la rotación de la Tierra (aceleración de Coriolis), por lo tanto este movimiento horizontal de las masas de aire, sufrirá una deflexión hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur.

Para poder modelar la generación de oleaje por la acción del viento es necesario entender la física en la frontera océano-atmósfera. En esta interfase existe un intercambio constante de cantidad de movimiento, humedad y calor. El intercambio de cantidad de movimiento está directamente relacionado con la rugosidad de la superficie del mar, la cual a su vez depende del oleaje que sobre ella se desarrolle. Afortunadamente, se ha demostrado (Kitaigorodskii, 1970; Massel 1996) que este intercambio se puede considerar constante (no varía con la altura) dentro de una capa de aproximadamente 10-50 m. Además, en esta interfaz la fuerza de Coriolis es despreciable y es posible entonces considerar que la velocidad del viento es casi constante (CEM, 2001).

La Figura 3-1 muestra el perfil logarítmico que se supone sigue la distribución de velocidades del viento. Se tiene entonces aproximadamente una región de 50m donde el flujo de cantidad de movimiento se puede considerar constante (región de esfuerzo cortante constante), la región inmediata superior se conoce como región de Ekman, donde la fuerza de Coriolis es significativa, y la velocidad se incrementa considerablemente con la altura y finalmente la región geostrófica.

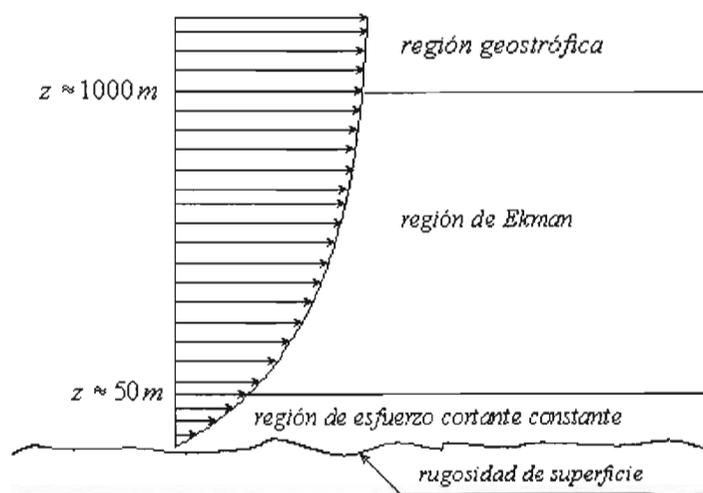


Figura 3-1 Perfil de velocidad del viento. Tomado de CERC, (2003)

### 3.2.1 Parametrización del flujo de cantidad de movimiento

Si se trata a la superficie oceánica como una frontera entre dos fluidos con diferentes propiedades es posible modelar el flujo de cantidad de movimiento de un fluido a otro como una fuerza de arrastre por unidad de área, denominada esfuerzo cortante en superficie. A su vez las olas al propagarse transportan cantidad de movimiento horizontal, por lo que si existe variación en las características de las olas se puede esperar un gradiente horizontal de flujo de cantidad de movimiento. Este gradiente se puede modelar como una fuerza en la frontera conocida como fuerza de radiación. Medir estas fuerzas resulta casi imposible, es por ello que se requiere parametrizarlas en función de una variable conocida, como la velocidad del viento medida a cierta distancia de la superficie del mar (Jones, 2001).

Para analizar la transferencia de cantidad de movimiento en la frontera océano-atmósfera se analiza primero un caso más sencillo, el flujo sobre una superficie rugosa. Se puede demostrar que para este caso, la velocidad cerca de la superficie sigue un perfil logarítmico de la forma:

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (3.1)$$

donde

- $U(z)$  velocidad del viento a una altura  $z$  sobre la superficie  
 $U_*$  velocidad de fricción o velocidad al cortante (medida alternativa para el esfuerzo)  
 $\kappa$  constante de von Kármán (aproximadamente 0.4)  
 $z_0$  escala de rugosidad

La relación entre el esfuerzo cortante en superficie y la velocidad del viento a una altura determinada requiere de un coeficiente de arrastre.

$$\tau = C_D U^2 \quad (3.2)$$

donde

- $\tau$  esfuerzo cortante en superficie  
 $C_D$  coeficiente de arrastre

Generalmente la altura a la que se determina la velocidad del viento es a 10m de la superficie.

Para condiciones estacionarias y homogéneas es posible considerar el esfuerzo en superficie como constante y se suele expresar en función de la denominada velocidad de fricción:

$$U_* = \sqrt{\tau} \quad (3.3)$$

Entonces para un perfil logarítmico el coeficiente de arrastre esta dada por

$$C_D = \frac{\kappa^2}{\ln^2(z/z_0)} \quad (3.4)$$

El problema radica ahora en determinar el valor de la escala de rugosidad  $z_0$ . Para un flujo suave donde la rugosidad de la superficie no influye porque se puede considerar que se encuentra embebida dentro de la capa viscosa, el parámetro  $z_0$  dependerá solamente de la velocidad de fricción y la viscosidad cinemática del fluido. Si aumenta  $U_*$ , la capa viscosa disminuye y la rugosidad empieza a interactuar con el flujo. Ahora, el coeficiente de arrastre se ve afectado también por la forma de la superficie y en este caso el valor de la escala de rugosidad  $z_0$  se puede considerar proporcional a la altura de los elementos rugosos que conforman la superficie.

En la realidad la determinación del coeficiente de arrastre no es tan simple, las componentes del oleaje que conforman todo el espectro (desde ondas capilares hasta swell u oleaje distante de periodos largos) actúan como la rugosidad de la superficie, por lo tanto pensar en un  $z_0$  proporcional a la altura de los elementos rugosos se dificulta debido a su aleatoriedad. Además, existen movimientos orbitales que desplazan la superficie del agua

hacia delante y hacia atrás lo que ocasiona que la rugosidad varíe en el tiempo. Muchos investigadores atribuyen a este fenómeno los valores relativamente bajos que se obtienen de  $C_D$ , considerando la gran rugosidad que se presentan en la superficie oceánica (Jones, 2001).

Datos experimentales muestran una gran dispersión en los valores de  $C_D$  (entre  $3 \times 10^{-4}$  y  $5 \times 10^{-3}$ ) y poco se sabe de las causas de esta situación. El desarrollo de diferentes teorías y parametrizaciones ha demostrado que no existe una formulación universal, lo que hace necesario realizar mediciones y adaptar las fórmulas para algunas zonas de estudio en particular (Bolaños, 2004).

Una buena aproximación en la determinación de la escala de rugosidad es la que propone Charnock (1955), considerando un estado de mar,

$$z_{ch} = m \frac{U_*^2}{g} \quad (3.5)$$

donde  $m$  varía de  $0.3 \times 10^{-2}$  a  $80 \times 10^{-2}$ .

En muchas aplicaciones se ha considerado  $z_0 = z_{ch}$  resultando en el siguiente perfil de velocidad,

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_{ch}} \right) \quad (3.6)$$

Autores como Janssen (1989), Chalikov et al. (1991) encontraron que el esfuerzo cortante se puede obtener si se integra el espectro de oleaje sobre todas las frecuencias existentes incluyendo las ondas capilares.

$$\tau = \rho_w \int_0^{\infty} S(f) df \quad (3.7)$$

Esta formulación tiene la desventaja de que el espectro de oleaje sólo se conoce en un rango acotado de frecuencias, además de que no se ha comprobado aun que ondas de muy pequeña escala puedan tratarse como olas.

Si se considera la escala de rugosidad igual a la propuesta por Charnock (3.5) y se obtiene el esfuerzo cortante a partir de la expresión (3.7), entonces el coeficiente de arrastre dependerá del espectro de oleaje, lo cual se asemeja más a las observaciones y experimentos realizados (Komen, 1994).

### 3.2.2 Edad del oleaje

Como se mencionó, en el sistema océano-atmósfera la respuesta de uno de los fluidos a las fuerzas impuestas por el otro forzosamente se traduce en un cambio sustancial en las

condiciones de la interfase, por lo tanto es de esperarse que la energía que trasmite el viento a las olas dependa directamente del estado en que éstas se encuentren. Una forma de analizar esto es a través del concepto denominado edad del oleaje.

La edad del oleaje es un parámetro que representa una condición de equilibrio entre el viento y el oleaje, es función del estado de mar, la transferencia y disipación de energía así como la forma de las olas (Bolaños 2004).

$$\text{Edad} = \frac{C}{U} \quad (3.8)$$

donde

$C$  celeridad de la onda

$U$  velocidad de viento, se pueden ocupar el valor de la velocidad a 10 m de la superficie  $U_{10}$  o velocidad al cortante  $U_*$

Cuando inicia el proceso de transferencia de energía del viento al mar las olas que se generan son cortas y su velocidad de propagación es menor que la del viento, en esta etapa se considera que el oleaje es joven y se encuentra en proceso de desarrollo. Al pasar el tiempo la frecuencia de las olas disminuye y aumenta su velocidad hasta alcanzar la del viento  $\frac{C}{U} = 1$ , en esta etapa se denomina oleaje maduro, y de aquí en adelante se puede considerar que el espectro se encuentra saturado y por lo tanto el crecimiento de las olas será casi nulo (Jones, 2001).

La variabilidad del viento es otro factor que influye en la modelación del oleaje, si la velocidad del viento es muy variable, con excepción de *fetch* muy cortos, las olas se encontrarán en un estado constante de desarrollo. Poco se sabe de la respuesta del campo de oleaje a cambios en la dirección del viento y mucho menos en el impacto que se pueda tener en el coeficiente de arrastre. La respuesta del campo de oleaje a cambios en la dirección del viento depende entre otras cosas de la edad del oleaje. Cuando el cambio de dirección del viento no es muy brusco, la energía del oleaje parece ser reorganizada en la nueva dirección, pero si el cambio de dirección es rápido y de alrededor de  $90^\circ$  la respuesta del campo de oleaje es lenta y se observa un decaimiento en el espectro (Bolaños, 2004).

**CAPÍTULO 4.**  
**MODELOS DE GENERACIÓN**  
**DE OLEAJE**

## 4.1 Antecedentes

La modelación de la generación de oleaje es necesaria en múltiples labores de la ingeniería, como el trazo de rutas de navegación y la planeación de actividades costa fuera. En años recientes también ha sido ampliamente utilizada en investigación climática (Massel, 1996).

El primer estudio de predicción de oleaje fue desarrollado por Sverdrup y Munk (1947) mediante una descripción paramétrica de un estado de mar. A mediados de los años cincuentas los investigadores comenzaron a darse cuenta que el proceso de generación de oleaje podía describirse mucho mejor si se consideraba como un fenómeno espectral.

En 1957 Gelci *et al.* desarrollan un modelo que describe la evolución en el espacio y en el tiempo de un espectro de oleaje, la llamada ecuación de balance de energía. Este modelo es función, entre otras cosas, de la transmisión de energía del viento al mar, la limitante era que en esa época se sabía poco sobre este mecanismo. Es hasta que surgen las teorías de generación de oleaje de Phillips (1957) y Miles (1957), y la teoría para la transferencia no lineal de energía propuesta por Hasselmann (1962), que se dan las condiciones necesarias para el surgimiento de los primeros modelos de generación de oleaje (Massel, 1996).

Las teorías de Phillips y Miles coinciden en que la generación de oleaje se da por un fenómeno de resonancia. Phillips considera que la resonancia ocurre entre las fluctuaciones de presión y las olas propagándose a cierta velocidad. Esta teoría produce el crecimiento lineal del espectro de oleaje en el tiempo. Por su parte la teoría de Miles se basa en el análisis de estabilidad de la interfaz de los dos fluidos (agua y aire), considerando diferentes densidades y velocidades. Así obtuvo un espectro de oleaje con crecimiento exponencial en el tiempo. Con base en estudios se ha demostrado que la teoría de Phillips simula bien el inicio del crecimiento del oleaje, mientras la teoría de Miles representa en gran proporción todo el desarrollo. Estas dos teorías han sido la base del desarrollo de los modelos actuales.

Los modelos numéricos de predicción de oleaje se basan en la ecuación de balance de energía, también llamada de transporte. Esta ecuación permite determinar la evolución de la energía espectral en el espacio y en el tiempo, debido a la interacción con el ambiente (viento, corrientes, variación de la profundidad, etc.) (Komen, 1994). Los modelos se han clasificado en tres tipos: modelos de primera, segunda y tercera generación dependiendo de las consideraciones utilizadas para dar solución a la ecuación de transporte.

Los modelos de primera generación se desarrollaron en los años sesentas y principios de los setentas. No resolvían toda la ecuación de balance de energía, y consideraban que las componentes del espectro dejaban de crecer cuando se alcanzaba un nivel de saturación fijado. Las interacciones no lineales entre componentes no se tomaban en cuenta, debido en gran parte a las limitantes computacionales, esto generaba que las componentes espectrales se

desarrollaran de manera independiente. Esta generación de modelos tiende a sobreestimar la acción del viento y subestimar la transferencia no lineal entre componentes del espectro.

Tratando de subsanar las deficiencias de los modelos de primera generación, a finales de los años setentas surgieron los modelos denominados de segunda generación. Estos modelos incorporan al cálculo las interacciones no lineales entre componentes mediante una parametrización del fenómeno, sin embargo esta parametrización impuso la restricción al modelo de tener que indicar la forma espectral a simular, ésta es la principal desventaja de los modelos de segunda generación. Además, diversos estudios demostraron que estos modelos no son capaces de simular bien el crecimiento del oleaje ante la presencia de vientos extremos como son, por ejemplo, los generados por huracanes.

A mediados de los ochentas surgen los modelos de tercera generación, el grupo WAMDI (*Wave Model Development and Implementation Group*) desarrolló el primero en su tipo denominado *WAM (Wave Model)*. El *WAM* integra la ecuación de balance de energía sin restricción alguna en la evolución del espectro. En aguas profundas es capaz de representar la generación, propagación, disipación por rotura e interacciones no lineales entre olas. En aguas someras puede modelar procesos de transformación como la refracción y disipación de la energía por la interacción con el fondo (Massel, 1996; Bolaños, 2004).

## 4.2 Modelo WAM

El *WAM* es un modelo de tercera generación, ampliamente aceptado en la mayoría de los centros de investigación que trabajan en predicción de oleaje. Resuelve la ecuación de transporte de energía utilizando un método implícito de integración. Dicha ecuación es

$$\frac{dF}{dt} + \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} F) = S \quad (4.1)$$

donde

$F(f, \theta, \phi, \lambda)$	función de densidad espectral
$f$	frecuencia
$\theta$	dirección de propagación del oleaje
$\phi$	latitud
$\lambda$	longitud
$t$	tiempo
$S$	término fuente/sumidero de energía, a través del cual se representan las tres principales funciones de generación y disipación del oleaje, es decir, es la suma de tres funciones

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (4.2)$$

donde

$S_{in}$  aporte de energía del viento  
 $S_{nl}$  representa las interacciones no lineales entre olas  
 $S_{ds}$  función de disipación de energía (*whitecapping*).

### 4.2.1 Aporte del viento

Janssen (1989) revisó las teorías propuestas por Miles y Phillips, y propuso que el suministro de energía del viento se tradujera en un crecimiento de las componentes del espectro de oleaje. Dicho crecimiento es lineal en las bajas frecuencias y exponencial en las altas. De esta forma, el término de energía por viento se define por

$$S_{in} = \beta F \quad (4.3)$$

donde

$F$  función de densidad espectral  
 $\beta$  función relacionada con el crecimiento exponencial

El *WAM* utiliza la función  $\beta$  propuesta por Snyder *et al.* (1981), que escala la velocidad mediante la velocidad de fricción  $u_*$ .

$\beta$  se define por

$$\beta = \max \left\{ 0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( 28 \frac{u_*}{c} \cos \theta - 1 \right) \right\} \omega \quad (4.4)$$

donde

$\omega = 2\pi f$  frecuencia angular (del viento o del oleaje)  
 $\rho_a$  densidad del aire  
 $\rho_w$  densidad del agua  
 $F$  función de densidad espectral.

El esfuerzo que el viento genera sobre las olas,  $\tau$ , depende del estado del oleaje, para calcularlo Janssen (1991) propuso la expresión

$$\tau = \left( \frac{\kappa U(z)}{\ln \left( \frac{z}{z_{ob} + z_o} \right)} \right)^2 \quad (4.5)$$

donde

- $z$  elevación sobre el nivel medio del agua en la que se tiene la medición de velocidad del viento, generalmente 10 m  
 $U(z)$  velocidad del viento a dicha elevación  
 $z_{ob}$  rugosidad por ondas capilares  
 $z_o$  rugosidad por pequeñas ondas de gravedad

## 4.2.2 Interacciones no lineales

En 1960 Hasselman estableció una teoría para estimar la transferencia de energía entre los diferentes componentes y direcciones del espectro de oleaje. Encontró que un grupo de cuatro olas podían intercambiar energía cuando se cumpliera la siguiente condición de resonancia para el número de onda y frecuencia:

$$k_1 + k_2 - k_3 - k_4 = 0 \quad (4.6)$$

$$\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4 = 0 \quad (4.7)$$

La determinación de las interacciones entre todas las componentes del espectro es poco práctica, ya que consume mucho tiempo de cómputo, para optimizar este cálculo el *WAM* incorpora una parametrización discreta de la interacción dividida en cuatro componentes (*cuadruplets*) de la forma

$$S_{nl}^{di}(k_4) = \sum_{\gamma=1,2} A_{\gamma} \omega_4 \left[ n_1^{\gamma} n_2^{\gamma} (n_3^{\gamma} + n_4^{\gamma}) - n_3^{\gamma} n_4^{\gamma} (n_1^{\gamma} + n_2^{\gamma}) \right] \quad (4.8)$$

donde

$$n_i^{\gamma} = \frac{F(k_i^{\gamma})}{\omega_i^{\gamma}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad \gamma = 1, 2 \quad \text{y}$$

$A_{\gamma}$  coeficiente de acoplamiento

## 4.2.3 Disipación de energía

La energía del oleaje no puede crecer indefinidamente, en la realidad cuando las olas alcanzan un grado de saturación disipan su energía por rotura, aún en aguas profundas. Este mecanismo de disipación de energía es complejo y se conoce muy poco de él, es por eso que el término que incorpora el *WAM* para representarlo es más un mecanismo de ajuste que la representación del fenómeno. Dicho término,  $S_{ds}$ , surge de una modificación del modelo de Komen *et. al* (1984) para la disipación por rotura,

$$S_{ds} = -2.33 \times 10^{-5} \hat{\omega} (\omega / \hat{\omega})^2 (\hat{\alpha} / \hat{\alpha}_{PM})^2 F \quad (4.9)$$

donde

$$\begin{aligned} \hat{\omega} &= E^{-1} \iint F(f, \theta) \omega df d\theta && \text{frecuencia media} \\ E &= \iint F(f, \theta) df d\theta && \text{energía total} \\ \hat{\alpha} &= E \hat{\omega}^4 g^{-2} && \text{parámetro del peraltamiento de la ola} \\ \hat{\alpha}_{PM} &= 4.57 \times 10^{-3} && \text{parámetro para el espectro Pierson-Moskowitz} \end{aligned}$$

#### 4.2.4 Extensión para aguas someras

Para que la ecuación de transferencia de energía (4.1) sea válida y aplicable también en aguas someras, es necesario que la función  $S$  fuente/sumidero incluya un término de disipación por la interacción con el fondo. También es necesario incluir en los demás términos la ecuación de la dispersión dada por,

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kD)} \quad (4.10)$$

donde

$$\begin{aligned} D & \text{ profundidad} \\ \omega & \text{ frecuencia} \\ k & \text{ número de onda} \end{aligned}$$

El término de disipación por fricción de fondo corresponde al desarrollado por Hasselmann (1973) en el estudio JONSWAP

$$S_{bf} = -\frac{\Gamma}{g^2} \frac{\omega^2}{\sinh^2 kD} F \quad (4.11)$$

donde

$$\begin{aligned} \Gamma &= 0.038 \text{ m}^2/\text{s}^3, \\ F & \text{ función de densidad espectral} \end{aligned}$$

La formulación para determinar la disipación de energía se pone ahora en términos del número de onda y no de la frecuencia

$$S_{ds} = -(2.36 \times 10^{-5}) \hat{\omega} \left( \frac{k}{\hat{k}} \right) \left( \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 F \quad (4.12)$$

donde

$$\hat{k} = \left( E^{-1} \int F(k) k^{-1/2} dk \right)^{-2} \quad \text{número de onda medio}$$

$$\hat{\alpha} = E \hat{k}^2$$

El término de disipación de energía es modificado para que incluya el número de onda además de la frecuencia, y se agrega un término de refracción por influencia del fondo,  $\theta_D$ ,

$$\theta_D = \frac{1}{kR} \frac{\partial \omega}{\partial D} \left( \text{sen} \theta \frac{\partial D}{\partial \phi} - \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \frac{\partial D}{\partial \lambda} \right) \quad (4.13)$$

donde

$R$  es un factor de escala.

El *WAM* utiliza un método fraccionado para integrar la ecuación de transporte, esto es, por un lado integra la ecuación suponiendo que no existen términos fuente/sumidero, y de forma independiente integra los términos fuente/sumideros sin considerar la transferencia de energía, el espectro se obtiene entonces sumando las contribuciones de la propagación y los términos fuente/sumideros. La discretización de las ecuaciones se hace con el método de diferencias finitas centradas llevadas al primero orden. En cuanto a las condiciones de frontera se asume que no hay transferencia de energía de las fronteras al interior de la malla, por lo tanto las fronteras son absorbentes.

### 4.3 Estadística para la validación de modelos

La modelación de los procesos físicos es sin lugar a duda una simplificación de la realidad, por lo general los fenómenos se conocen de manera limitada y por lo tanto su modelación será sólo aproximada.

Para validar la calidad de cualquier modelo es necesario hacer comparaciones con datos de campo o experimentales. Por la naturaleza del fenómeno analizado, las comparaciones se hacen generalmente mediante parámetros estadísticos, los más comunes (tomados de Bolaños, 2004) se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Parámetros estadísticos para la validación, tomados de Bolaños (2004)

Parámetro	Función	Ecuación
BIAS	Describe la tendencia central del modelo	$B = \bar{X}_{mod} - \bar{X}_{obs}$
Error medio absoluto	Estimación de la magnitud del error	$E_a =  X_{mod} - X_{obs} $
RMSE	Media de la raíz cuadrada del error	$E_{rms} = \left( (X_{mod} - X_{obs})^2 \right)^{1/2}$
SI	Índice de esparcimiento para determinar la variabilidad de los errores	$S_i = \frac{\left( (X_{mod} - X_{obs})^2 \right)^{1/2}}{X_{obs}}$

donde

$X_{mod}$  valor estimado por el modelo

$X_{obs}$  valor medio observado (en datos experimentales o de campo).

# **CAPÍTULO 5.**

## **CASOS DE APLICACIÓN**

El Golfo de México se ve recurrentemente afectado por la incidencia de huracanes, que causan grandes daños económicos y en ocasiones también pérdidas humanas; por ello se decidió verificar el comportamiento del modelo *WAM* en dicha situación.

Se modelaron tres huracanes: *Gilberto* (septiembre de 1988), *Mitch* (octubre de 1998) e *Isidore* (septiembre de 2002). Se trabajó con campos de viento sintéticos, por lo tanto, antes de elegir los huracanes a modelar fue necesario verificar que los campos de viento con los que se contaba reprodujeran de manera aceptable la tormenta.

La zona de estudio se limitó con un rectángulo de coordenadas  $18^{\circ}\text{N}$ ,  $30^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{W}$ ,  $80^{\circ}\text{W}$ . A continuación se resume la metodología que se siguió para realizar la modelación de las tormentas, así como las consideraciones y adaptaciones realizadas para su aplicación con los datos disponibles, que aquí como en muchos sitios suelen ser una limitante.

- **BATIMETRÍA**

La batimetría que se utilizó, de resolución de un minuto, se obtuvo del “*British Oceanographic Data Center*” ([www.bodc.ac.uk](http://www.bodc.ac.uk)), ver Figura 5-1. Se eligió esa resolución debido a la escala del estudio, que pretende validar el comportamiento general del modelo en todo el Golfo de México. Cabe aclarar que si se quisiera conocer la afectación de una zona en particular es conveniente contar con una batimetría más detallada.

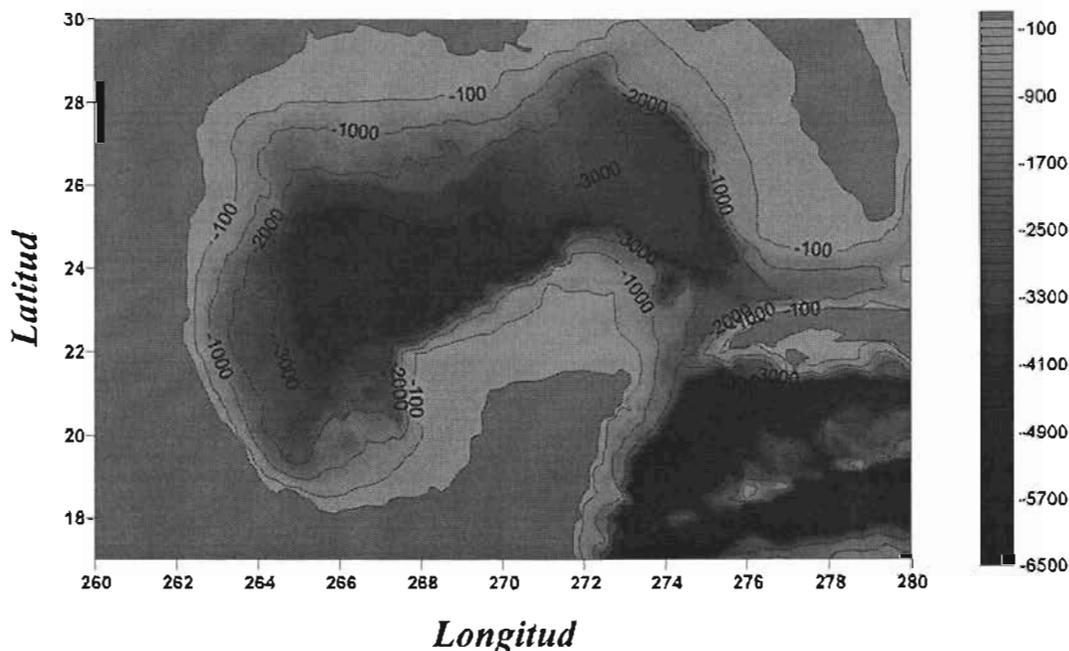


Figura 5-1 Batimetría obtenida de *BODC* con un minuto de resolución

- CAMPOS DE VIENTO

En virtud que la precisión de los resultados de cualquier modelo de generación de oleaje por viento es función directa de la calidad con la que se tenga caracterizado el campo vientos. Hasta el momento no existe sistemas de medición accesibles capaces de caracterizar satisfactoriamente variables atmosféricas a resolución de un minuto, aunque es posible que en el mediano plazo las técnicas de percepción remota lo permitan. Actualmente es necesario combinar datos puntuales medidos con modelos paramétricos que permitan interpolarlos a la escala deseada. Para el presente trabajo se contaba con una formulación paramétrica para simular viento generado por huracanes, desarrollada en el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, sin embargo las dimensiones del espacio analizado salen de su rango de validez (aproximadamente 500 km).

Se utilizaron los campos de viento del programa de reanálisis *NCEP/NCAR Reanalysis Project* del *Climate Diagnostics Center* de la *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Estados Unidos)*, a los que puede accederse a través de su página de internet ([www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis](http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis)). La base de datos posee información meteorológica (estimada) de todo el mundo, desde 1948 hasta 2004. La principal desventaja de los campos de viento de ese sitio es su baja resolución (datos cada 6 horas, espaciados 2 grados en latitud y longitud). Para este trabajo la información debió ser interpolada tanto en el tiempo como en el espacio.

- VALIDACIÓN DE DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS

Para garantizar la fiabilidad de los resultados (oleaje generado por el huracán) fue necesario verificar que la interpolación de los campos de viento del *NCEP/NCAR Reanalysis Project* reprodujera de forma aceptable la tormenta, ya que el espaciamiento temporal de 6 horas podía ocasionar que el pico de la tormenta se perdiera, y se subestimara el oleaje generado.

Tanto los datos de entrada interpolados como los resultados obtenidos se compararon con registros tomados del *Data Bouy Center* de la *NOAA*. La Figura 5-2 muestra las boyas cuyos registros fueron utilizados, su localización se resume en la Tabla 5-1.

Se utilizaron los registros de las siguientes variables:

- Velocidad del viento a 10m sobre la superficie, reportada a cada hora, y calculada como el promedio de las mediciones del anemómetro en un periodo de 8 minutos.
- Altura de ola significativa y
- Periodo medio, reportados también a cada hora, pero obtenidos a partir del análisis espectral de 20 minutos de registro de los desplazamientos de la superficie libre.

El primer dato se utiliza para la comparación de los campos de viento de entrada y los dos últimos para la validación de los resultados.

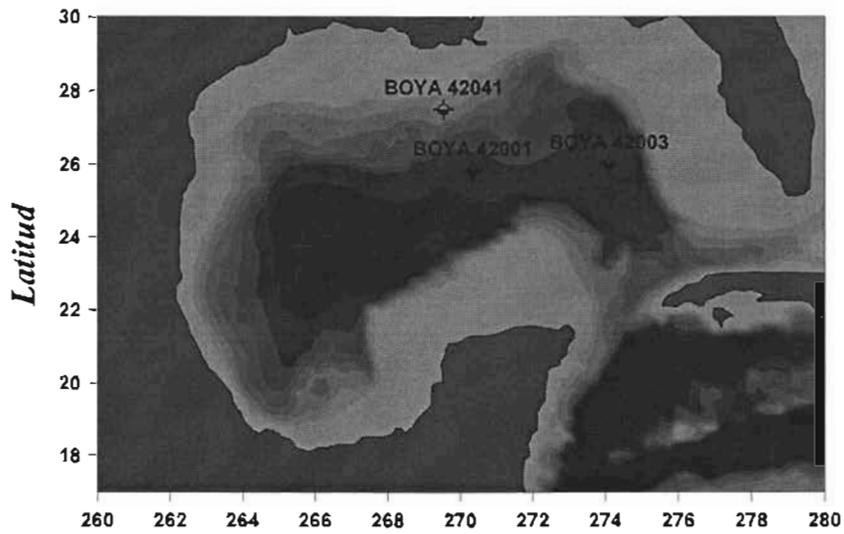
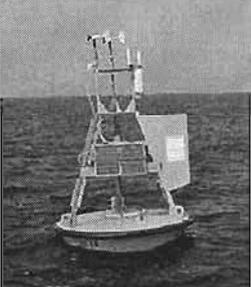


Figura 5-2 Boyas propiedad del “Data Bouy Center” situadas en el Golfo de México

Tabla 5-1 Localización de las boyas utilizadas para la validación del modelo

BOYA	Localización	Profundidad	Tipo
42001	25.84 N 89.66 W	3246 m	
42003	26.01 N 85.91 W	3164 m	
42041	27.50 N 90.46 W	1435.6 m	

- IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL DEL MODELO *WAM*

El modelo *WAM* desde su desarrollo e implementación por el grupo *WAMDI* (*Wave Model Development and Implementation Group*) se ha manejado como código abierto (lenguaje FORTRAN bajo entorno UNIX), esto significa que su desarrollo es impulsado por las modificaciones y mejoras realizadas en los centros de investigación donde se adopta (que son la mayoría de los que trabajan en el tema). Dichas mejoras son monitoreadas por el grupo e incorporadas al modelo en forma de nuevas versiones. La última versión puesta al público es la denominada *WAM cycle 4*.

La adaptación (o sub-versión) implementada en cada lugar mantiene los fundamentos físicos de la versión estandarizada, pero suele diferir en aspectos técnicos como la anidación de mallas, formatos de entrada y salida de datos, etc.

La sub-versión del modelo *WAM* utilizada en este trabajo fue proporcionada por *Puertos del Estado* de España (dependencia gubernamental encargada de la planeación y operación de la infraestructura portuaria española). La principal variación respecto a la versión *WAM cycle 4* consiste en la posibilidad de utilizar esquemas de espaciamiento variable, es decir, aumentos de resolución de la malla en zonas donde interesen predicciones más detalladas. En el anexo se hace una breve descripción de la implementación computacional del modelo.

Las condiciones generales para la puesta en marcha del modelo fueron las siguientes:

- Resolución de malla de  $\frac{1}{4}^\circ$  en latitud y longitud (ver Figura 5-3),
- paso de tiempo para la propagación de 10 minutos para cumplir con la estabilidad del modelo bajo el criterio de *Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)*, y
- espectro discretizado en 30 frecuencias, con un valor mínimo de  $f = 0.0417 \text{ Hz}$  y 25 direcciones.

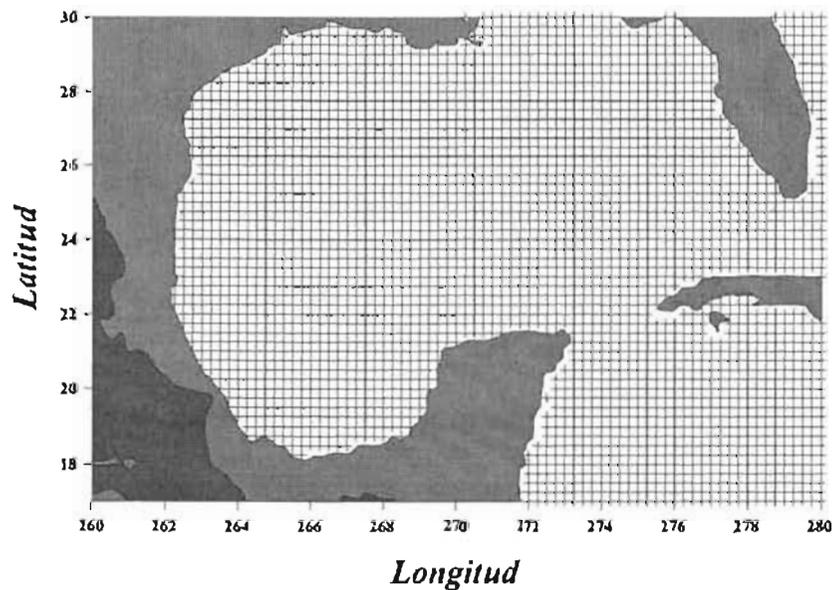


Figura 5-3 Malta con resolución de  $\frac{1}{4}^\circ$  en latitud y longitud

## 5.1 Huracán GILBERTO (1988)

### 5.1.1 Generalidades

*Gilberto* ha sido uno de los huracanes más destructivos que han azotado la República Mexicana ya que ocasiono 200 muertos y pérdidas millonarias en infraestructura, que fue el saldo que dejó a su paso por nuestro país.

Comenzó como una depresión tropical el 3 de septiembre de 1988, en la costa norte de África. Seis días más tarde, el sistema había cruzado el Atlántico y se convirtió en tormenta tropical. El 14 de septiembre arribó a la Península de Yucatán como huracán de categoría 5 (escala Saffir-Simpson). El 16 de septiembre finalmente se disipó después de impactar sobre tierra en la costa Este de nuestro país.

La trayectoria del huracán *Gilberto* así como la localización de las boyas utilizadas para la validación se muestran en la Figura 5-4 .

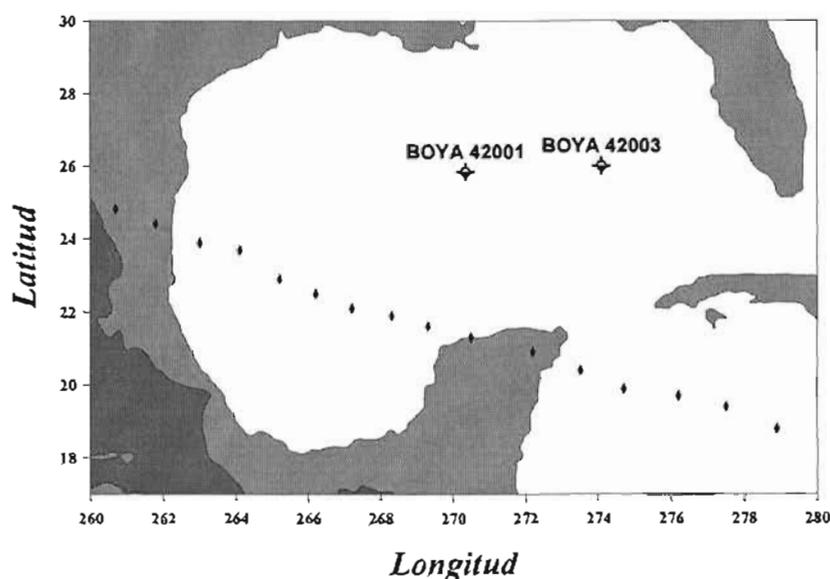


Figura 5-4 Trayectoria del huracán *Gilberto* en la zona de estudio así como la localización de las boyas para la validación

### 5.1.2 Verificación del campo de vientos

La Figura 5-5 muestra la comparación entre la interpolación de los datos de viento del *NCEP/NCAR* y los medidos en la boya 42003. El error medio absoluto es de 30% (ver Tabla 5-2) y la tendencia es de sobreestimación. Dada la complejidad del fenómeno y el grado de precisión hasta el momento alcanzado en modelos de este tipo, la concordancia entre los datos interpolados y los reales puede considerarse satisfactoria.

La boya 42001 no registró datos de viento

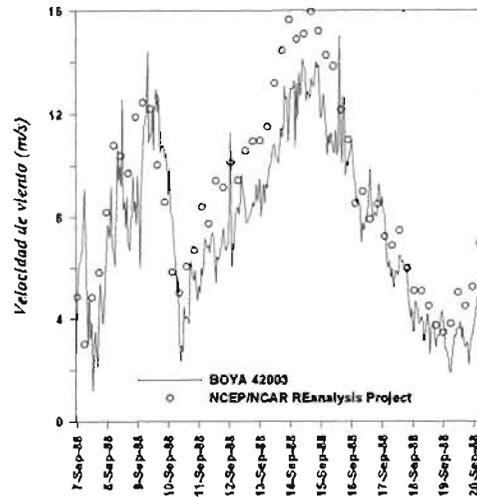


Figura 5-5 Velocidad de viento medido y predicción del NCEP/NCAR, huracán *Gilberto*

Tabla 5-2 Errores calculados para la velocidad de viento al paso del huracán *Gilberto*

BOYA	Variable	BIAS	Error medio absoluto normalizado	RMSE	Índice de dispersión SI
42001	viento	-	-	-	-
42003	viento	1.18 m/s	23 %	2.10 m/s	27 %

### 5.1.3 Validación de resultados

La comparación entre los resultados del *WAM* y los registros de las boyas se muestra en la Figura 5-6. El modelo acierta satisfactoriamente en la tendencia de evolución de la altura de ola, aunque en algunos casos subestima magnitudes. En la boya 42001, la tendencia es bien representada, no así las magnitudes del 7 al 11 de septiembre. En cuanto a la boya 42003, la posición de los picos es exitosamente reproducida, sin embargo la magnitud de estos es ligeramente subestimada.

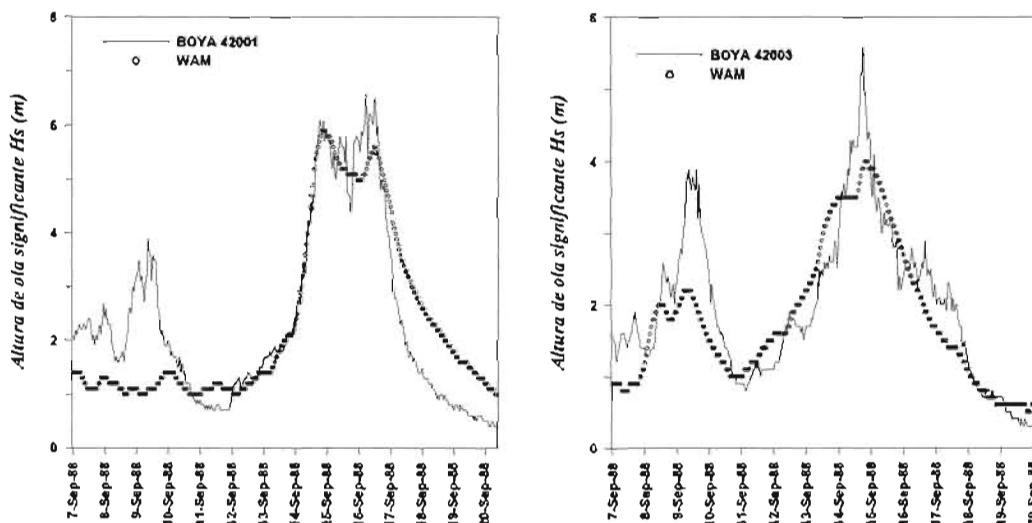


Figura 5-6 Series de tiempo y predcción de altura de ola significativa  $H_s$ , huracán *Gilberto*

La comparación de los periodos medios del oleaje se muestra en la Figura 5-7. También se reproducen tendencias satisfactoriamente, aunque no tanto como en las alturas de ola. En general, el modelo subestimó los valores, en los picos de la tormenta las diferencias fueron hasta de 3 segundos. La Tabla 5-3 muestra los errores para ambos casos.

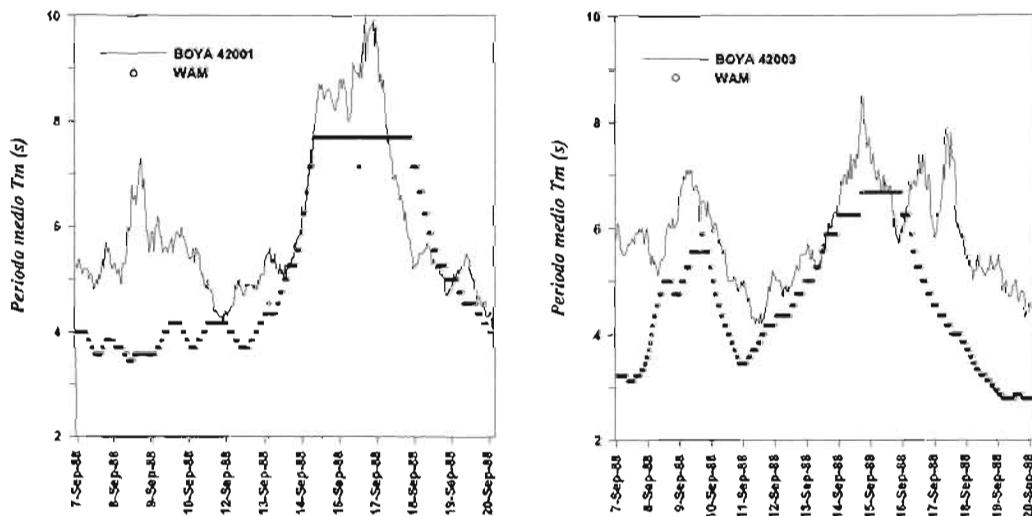


Figura 5-7 Series de tiempo y predcción de periodo medio  $T_m$ , huracán *Gilberto*

Tabla 5-3 Errores calculados para la altura de ola significativa y periodo medio al paso del huracán *Gilberto*

BOYA	Variable	BIAS	Error medio absoluto normalizado	RMSE	Índice de dispersión SI
42001	<i>Hs</i>	- 0.044 m	30 %	0.90 m	38 %
	<i>Tm</i>	- 0.81 s	18 %	0.29 m	5 %
42003	<i>Hs</i>	-0.16 m	22 %	0.56 m	29 %
	<i>Tm</i>	-1.25 s	22 %	0.22 s	4 %

### 5.1.4 Distribuciones espaciales

La Figura 5-8 presenta los campos de viento del *NCEP/NCAR Reanalysis Project* a cada 12 horas, dentro del periodo del 14 al 17 de septiembre. La intensidad de los vientos se representa con la escala de color, y su dirección con ayuda de las flechas, cuya longitud está también escalada respecto a la intensidad.

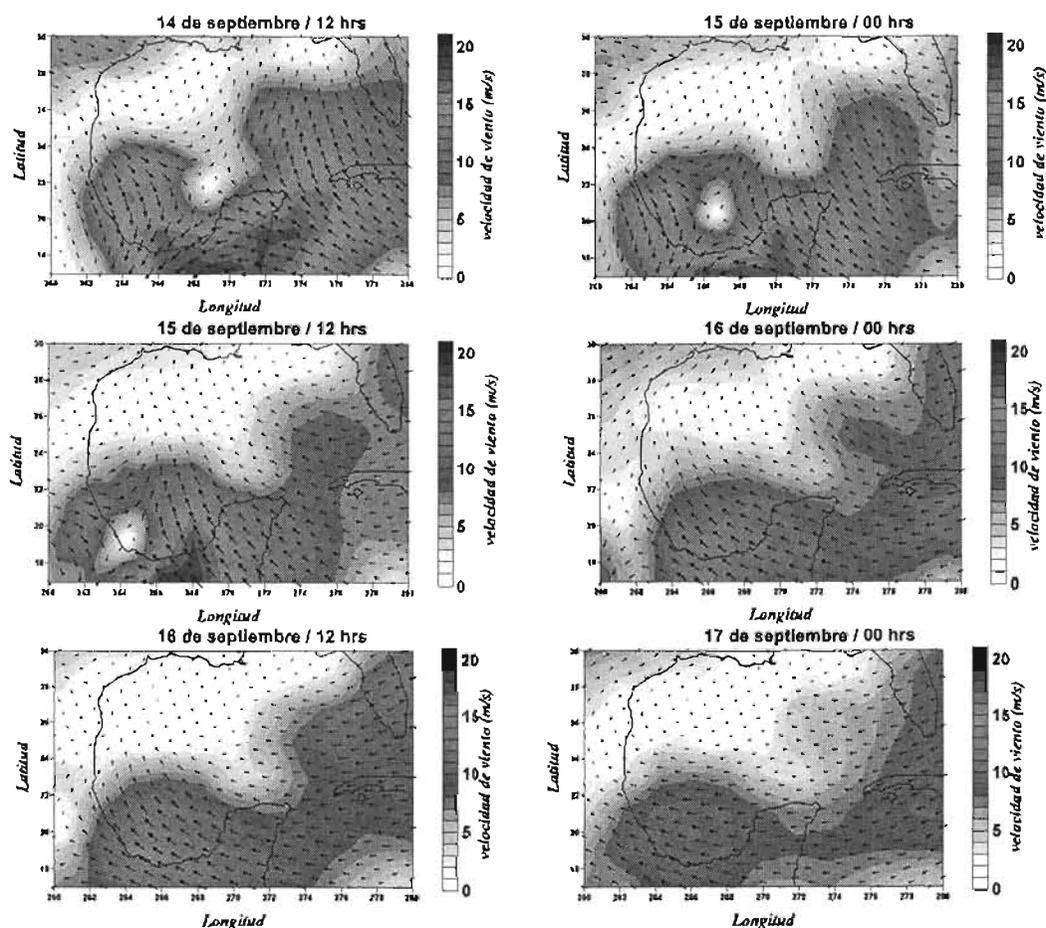


Figura 5-8 Campos de viento *NCEP/NCAR Reanalysis Project* al paso del huracán *Gilberto*

La dirección predominante de los vientos es *NW* siguiendo la trayectoria del huracán. Los días 14 y 15 de septiembre se presentan los vientos más intensos en la península de Yucatán, generando oleaje de más de 5m de altura (ver Figura 5-9). Cabe aclarar que los mapas que se presentan, tanto de viento como altura de ola significativa, no corresponden necesariamente a las condiciones más intensas. Debe recordarse que se está trabajando con campos de viento reportados cada 6 horas y el pico de la tormenta se pudo haber suavizado.

A medida que el huracán cruza la península de Yucatán con rumbo *NW* el oleaje en las costas de Tabasco y Veracruz se incrementa, pero no de manera considerable. Esto se debe probablemente a que el *fetch* es limitado y el oleaje no se alcanza a desarrollar.

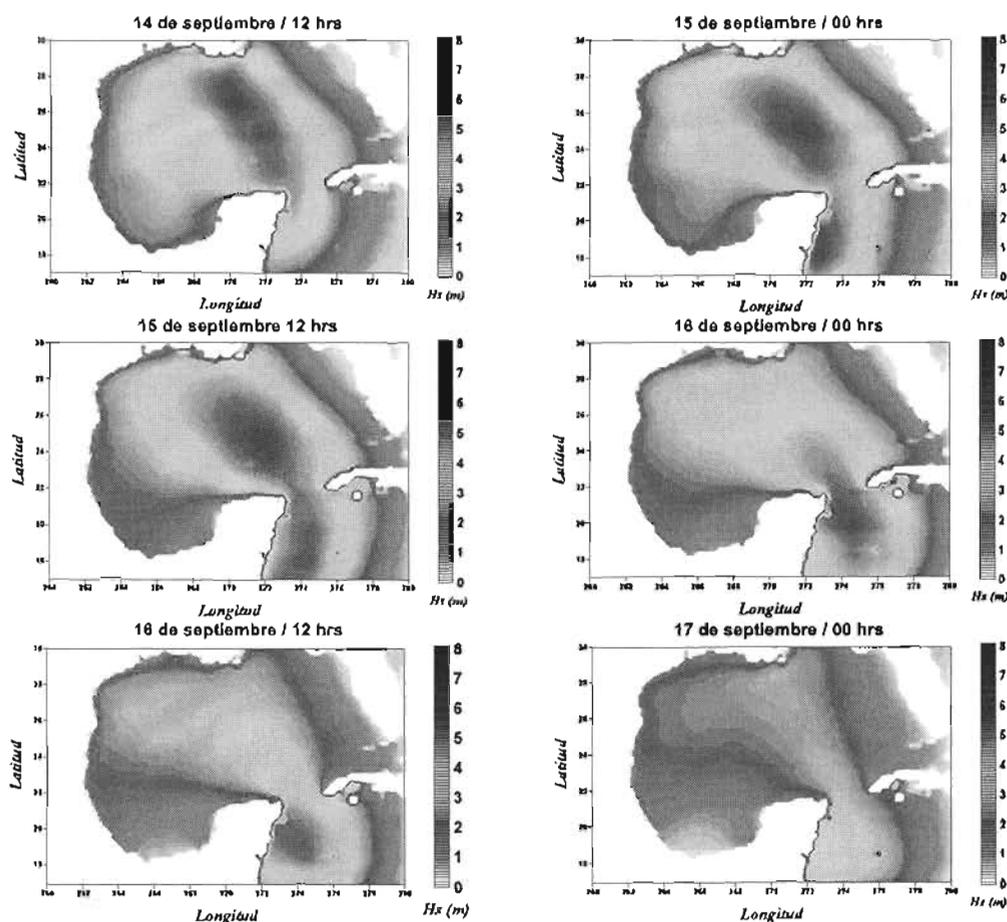


Figura 5-9 Distribuciones espaciales de altura de ola al paso del huracán *Gilberto*

## 5.2 Huracán MITCH (1998)

### 5.2.1 Generalidades

Al huracán *Mitch* se le atribuyen más de 9 000 muertes causadas por las inundaciones que provocó a su paso por Centroamérica, principalmente en Honduras y Nicaragua. *Mitch* se originó como una depresión tropical en las costas de África el 8 de octubre de 1998, inició su traslado hacia la zona del Caribe cruzando Florida y la península de Yucatán como tormenta tropical. Se convirtió en huracán el 24 de octubre cuando se encontraba cerca de las costas de Jamaica, su trayectoria continuó hacia las costas de Honduras en donde tocó tierra siendo huracán clase 4 (escala Saffir-Simpson) el 27 de octubre, a partir de esa fecha inició su proceso de disipación.

La Figura 5-10 muestra el paso del huracán *Mitch* por la zona de estudio, así como la localización de las boyas utilizadas para la validación.

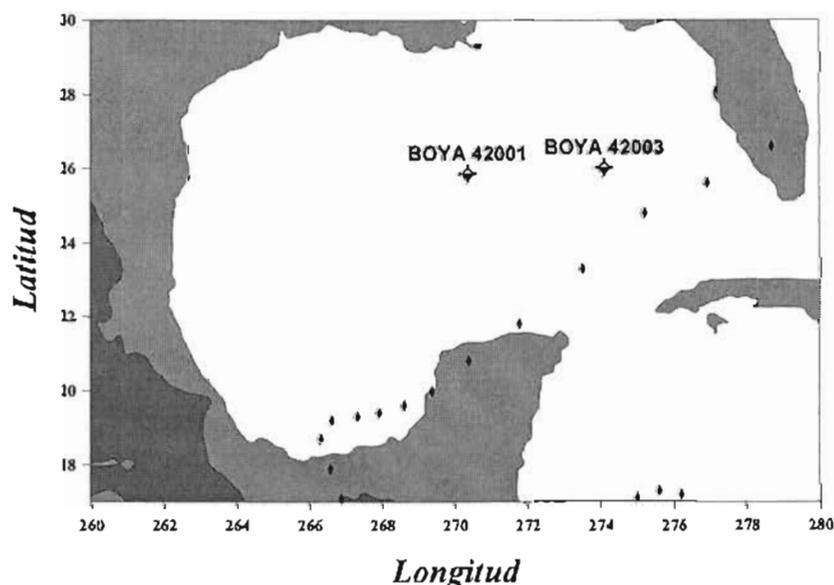


Figura 5-10 Trayectoria del huracán *Mitch* en la zona de estudio así como la posición de las boyas para la validación

### 5.2.2 Verificación del campo de vientos

El campo de vientos interpolado a partir de los datos del *NCEP/NCAR* ajusta satisfactoriamente con los datos medidos (de hecho mejor que en el caso anterior), ver Figura 5-11. En la comparación con ambas boyas el índice BIAS fue positivo (ver Tabla 5-4), lo que indica los valores de los vientos sintéticos, en promedio, estuvieron por arriba de los registrados por el anemómetro.

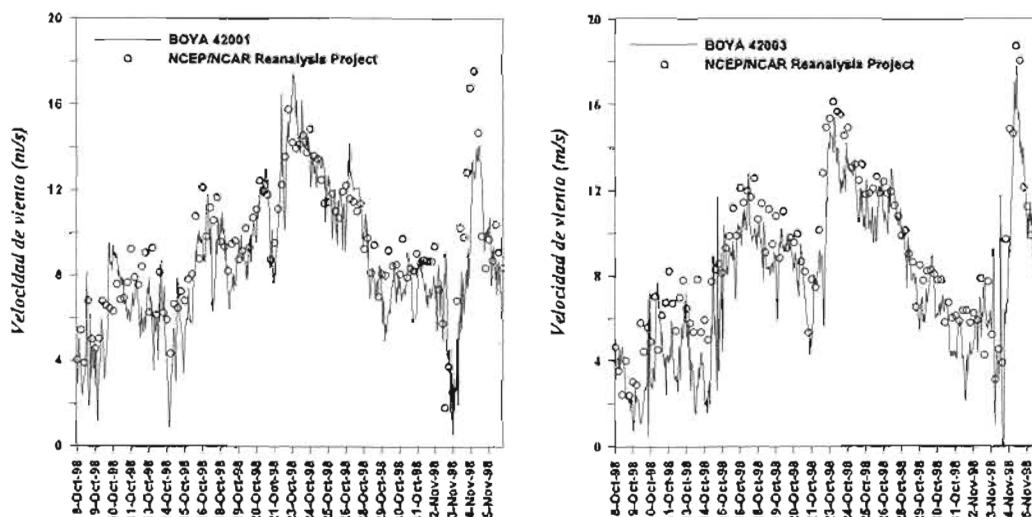


Figura 5-11 Velocidad de viento medido y predicción del NCEP/NCAR, huracán *Mitch*

Tabla 5-4 Errores calculados para la velocidad de viento al paso del huracán *Mitch*

BOYA	Variable	BIAS	Error medio absoluto normalizado	RMSE	Índice de dispersión S1
42001	viento	0.83 m/s	19%	2.05 m/s	24%
42003	viento	1.43 m/s	24%	2.12 m/s	28%

### 5.2.3 Validación de resultados

El error promedio entre valor interpolado y medido en la boya 42001 fue del 30%, tendiendo a la sobreestimación (Figura 5-12). Destaca la sobreestimación de un pico el 4 de noviembre, lo cual podría ser atribuido a un error de interpolación. El ajuste de la boya 42003 con la interpolación es muy bueno, ya que se describe perfectamente tanto la tendencia como la magnitud, aún en los picos. Los errores se presentan en la Tabla 5-5.

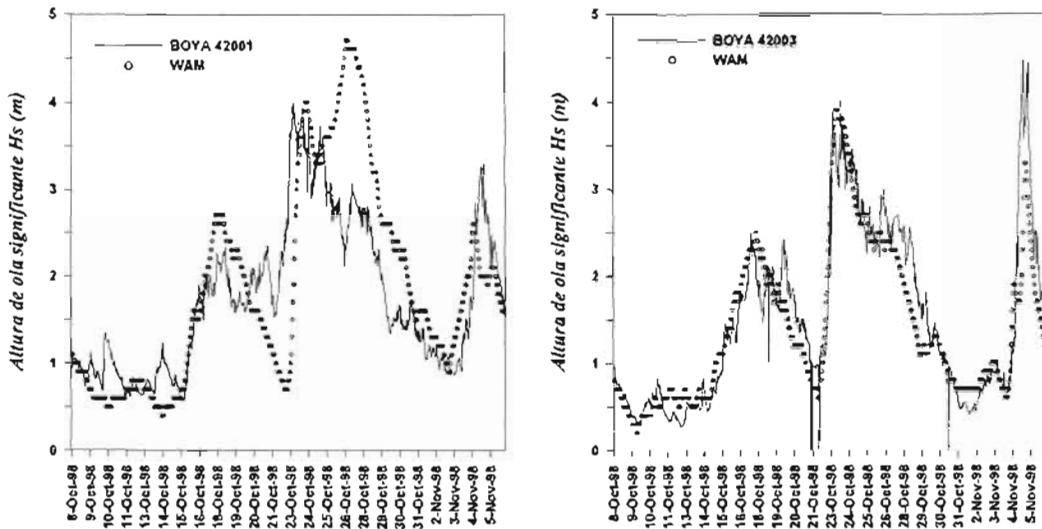


Figura 5-12 Series de tiempo y predicción de altura de ola significativa  $H_s$ , huracán *Mitch*

El error absoluto medio entre los valores modelados y los registros del periodo medio fue del 16% con un BIAS negativo para la boya 42001. En la boya 42003 el error absoluto fue de 21% con una tendencia también a subestimar los valores. Los errores calculados para la verificación del periodo medio se muestra en la Tabla 5-5.

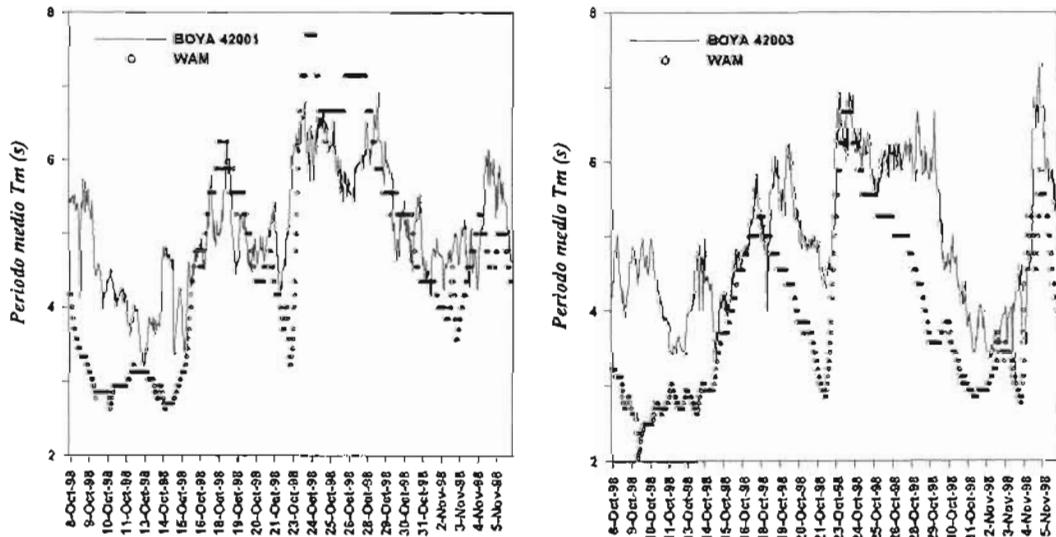


Figura 5-13 Series de tiempo y predicción de periodo medio  $T_m$ , huracán *Mitch*

Tabla 5-5 Errores calculados para la altura de ola significativa y periodo medio al paso del huracán *Mitch*

BOYA	Variable	BIAS	Error medio absoluto normalizado	RMSE	Índice de dispersión SI
42001	<i>Hs</i>	0.11 m	31%	0.31 m	18%
	<i>Tm</i>	-0.37 s	16%	0.99 s	20%
42003	<i>Hs</i>	-0.076 m	18%	0.39 m	26%
	<i>Tm</i>	-0.99 s	21%	1.21 s	25%

### 5.2.4 Distribuciones espaciales

Los vientos asociados al paso del huracán *Mitch* se muestran en la Figura 5-14. La dirección predominante de los vientos fue *SW*, por lo que el Estado más afectado fue Quintana Roo, a pesar de que recibió al huracán cuando todavía no había alcanzado su máxima intensidad.

Los mapas de altura de ola significativa se muestran en la Figura 5-15. El crecimiento del oleaje se da en la dirección predominante del viento, afectando principalmente las costas del Estado de Quintana Roo con alturas de ola mayores a los 5 m.

Una vez más se puede observar en las 6 figuras de distribución espacial de alturas de ola que, a pesar de que los vientos también afectan las costas de Tabasco y Veracruz, el crecimiento del oleaje no es tan severo debido a la limitación del *fetch*.

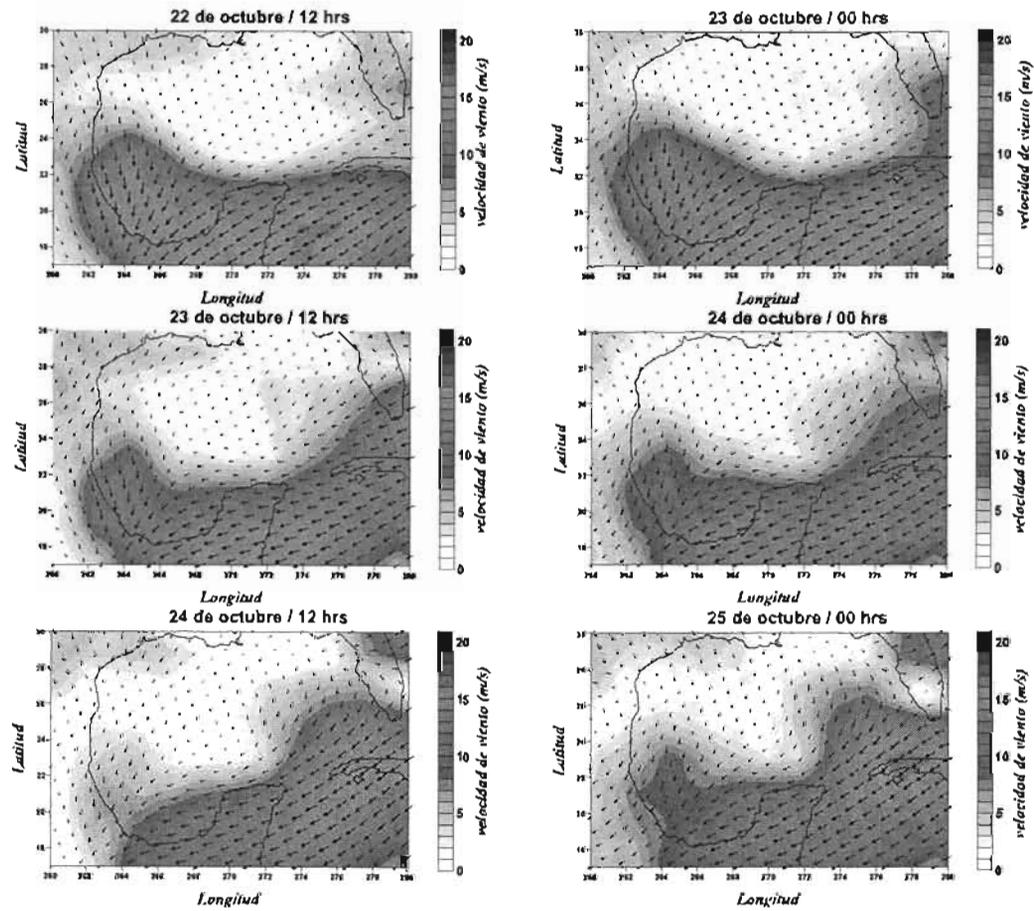


Figura 5-14 Campos de viento NCEP/NCAR Reanalysis Project al paso del huracán Mitch

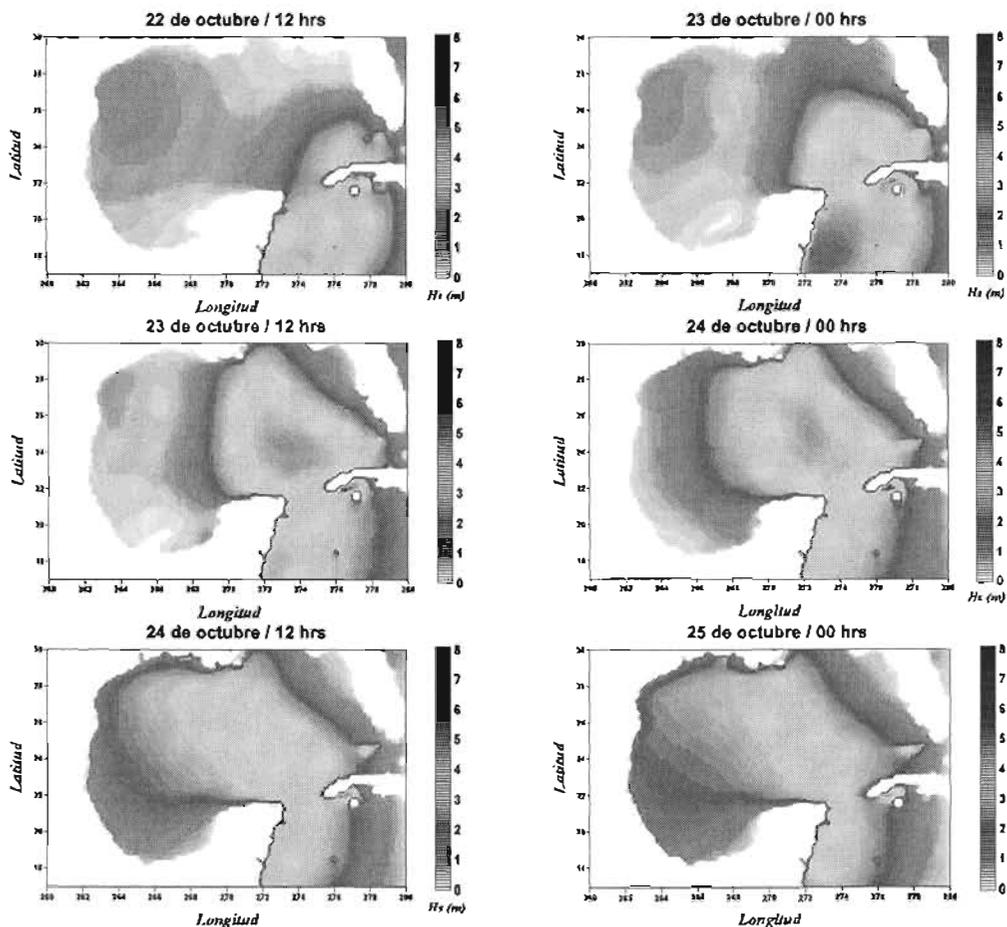


Figura 5-15 Distribuciones espaciales de altura de ola al paso del huracán *Mitch*

## 5.3 Huracán ISIDORE (2002)

### 5.3.1 Generalidades

Según la reseña del *Servicio Meteorológico Nacional* (SMN) este huracán se generó a partir de la depresión tropical No. 10 que se presentó 14 de septiembre de 2002 en las aguas del mar Caribe. Inició su circulación a 2,950 km al Este de las costas de Quintana Roo, con vientos máximos sostenidos de 45 km/h. El 18 de septiembre, a 120 km Jamaica se convirtió en la tormenta tropical *Isidore*, presentando vientos máximos sostenidos de 65 km/h. Para el día 19, *Isidore* pasó a ser huracán clase 1 en la escala Saffir-Simpson. Siguió su trayectoria con rumbo predominante hacia el Noroeste y el día 21 por la mañana se localizó en la parte media del Canal de Yucatán, donde alcanzó categoría 3. El 22 de septiembre el ojo del huracán impactó tierra aproximadamente a 45 km al Este de Puerto Progreso, Yucatán, causando daños materiales muy importantes principalmente en Yucatán y Campeche. Al impactar tierra se degradó a tormenta tropical, y el día 24 retornó al mar siguiendo una trayectoria hacia las costas de Louisiana y Mississippi en los Estados Unidos.

La Figura 5-16 muestra la trayectoria del huracán *Isidore* así como las boyas utilizadas para la validación.

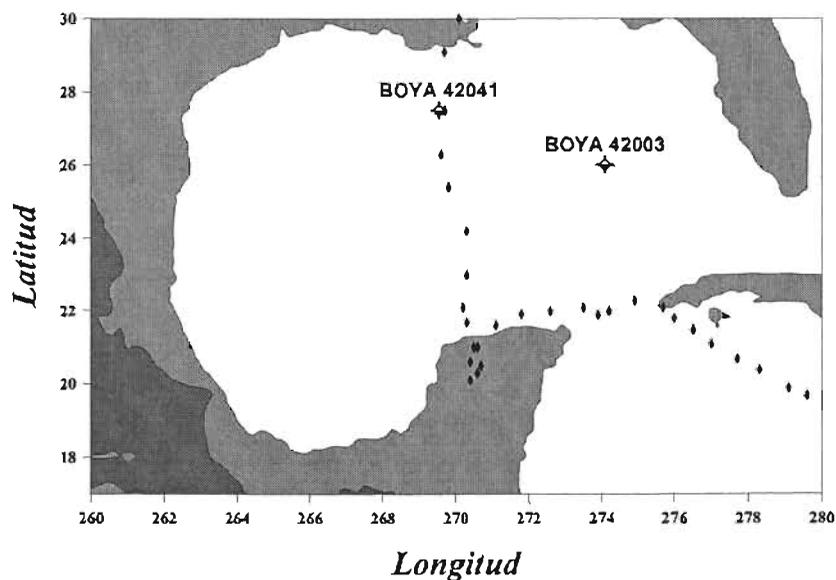


Figura 5-16 Trayectoria del huracán *Isidore* y posición de las boyas para la validación

### 5.3.2 Verificación del campo de vientos

La Figura 5-18 muestra la comparación de las boyas 42001 y 42041 con los datos de viento del *NCEP/NCAR*. Se observa que las velocidades del viento son en general sobreestimadas, aunque también hay valores por debajo de los registrados. La tendencia de la tormenta, incluidos los picos, se reproduce satisfactoriamente. Vale la pena destacar el paso del ojo del huracán por la boya 42041 (ver Figura 5-16), el cual es registrado tanto en los datos medidos como en los interpolados (25 de septiembre). El ajuste con la boya 42001 tiene un error medio absoluto de 29%, mientras que para la boya 42041 el error es del 28%, la Tabla 5-6 muestra el resumen de los errores.

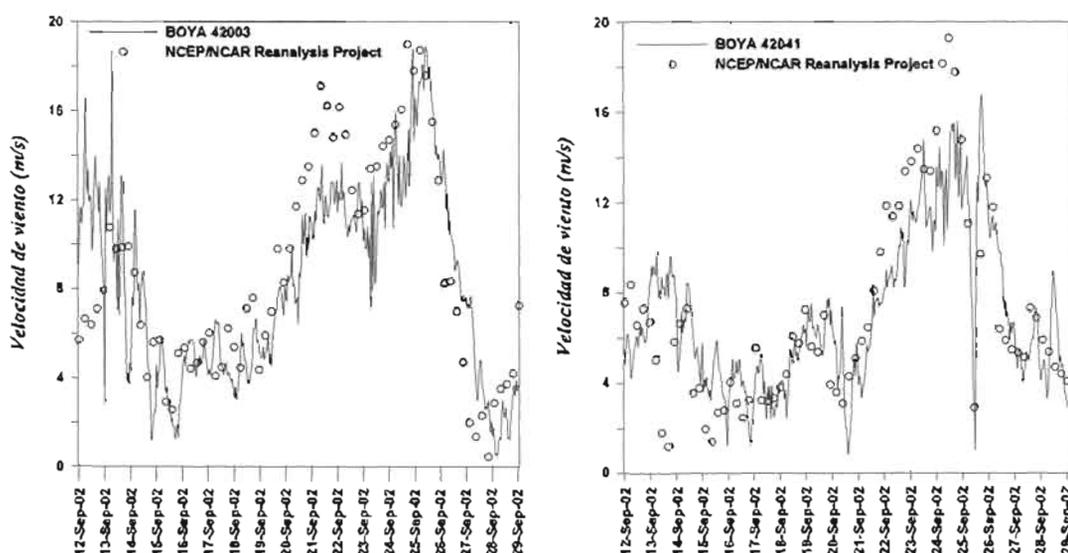


Figura 5-17 Velocidad de viento medido y predicción del NCEP/NCAR, huracán *Isidore*

Tabla 5-6 Errores calculados para la velocidad de viento al paso del huracán *Isidore*

BOYA	Variable	BIAS	Error medio absoluto normalizado	RMSE	Índice de dispersión SI
42003	viento	0.54 m/s	29%	3.05 m/s	37%
42041	viento	0.09 m/s	28%	2.55 m/s	36%

### 5.3.3 Validación de resultados

En lo que se refiere a altura de ola significativa, Figura 5-18, el ajuste del modelo con las mediciones de la boya 42003 es muy bueno, y aunque el modelo predice un valor ligeramente menor al pico máximo, la evolución es descrita adecuadamente. En la boya 42041 no sucede lo mismo, ya que el modelo no registra el pico máximo, lo cual está relacionado sin duda con la variación súbita en la intensidad de la tormenta inducida por el

paso del ojo del huracán, como se había hecho notar anteriormente. De aquí puede comprenderse el impacto de la resolución de la modelación, ya que el paso del ojo del huracán sucede en una escala temporal mucho menor que la tasa media de variación de las variables, y su representación adecuada requeriría disminuir sustancialmente el espaciamiento temporal.

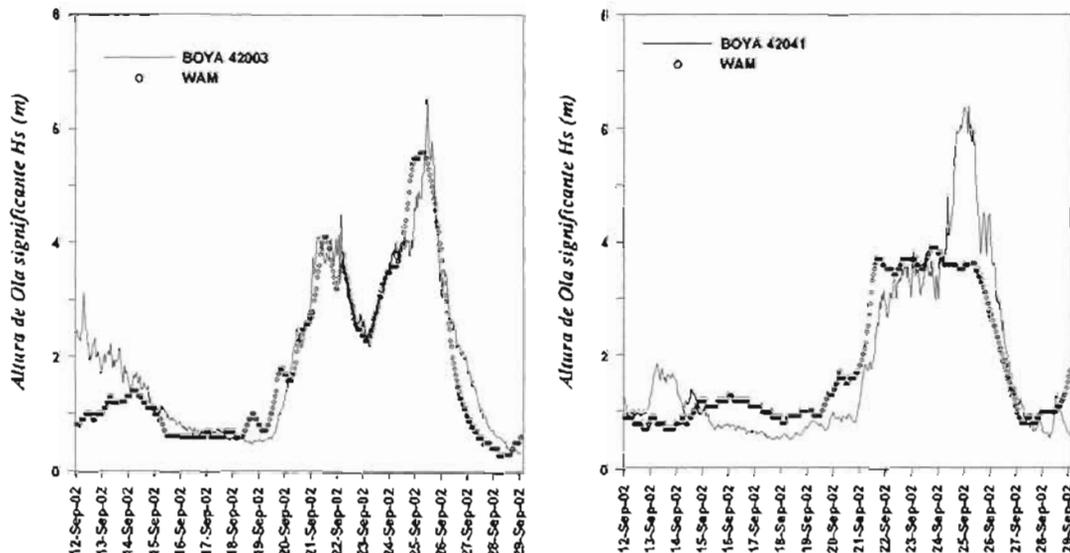


Figura 5-18 Series de tiempo y predicción de altura de ola significativa  $H_s$ , huracán *Isidore*

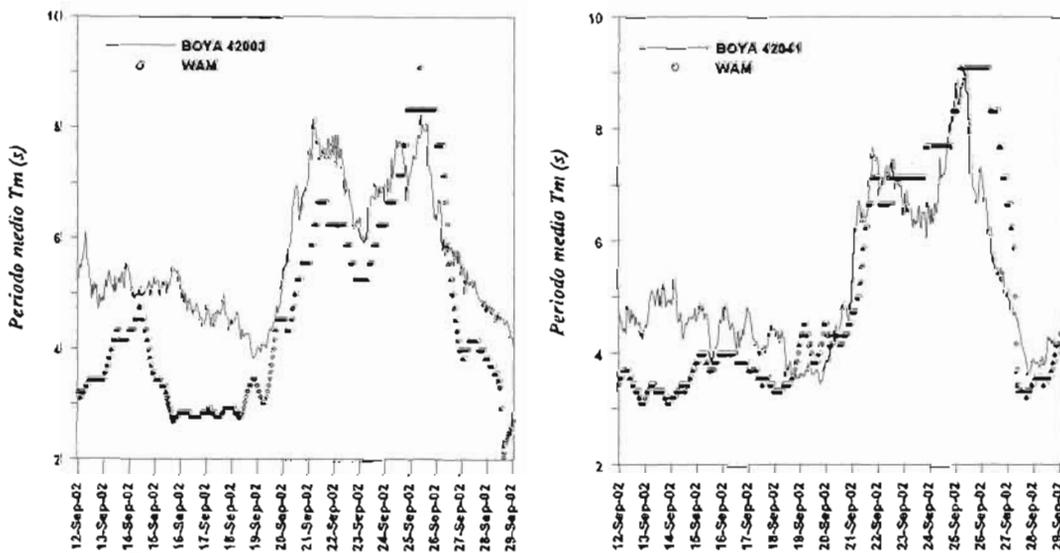


Figura 5-19 Series de tiempo y predicción de periodo medio  $T_m$ , huracán *Isidore*

La tendencia general del modelo fue subestimar ligeramente el periodo medio, el error medio absoluto, para altura de ola y periodo, es de aproximadamente 20%. Los errores se presentan en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7 Errores calculados para la altura de ola significativa y periodo medio al paso del huracán *Isidore*

BOYA	Variable	BIAS	Error medio absoluto normalizado	RMSE	Índice de dispersión SI
42003	<i>Hs</i>	-0.182 m	20%	0.53 m	26%
	<i>Tm</i>	-1.05 s	22%	1.37 s	24%
42041	<i>Hs</i>	-0.004 m	31%	0.76	42%
	<i>Tm</i>	-0.14 s	16%	1.06	20%

### 5.3.4 Distribuciones espaciales

La Figura 5-20 muestra los campos de vientos asociados al paso del huracán *Isidore* por nuestro país, el periodo más crítico es entre el 23 y 24 de septiembre cuando el huracán toca tierra en la península de Yucatán.

A partir del 25 de septiembre el huracán se degrada a tormenta tropical y los vientos disminuyen su intensidad de forma considerable.

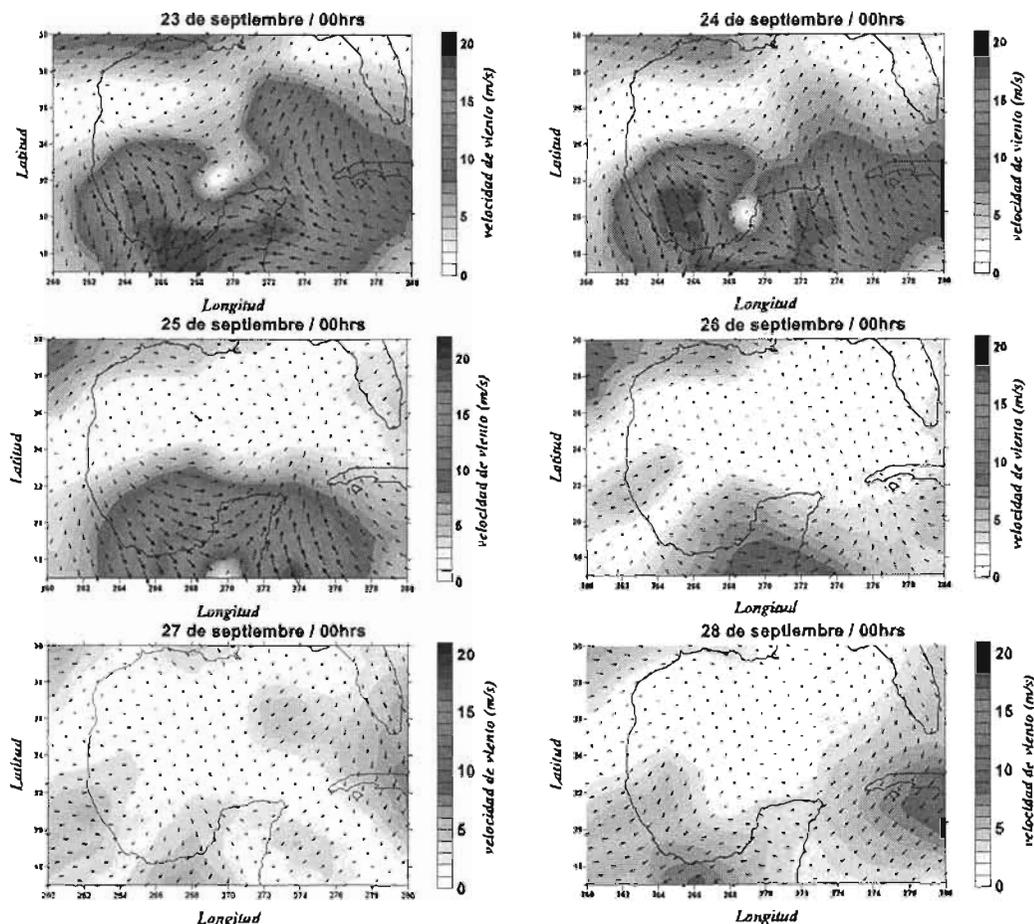


Figura 5-20 Campos de viento NCEP/NCAR Reanalysis Project al paso del huracán *Isidore*

Las distribuciones de altura de ola asociadas al paso de *Isidore* se muestra en la Figura 5-21. Las zonas más afectadas fueron los Estados de Quintana Roo y Campeche. El oleaje generado al paso de este huracán fue importante en toda el área de estudio. Para el periodo entre el 27 y 28 de septiembre *Isidore* se había degradado a tormenta tropical con una trayectoria hacia las costas de Estados Unidos, en los mapas de altura de ola correspondientes a este periodo se pudo apreciar una disminución en costas mexicanas, acompañado de un incremento costas estadounidenses.

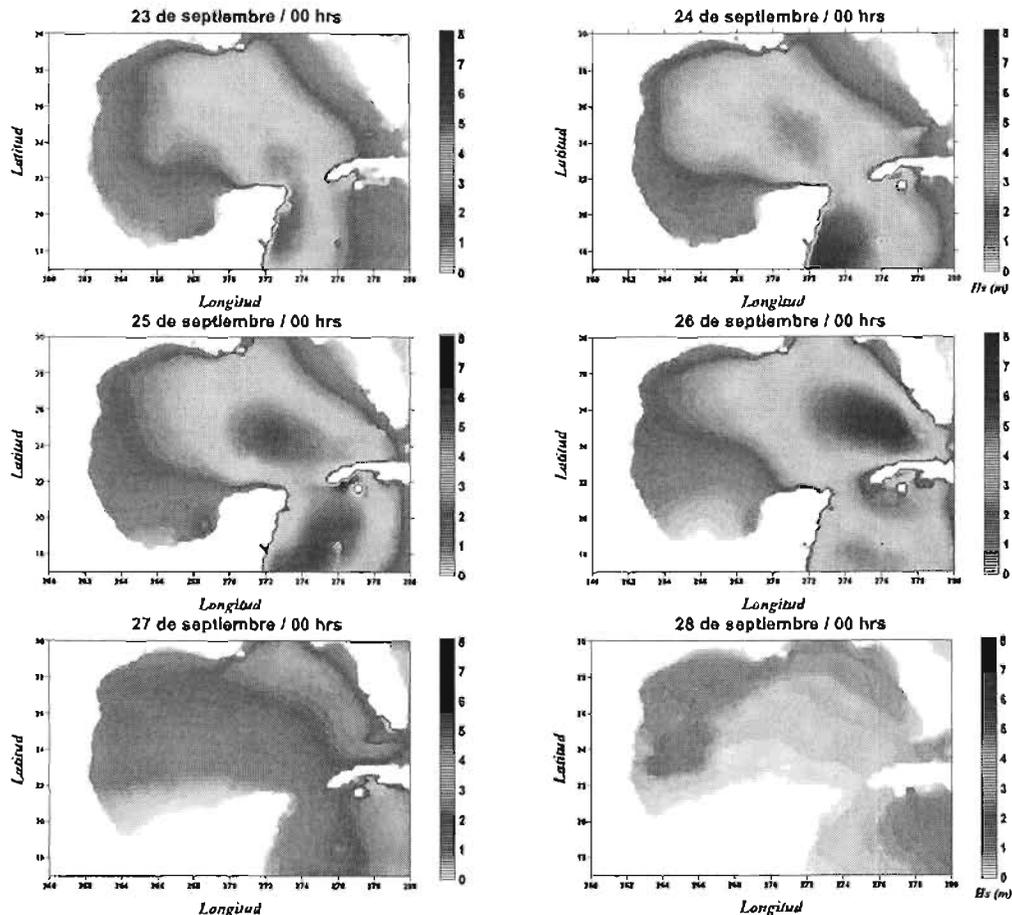


Figura 5-21 Distribuciones espaciales de altura de ola al paso del huracán *Isidore*

## 5.4 Comentarios

Puede concluirse que el comportamiento general del modelo *WAM* en los tres casos analizados fue bueno, ya que hace una correcta descripción del desarrollo de las variables durante el paso de los huracanes.

No obstante lo anterior, pudo apreciarse una tendencia a la subestimación de los picos de aproximadamente el 30%. Este porcentaje es relativamente alto, sobre todo porque los

daños que puede ocasionar una ola de 7 m son mucho mayores que los que causa una de 5 m (recordar que la energía transportada por el oleaje es proporcional al cuadrado de la altura de ola). Aún así, el modelo presentado es un avance importante en la modelación de este tipo de fenómenos, sobre todo tomando en cuenta las limitaciones científicas y tecnológicas frente a la complejidad de los eventos meteorológicos.

También cabe aclarar que la resolución tanto espacial como temporal de los campos de viento con los que se trabajó, pensada para hacer un análisis de tipo general y a gran escala, no alcanza para emitir un juicio definitivo sobre el comportamiento del modelo, esto es, si los datos fueran más detallados los resultados serían sin duda mejores. Es necesario comentar que la ejecución del modelo, a pesar de estar diseñada para estaciones de trabajo muy potentes, requiere de muchos recursos y mucho tiempo de cómputo, lo cual representa una limitante al escoger resoluciones. Los casos presentados se ejecutaron en el cluster *Ollin* con sistema operativo Linux Suse Enterprise 9.0, propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Por otro lado, una mejor caracterización de los campos de vientos (datos de entrada del modelo) mejoraría sustancialmente los resultados obtenidos. Los avances tecnológicos en el ramo de la teledetección generan un panorama optimista, sin embargo es necesario avanzar en aspectos cuya limitación ha dejado de ser técnica, como los medios de acceso a los bancos de información.

## **CONCLUSIONES**

En este trabajo se exponen las principales causas por lo que es necesario que exista una caracterización adecuada del clima marítimo del litoral de nuestro país, se presenta un modelo numérico capaz de simular la generación de oleaje por la acción del viento, sus antecedentes y la verificación de éste ante fenómenos meteorológicos de interés nacional, como es el caso de los huracanes.

Una de las principales limitantes durante el desarrollo de la tesis fue la escasez de datos para alimentar y validar el modelo propuesto. La totalidad de las fuentes de datos utilizadas (de donde se obtuvieron campos de viento y batimetría) fueron extranjeras. Esto es un claro aviso de la necesidad de que existan en México sistemas de información con bases de datos hidrometeorológicos, batimétricos, etc., y sobre todo que dichas bases sean accesibles.

Muchas de las actividades que se realizan en el litoral mexicano y en particular en el Golfo de México requieren de la predicción de las condiciones de oleaje ante ciertos escenarios climáticos. El modelo *WAM* es ampliamente utilizado en todo mundo, y con este trabajo puede concluirse que su aplicación en México es una excelente opción.

Los resultados del modelo se verificaron con un estudio diseñado para analizar su comportamiento global en el Golfo de México, por lo que, como se ha mencionado, la resolución de los campos de viento y batimetría no son las óptimas para obtener resultados de mayor precisión; a pesar de esta limitante puede asegurarse que el modelo mostró un comportamiento francamente satisfactorio. Del trabajo realizado surgen las conclusiones siguientes:

- El modelo simula adecuadamente el desarrollo de las variables oceanográficas durante el paso de una tormenta, sobre todo en lo que se refiere a la tendencia, ya que en los picos suele subestimar magnitudes. Este último problema podría solucionarse con datos de entrada definidos con mayor resolución y con modelaciones más detalladas temporalmente, en la medida, claro está, en que las limitaciones de información y herramientas de cálculo disponibles lo permitan.
- El modelo, como es de esperarse, es muy sensible a la calidad con la que se tenga definido el campo de vientos, que es el dato de entrada. Entonces, en la medida en que se reduzca el error en las predicciones, o mejor aún, en la medida en que las predicciones se cambien por mediciones, la calidad de la predicción del oleaje asociado se incrementará notablemente.
- Para la aplicación del modelo a zonas pequeñas y cercanas a la costa se debe tomar en cuenta lo siguiente: el *WAM* se desarrolló como un modelo de gran escala, por lo que aplicarlo en zonas pequeñas, donde la malla necesitara gran resolución, podía incrementar en gran medida el tiempo de cómputo y ser poco práctico. Para resolver esta limitante se han desarrollado técnicas como la anidación de mallas, alimentadas por ejecuciones a mayor escala, con lo que el aumento de resolución es gradual y eficiente en costo computacional. No obstante este beneficio sólo es bien aprovechado si se trabaja con batimetrías de gran resolución.

- Si se deseara conocer la magnitud con que llega a la costa el oleaje generado por el viento en altamar, debe tomarse en cuenta que el *WAM* no reproduce algunos fenómenos propios de las zonas costeras. Para estudios de ese tipo se recomienda seguir el siguiente procedimiento: utilizar el *WAM* en el área de generación del oleaje con una malla de baja resolución, y hacer un acercamiento hacia costa mediante una malla anidada. La malla anidada debe extenderse hasta un punto en el cual pueda despreciarse la acción del viento sobre el agua en lo que reste de camino hasta la costa. A partir de ahí debe aplicarse un modelo específicamente diseñado para representar propagación de oleaje en zonas costeras, como los tipo *mild-slope* o los tipo *Boussinesq*, capaces de modelar difracción, reflexión, refracción y en algunos casos hasta rotura.

De implementarse formalmente el *WAM* (o cualquier otro modelo) para la predicción de oleaje en nuestro país, debe implementarse además un modelo atmosférico de predicción de campos de viento. El *Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN)* cuenta con el modelo *MM5*, desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Estados Unidos. El *MM5* es muy robusto, y ha sido validado por el *SMN* con muy buenos resultados. Se ejecuta con una malla que cubre toda la República Mexicana y su litoral, con resolución variable entre 45 km (en el mar) y 5 km (en algunos lugares en tierra, como en el Distrito Federal). Diariamente se obtiene un pronóstico a 72 horas, con resultados parciales cada 12 horas. Las principales variables pronosticadas son: temperatura, precipitación y viento (magnitud y dirección). Para este trabajo no se utilizaron datos provistos por el *SMN* porque desgraciadamente no cuenta con registros históricos de campos de viento, además de que las validaciones que se le han hecho han sido para tierra, y no se tiene ningún diagnóstico por parte del *SMN* de su confiabilidad en mar.

## Futuras líneas de investigación

La caracterización del clima marítimo en México es una necesidad imperante, el modelo *WAM* se presenta como una buena opción para lo que se refiere a oleaje generado por viento, sin embargo existen muchos aspectos que deben ser mejorados para incrementar sus beneficios. Los trabajos más convenientes en el corto plazo son:

- Implementación del modelo *MM5* para su uso en conjunto con el *WAM*, lo cual permitiría contar con un sistema integral de predicción de oleaje dirigido desde México. Sería deseable que los resultados de ese sistema estuvieran disponibles a través de Internet.
- Incrementar la calidad y resolución de la caracterización batimétrica de las costas mexicanas, lo cual además de ser útil en innumerables aspectos, permitiría explotar al máximo la posibilidad del *WAM*, sobre todo cuando se realicen estudios de interés más localizado.

- Instrumentación de las costas mexicanas para contar con registros de mediciones de parámetros oceanográficos, que permitirían validar los modelos de predicción atmosférica y el mismo *WAM*.
- Acoplamiento del *WAM* con modelos de propagación de oleaje, como el *WAPO2D* (Silva et al., 2005), de tal forma que se generen herramientas para análisis integrales de predicción de oleaje distante.
- Hacer un análisis estadístico de las tormentas extremas que han azotado las costas del Golfo de México, para utilizarlo en la elaboración de mapas de oleaje para distintos periodos de retorno, que permitan identificar zonas vulnerables.

## **REFERENCIAS**

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

- Adams, M.C., Hernández, E., Cato, J. (2004). “*The economic significance of the Gulf of Mexico related to population, income, employment, minerals, fisheries and Shipping*”. *Ocean & Coastal Management* **47**: 568-580 pp.
- Anuario estadístico del Sector de Comunicaciones y Transportes (2003). Dirección General de Planeación: 105-125 pp.
- Bolaños, R. (2004). “*Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: física y predicción*”. Tesis de Doctorado. Laboratori d’Enginyeria Marítima Universitat Politècnica de Catalunya, 239 pp.
- Bouws, E., Günther, H., Rosenthal, W. & Vincent, C.L.. (1985). “*Similarity of the Wind Wave Spectrum in Finite Depth Water I. Spectral Form*”. *Jour. Geoph. Res.*, **90(C1)**: 975-986 pp.
- Bretschneider, C.L. (1959). “*Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves*”. Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers: Washington, D.C.
- Carretero, J.C., Gómez, M. (2000). “*Modifications to the WAM cycle 4 code operational at Clima Marítimo (CM)*”. Puertos del Estado.
- Cartwright, D.E., Longuet-Higgins, M.S. (1956). “*The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function*”. *Proc. of the Royal Society of London, Series A (Mathematics and Physical Science)*: 212-232 pp.
- Chakrabarti, S.K. (1987). “*Hydrodynamics of Offshore structures*”, WIT Press, Southampton, UK.
- Charnock, H. (1955). “*Wind stress on a water surface*”, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **81**: 639-640 pp.
- Cheung, K.F., Phadke, A.C., Wei, Y., Rojas, R., Douyere, Y. J.-M., Martino, C.D., Houston, S.H., Liu, F., Lynett, P.J., Dodd, N., Liao, S., Nakazaki, E. (2003). “*Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management*”. *Ocean Engineering* **30**: 1353-1386 pp.
- Coastal Engineering Manual (CEM) (2001). U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Capítulos II-1 y II-2.
- CONAPO (1999). “*La situación sociodemográfica en las zonas costeras*”, Informe 73-89 pp.

- Contreras, A. (2000). "*Estudio océano-meteorológico del riesgo generado por ciclones tropicales en el litoral mexicano*". Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2-3 pp.
- Gelci, R., Cazalé, H. & Vassal, J. (1957). "*Prévision de la houle. La méthode des densités spectroangulaires*". Bull. Infor. Comité Central Oceanogr. d'Etude Côtes 9: 416-435 pp.
- Goda, Y. (1979). "*Numerical experiments on wave statistics with spectral simulations*". Port and Harbour Res. Inst. 3-57 pp.
- Günther, H., Hasselmann, S., Janssen, P. A. E. M. (1992). "*The WAM model cycle 4*". Modellberatungsgruppe, 102 pp.
- Hasselmann, K. (1960). "*Grundgleichungen der Seegangsvoraussage*". Schiffstechnik 7: 191-195 pp.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bonws, E., Carlson H., Cartwright, D. C., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W. & Walden, H. (1973). "*Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*". Deutsches Hydrographisches Institut: Hamburg. 95 pp.
- Hsu, L., Allard, R. (2002). "*Wave model validation for the Northern Gulf of Mexico Litoral Initiative (NGLI) Project*". Naval Research Laboratory, 30 pp.
- Informe PEMEX (2001). "*Evaluación de líneas submarinas en el Golfo de México*". Documento informativo, 4 pp.
- Jassen, P.A.E.M. (1989). "*Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves*". J. Phys. Oceanogr. **19**: 745-754 pp.
- Jassen, P.A.E.M. (1991). "*Quasi-Linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting*". J. Phys. Oceanogr. **21**: 1631-1642 pp.
- Jones, I., Toba, Y. (2001). "*Wind stress over the ocean*". Cambridge University Press, 1-33 pp.
- Kitaigorodskii, S.A. (1970). "*Fizika Vzaimodeystviya Atmosfery I Okieana (Physics of Air-Sea Interaction)*". Gidrometeoizdat, Leningrad, 284 pp.
- Komen, G.J., Hasselmann, S., Hasselmann, K. (1984). "*On the existence of a fully developed windsea spectrum*". J. Phys. Oceanogr. **14**: 1271-1285 pp.

- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, Janssen, P.A.E.M. (1994). *"Dynamics and Modelling of Ocean Waves"*. Cambridge University Press, 532 pp.
- León, C., (2004). *"Piezas de un rompecabezas: dimensión socioeconómica de las costas en México"*. El manejo Costero en México "Antecedentes", Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo, 5-26 pp.
- Lizano, O.G., Ocampo, J.F., Alvarado, L.F., Vega, R., Puig, J.M. (2001). *"Evaluación de modelo numéricos de tercera generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México"*. Top. Meteor. Oceanog. **8**: 40-49 pp.
- Longuet-Higgins, M.S., & Stewart, R.W. (1964). *"Radiation stresses in water waves: A physical discussion with applications"*, Deep Sea Research **11**: 529-562 pp.
- Martínez, E. (2002). *"Análisis de vulnerabilidad por presencia de huracanes en la costas del Estado de Guerrero"*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 13 - 26 pp.
- Massel, S.R. (1996). *"Ocean surface waves: Their physics and predictions"*, Advanced Series on Coastal Engineering –Vol **11**, World Scientific, 491 pp.
- Miles, J. W. (1957). *"On the generation of surface waves by shear flows"*. Journal of Fluid Mechanics **3**: 185-204 pp.
- Mitsuyasu, H., Suhaya, T. Mizuno, S. Okhuso, M., Honda, T. & Rikiishi, K., (1975). *"Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy"*. J. Physical Oceanogr. **5**: 750-760 pp.
- Monbaliu, J., Padilla-Hernández, R., Hargreaves, J., Carretero, J.C., Weimin, L., Sclavo, M., Günther, H., (2000). *"The spectral wave model, WAM adapted for aplicaciones with high spartial resolution"*. Coastal Engineering **41**: 41-62.
- Mobaliu, J., Hargreaves, J.C., Carretero, J.C., Gerritsen, H., Flather, R. (1999). *"Wave modeling in the PROMISE project"*. Coastal Engineering **37**: 379-407 pp.
- Phillips, O.M. (1957). *"On the generation of waves by turbulent wind"*. Journal of Fluid Mechanics **2**: 417-455 pp.
- Phillips, O.M. (1958). *"The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves"*. Journal of Fluid Mechanics **4**: 426-434 pp.

- Pierson, W.J., Moskowitz, L.A. (1964). "*A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii*". J. Geoph. Res. **69**(24): 5181-5203 pp.
- Sánchez-Gil, P., Yáñez-Arancibia, A., Ramírez-Gordillo, J., Day, W., J., Templet, H. P. (2004). "*Some socio-economic indicators in the Mexican states of the Gulf of Mexico*". Ocean & Coastal Management **47**: 581-596 pp.
- Silva, R., Díaz, G., Contreras, A., Baustista, G., & Sánchez, C. (2000). "*Determination of oceanographic risk for hurricanes on the Mexican coast*". 6<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Melbourne Fl. 134-145 pp.
- Silva, R. (2003). "*Análisis y descripción estadística del oleaje*". Instituto de Ingeniería, UNAM, apuntes en revisión por el consejo de publicaciones, 49-75 y 101-131 pp.
- Silva, R., Salles, P. (2004). "*Puertos, marinas, muelles e infraestructura naviera*". El manejo Costero en México "Antecedentes", Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo, 163-177 pp.
- Silva, R., Mendoza, E., Pérez, D.M. (2005). "*Small scale wave climate prediction*". Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES 2005, Aceptado.
- St. Denis, M., & Pierson, W.J. (1953). "*On the motion of ships in confused seas*". Trans. SNAME, Vol **61**: 280-357 pp.
- WAMDI Group (1988). "*The WAM model – A third generation ocean wave prediction model*". J. Phys. Oceanogr. **18**: 1775-1810.

**ANEXO.**  
**IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL**  
**DEL MODELO *WAM***

## ANEXO. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL DEL MODELO *WAM*

El código del modelo *WAM* está programado en lenguaje FORTRAN, y consta de 127 módulos (cada uno un archivo independiente), que funcionan entorno a 3 programas principales: PREPROC, PRESET y CHIEF, que se agrupan de la siguiente forma:

- Programas de pre-proceso de los datos de entrada.
  - PREPROC
  - PRESET
- Programa de cálculo principal.
  - CHIEF
- Programas de post-proceso de los resultados.
  - Dependerá de las necesidades del usuario.

A continuación se hace una breve descripción de la función de cada uno de los programas.

### *Pre-proceso de datos*

#### PREPROC

Lee los datos de entrada y calcula los parámetros independientes del tiempo que se utilizan en el cómputo principal. También organiza la información en el formato de malla empleado por el resto de programas.

Los datos de entrada los recoge de tres archivos de datos, cada uno de los cuales contiene:

- los límites e intervalos de los dominios espacial y temporal,
- la topografía y batimetría, y
- el campo de corrientes, en caso de que el usuario haya decidido considerar la interacción del viento y el oleaje con estas.

Genera un archivo que contiene tanto los datos de la malla como los parámetros independientes del tiempo.

#### PRESET

El modelo *WAM* se puede ejecutar de dos formas: a partir de condiciones de oleaje iniciales calculadas en una ejecución anterior, llamado modo "*Hot Star*", o a partir de condiciones sintéticas "*Cold Star*", en donde será necesario tomar en cuenta un periodo de tiempo inicial que permita que el modelo se establezca.

En caso de que el modelo arranque en frío (*Cold Star*), el programa PRESET es el encargado de generar las condiciones iniciales del campo de oleaje. Existen dos posibilidades: considerar un espectro tipo JONSWAP para todos los puntos de la mallas, o generar el espectro inicial en función de los vientos locales y del *fetch*.

Lee dos archivos de entrada con la siguiente información:

- condiciones de arranque del modelo y características del campo de viento, y
- campos de viento.

Genera tres archivos de salida: BLSPANAL, SLATANAL y LAWIANAL, que guardan las condiciones iniciales del campo de oleaje.

### *Cálculo Principal*

#### CHIEF

Este programa es el encargado de supervisar y realizar la ejecución del modelo WAM.

Utiliza los siguientes archivos de entrada:

- Archivo generado por el usuario en el que se especifica, entre otras cosas, el paso de tiempo, si se desea guardar archivos para una ejecución posterior, si se hará una ejecución anidada, etc.
- Archivo también generado por el usuario en el que se introducen los campos de viento.
- Archivo de salida del módulo PREPROC.
- Archivos de salida del módulo PRESET.

Después del cálculo genera los archivos MAP $\xi$ , SPE $\xi$ , SWE  $\xi$  y SWS $\xi$ , que contienen al espectro de oleaje, altura de ola significativa, dirección del oleaje y frecuencia media, entre otros resultados, en cada punto de la malla y en cada paso de tiempo ( $\xi$  es la fecha y hora de cada paso de tiempo en formato YYMMDDHHMM).

### *Post-proceso de resultados*

Es mucha la información generada durante la ejecución del programa completo, ya que muchas variables cambian de valor en cada punto de la malla y en cada instante de tiempo, por ello conviene manejar los archivos intermedios en formato binario. Los módulos de post-proceso se encargan de traducir el código binario utilizado a formatos legibles por el usuario.

#### ANIDACIÓN DE MALLAS

La metodología a seguir para el anidamiento de las mallas es la siguiente:

- 1.- Se ejecuta el modelo para una malla gruesa (baja resolución), especificando dentro de ésta el área en que se desea tener mayor resolución en los resultados (malla fina). Con lo anterior, el modelo guardará los espectros de los puntos ubicados dentro del área de interés.
- 2.- Se hace una nueva ejecución del modelo con una nueva malla que corresponda a la zona de interés (malla fina), utilizando como condiciones de entrada las guardadas en la ejecución de la malla gruesa.

En el paso 1 el modelo genera el archivo CBOUND, que será la entrada para generar la malla fina FBOUND. Las condiciones de frontera se guardan en los archivos C00-C90 (se pueden especificar hasta 10 áreas de interés), para cada paso de tiempo especificado por el usuario.

Otra forma de variar la resolución de la malla es utilizando la opción “two-way nesting” (versión de *Puertos del Estado*), esta opción permite además usar distintas batimetrías para las diferentes resoluciones de la malla.

**RESUMEN**

La Figura a-1 se resume el funcionamiento general del modelo.

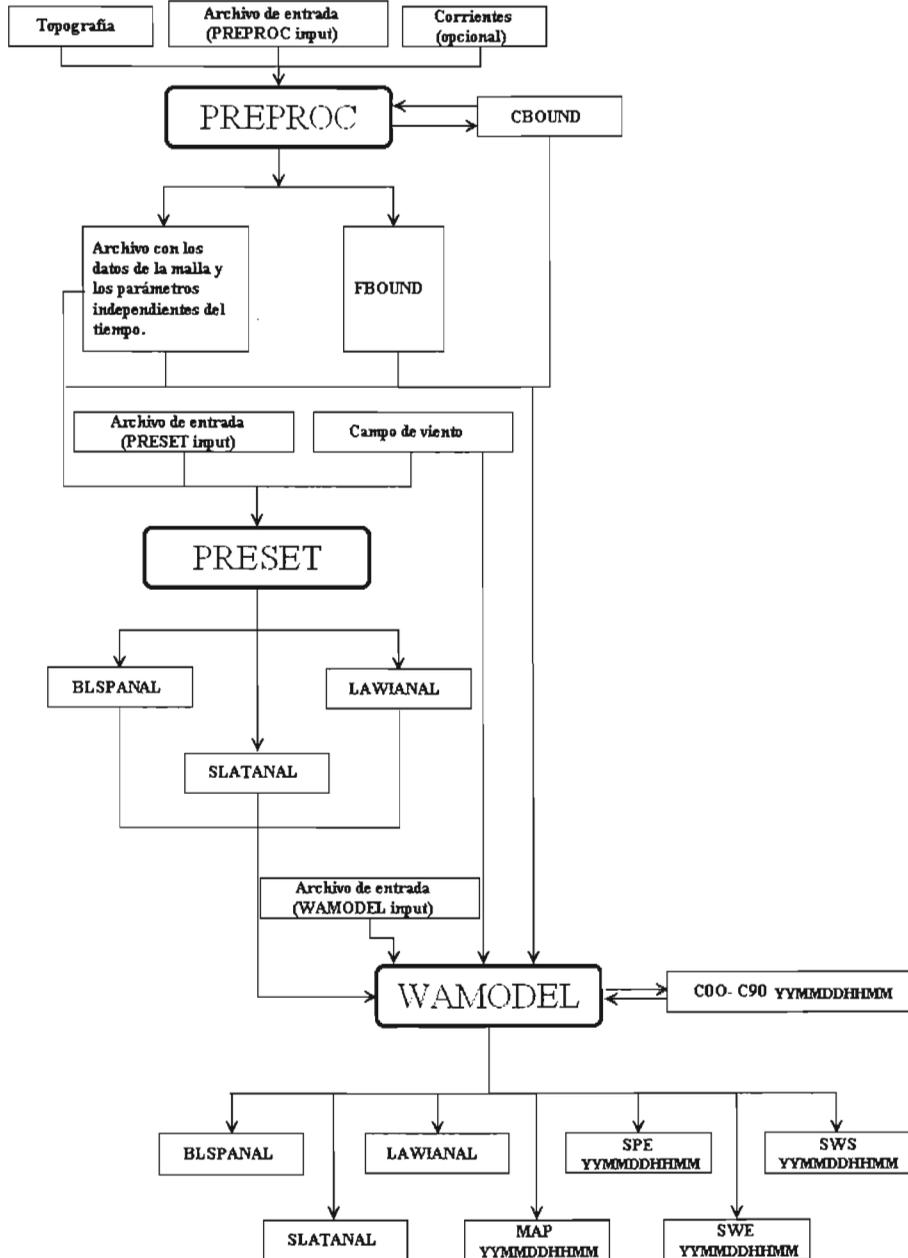


Figura a-1 Diagrama de flujo del funcionamiento general del modelo WAM