

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Sistema de Pronóstico Automatizado de Oleaje.
<i>Autor / Adscripción</i>	<p>José Antonio Salinas Prieto Instituto Mexicano de Tecnología del Agua</p> <p>Roberto Padilla Hernández NOAA/NCEP/EMC/MMAB/IMSG, Camp Springs, Maryland, Estados Unidos</p> <p>Fernando Oropeza-Rosales FUGRO México</p> <p>René Lobato-Sánchez Comisión Nacional del Agua, México</p>
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 3(1): 45-67
<i>Fecha de publicación</i>	2012
<i>Resumen</i>	<p>Se sintetizan los procedimientos aplicados para implementar un sistema de pronóstico de viento y oleaje para el Golfo de México al que se le denominó POMA (Pronóstico de Oleaje con Modelos Acoplados). El sistema POMA fue verificado mediante diversos eventos; en este artículo se muestran tres casos con características de viento diferentes: 1) situación de calma, 2) frente frío y 3) huracán.</p>
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/1294">http://hdl.handle.net/123456789/1294</a>

# SISTEMA DE PRONÓSTICO AUTOMATIZADO DE OLEAJE

• José Antonio Salinas-Prieto •  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*

• Roberto Padilla-Hernández •  
*NOAA/NCEP/EMC/MMAB/IMSG, Camp Springs, Maryland, Estados Unidos*

• Fernando Oropeza-Rosales •  
*FUGRO México*

• René Lobato-Sánchez •  
*Comisión Nacional del Agua, México*

## Resumen

Se sintetizan los procedimientos aplicados para implementar un sistema de pronóstico de viento y oleaje para el Golfo de México al que se le denominó *POMA* (Pronóstico de Oleaje con Modelos Acoplados). Este sistema está conformado por los modelos: *MM5*, *WAM-PROMISE* y *SWAN*, en sistemas de mallas anidadas. La validación del sistema se basó en comparaciones con boyas propiedad del Centro Nacional de Datos de Boyas (NDBC, por sus siglas en inglés). El proceso de anidamiento consistió en generar una malla que cubre la totalidad del Atlántico Tropical (hemisferio norte), donde se simularon vientos a diez metros de altura en relación con el nivel de la superficie (con el modelo *MM5*); esta información se transfiere al modelo de oleaje global *WAM*, que abarca aguas profundas, con el que simula en una malla interna el oleaje que a su vez contiene mallas internas, a las que se les transfiere condiciones iniciales y de frontera, para simular oleaje en aguas someras. El sistema *POMA* fue verificado mediante diversos eventos; en este artículo se muestran tres casos con características de viento diferentes: 1) situación de calma, 2) frente frío y 3) huracán. Los resultados se despliegan automáticamente en una página Web de acceso restringido, visualizándose dos mallas internas en costas mexicanas: Caribe y Golfo de México. El sistema tiene la capacidad de incorporar nuevas mallas anidadas en sitios con interés regional.

**Palabras clave:** modelos acoplados, viento, oleaje local y distante, validación.

## Introducción

El oleaje es uno de los procesos oceánicos con mayor influencia en diversos sectores socioeconómicos, ya que afecta tanto a la navegación como a comunidades costeras. Por ello, el pronóstico de oleaje es una demanda creciente por parte de diversos sectores sociales y económicos, los cuales requieren planear actividades a corto y largos plazos; además de la importancia del oleaje descrita, recientemente se ha descubierto que durante un huracán, la

cantidad de aerosol esparcido a la atmósfera por el oleaje rompiente es hasta cien veces mayor que si no ocurriese, factor sumamente importante en la intensificación abrupta de los huracanes (Padilla-Hernández *et al.*, 2007).

La importancia del oleaje también consiste en que la morfología costera varía debido a los procesos litorales resultantes de la interacción del viento, oleaje, corrientes, mareas, sedimento y otros agentes (Kinsman, 1965); las líneas de costa se modificarán en función de la cantidad de sedimento y energía disponibles; esta

energía proviene mayoritariamente del oleaje, ya que durante el proceso de disipación de energía en la zona de rompiente, parte de ésta genera turbulencia, colocando sedimento en suspensión, el cual puede ser transportado por flotación, arrastre o una combinación de ambas formas: saltación. Durante eventos extremos, como huracanes, estos procesos pueden modificar visiblemente la configuración costera, como en Cancún, México, durante el paso del huracán *Wilma*, en 2005, cuya recuperación de las playas implicó sumas importantes de dinero y tecnología; por ello la planeación adecuada de la infraestructura costera es fundamental para su operación y mantenimiento adecuados. Por otra parte, el pronóstico de oleaje es útil en la toma de decisiones para cerrar o abrir los puertos a la navegación.

Considerando lo anterior, la medición sistemática del oleaje es de gran utilidad; no obstante, los recursos para ello son insuficientes, dados los altos costos que implican la instrumentación, su colocación y mantenimiento. En México, el presupuesto de los centros de investigación y operativos es insuficiente para dicho propósito, siendo importante utilizar formas alternativas y complementarias de investigación, como la modelación numérica.

Dada su versatilidad, la modelación numérica, aun con sus limitaciones, es una alternativa para la descripción de la dinámica del oleaje, que en tiempo real se convierte en una herramienta de pronóstico; no obstante, debe considerarse únicamente como una buena aproximación; su precisión depende tanto del conocimiento del fenómeno a modelar como de las técnicas numéricas aplicadas, así como de la calidad de datos de viento para utilizar como condiciones iniciales y de frontera.

El auge de los modelos numéricos en los últimos años se debe al avance tecnológico en el equipo de cómputo, aumentando tanto la cantidad de operaciones por unidad de tiempo, como su capacidad de almacenamiento y

costos a la baja. Los modelos numéricos de la atmósfera y del océano han tenido en los últimos años un creciente uso tanto por su desempeño favorable, como por la incorporación de nueva tecnología de cómputo. Estos modelos son versátiles, al reproducir la dinámica del océano y atmósfera, ya que además de ser factible repetir experimentos numéricos, el costo de computadoras de alto rendimiento es cada vez menor. Así, la modelación numérica de la atmósfera se convirtió en los últimos veinte años en una herramienta incorporada a la comunidad operativa, ya que en sus orígenes estuvo confinada a la comunidad científica. Con ello, los modelos son sometidos a exhaustivas pruebas, mediante transparentes evaluaciones, manteniéndose así en una mejora continua. En cuanto a los modelos numéricos de oleaje, también han tenido un auge en los últimos años en la comunidad científica, pero en México no se han implementado modelos operativamente, oportunidad que con la tecnología disponible es posible y se debe aprovechar debido a que el oleaje aunado a las mareas son los procesos oceánicos de mayor impacto en actividades como transporte, pesca, turismo, explotación de hidrocarburos y salvaguarda costera (Pérez-Romero *et al.*, 2008). No obstante la importancia de mediciones sistemáticas de oleaje, es imposible instrumentar grandes áreas oceánicas, siendo fundamental utilizar formas alternativas de diagnóstico y pronóstico, como la modelación numérica de oleaje.

El estado de desarrollo actual de los modelos espectrales permite que se transfieran a la comunidad operativa, ello dada la creciente versatilidad de la modelación numérica de la atmósfera y del oleaje, la cual se refleja en la facilidad de reproducir su dinámica a un bajo costo, como en experimentos numéricos y reproducción de casos históricos, para conocer sus alcances y limitaciones (The SWAMP Group, 1985).

El objetivo de este trabajo es documentar el primer esfuerzo que se ha hecho en México por generar un sistema de pronóstico operativo de

oleaje en las costas del Golfo de México y el mar Caribe; la metodología de implementación y evaluación, la descripción de los modelos y la descripción de los casos de estudio se presentan en la Metodología; los resultados detallados para cada caso de estudio, en la sección de Resultados; finalmente se tienen las Discusiones y conclusiones.

## Metodología

La implementación de la modelación de oleaje se dividió en siete etapas:

- a) Implementación del modelo *MM5* (NCAR: National Center for Atmospheric Research, EU) (atmósfera).
- b) Implementación del modelo numérico de oleaje *WAM* (Max-Planck Institut für Meteorology, Alemania; KNMI, Royal Netherlands Meteorological Institute, Holanda; ECMWMF: Centro Europeo de Pronóstico a Mediano Plazo, Reino Unido) en equipo de alto rendimiento del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), iniciando en la fase de oleaje en aguas profundas.
- c) Implementación del modelo *SWAN* para modelación de oleaje en aguas someras. En esta etapa se requiere información digitalizada de la batimetría del área costera en las bahías o litorales de interés, generando subregiones, utilizando datos de relieve marino de una base de datos mundial *ETOPO II*.
- d) Acoplamiento del modelo atmosférico a los de oleaje.
- e) Simulación numérica de viento y oleaje de manera secuencial, para generar resultados de alturas significantes, dirección de oleaje y periodos más energéticos para las subregiones de interés en los eventos seleccionados.
- f) Generación de algoritmos de verificación.
- g) Evaluación del desempeño de simulaciones numéricas con datos de boyas disponibles en el Golfo de México y mar Caribe.

La síntesis gráfica del proceso se muestra en la figura 1: el modelo *MM5* proporciona los campos de viento a 10 m de altura para ambos modelos del oleaje; el modelo *WAM* simula el oleaje en el Atlántico y proporciona las condiciones de frontera para el modelo *SWAN*, el cual simula el oleaje en el mar Caribe y Golfo de México.

Estos campos de viento se procesan para extraerlos en la región requerida, a una resolución determinada y en el formato esperado por los modelos de oleaje. Estos campos de viento fueron utilizados para forzar los modelos *WAM* y *SWAN*. El modelo *WAM* es utilizado en un área del océano Atlántico y el *SWAN* en el Golfo de México y mar Caribe.

### *Descripción de los modelos numéricos utilizados*

Los modelos seleccionados fueron desarrollados por la comunidad científica y han sido evaluados bajo diferentes condiciones; en el caso del *MM5*, su evaluación también se ha desarrollado en la comunidad operativa; mientras que en el caso de los de oleaje, *WAM* y *SWAN*, aún no se encuentran ampliamente difundidos en la comunidad operativa. En cuanto a México, al momento del desarrollo de este proyecto no existía aún algún modelo numérico de oleaje funcionando de manera operativa, de ahí la importancia del desarrollo de este sistema, ya que implementar modelos de oleaje en tiempo real es una tarea sumamente importante, dada la demanda de pronósticos de oleaje por diversos sectores sociales y productivos del país.

### *Modelo atmosférico MM5*

El modelo *MM5* describe eventos atmosféricos de escala regional utilizando un sistema de ecuaciones primitivas con aproximación no hidrostática; permite el uso de dominios múltiples y anidados; integra numéricamente en la componente vertical en coordenadas sigma, que sigue la superficie terrestre,

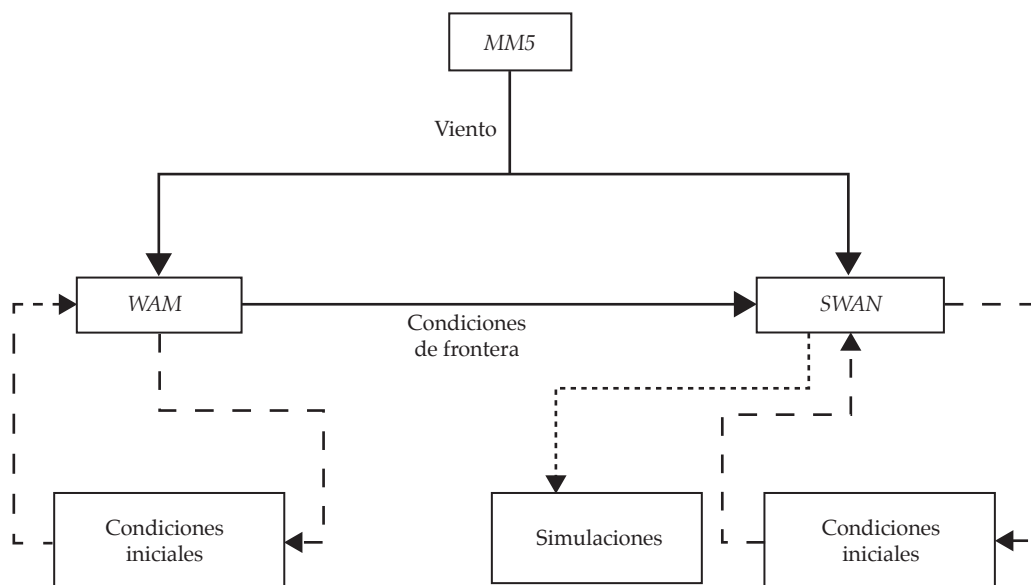


Figura 1. Flujo de información del sistema de simulación de oleaje. En flechas continuas se indica el envío de información entre modelos; en punteadas delgadas, el envío de información a sí mismo, y en punteadas gruesas, los resultados finales.

permitiendo así modelar en lugares de topografía compleja, y resuelve las ecuaciones de diferencias finitas con un esquema de paso de tiempo, usando el esquema salto de rana, seleccionando el número de niveles verticales y tiene las siguientes opciones de proyección geográfica: estereográfica polar, Lambert conforme y Mercator (Cox et al., 1997). Cuenta con opciones adicionales para las parametrizaciones de convección, capa límite planetaria, radiación, procesos de superficie y condensación de gran escala.

Este modelo integra numéricamente las ecuaciones de movimiento, termodinámica y de continuidad para la proyección Lambert, conforme Anthes (1972), en coordenadas verticales  $\sigma$  (sigma), definida por:

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad (1)$$

donde  $p$  es la presión en el nivel de interés,  $p_t$  es la presión en la parte más alta de la atmósfera

simulada y  $p_s$  es la presión en superficie. Este sistema de coordenadas sigue el terreno, permitiendo que el tope del modelo sea puesto a cualquier superficie de presión. El modelo MM5 integra las ecuaciones completas de movimiento en coordenadas  $\sigma$ , escritas en coordenadas Lambert conforme en forma de flujo:

$$\frac{\partial p^* u}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu/m}{\partial y} \right] \quad (a)$$

$$-\frac{\partial p^* u \sigma}{\partial \sigma} - mp^* \left[ \frac{RT}{\left( p^* + \frac{p_t}{\sigma} \right)} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + p^* v (f + \gamma) \quad (b) \quad (c) \quad (d)$$

$$+ p^* w \left[ r^{-1} 2\Omega (\cos \phi) y - \frac{u}{a} \right] + FU \quad (e) \quad (f) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* v}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uv/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vv/m}{\partial y} \right] \\ & - \frac{\partial p^* v\sigma}{\partial \sigma} - mp^* \left[ \frac{RT}{\left(p^* + \frac{p_t}{\sigma}\right)} \frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + p^* u(f+\gamma) \\ & + p^* w \left[ r^{-1} 2\Omega(\cos\phi)x - \frac{v}{a} \right] + FV \end{aligned} \quad (3)$$

El primer término entre corchetes (a) representa la divergencia del flujo de momento; (b) representa el momento en la vertical; (c) se refiere a los efectos termodinámicos y representa la entrada de masa; (d) se refiere al parámetro de Coriolis; el término subrayado (e) es la componente horizontal de la fuerza de Coriolis, y el último término (f) es el de fricción.

Las cantidades  $m$ ,  $r$  y  $\gamma$  son factores de mapa y están definidos por:

$$m = \frac{\text{sen } \Psi_1}{\text{sen } \Psi} \left[ \frac{\tan \frac{\Psi}{2}}{\tan \frac{\Psi_1}{2}} \right] \quad (4)$$

$$r = \frac{a}{n} \text{sen } \Psi_1 \left[ \frac{\tan \frac{\Psi}{2}}{\tan \frac{\Psi_1}{2}} \right]^n \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{(\text{sen}\phi - n)}{a \cos\phi} \left( \frac{-uy}{r} + \frac{vx}{r} \right) \quad (6)$$

donde  $n = 0.716$ ,  $\Psi_1 = 30^\circ$ . Para estos casos de  $n$  y  $\Psi_1$ , la proyección es verdadera a  $30^\circ$  y  $60^\circ$  N.

Por consistencia en la ecuación de energía cinética, cuando la ecuación hidrostática es empleada en lugar de la componente vertical de la ecuación de movimiento, los términos multiplicados por  $w$  (componente vertical

del viento) son significantes en (2) y (3), por lo tanto  $\gamma$  es dos órdenes de magnitud más pequeña que  $f$  en latitudes medias, y puede ser considerada. Las ecuaciones de movimiento utilizadas en el modelo están por lo tanto dadas por (2) y (3), sin los términos subrayados, ecuaciones (7) y (8).

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* u}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vu/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* u\sigma}{\partial \sigma} \\ & - mp^* \left[ \frac{RT}{p^* + \frac{p_t}{\sigma}} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + pvf + FU \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* v}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* uv/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vv/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* v\sigma}{\partial \sigma} \\ & - mp^* \left[ \frac{RT}{p^* + \frac{p_t}{\sigma}} \frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + puf + FV \end{aligned} \quad (8)$$

La ecuación de continuidad completa para la proyección Lambert conforme, en coordenadas sigma, está dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^*}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial p^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v/m}{\partial y} \right] \\ & - \frac{\partial p^* \sigma}{\partial \sigma} - \frac{2\omega p^*}{a} \end{aligned} \quad (9)$$

La ecuación termodinámica está dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* T}{\partial t} = & -m^2 \left[ \frac{\partial up^* T/m}{\partial x} + \frac{\partial vp^* T/m}{\partial y} \right] - \frac{\partial p^* T\sigma}{\partial \sigma} \\ & + \frac{RTw}{c_p \left( \sigma + \frac{p_t}{p^*} \right)} + \frac{p^* Q}{c_p} + FT \end{aligned} \quad (10)$$

donde  $FT$  es el índice de cambio de  $P^*T$  debido a la difusión horizontal y vertical de calor, donde  $Q$  es el calentamiento adiabático por unidad de masa e introduciendo la velocidad vertical omega:

$$w = \frac{dp}{dt} \quad (11)$$

Las condiciones iniciales para integrar numéricamente estas ecuaciones son generadas con datos del modelo Global Forecast System (GFS, por sus siglas en inglés) y de Reanálisis del NCAR (National Center for Atmospheric Research).

El código fuente del modelo *MM5* está escrito en lenguaje *Fortran 90*, cuenta con módulos de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento, llamados *TERRAIN*, *REGRID*, *INTERPF* y *MM5*, cada uno de los cuales está conformado por decenas de programas *Fortran* ligados entre sí a través de instrucciones (macros) basadas en sistemas operativos *LINUX* y *UNIX*.

Se implementó el modelo en dos dominios anidados; los campos de viento simulados en el dominio grueso con una resolución de 90 km (figura 2) son los que se utilizan como forzamiento para el modelo *WAM*, y los

campos de viento simulados en el dominio anidado, con resolución de 30 km (figura 2), son los que se utilizan como forzamiento para el modelo *SWAN*.

### Modelo de oleaje WAM

Los modelos de oleaje usados en este estudio son modelos espectrales discretos y promediados en fase (Batjes, 1994), lo que significa que describe la superficie del mar en función de la densidad de la energía espectral sin información de la fase de las diferentes frecuencias. El espectro direccional es resuelto en cada punto de malla en términos de bandas de frecuencia-dirección y la evolución del campo de oleaje es encontrado resolviendo numéricamente la ecuación de balance de acción (de energía espectral en el caso del *WAM*):

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{x,y} \cdot (\bar{c}_{x,y} N) + \nabla_{\sigma,\theta} \cdot (\bar{c}_{\sigma,\theta} N) \\ = \frac{1}{\sigma} (S_{in} + S_{ds} + S_{nl} + S_{bf} + S_{brk}) \end{aligned} \quad (12)$$

Donde  $N$  es el espectro de acción del oleaje;  $t$ , el tiempo;  $\sigma$ , la frecuencia angular intrínseca y  $\theta$  es la dirección del oleaje;  $C_{x,y}$  y  $C_{\sigma,\theta}$  son las

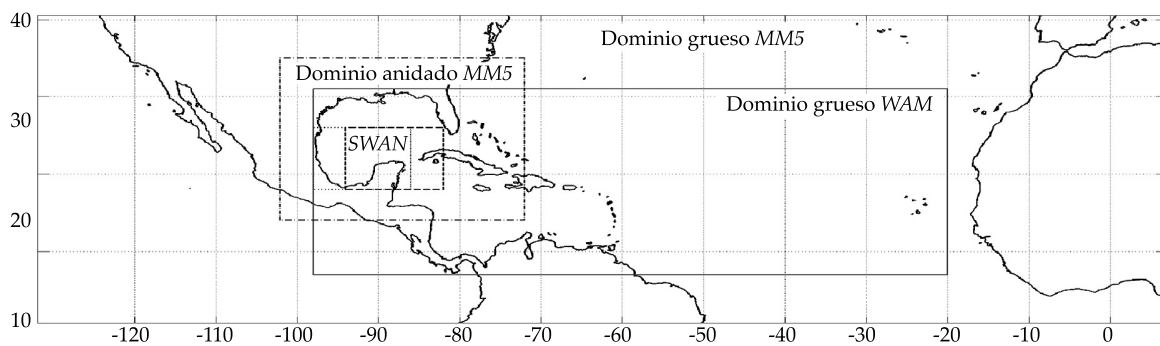


Figura 2. Dominios de los modelos involucrados en el sistema *POMA*: el dominio grueso de *MM5* posee una resolución de 90 km; el anidado del modelo *MM5* de 30 km; el correspondiente al modelo *WAM* de 111 km, y los dominios del modelo *SWAN* de 10 km.

velocidades de propagación en los dominios físico y espectral, respectivamente. El lado izquierdo de la ecuación (12) representa la razón de cambio local de la densidad de acción del oleaje, la propagación en el espacio físico, el corrimiento de la densidad de acción en frecuencia y en dirección, debido a variaciones espaciales y temporales de la profundidad y las corrientes. El lado derecho representa los efectos debidos a la entrada de energía por el viento  $S_{in}$ , la disipación por el rompimiento en aguas profundas  $S_{ds}$ , las interacciones no lineales entre cuádrupletas olas-ola  $S_{nl}$ , la fricción con el fondo  $S_{bf}$  y el rompimiento inducido por la profundidad  $S_{brk}$ .

El WAM es un modelo de oleaje de tercera generación que resuelve el lado izquierdo de la ecuación de balance de energía espectral (advección de la energía del oleaje), usando un esquema explícito, tomando en cuenta los términos fuente. Los términos fuente del lado derecho son calculados usando un método semi-implícito de segundo orden y luego se agregan al espectro del oleaje. Como se hace notar en la introducción, usamos la versión PROMISE del WAM (Monbaliu et al., 2000). La entrada de energía por el viento  $S_{in}$  y la disipación  $S_{ds}$  son basados en la teoría de generación cuasi-lineal del oleaje (Janssen 1989, 1991) acorde con la física del WAM Ciclo 4. Las interacciones no lineales  $S_{nl}$  son representadas por la aproximación de interacciones discretas (DIA, por sus siglas en inglés) de Hasselmann et al. (1985), y la fricción con el fondo  $S_{bf}$  según Hasselmann (1974), y el rompimiento inducido por la profundidad  $S_{brk}$  de acuerdo con Monbaliu et al. (2000), Padilla-Hernández (2002), y Padilla-Hernández y Monbaliu (2003).

El modelo WAM se implementó en un solo dominio (figura 2), con una resolución espacial de  $1^\circ$  en latitud y  $1^\circ$  en longitud (aproximadamente 111 km); este dominio fue forzado con vientos generados en el dominio grueso del modelo MM5.

### El modelo de oleaje SWAN

Desarrollado en la Delft University of Technology, el modelo SWAN simula numéricamente el oleaje en zonas costeras, lagos y estuarios, a partir de datos de viento, batimetría y condiciones iniciales. Este modelo está basado en principios de conservación de energía descrita en la sección anterior, utilizando todos los términos descritos; su nombre es el acrónimo en inglés de Simulating Waves Nearshore, que significa Simulación de Oleaje Costero. SWAN simula numéricamente los siguientes procesos:

El modelo SWAN resuelve la ecuación (12) de balance de acción, con los términos fuente representativos para la entrada de energía por el viento  $S_{in}$ , interacciones no lineales (cuádrupletas  $S_{nl4}$ ; rompimiento del oleaje en aguas profundas,  $S_{ds}$ ; fricción con el fondo,  $S_{bf}$ ; y rompimiento del oleaje inducido por el fondo,  $S_{brk}$ ). La documentación está dada por Ris (1997), Booij et al. (1999), y Holthuijsen et al. (2003). Dos formulaciones diferentes pueden ser usadas para  $S_{in}$ : la formulación de la física de WAMC3 (WAMDI Group, 1988; Komen et al., 1984, 1994) usada en este estudio, y la WAMC4 sugerida por Janssen (1989, 1991). El DIA es usado para  $S_{nl4}$  y la aproximación para tríadas  $S_{nl3}$  de Eldeberky (1996). SWAN tiene varias expresiones para la disipación de energía en el fondo  $S_{bf}$  de Hasselmann et al. (1985), Madsen et al. (1988), y Collins (1972), y rompimiento del oleaje inducido por el fondo  $S_{brk}$  de acuerdo con Eldeberky y Batjes (1996), y Ris (1997). En este estudio usamos la física estándar de WAMC3 para  $S_{in}$  y  $S_{bf}$  con DIA para representar las interacciones de cuádrupletas  $S_{nl4}$  y el rompimiento inducido por el fondo  $S_{brk}$  para pruebas específicas.

#### Propagación.

- Propagación en el espacio geográfico.
- Refracción debido a variaciones espaciales de batimetría y corrientes.
- Someramiento debido a variaciones espaciales de batimetría y corrientes.



- Bloqueo y reflexión por obstáculos.

#### Generación y disipación.

- Generación de oleaje por viento.
- Disipación en aguas profundas.
- Disipación por rompimiento en aguas someras.
- Interacción ola-ola.

El modelo integra numéricamente en coordenadas Cartesianas o curvilíneas (recomendadas para escalas pequeñas), o esféricas. El modelo SWAN funciona en opción estacionaria, útil cuando el tiempo de residencia del oleaje es corto en la malla de interés; esto significa que el tiempo de travesía del oleaje es pequeño respecto al del cambio de condiciones de frontera de oleaje, de viento o mareas, aunque también en modo no estacionario.

El cálculo de la transferencia de energía entre grupos de olas requiere de un gran número de cálculos, por ello el modelo SWAN es paralelizable, esto es, los cálculos se realizan entre los procesadores disponibles. Una de las limitaciones del modelo SWAN es que no es capaz de calcular la difracción del oleaje, ya que no es proceso conservativo, sin embargo, al calcular la distribución energética entre los puntos de la malla, los efectos de la difracción desaparecen, ya que las simulaciones se realizan en un amplio sector geográfico.

El modelo SWAN se implementó en dos dominios pequeños, que cubren el área del Caribe mexicano y el área del Golfo de México, y se traslapan entre sí en una región más pequeña (figura 2), con una resolución espacial de seis minutos en latitud y longitud (aproximadamente 10 km); estos dominios fueron forzados con vientos generados en el dominio anidado del modelo MM5 y reciben condiciones de frontera del modelo WAM en todas sus fronteras abiertas.

#### Datos de batimetría

Los modelos numéricos de oleaje requieren información de la interacción con las con-

diciones de frontera, como batimetría. En el sistema POMA se utilizó la base de datos llamada ETOPO2 v2 (2006), creada por el Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC, por sus siglas en inglés), esta base de datos contiene la información digital del piso oceánico (batimetría) y elevaciones continentales con una resolución de dos minutos de arco (aproximadamente 4 km), cubriendo la totalidad del planeta (Smith y Sandwell, 1997). Esta base de datos se generó con una combinación de mediciones realizadas por sondeos (ecosondas de embarcaciones) y datos de anomalías de gravedad asociadas con el relieve marino, obtenidos por altímetros montados en satélites. Se extrajo la batimetría en la resolución apropiada para cada dominio de los modelos de oleaje. Como ejemplo se muestra la batimetría para el Atlántico Norte, que corresponde con el dominio del modelo WAM (figura 3). Esta información es incorporada a las simulaciones numéricas de oleaje para calcular la refracción y sus procesos de transformación por efectos del fondo marino.

#### Evaluación del desempeño de los modelos numéricos

Para diagnosticar el desempeño de los modelos numéricos utilizados, se calculó el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), aplicado a las variables: altura, dirección y periodo de oleaje, así como viento, para los eventos seleccionados en sitios donde sí existan observaciones.

Se realizaron comparaciones con datos de observaciones obtenidos de boyas administradas por el Centro Nacional de Datos de Boyas (NDBC, por sus siglas en inglés). En el área del Caribe del oeste se localizan tres boyas. La más cercana a la península de Yucatán (figura 4) es la número 42056, localizada a 19.87 N 85.06 W (19° 52' 27" N, 85° 03' 33" W); las variables que registra son temperatura del aire (10 m sobre nivel del mar) y océano (1 m bajo el nivel del mar), viento y presión atmosférica. La profundidad donde está instalada es de 4 446.0 metros.

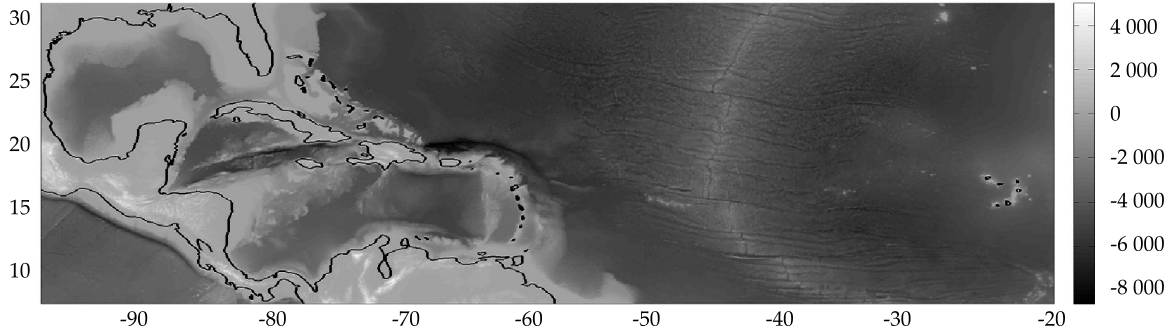


Figura 3. Batimetría según ETOPO2 de la zona que corresponde con el dominio del modelo WAM, con resolución de dos minutos.

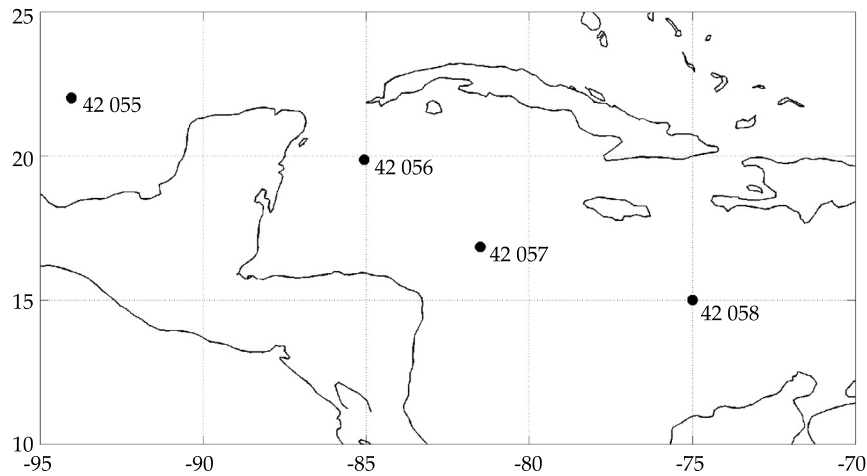


Figura 4. Ubicación de las boyas del Centro Nacional de Datos de Boyas de la NOAA (NDBC, por sus siglas en inglés) en el Caribe y Golfo de México.

El error cuadrático medio (RMSE) brinda la medida de las diferencias entre los valores pronosticados y los observados, y está definido por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{iobs})^2}{N}} \quad (13)$$

Donde  $\phi_i$  es el valor simulado de la celda  $i$ ;  $\phi_{iobs}$  es el valor observado de la celda  $i$ , y  $N$  es el número de valores analizados.

En este trabajo se utilizó la verificación celda-punto, que consiste en comparar valores promedio simulados en una celda contra observaciones puntuales. Esta metodología supone que ambos valores son comparables, aunque las observaciones tienen un valor temporal y puntual, y las simulaciones tienen un valor temporal y espacialmente promediado. Para comparar las simulaciones con las observaciones, se seleccionaron datos del modelo correspondientes a la celda más próxima a la localización de la observación.

### Casos de estudio

Una de las pruebas del desempeño de los modelos numéricos de oleaje está ligada a la respuesta del mismo ante cambios abruptos de dirección o intensidad del viento, situación que sucede en los huracanes. Dado que el oleaje generado por huracanes afecta las actividades humanas e impacta como agente destructivo, las simulaciones de este proceso representan la forma más realista de verificar el desempeño tanto de los modelos numéricos de atmósfera (viento) como de oleaje. Por tanto, se seleccionaron tres casos de estudio con condiciones diferentes entre sí: situación en calma, huracán y frente frío bajo las características de la malla, mostradas en los cuadros 1 y 2.

### Resultados

El esquema gráfico de la transferencia de información para generar las condiciones iniciales se presenta en la figura 5, donde los datos de la malla gruesa del modelo *MM5* son interpolados a la resolución espacial y escritos en el formato de archivo de entrada que requiere el modelo *WAM*, ello incluye los

efectos del oleaje distante a través de oleaje desarrollado, que se lee como condiciones de frontera en los cuatro costados de las mallas de *SWAN*. El flujo secuencial de información se realiza a diferentes tiempos en los modelos *MM5*, *WAM* y *SWAN*.

Para evaluar el desempeño de los modelos numéricos tanto de atmósfera como de océano, se compararon las mediciones realizadas por la boya 42056 del NDBC (figura 4) durante tres tipos de eventos: situación en calma, huracán y frente frío.

#### Situación en calma

Se evaluó el desempeño de los modelos *MM5* y *SWAN* bajo situación en calma; durante el mes de julio de 2007, el modelo *MM5* le transfirió condiciones iniciales al *SWAN*, observándose que en ausencia de eventos extremos, estos modelos acoplados reproducen de manera adecuada la altura significativa (figura 6).

Los resultados de las simulaciones se compararon con la boya 42056. En la figura 6 se muestran las series de tiempo de altura significativa ( $H_s$ ), simulada y observada. Los máximos de  $H_s$  simulada son menores que los observados, no obstante ocurren

Cuadro 1. Localización geográfica de las mallas utilizadas en este estudio:  $\Delta_{\lambda,\theta}$  es la resolución en longitud  $\lambda$  y latitud  $\phi$ , y  $N\lambda$  y  $N\phi$  son el número de puntos en  $\lambda$  y  $\phi$ , respectivamente.

Mallas	Longitud	Latitud	$\Delta_{\lambda,\theta}$	$N\lambda$	$N\phi$
Gruesa ( <i>MM5</i> )	-131°, 7°	0.7°, 40°	0.25°	496	157
Gruesa ( <i>WAM</i> )	-98°, -20°	7°, 31°	1°	79	25
Fina ( <i>SWAN</i> )	-94°, -82°	18°, 26°	0.1°	121	81

Cuadro 2. Dominios espectrales para los modelos de oleaje;  $f_{low}$  y  $f_{high}$  son frecuencia espectral mínima y máxima, respectivamente;  $nf$ , el número de frecuencias espectrales;  $\Delta f$ , el ancho espectral de la frecuencia, y  $\Delta\theta$  es el ancho espectral de dirección.

Parámetros	Valores
$f_{low} / f_{high}$ [ $s^{-1}$ ]	0.0412, 0.4060
$nf, \Delta f$	24, 0.1xf
$nf, \Delta\theta$	36, 10°

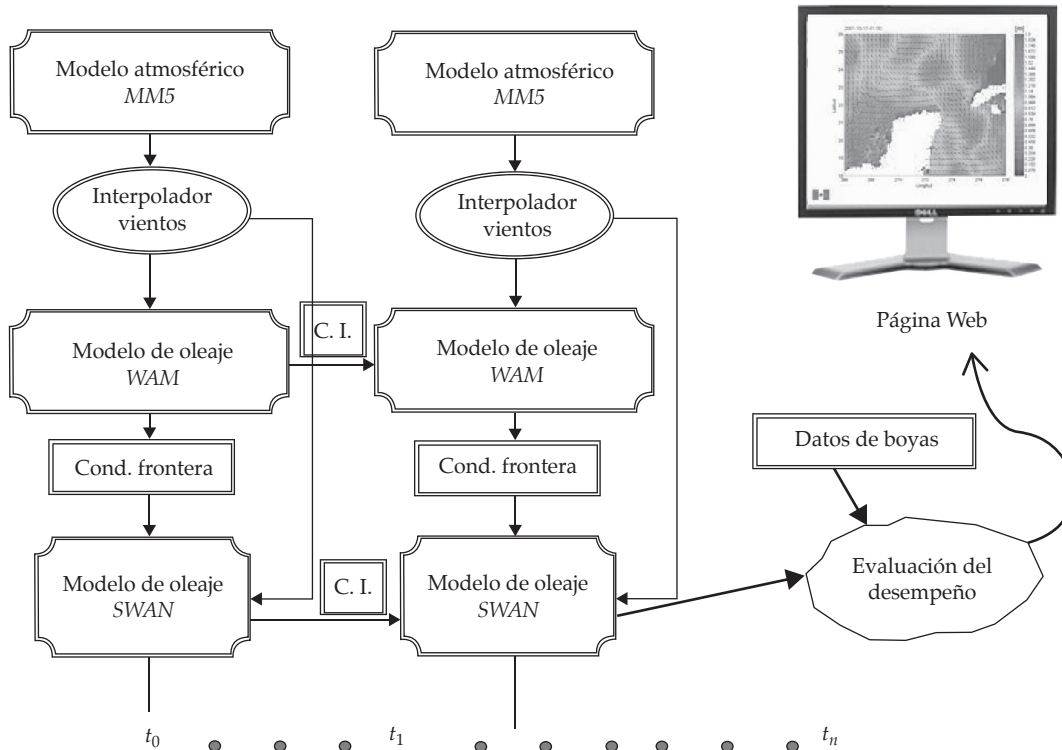


Figura 5. Diagrama del flujo de información en el sistema de simulación numérica viento-oleaje local y distante.

simultáneamente; esta subestimación refleja la subestimación de viento en el modelo atmosférico *MM5* o la subestimación de condiciones de frontera por el modelo *WAM*. Las simulaciones con valores entre 0.8 y 1.0 m representan las mejores aproximaciones, mientras que para los valores menores de 0.8 m, éstas se alejan más de los valores observados.

Respecto al error cuadrático medio durante julio a diferentes tiempos de simulación: 12, 24, 36 y 48 horas, se observa que los periodos con menor error son 24 y 36 horas (periodos intermedios), mientras que los iniciales y finales presentan mayor error; esto se explica dado que al inicio de las simulaciones (primeras 12 horas) (figura 7), los modelos alcanzan la inercia del oleaje y las mejores simulaciones son los periodos intermedios;

en cuanto a los finales (48 horas), la calidad de las simulaciones disminuye debido a que en la realidad ya existen nuevas condiciones oceánicas y atmosféricas que no captaron los modelos al inicializarse.

#### *Frente frío 4*

Un evento meteorológico de gran impacto en oleaje del Golfo de México son los frentes fríos. Por sus vientos poco cambiantes en dirección, los frentes fríos llegan a desarrollar oleaje importante que impide la navegación y operación de instalaciones, como plataformas petroleras. El frente frío número 4 de la temporada 2007 causó gran impacto en actividades de Petróleos Mexicanos (Pemex) en la Sonda de Campeche, mostrando con ello la gran valía de los pronósticos de oleaje por frentes fríos.

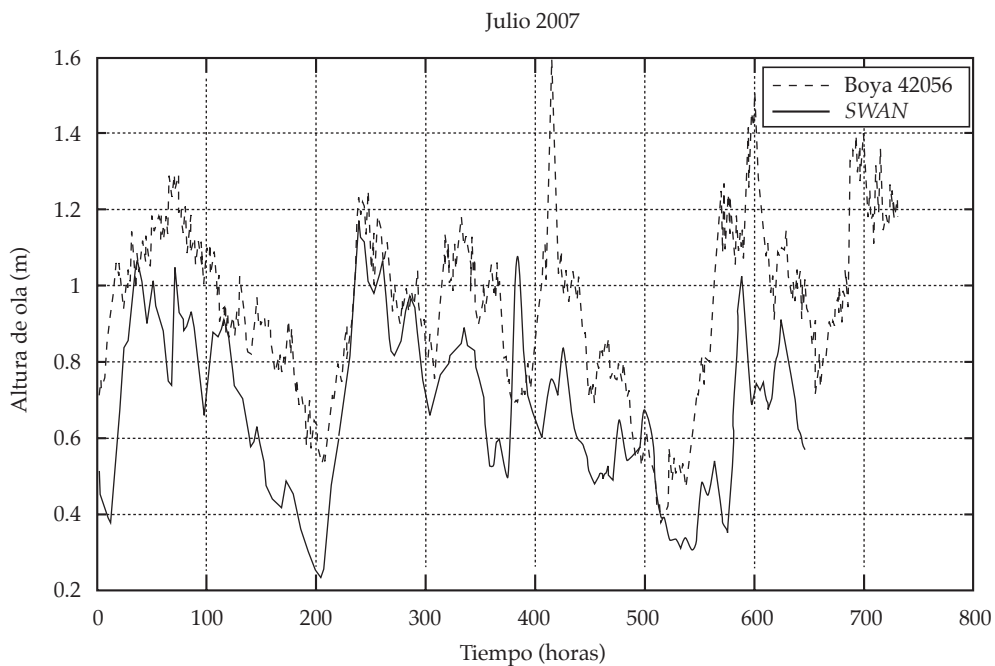


Figura 6. Altura significativa simulada con el sistema *POMA* y observada por la boya 42056 del NDBC durante un mes en situación de calma.

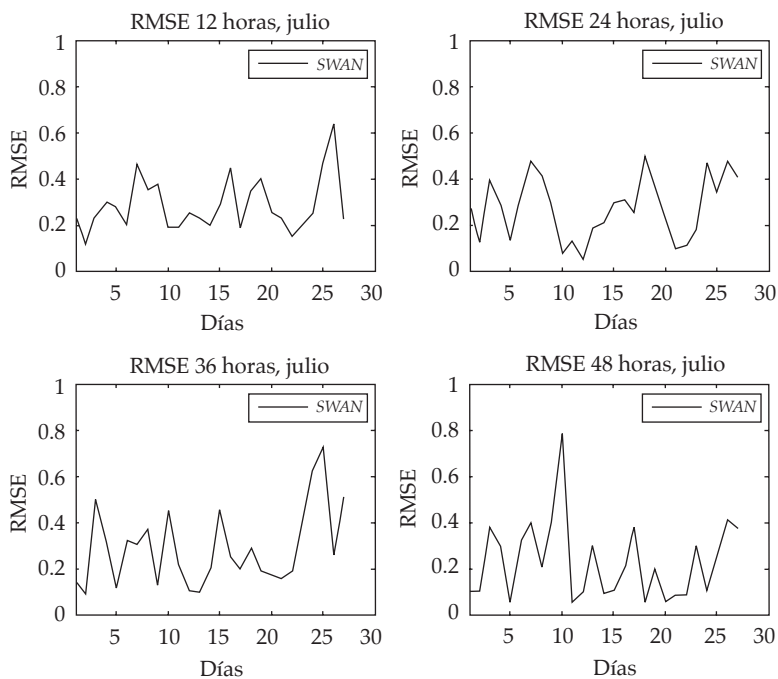


Figura 7. Error cuadrático medio de altura significativa simulada contra observada durante un mes en situación de calma.

El frente frío número 4 de la temporada de 2007, de acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional, se localizó en las costas de Tamaulipas, México, a las 0600 UTC del 23 de octubre; se movió hacia el sureste a lo largo de la vertiente del Golfo de México (figura 8), con una presión superficial de 1 042 hPa, vientos superficiales de 12.5 a 18 m/s y ráfagas hasta de 22 m/s (boletín del SMN); a las 1800 UTC, el frente se aproximó al norte de Veracruz, propagando más aire frío al este y centro de México; sobre el Golfo de México, las ráfagas de viento alcanzaron 27 m/s; a las 0000 UTC del 24 de octubre, el frente comenzó a afectar el suroeste de la península de Yucatán, con vientos de 33 m/s; del 25 al 26 de octubre, el frente cruzó el Golfo de México, alcanzando un estado semi-estacionario el 27 de octubre; en el este del Golfo de México, cerca de la península de Yucatán, los efectos de precipitación fueron registrados en Tabasco y Chiapas a las 1200

UTC del 28 de octubre, continuando las tormentas locales hasta el 31 de octubre, con precipitaciones mayores a 50 mm; a las 1200 UTC, el sistema se localizó en la bahía de Campeche, manteniéndose estacionario.

De acuerdo con las simulaciones numéricas con *MM5*, el viento máximo fue de 25 m/s (figura 9), este viento antecede al efecto llamado Tehuano, viento proveniente del Golfo de México y que se intensifica al paso por el Istmo de Tehuantepec, afectando tanto localidades del Istmo como la dinámica regional del océano Pacífico.

El viento asociado con el frente produjo alturas de ola significantes hasta de 6 m (figura 10) en el sureste, afectando hasta el noroeste del Golfo.

Durante el frente frío número 4, la boya 42055, localizada dentro del Golfo de México (figura 4), dejó de funcionar, por lo que las comparaciones se realizaron utilizando la boya

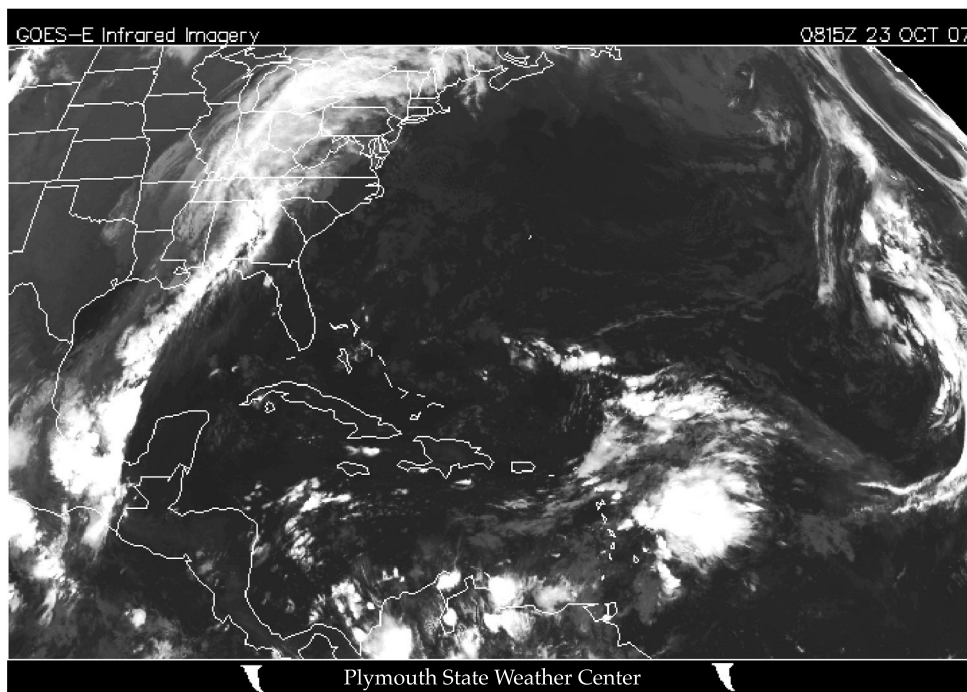


Figura 8. Imagen IR del satélite GOES-E durante el frente frío número 4, a las 08:15 UTC del 23 de octubre de 2007.

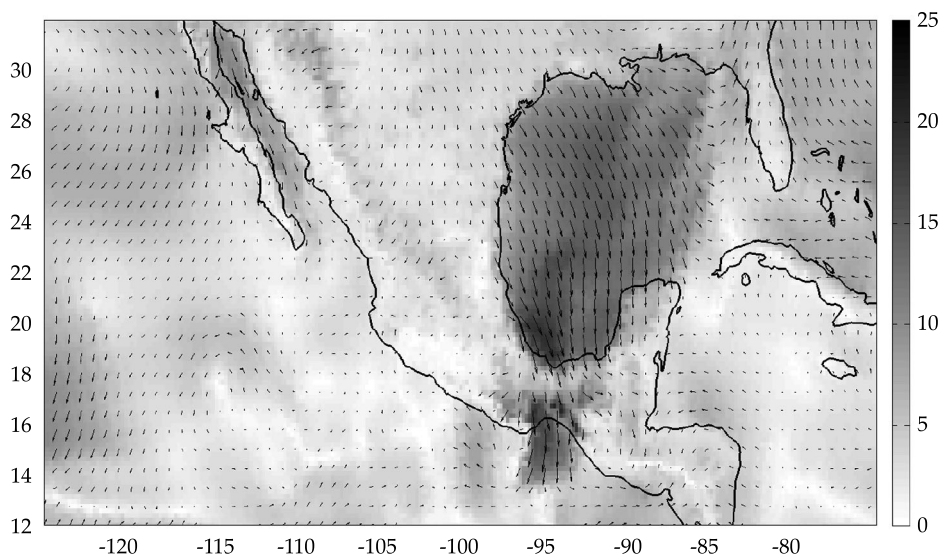


Figura 9. Simulación numérica de viento (m/s) modelo MM5. Frente frío número 4, 24 de octubre de 2007, 00 horas, UTC.

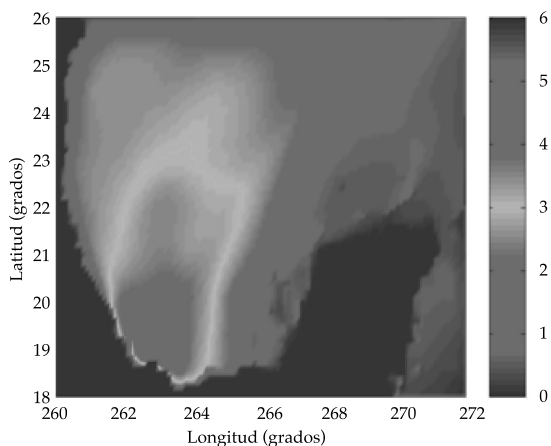


Figura 10. Simulación numérica de altura significativa (m), con el modelo SWAN. Frente frío número 4, 24 de octubre de 2007, 06 horas, UTC.

los valores máximos de viento simulado presentan un retraso en tiempo respecto de las observaciones; además, las simulaciones subestiman por aproximadamente 25%. Durante incrementos rápidos de intensidad de viento, el modelo WAM responde más lentamente que lo observado, y el modelo SWAN anidado responde aún más lento, como fue reportado por Padilla *et al.* (2007).

Respecto al error cuadrático medio, las simulaciones a 12, 24 y 36 horas presentan comportamientos similares entre sí a lo largo del tiempo (figura 12). A las 48 horas, este error cuadrático medio disminuye; es el periodo cuando el frente frío está dejando de afectar la región. Esto significa que durante el periodo de afectación del frente frío, el error cuadrático medio es mayor.

### Huracán Dean

Una prueba extrema del desempeño de simulaciones de oleaje es un huracán, ya que continuamente cambia de dirección el viento forzante y también existe gran variabilidad

42056 —único dato disponible en la región—, de la cual se muestra una serie de tiempo de *Hs*, sobrepuesta a simulaciones (figura 11), las cuales reproducen en lo general de manera adecuada la variación temporal, exhibiendo en ambos casos, dos máximos; sin embargo,

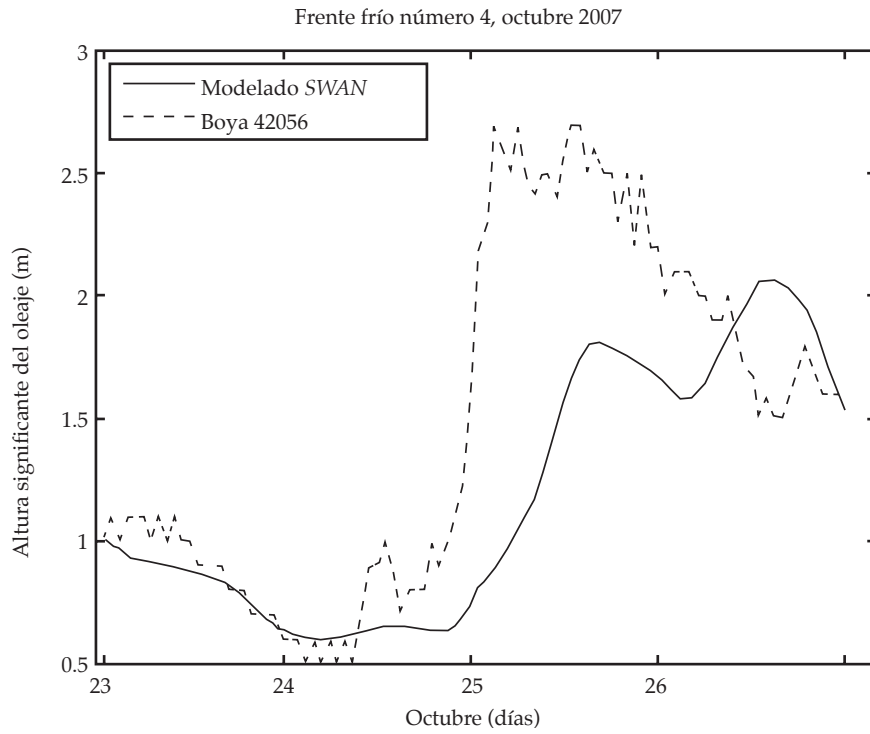


Figura 11. Altura significativa simulada y observada (boya Caribe 42056). Frente frío número 4.

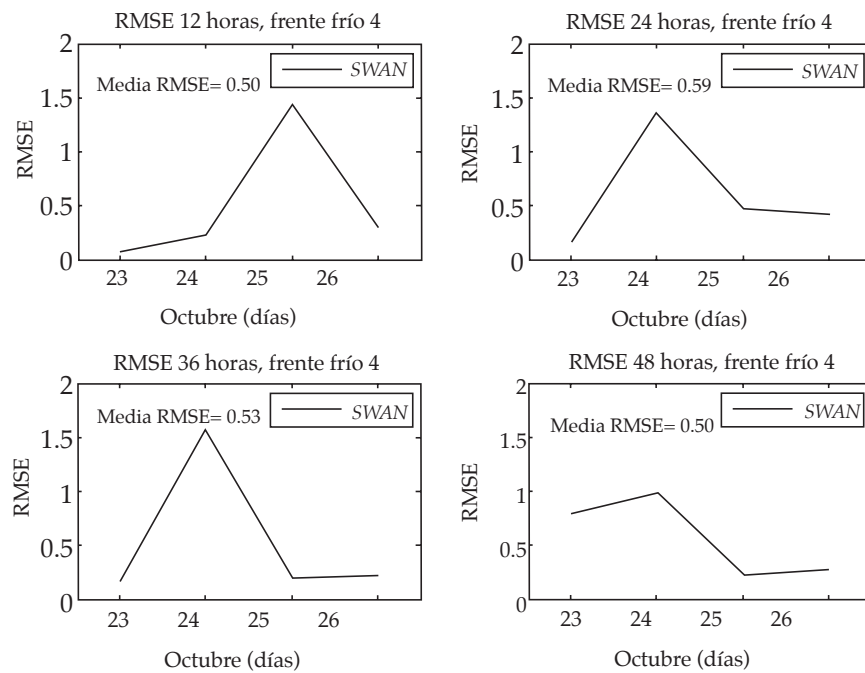


Figura 12. Error cuadrático medio a 12, 24, 36 y 48 horas. Frente frío número 4.



temporal, siendo un buen caso de estudio para determinar la respuesta de modelos en casos extremos y cambiantes en pocas horas; al ser un huracán un evento de generación de oleaje local, el modelo SWAN acoplado al MM5 fue una prueba de desempeño adecuada en el camino a la operatividad.

*Dean* se originó a partir de una onda del este que cruzó el Atlántico desde las costas de África el 11 de agosto de 2007. *Dean* fue considerado depresión tropical a las 0600 UTC del 13 de agosto; el 14 de agosto a las 1200 se desplazó hacia el oeste a 36 km/h; el 16 de agosto, a las 1200 UTC, *Dean* se convirtió en huracán, con intensidades de viento de 144 km/h; el 17 de agosto a las 0930 UTC, *Dean* ingresó al Caribe, iniciando su intensificación acelerada en el Caribe del este, pasando de categoría 1 a 4 en la escala Saffir-Simpson el 18 de agosto, con una presión central mínima de 923 hPa. Al acercarse a las costas de Yucatán, *Dean* se convirtió en categoría 5, ello sucedió el 21 de agosto; el ojo tocó tierra a las 0830 UTC, con una presión mínima de 905 hPa y vientos máximos sostenidos de 270 km/h, debilitándose durante las diez horas que requirió para cruzar la península de Yucatán; emergió al Golfo de México sobre la bahía de Campeche, atravesó el Golfo de México y tocó

tierra nuevamente en Tecolutla, en el estado de Veracruz, como categoría 2, con vientos de 153 km/h; se debilitó rápidamente a partir del 23 de agosto, por la fricción con las montañas de la Sierra Madre Oriental (Centro Nacional de Huracanes, EU). En la figura 13 se muestra una imagen de satélite en la que se aprecia el tamaño del huracán *Dean* (izquierda) y un mapa con su trayectoria (derecha).

Durante la trayectoria de *Dean* se observaron vientos mayores a 20 m/s (figura 14) en las boyas del NDBC.

Tanto el modelo MM5 como SWAN ubicaron adecuadamente el centro de *Dean*. En la figura 15 se muestra una serie de tiempo de viento simulado y observado en la boya 42056. Las simulaciones reproducen adecuadamente el patrón de intensificación-debilitamiento; no obstante, subestiman el viento, por ello la altura significativa es subestimada también, sobre todo en sus valores máximos, en aproximadamente un 18%, reflejándose cerca de un 50% en la subestimación de altura significativa (figura 16); el máximo observado y simulado presentan sus máximos simultáneamente.

El error cuadrático medio, como índice de las diferencias entre lo simulado y observado, refleja que al iniciar la afectación de *Dean* en

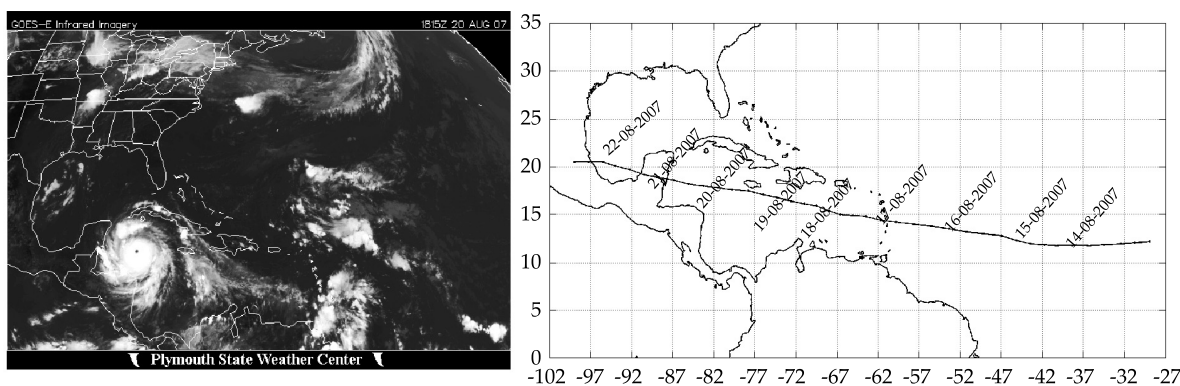


Figura 13. Imagen IR del satélite GOES-E durante el paso del huracán *Dean*, a las 18:15 UTC del 20 de agosto de 2007 (izquierda), en la que se puede apreciar el tamaño del sistema y la trayectoria del huracán *Dean* (derecha), según el NHC.

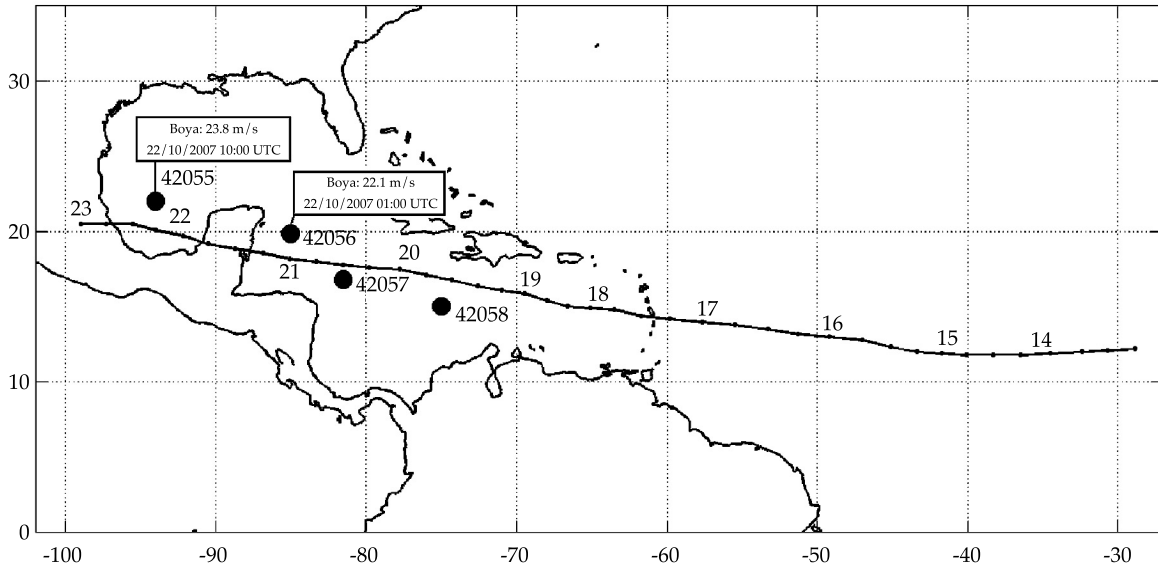


Figura 14. Ubicación de las boyas de observaciones de oleaje y viento del NDBC y trayectoria del huracán Dean entre el 13 y el 23 de octubre de 2007.

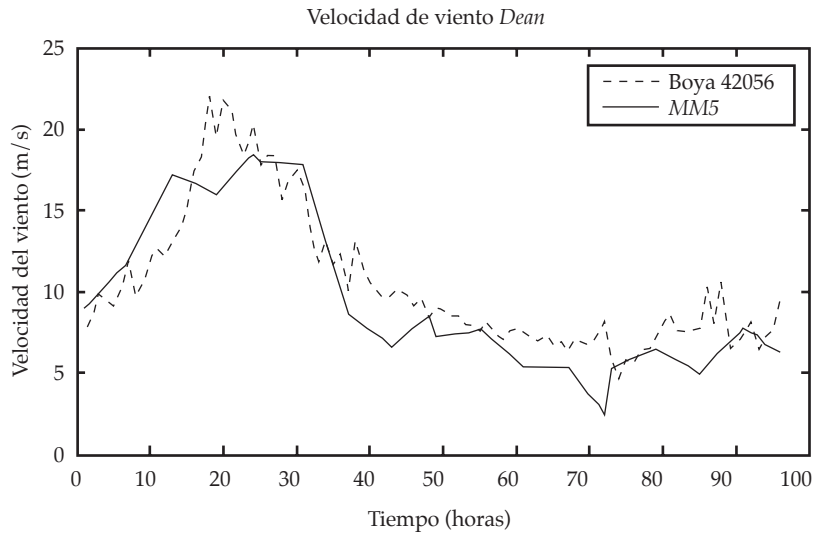


Figura 15. Intensidad de viento simulado y observado durante el huracán Dean.

la región (20 de agosto), este error es mayor, correspondiendo a 24 horas de simulación (figura 17); los errores menores se dan a 36 horas de simulación, ello indica que los

máximos errores se registran durante la fase de incremento de viento (subestimación de viento), reflejándose en subestimación de altura significante; por otra parte, mientras

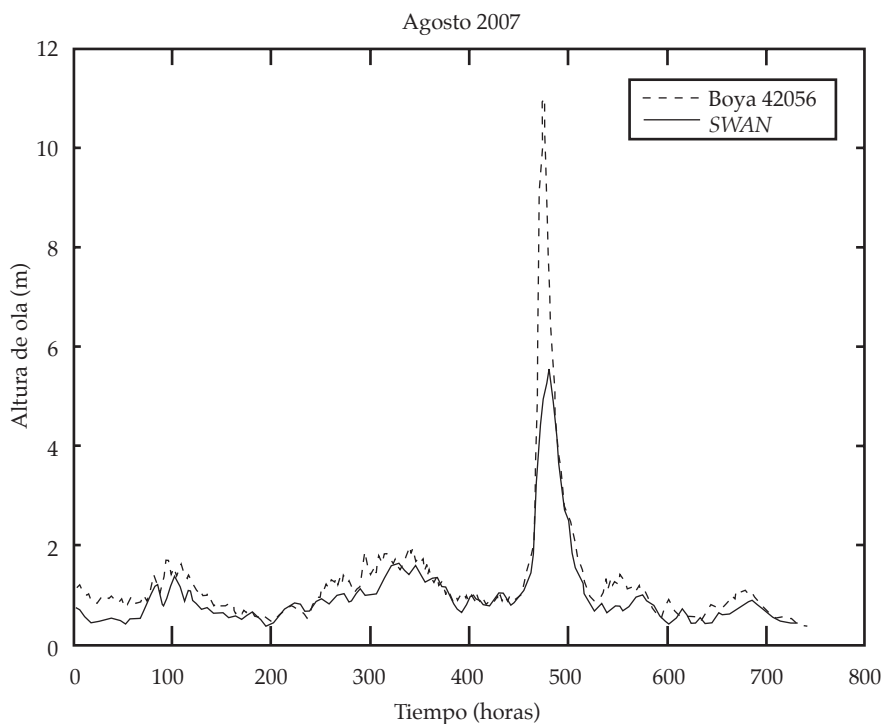


Figura 16. Altura significativa observada y simulada durante el huracán Dean.

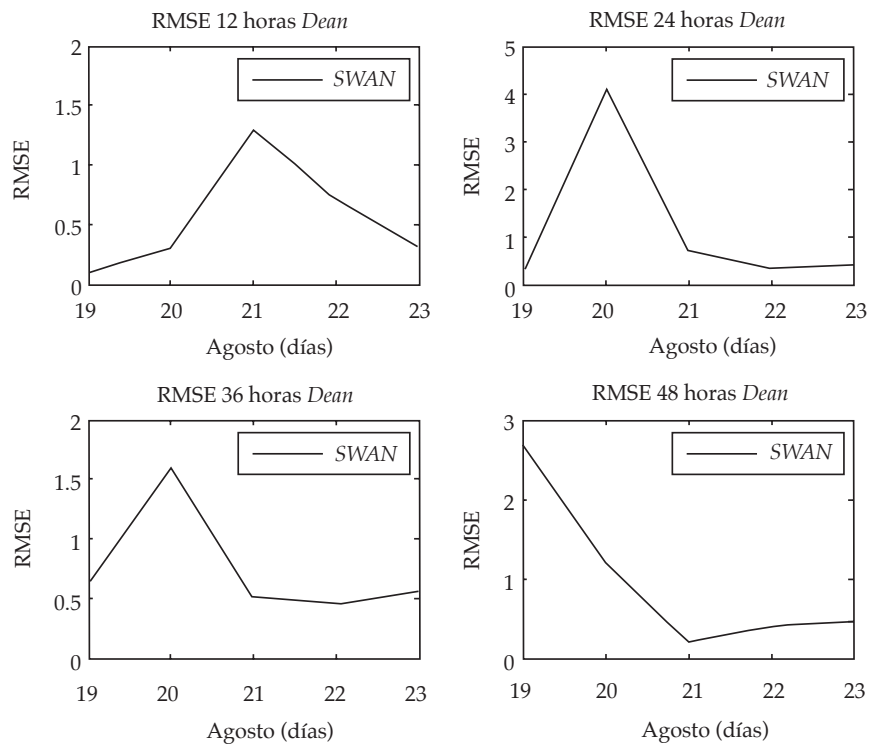


Figura 17. Error cuadrático medio a 12, 24, 36 y 48 horas de simulación durante el huracán Dean.

el huracán prosigue su efecto local, las simulaciones mejoran, volviendo a disminuir su calidad cuando el meteoro se aleja, es decir, cuando vuelve a cambiar abruptamente la intensidad del viento, esto es, los errores son mayores cuando se acerca y cuando se aleja el huracán, siendo menores durante su estancia y antes de su arribo.

Identificando como crítica la fase de incremento de viento abrupto por efecto de un evento extremo, se experimentó con la magnitud del viento simulado durante *Dean*, incrementando en un 25% su valor durante la fase de intensificación del mismo, ello para brindar al modelo *SWAN* vientos más aproximados a las observaciones. La nueva serie de tiempo corregida se muestra en la figura 18; las líneas verticales punteadas limitan el tiempo durante el cual se varió artificialmente la intensidad del viento.

Con esta modificación artificial, las simulaciones numéricas de altura significativa reprodujeron de manera extraordinaria las variaciones del oleaje en intensidad y tiempo de ocurrencia (figura 19), siendo de gran coherencia con las observaciones. Estas co-

rrecciones disminuyen el error cuadrático medio significativamente (figura 20), ello indica que es posible calibrar el modelo de atmósfera *MM5* con casos similares con buenos resultados en el oleaje simulado.

## Discusiones y conclusiones

El sistema *POMA* está funcionando de manera operativa y automatizada para una malla sobre el Atlántico tropical del hemisferio norte y dos mallas internas sobre las costas mexicanas: una en el Caribe y la otra en el este del Golfo de México.

El sistema *POMA* subestima los vientos a 10 m de altura, siendo mayor esta subestimación en eventos extremos como huracanes y frentes fríos, ello puede deberse a que la resolución de los modelos no describe totalmente la estructura del evento, no obstante es posible su calibración durante la fase de intensificación de vientos, obteniendo significativamente mejoras en las simulaciones de altura significativa de ola. Las simulaciones de viento mejorarán cuando se consideren datos de viento cada hora, y no cada seis,

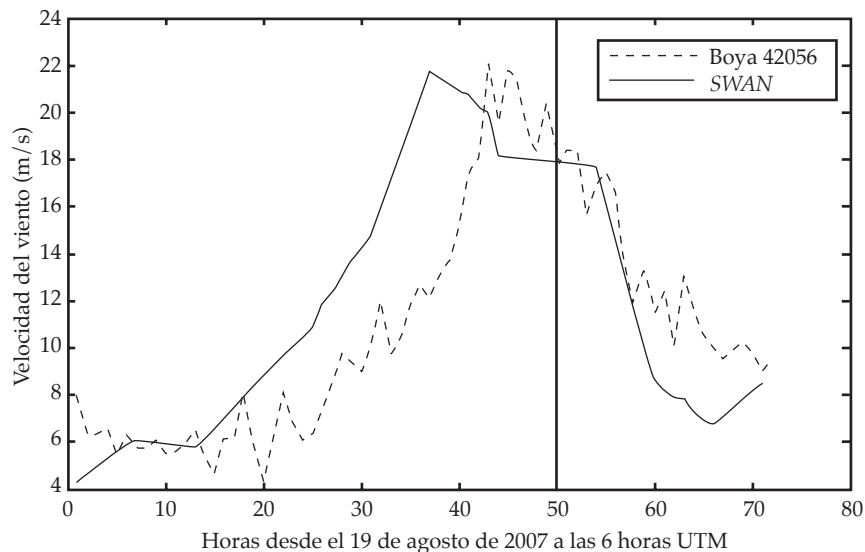


Figura 18. Incremento artificial del viento (entre líneas verticales) en un 25% durante las 24 horas de intensificación del mismo.

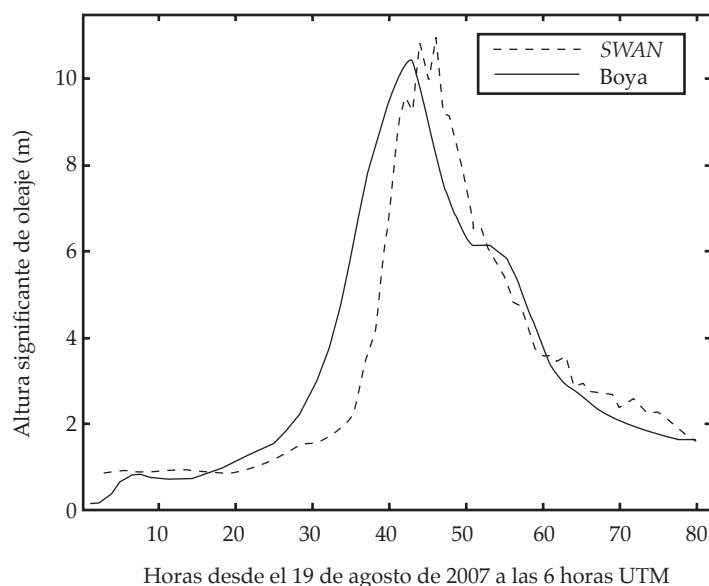


Figura 19. Altura significativa simulada con el incremento de un 25%.

como se encuentra actualmente, sobre todo cuando el campo de viento varía muy rápido temporal y espacialmente.

La validación de los modelos de oleaje está en proceso. Se requiere hacer en varias circunstancias: tiempos de calma, huracanes y nortes, por ejemplo. Esto se hará forzando los modelos con campos de viento horarios. Ante la escasez de observaciones de oleaje en costas mexicanas, esta herramienta es muy valiosa para realizar tanto diagnósticos como pronósticos, ello contando con un sistema de verificación en tiempo real y reconociendo sus alcances y limitaciones.

### Trabajo futuro

Utilizar simulaciones de viento cada hora del modelo MM5, ya que actualmente el sistema genera cada seis horas salidas de vientos superficiales. Realizar simulaciones numéricas exhaustivas para decenas de frentes fríos, huracanes y situaciones de calma, además de generar estadística general del desempeño de los modelos de manera mensual operativamen-

te y por periodos de cinco a ocho días en presencia de eventos extremos.

Generar mallas regionales de acuerdo con las necesidades de potenciales usuarios como Pemex, el Instituto Mexicano del Transporte, la Secretaría de Marina o alguna otra institución, que requiera pronósticos o diagnósticos de oleaje a diferentes tiempos.

Extender la cobertura del sistema al Pacífico del Este, incluyendo un dominio de resolución gruesa con el modelo WAM para todo el Pacífico y mallas locales en las costas del Pacífico mexicano, que reciban las condiciones de frontera del modelo WAM para considerar el mar de fondo (o *swell*), que puede ser muy importante en esta región.

Acoplar los modelos de oleaje a modelos de circulación oceánica, para describir la relación oleaje-corrientes, sobre todo en regiones costeras.

### Agradecimientos

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por su financiamiento total a los estudios reportados.

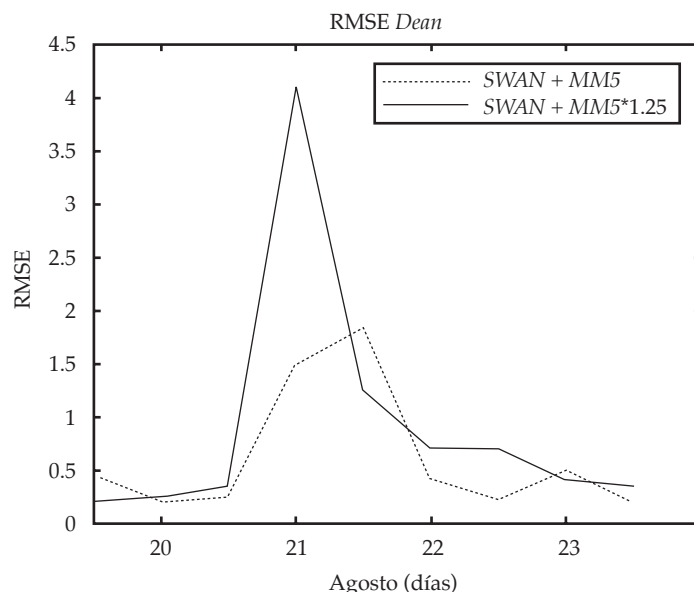


Figura 20. Error cuadrático medio con el incremento de un 25% de viento.

A Diana Afrodita Ramírez Elías, por sus trabajos de programación en los módulos de verificación del sistema y graficado de resultados.

A José Guadalupe Rosario de la Cruz, por la automatización de los procesos de cómputo del sistema.

Recibido: 29/03/10

Aceptado: 17/02/11

## Referencias

- ANTHES, R.A. The development of asymmetries in a three-dimensional numerical model of the tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.* Vol. 100, 1972, pp. 461-476.
- BATJES, J.A. Shallow water wave modelling. *Proc. Int. Symp. Waves -Phys. Numerical Modelling*. Vancouver: University of British Columbia, I, 1994, pp. 1-23.
- BOOIJ, N., RIS, R.C., and HOLTHUIJSEN, L.H. A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.* Vol. 104, C4, 1999, pp. 7649-7666.
- COLLINS, J.I. Prediction of shallow water spectra. *J. Geophys. Res.* Vol. 93, C1, 1972, pp. 491-508.
- COX, A.T. and SWAIL, V.R. A global wave hindcast over the period 1958-1997: validation and climate assessment. *J. Geophys. Res.* Vol. 106, C2, 2001, pp. 2313-2329.
- ELDEBERKY, Y. Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone. Ph.D. dissertation. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, Dept. Civil Engineering, 1996, 203 pp.
- ELDEBERKY, Y. and BATJES, J.A. Spectral modelling of wave breaking: Application to Boussinesq equations. *J. Geophys. Res.* Vol. 101, C1, 1996, pp. 1253-1264.
- HASSELMANN, K. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping. *Bound.-Layer Meteor.* Vol. 6, 1974, pp. 107-127.
- HASSELMANN, S., HASSELMANN, K., ALLENDER, J.H., and BARNETT, T.P. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 15, 1985, pp. 1378-1391.
- HOLTHUIJSEN, L., BOOIJ, N., RIS, R.C., and HAAGSMA, I.J. *SWAN Cycle III, version 40.20, User Manual*. IJ. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2003.
- JANSSEN, P.A.E.M. Wave-induced stress and the drag of the air flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 19, 1989, pp. 745-754.
- JANSSEN, P.A.E.M. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 21, 1991, pp. 1631-1642.
- KINSMAN, B. *Wind waves: their generation and propagation on the ocean surface*. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 1965, 676 pp.

- KOMEN, G.J., HASSELMANN, S., and HASSELMANN, K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 14, 1984, pp. 1271-1285.
- KOMEN, G.J., CAVALERI, L., DONELAN, M., HASSELMANN, K., HASSELMANN, S., and JANSSEN, P.A.E.M. *Dynamics and Modeling of Ocean Waves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994, 520 pp.
- MADSEN, O.S., POON, Y.-K., and GRABER, H.C. Spectral wave attenuation by bottom friction: theory. *Proc. 21st Int. Conf. Coastal Eng.* Torremolinos, España: ASCE, 1988, pp. 492-504.
- MONBALIU, J., PADILLA-HERNÁNDEZ, R., HARGREAVES, J.C., CARRETERO, J.-C., LUO, W., SCLAVO, M., and GÜNTHER, H. The spectral wave model WAM adapted for applications with high spatial resolution. *Coastal Eng.* Vol. 41, 2000, pp. 41-62.
- PADILLA-HERNÁNDEZ, R. *Numerical modelling of wind wave energy dissipation at the bottom including ambient currents*. Ph.D. dissertation. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2002, 171 pp.
- PADILLA-HERNÁNDEZ, R. and MONBALIU, J. *WAM-PROMISE, Extension 1*. Internal Report. Leuven, Belgium: Hydraulics Laboratory, Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
- PADILLA-HERNÁNDEZ, R., PERRIE, W., TOULANY, B., and SMITH, P.C. Modelling of two Northwest Atlantic Storms with Third Generation Wave Models. *J. of Weather and Forecasting*. Vol. 22, No. 6, 2007, pp. 1229-1242.
- PÉREZ-ROMERO, D.M., BOLAÑOS, R. y SILVA-CASARÍN, R. Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 2, abril-junio de 2008, pp. 5-20.
- RIS, R.C. *Spectral modelling of wind waves in coastal areas*. Ph.D. dissertation. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 1997, 160 pp.
- SMITH, W.H.F. and SANDWELL, D.T. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*. Vol. 277, No. 5334, 1997, pp. 1956-1962.
- THE SWAMP GROUP. *Ocean Wave Modeling: Principal results of a wave model intercomparison study conducted by the Sea Wave Model Project (SWAMP) and first presented at a symposium on Wave Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface, held May 13-20, 1981, in Miami, Florida*. New York: Plenum Press, 1985.
- WAMDI GROUP. The WAM model-a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 18, 1988, pp. 1775-1810.

## Abstract

SALINAS-PRIETO, J.A., PADILLA-HERNÁNDEZ, R., OROPEZA-ROSALES, F. & LOBATO-SÁNCHEZ, R. *Operational wind-wave forecasting system*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 1, January-March, 2012, pp. 45-67.

A numerical forecast system was implemented (POMA, acronym in Spanish: coupled wind-wave models) with 3 widely-used models: MM5 model, WAM-PROMISE and SWAN. Model validation was based on data from buoys owned by the NDBC (National Data Buoy Center). The nesting process was generated with a coarse grid for the Atlantic tropics (northern hemisphere) where winds 10 meters from the surface level were simulated (with MM5 model). This information was transferred to the global WAM model for deep waters using a down-scaling process based on initial boundary conditions to simulate wind waves in shallow waters. The POMA system was verified using several events; three cases with different wind characteristics are presented in this paper: 1) calm situation, 2) cold front and 3) hurricane. The results are automatically displayed on a restricted WEB page, illustrating two nested grids located in the Mexican coast—the Caribbean and the Gulf of Mexico. The system is able to incorporate new nested grids in sites with local interest.

**Keywords:** coupled models, wind, local and distant wind wave, validation.

## Dirección institucional de los autores

*Dr. José Antonio Salinas Prieto*

Subcoordinación de Hidrometeorología  
 Coordinación de Hidrología  
 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
 Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso  
 62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO  
 Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 827  
 Fax: +52 (777) 3293 683  
 jsalinas@tlaloc.imta.mx

*Dr. Roberto Padilla-Hernández*

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México  
 Ahora en I.M. Systems Group, Inc. (IMSG) NOAA/  
 EMC/NCEP  
 5200 Auth Road, Room 209  
 Camp Springs, MD 20746  
 United States of America  
 roberto.padilla@noaa.gov

*Dr. Fernando Oropeza Rosales*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
 Ahota en FUGRO México  
 Calle 5 Sur, Manzana Q, Lote 10  
 Puerto Pesquero Laguna Azul  
 24140 Ciudad del Carmen, Campeche, MÉXICO  
 forozeza@fugro.com

*Dr. René Lobato Sánchez*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
 Ahora Gerente de Meteorología  
 Servicio Meteorológico Nacional  
 Comisión Nacional del Agua  
 Avenida Observatorio 192, Colonia Observatorio,  
 Delegación Miguel Hidalgo  
 11860 México, D.F., MÉXICO  
 Teléfono: +52 (55) 26364 600, extensión 3457  
 rene.lobato@conagua.gob.mx