

## APLICACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA AL PRONÓSTICO OCEANOGRÁFICO, EN AGUAS JURISDICCIONALES DEL CARIBE COLOMBIANO

### ABOUT THE APPLICATION OF A NUMERICAL MODEL FOR FORECASTING OCEANOGRAPIC TERRITORIAL WATERS OF THE COLOMBIAN CARIBBEAN

ALEJANDRO MUÑOZ VARGAS\*

#### RESUMEN

En este artículo, se hace un resumen de las principales herramientas computacionales, adquiridas y aplicadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, a través de las cuales, se brinda una serie de productos a los usuarios en general, para ofrecer diferentes servicios, tales como evaluación de impactos que pudieran producir diseños de obras costeras (espolones, rompeolas, estructuras de protección costera, etc.) así como los cálculos de impacto, relacionados con el desarrollo de operaciones de búsqueda y rescate, o pronóstico de la posición de manchas de hidrocarburos originadas por un derrame, ya sea en aguas del mar Caribe, así como en bahías interiores (Santa Marta, Bahía de Cartagena y Golfo de Morrosquillo). Asimismo, colaborar en la emisión ininterrumpida del pronóstico de las condiciones meteorológicas y oceanográficas en el Caribe, el cual se calcula con base en modelos de circulación oceánica, y el ploteo de archivos de datos obtenidos con base en convenios de cooperación internacional con instituciones allegadas al ramo.

**Palabras clave:** Modelos numéricos; Búsqueda y rescate; Pronóstico meteomarinero; Derrame de hidrocarburos.

#### ABSTRACT

In this one article, the development is explained and the principal computational tools, acquired and utility for the C.I.O.H, through which, they offer a series of products to the users in general, to offer different services, such as evaluation of impacts that could produce shore fortification designs (spurs, breakwater, structures of coastal protection, etc) as well as the calculations of impact, related to the development of operations search and Rescue, or prognosis of the position of hydrocarbon spots originated by a spill, or in waters of the Caribbean Sea, as well as in inner bays (Santa Marta, Bay of Cartagena and Gulf of Morrosquillo). Also, to collaborate in the uninterrupted emission of the prognosis of the meteorological conditions and oceanographic in the Caribbean, which is calculated with base in models of oceanic circulation, and the plotting of data files obtained with base in agreements of international cooperation, with institutions close friends to the branch.

**Keywords:** Numerical models; Search and rescue; Forecast prognosis; Hydrocarbon spill.

#### INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), lleva a cabo desde el año 1990, un servicio tendiente a proveer a las unidades de la Dirección General Marítima (DIMAR), de la Armada Nacional y la Comunidad Marítima, la previsión de las condiciones meteorológicas y oceanográficas sobre las aguas jurisdiccionales del Caribe colombiano. El CIOH se encarga de vigilar

el desarrollo de las condiciones climáticas reinantes en el mar Caribe, con el fin de difundirlo a la comunidad marítima en general y en particular a la Armada Nacional de Colombia, mediante la emisión de cartas sinópticas y de oleaje, pronósticos del tiempo y mareas, guías del usuario para la conservación de la vida humana en el mar.

Las metodología se basa en la corrida diaria de modelos numéricos, análisis estadístico de imáge-

\* Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), Isla Naval de Manzanillo, Escuela Naval Almirante Padilla, Cartagena, Colombia. e-mail: alejandromunoz66@yahoo.es

Fecha de recibido: Junio 11, 2008

Fecha de aprobación: Noviembre 11, 2008

nes de satélite, recopilación automática de información disponible en la Internet y despliegue automático de información meteorológica en tiempo real, disponibles por las Estaciones Meteorológicas Automáticas Satelitales (EMAS) y datos oceanográficos provenientes de las boyas de oleaje direccional, para evaluación y análisis de los pronosticadores de la central de pronósticos del CIOH.

El presente documento, hace énfasis en la aplicación continua de la modelación numérica, así como en las metodologías antes mencionadas, haciendo una descripción de la física envuelta en ellas, así como los diferentes procesos oceanográficos y meteorológicos que son resueltos.

La aplicación de conocimientos obtenidos sobre el comportamiento de las condiciones océano atmosféricas del área del Caribe, permite anticipar el desarrollo de eventos meteorológicos de alto riesgo para la seguridad en las actividades marítimas.

La continuidad en la recolección, procesamiento y análisis sobre las condiciones océano-atmosféricas en el área del mar Caribe, requiere constancia y dedicación, labor que se encuentra implicada dentro de la función principal de la Central de pronóstico del CIOH mediante el suministro oportuno y eficaz de boletines, informes y comunicados emitidos para prever las condiciones meteorológicas e informar a la comunidad marítima y comités locales de emergencia, quienes toman las medidas pertinentes para salvaguardar la vida humana en el mar y la seguridad de las localidades y municipios costeros.

El trabajo es un resumen del aporte realizado por los oficiales, suboficiales e investigadores del CIOH que en diferentes años lograron desarrollar e implementar metodologías que hoy se están unificando y mejorando, para que en un sistema único de pronósticos (SPOA), el CIOH logre entregar a sus usuarios un producto confiable que permita aportar a salvaguardar la vida humana en el mar, mejorar la seguridad de las operaciones navales y brindar

seguridad, mediante la prevención produciendo pronósticos oportunos a los turistas nacionales y extranjeros que desarrollan actividades marítimas en el Caribe y sus litorales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio y clima.** Por su situación geográfica en el área oeste del Océano Atlántico, el área marítima del Caribe colombiano es una zona amplia con una longitud de 1.600 km de línea de costa, y un área marítima de 579.876 km<sup>2</sup> respectivamente del área de estudio (Figura 1).

En la parte continental, limita al oeste con Panamá en la zona de Cabo Tiburón (08° 04' N y 77° 19' W), y al occidente con Venezuela en la zona de Castilletes (11° 50' N y 71° 18' W). Comprende las zonas costeras al norte del departamentos del Chocó, así como los departamentos de Antioquia, Atlántico, Bolívar, Córdoba, Magdalena, Sucre, la Guajira y una pequeña región insular constituida por el archipiélago de San Andrés y Providencia, Santa Catalina y los cayos de Roncador, Cayo Bolívar, Quitasueño, Serrana, Serranilla, Alburquerque, y Bajo Nuevo respectivamente. Asimismo, el régimen climático de la cuenca Caribe, está bajo la influencia de los desplazamientos norte-sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

El movimiento de la ZCIT en dirección norte o sur es una resultante de los fenómenos físicos subtropicales. Además, el sector está influido por la circulación atmosférica de los vientos Alisios (vientos del N y NE), procedente de los centros de alta presión del atlántico nororiental. La incidencia de los vientos de este-sureste, también es notable en determinada época del año. El clima se caracteriza como tropical semiárido. En el área, se identifican dos períodos climáticos principales, llamados época seca (verano) y época húmeda (invierno) y una época de transición.

**Época seca o época de verano.** Se extiende des-

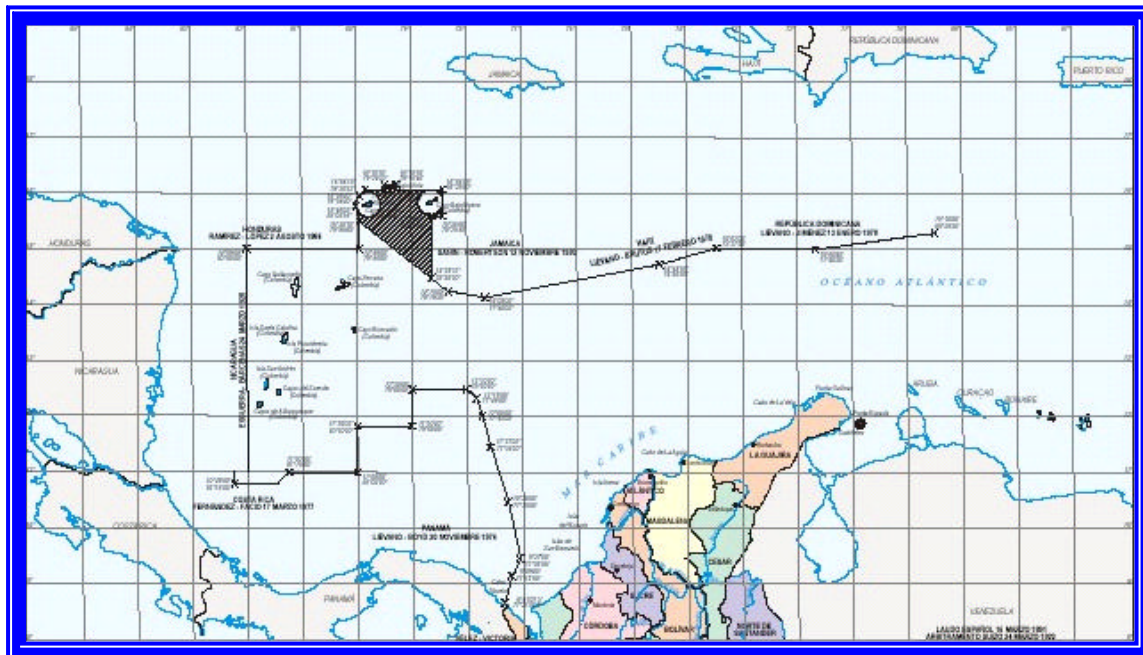


Figura 1. Jurisdicción marítima cuenca Caribe colombiana. IGAC.

de diciembre hasta abril, caracterizándose por vientos fuertes del sector norte-noreste y lluvias débiles y escasas. En esta época pueden presentarse los denominados «mares de leva», ocasionados por la incursión en aguas del mar Caribe de frentes polares provenientes del hemisferio norte, cuando alcanzan a llegar a los 15° de latitud norte (unas 150 millas náuticas al norte de la Guajira).

**Época húmeda o época de invierno.** Época de lluvias que se extiende desde agosto a noviembre. Se caracteriza por vientos débiles, de orientación variable y por un régimen de lluvias abundantes. En esta época suelen presentarse los denominados ciclones tropicales (huracanes), los cuales pueden aumentar el régimen de lluvias en todo el Caribe colombiano.

**Época de transición.** Compreendida entre mayo y julio. También denominado veranillo de San Juan. Esta época se caracteriza por vientos uniformes y fuertes de dirección norte y noreste. El inicio de esta época marca también el comienzo de la temporada de huracanes en el área del Océano Atlántico norte,

Golfo de Méjico y Mar Caribe que se extiende hasta el mes de noviembre.

La evolución de los parámetros hidrológicos e hidrodinámicos de la región está en estrecha relación con los tres períodos climáticos identificados. Las variaciones climáticas estacionales definen la dirección e intensidad de las corrientes regionales y locales, la dirección e intensidad del oleaje y el régimen de precipitaciones.

Se establece una temperatura media anual de 28°C para el área de estudio. Las variaciones observadas en la temperatura media no superan los 2°C, esto se debe principalmente a que la temperatura de la superficie del océano presenta fluctuaciones mínimas durante todo el año.

## RESULTADOS

Como parte del aprovechamiento continuo de las herramientas numéricas con las cuales la Dirección General Marítima a través del CIOH cuenta, a continuación se realiza una leve explicación de cada uno

de los modelos numéricos y su respectiva aplicación en las labores de pronósticos océano-atmosféricos en general.

En la actualidad existen 3 modelos numéricos propios, así:

- Modelo de circulación oceánica.
- Modelo derrame de hidrocarburos en la Bahía de Cartagena, Santa Marta y Morrosquillo.
- Modelo de altura del oleaje Nedwam.

**Modelo de circulación oceánica MCO.** En el marco del proyecto de investigación «Modelación numérica aplicada a operaciones navales de búsqueda y rescate» del CIOH, se desarrollaron diferentes bloques numéricos que acoplados al modelo *Princeton Ocean Model* (POM por sus siglas en inglés) se presentan como un sistema de predicción operativo de las condiciones oceanográficas del mar Caribe para aplicaciones en operaciones de búsqueda y rescate, planes de contingencia de derrames de hidrocarburos, pesquería y otros.

El sistema permite a la Armada Nacional y a sus unidades navales la planeación de operaciones de búsqueda y rescate y el replanteamiento de las mismas por cambios en las condiciones reinantes del tiempo marítimo, contribuyendo a disminuir costos y tiempos de operación, y aumentando las posibilidades de éxito.

El sistema hace uso del modelo POM (Mellor, 1993) y es alimentado de manera automática con datos del modelo global de pronóstico meteorológico de la UKMO (*United Kingdom Meteorological Office, UK*, Oficina Meteorológica del Reino Unido), y con datos de temperatura superficial del mar (TSM) de satélites de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration, EU*). Los datos de la UKMO se utilizan para forzar al modelo y pronosticar el comportamiento de los campos hidrodinámicos, en el período entre las 24 y 72 horas; los datos de TSM de los satélites de la NOAA

se asimilan durante el proceso de cálculo, permitiendo un mejor ajuste a las condiciones reales. Finalmente, los datos de la base de datos WOA-98 del NODC (*Nacional Oceanographic Data Center*) se utilizan para la fase de inicialización del modelo.

El interés de pronosticar el movimiento de las manchas de hidrocarburo en toda la plataforma cubierta por el modelo de gran escala, es obvio, debido a que un derrame puede ocurrir en cualquier punto de la ruta de los buques petroleros. Por otro lado, un modelo de transporte de sustancias en la superficie del mar permite simular el desplazamiento de cualquier objeto flotante, si se tienen en cuenta sus propiedades físicas. Esto significa que el modelo, ajustado en forma adecuada, puede emplearse en las operaciones navales de búsqueda y rescate, pronosticando la posición de los artefactos y cuerpos humanos resultados de un accidente (Figura 2). Con este fin, el sistema operativo reúne los siguientes elementos:

- Un bloque de transporte de trazadores que simula el comportamiento del hidrocarburo o del artefacto a la deriva.
- Facilidad de cambiar la resolución espacial del dominio de cálculo, aplicando mallas de nido, o empleando mallas curvilíneas.
- Asimilar los datos de observaciones en tiempo real. Inicialmente, datos de la temperatura superficial del mar.
- Utilizar en tiempo real los datos del pronóstico de la UKMO sobre el campo de viento y otros parámetros meteorológicos.
- Tener en cuenta las reglas y métodos de búsqueda y rescate (Manual de OMI de Búsqueda y Salvamento, 1987).

El sistema recibe información en tiempo cuasi-real sobre la temperatura superficial del mar procedente de satélites de la NOAA, para ser asimilada; adicionalmente, recibe datos de viento del modelo global meteorológico de alta resolución, UKMO,

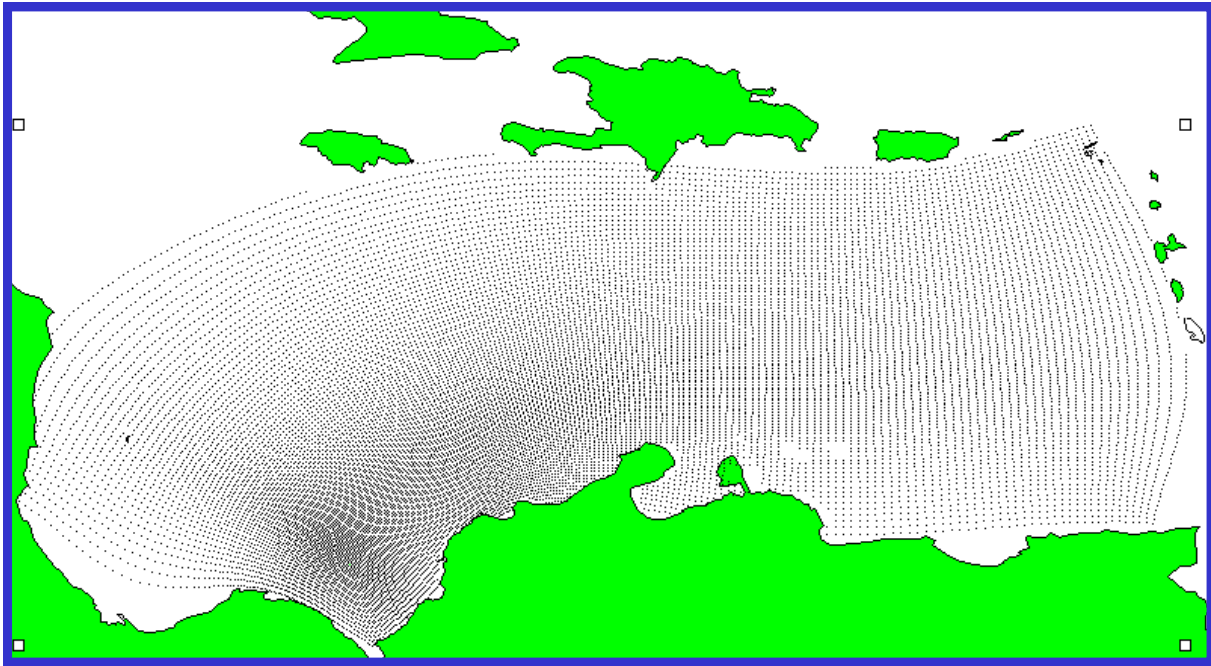


Figura 2. Área de cálculo modelo MCO.

los cuales se utilizan como entradas diarias para realizar pronósticos hasta de 72 horas.

El sistema está en capacidad de pronosticar el movimiento de una mancha de hidrocarburo derramada y la trayectoria de un artefacto flotante a la deriva; suministra información útil a las unidades de guerra sobre la estructura térmica de la columna de agua y puede tener aplicaciones en la pesquería, entre otras.

Los siguientes son algunos productos ofrecidos por el modelo así (Figura 3):

**Modelo derrame de hidrocarburos en bahía de Cartagena, Santa Marta y Morrosquillo.** El CIOH desarrolló un sistema de pronóstico de desplazamiento de manchas de hidrocarburo en tres zonas de probable impacto: el golfo de Morrosquillo, la bahía de Cartagena y el área de los Pozos Colorados de Santa Marta. Sus productos fueron un modelo acoplado de océano y atmósfera para la plataforma continental del mar Caribe en el sector de Colombia entre el golfo de Morrosquillo y

Riohacha y los modelos de derrame para las tres áreas mencionadas (Figura 4).

Inicialmente se debe correr el modelo acoplado, el cual genera información de vientos que es utilizada por los modelos hidrodinámicos locales para generar el comportamiento de las corrientes que acoplado con el bloque de transporte de crudos, dará como resultado el desplazamiento de la mancha de crudo. Entonces el modelo de derrame se compone de tres bloques principales que son:

- Bloque atmosférico
- Bloque hidrodinámico
- Bloque de transporte de crudo.
- Básicamente es el modelo CODEGO (Ionin) aplicado para las áreas antes mencionadas, el cual se basa en el modelo MECCA.

**Modelo de altura del oleaje Nedwam.** Para el cálculo y pronóstico del oleaje sobre el área del mar Caribe, el CIOH ha desarrollado a través del tiempo productos derivados de la modelación numérica, el modelo NedWAM (Netherland Wave Model),



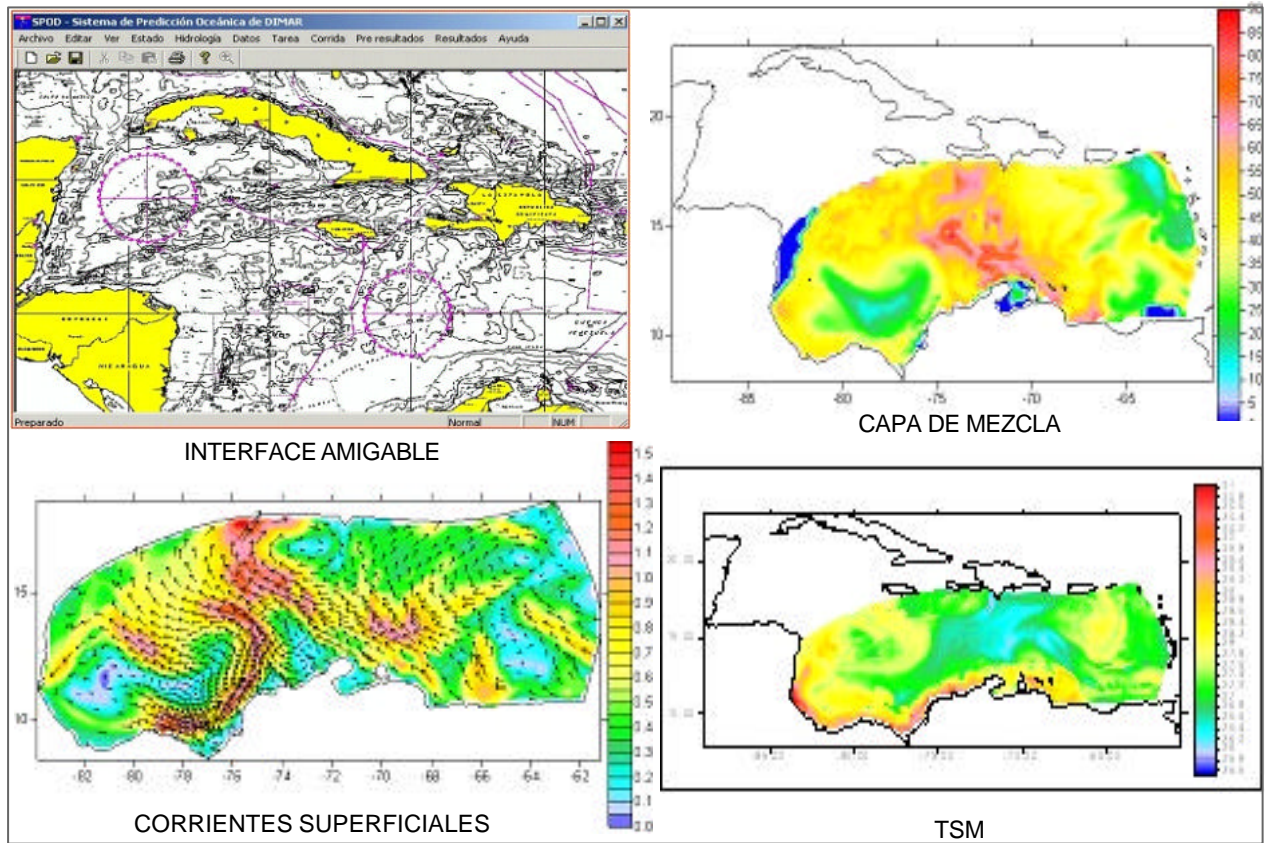


Figura 3. Salida productos del modelo MCO.

adaptado en el CIOH para el pronóstico de los parámetros del oleaje generado por el viento y swell.

Dentro de las funciones y tareas de la División de Oceanografía Operacional del CIOH como apoyo a las operaciones navales y marítimas, se tiene la emisión de pronósticos diarios del oleaje generado por el viento en el mar Caribe. Para ello ha sido necesario el desarrollo de métodos de modelación matemática.

En 1996, siguiendo la formulación original del modelo «NedWAM», se puso en funcionamiento sobre la cuenca Caribe. Para 1999 se realizaron nuevas reformas al modelo, las cuales permitieron mejorar los resultados obtenidos del modelo en cuanto a la altura de la ola se refiere.

Inicialmente se venía trabajando el modelo con un procedimiento de interpolación de datos de viento

tomados de la NOAA, pero no eran suficientes para resolver la escala de fenómenos sinópticos que se desarrollaban en la región. Fue necesario realizar modificaciones al procedimiento de interpolación de los datos de viento el cual es el principal factor de forzamiento del oleaje para obtener cambios significativos en la resolución, mejorando para los casos de la presencia de sistemas de bajas presiones, depresiones, tormentas y huracanes que se encuentren afectando el oleaje.

Con la ampliación de datos de viento en cantidades iguales al número de nodos de interpolación, los cuales son obtenidos de la UKMO que envía diariamente información global atmosférica y oceánica, extractando para el modelo la información correspondiente para el área del mar Caribe.

Los datos de viento están disponibles para cada 6 horas durante el período de interés del CIOH (eva-

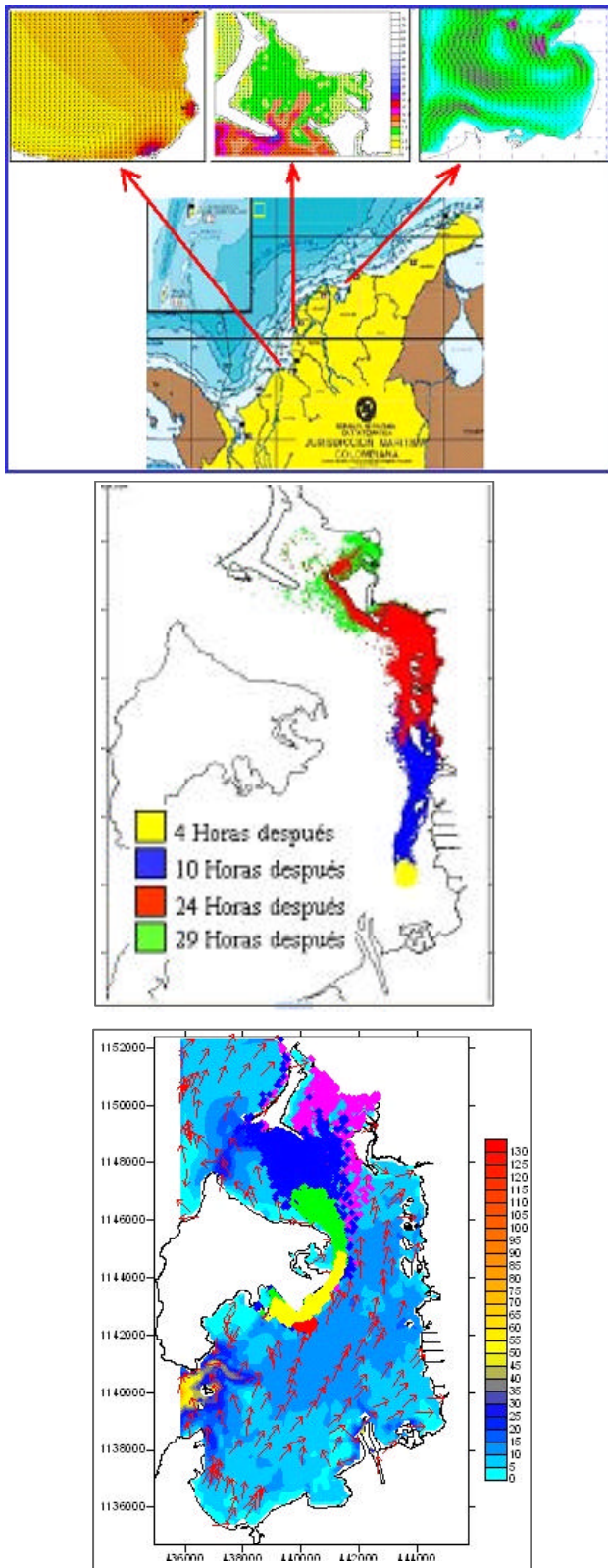


Figura 4. Salida productos del modelo de derrames de hidrocarburos a escala local.

luación de los pronósticos a 24 horas) en una malla de 0.5 de latitud por 0.83 de longitud (Figura 5).

El modelo entonces, permite obtener las características espectrales del oleaje, así como las características más significativas desde el punto de vista práctico, tales como altura media, período, longitud de onda y dirección general de las olas.

Para el desarrollo del modelo se siguieron varios pasos y diferentes etapas para poder formar un sistema de pronóstico del oleaje correcto en el área del mar Caribe. Inicialmente fue necesario definir la malla de cálculo para el modelo, diseñada para el trabajo, la cual va desde las costas de Nicaragua hasta las Antillas Menores (-85° LW a -60° LW al oeste de Greenwich), y desde el litoral Caribe de Colombia y Venezuela hasta la latitud de Jamaica (9° N a 13° N). La malla de cálculo del modelo consta de 1.820 nodos (65 en longitud, 28 en latitud), la cual permite, con alto grado de detalle, describir las condiciones del oleaje disponiendo de información bastante confiable sobre el viento en la cuenca Caribe.

### CONCLUSIONES

En la actualidad, la falta de instrumentación oceanográfica y meteorológica y la toma o recolección de datos *in situ*, procedentes de la cuenca Caribe, deja como primera prioridad, la utilización y mejoramiento de la modelación numérica, con la cual se intenta predecir a corto y mediano plazo, las posibles causas que desencadenan cambios físicos y atmosféricos, los cuales pueden afectar la seguridad de la vida humana en el mar, y sobre la franja litoral Caribe colombiana. Es por eso que, como parte de este mejoramiento continuo, se tiene proyectado un aumento en la resolución de los modelos, como parte del proyecto SPOA (Sistema de Pronósticos Oceánicos de la Armada), utilizando datos batimétricos actualizados, con el fin de que el modelo asimile mejor la información de forzamiento de viento y pueda simular a mayores escalas, la ocurrencia de fenómenos de altura



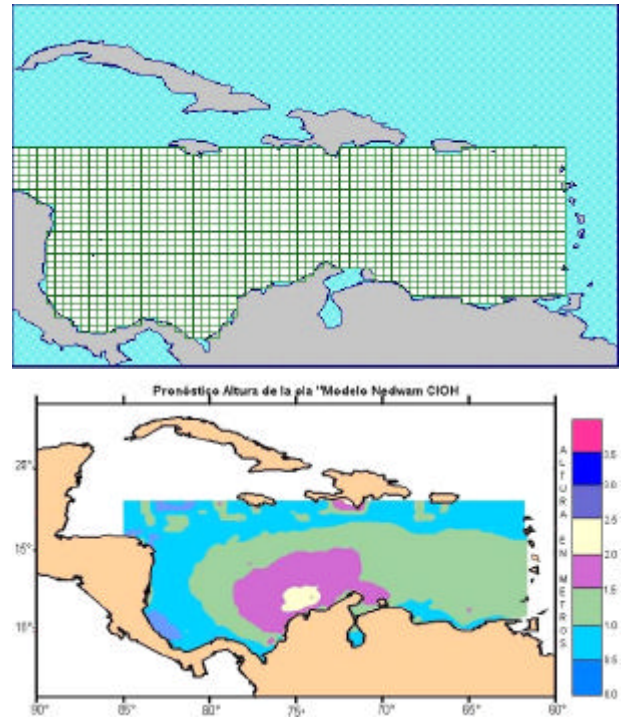
de oleaje, incrementos en la velocidad de la corriente y posibles anomalías de temperatura superficial del mar respectivamente.

Asimismo, para el caso de las operaciones de búsqueda y rescate, las cuales en su gran mayoría, se inician por una señal electromagnética activada desde las embarcaciones en emergencia, dicha señal, alerta los centros de operaciones de los guardacostas de los Estados Unidos, con la posición geográfica del buque en cuestión y la información es entregada a la Armada Nacional de Colombia dando inicio a las operaciones respectivas. En muchos casos, en las aguas jurisdiccionales colombianas, se trata de embarcaciones que no tienen los equipos de emergencia adecuados y las operaciones de búsqueda y rescate se inician hasta con cinco días de retraso partiendo de cualquier posición en la ruta del buque. SPOD logra restituir las condiciones pasadas y pronosticar probabilísticamente la posición.

En cuanto a derrame de hidrocarburos ocasionados por siniestros marítimos se refiere, ha sido de gran ayuda para el apoyo irrestricto que se le viene prestando a los Comités Locales de Prevención y Atención de Desastres (CLOPAD)G y a las Corporaciones Regionales de Prevención y Atención de Desastres (CREPAD), así como a las principales empresas encargadas del transporte del crudo en el Caribe, tales como la Exxon Mobile etc., realizando ejercicios o simulacros periódicos, con el fin de mantenerse alertas ante la posible ocurrencia de un derrame de hidrocarburos de grandes proporciones.

### RECONOCIMIENTOS

Se hace un reconocimiento especial al doctor Serguei Lonin, arquitecto y autor principal de la implementación de la modelación numérica en la Dirección General Marítima CIOH. Y asimismo, a todos aquellos hombres y mujeres, que han participado de alguna manera, en los diferentes proyectos de investigación, que han hecho posible posicionar



**Figura 5.** Malla de cálculo para el pronóstico del oleaje en el Mar Caribe con el modelo NedWAM. Resolución de la malla  $\Delta x = \Delta y = 39.408$  metros.

al CIOH a la vanguardia de la modelación numérica y oceanográfica en Colombia.

### LITERATURA CITADA

- Andrade C.A., 1992.** Movimiento geostrófico en el Pacífico colombiano. *Bol Cient CIOH.* 12: 23-38.
- Andrade, C.A., E.D. Barton y C.N.K. Mooers.** 2003. Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean coast. *J Geophys Res.* 108: C6-3185.
- Mascarenhas JR.,** Affonso da S. 1998. *Procesamiento y análisis de datos oceanográficos.* Cartagena DT y C, Escuela Naval de Cadetes «Almirante Padilla». 219 pp.
- Levitus, S.** 1982. *Climatological Atlas of the World Ocean.* Rockville: NOAA Professional Paper 13.
- Lonin S.,** Anduckia J., Parra C., Molares, R. 2003. Sistema de pronóstico de las condiciones oceanográficas del Mar Caribe para operaciones navales. *Bol Cient CIOH.* 21: 8-27.
- Tejada Vélez C.E.** 2003. Desarrollo de un módulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las aguas jurisdiccionales colombianas. *Bol Cient CCCP.* 9: 88-9.