

## Utilización del Modelo Nedwam para el Cálculo y Pronóstico del Oleaje en el Mar Caribe

SERGUEI A. LONIN, Ph.D., Oceanólogo IRINA E. LONINA, Ing. Meteorólogo  
YURI S. TUCHKOVENKO, Ph.D.\*

*Division de Oceanografía Operacional, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia*

### RESUMEN

El trabajo describe una de las versiones del modelo NedWAM (Netherland Wave Model), adaptada en el CIOH para el pronóstico de los parámetros del oleaje generado por el viento y swell. Se analizan diferentes esquemas numéricos de discretización de la ecuación de transporte de la energía del oleaje y se presentan los resultados de los cálculos de los campos de oleaje con base en datos climatológicos de las Pilot Charts.

### ABSTRACT

*Paper describes one of the NedWAM model versions, which was adapted in the CIOH to forecast wind-wave and swell parameters. Some numerical schemes for the discretization of the wave energy transport equation are studied and the results of the model for the wave fields, calculated with bases on climatological data from the Pilot Charts, are introduced.*

### 1. INTRODUCCION

Una de las tareas de la División de Oceanografía Operacional del CIOH es la implementación de pronósticos diarios del oleaje generado por el viento en el mar Caribe. Este problema puede resolverse por el método de la modelación matemática, siempre y cuando exista un pronóstico del campo de viento para el área de interés, en los puntos de una malla de cálculo.

Todos los modelos de oleaje se dividen en tres grupos: Primera, segunda y tercera generación. En los de primera, la evolución de las armónicas del oleaje se describe en forma independiente, es decir, la interacción no-lineal entre las olas no se tiene en cuenta. En los de segunda generación, la interacción no-lineal se tiene en cuenta sólo de forma parametrizada. En los modelos de tercera generación, el cálculo de la interacción no-lineal se basa en los resultados del cálculo de la integral de la transmisión no-lineal de energía a través del espectro de ondas. Uno de los modelos de tercera generación es el modelo NedWAM (Netherland Wave Model), una de cuyas versiones fue realizada en forma independiente por los autores del presente trabajo (1992, sin publicar).

Este modelo 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.

El objeto del presente trabajo es presentar los pasos que se siguieron y discutir las diferentes etapas que aún quedan por resolver para poder formar un sistema de pronóstico del oleaje correcto en el área del mar Caribe. La malla, diseñada para el trabajo, se presenta en la Figura 1. Esta permite, con alto grado de detalle, describir las condiciones del oleaje si se dispone de información bastante confiable sobre el viento.

### 2. DESCRIPCION DEL MODELO

Por norma, los modelos espectrales, se elaboran con base en la ecuación de balance de energía del oleaje. En este trabajo no se tienen en cuenta los efectos de la variación de la densidad de la energía como consecuencia de los procesos en aguas someras, concretamente, los procesos costeros (shoaling), refracción, disminución de la energía del oleaje debido al rozamiento con el fondo y rompimiento de las olas, así como la variación de los parámetros del oleaje con las corrientes. Esta simplificación está justificada para el cálculo del oleaje en el Caribe, por cuanto el tamaño de las celdas de la grilla es del orden de decenas de kilómetros.

\* Instituto de Biología de los Mares del Sur, Odesa, Ucrania

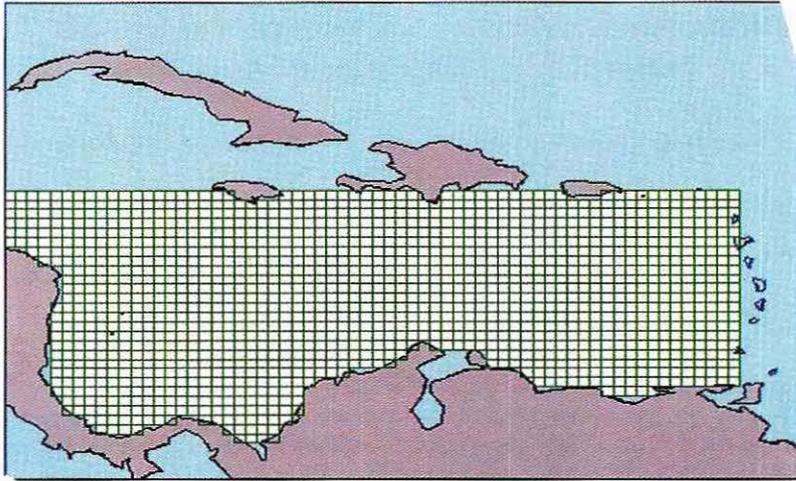


Fig.1. Malla de cálculo para el pronóstico del oleaje en el mar Caribe con el modelo NedWAM. Resolución de la malla  $\Delta x = \Delta y = 39408$  metros.

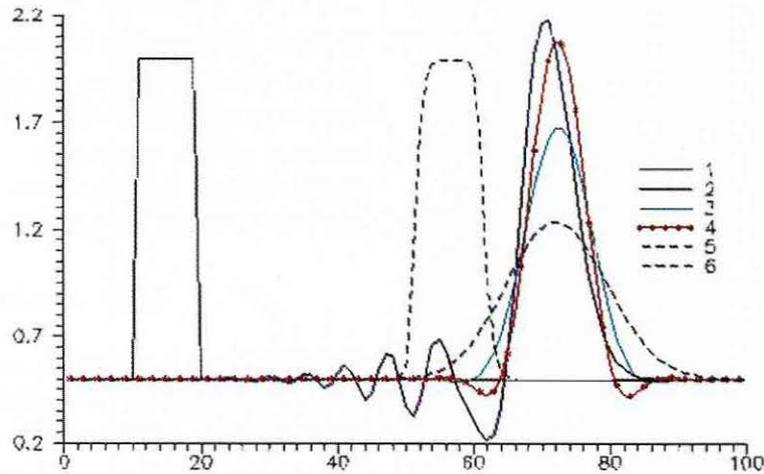


Fig.2. Comparación de los esquemas numéricos del transporte de una perturbación inicial dada en la forma 1. Convenciones: 2 - esquema de Lax-Vendroff; 3 - algoritmo FCT para  $\nu = 1/6 + C^2/3$ ;  $\mu = 1/6 - C^2/6$ ; 4 - algoritmo FCT para  $\nu = \mu = 1/6$ ; 5 - esquema TVD; 6 - diferencias dirigidas ("upward scheme"). Paso en el tiempo  $\Delta t = 600$  seg.;  $\Delta x = 39408$  metros.

La ecuación de balance de la energía del oleaje en el modelo NedWAM, teniendo en cuenta las simplificaciones anteriores presenta la siguiente forma:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_{gu} \frac{\partial S}{\partial x} + C_{gv} \frac{\partial S}{\partial y} = \sum_i G_i, \quad (1)$$

donde  $S = S(x, y, \omega, \theta, t)$  - espectro direccional de frecuencia de la acción del oleaje, el cual evoluciona en el espacio con coordenadas horizontales  $(x, y)$  ( $x$  se orienta hacia el este, y hacia el norte) en el tiempo  $t$ ;  $\omega$  - frecuencia cíclica;  $\theta$  - dirección de propagación de la energía del oleaje;  $C_{gu}$  y  $C_{gv}$  - componentes de la velocidad de grupo del oleaje;  $G_i$  - función de las fuentes y sumideros de energía de onda.

Veamos una forma concreta de la función  $G_i$ . En aguas profundas la suma de fuentes y sumideros  $\sum_i G_i$  está compuesta por tres

factores:  $G_{in}$  - función de la acción del viento,  $G_{nl}$  - interacción no-lineal del oleaje,  $G_{dis}$  - sumidero de energía del oleaje por la disipación, es decir:

$$\sum_i G_i = G_{in} + G_{nl} + G_{dis}. \quad (2)$$

Para la función de forzamiento del oleaje en el modelo NedWAM se emplea una parametrización de la forma

$$G_{in}(f, \theta) = \max \left\{ 0.0003 \alpha \left[ 28 u^3 / C_f \cos \left( \frac{2\pi(I_0 - 1)}{12} - \theta \right) - 1 \right] S(f, \theta), 0 \right\}, \quad (3)$$

donde  $f$  - frecuencia lineal,  $u$  y  $\theta$  - velocidad dinámica (velocidad de rozamiento) y dirección del viento;  $C_f$  - velocidad de fase del componente  $S(f, \theta)$  del oleaje;  $2\pi(I_0 - 1)/12$  - dirección del vector de oleaje de la componente dada  $I_0$ , con respecto al eje  $x$ . En esta versión del modelo se toman doce direcciones ( $\theta$ ) de propagación de la energía del oleaje, es decir,  $I_0 \in [1, 12]$ .

Según la ecuación (3), la energía del viento se percibe sólo en aquella parte del espectro del oleaje en la cual  $\cos[2\pi(I_0 - 1)/12 - \theta] > 0$ , es decir, en la mitad de la superficie que coincide con la dirección del viento.

La componente  $G_{dis}$ , que describe la función de disipación, se expresa como sigue

$$G_{dis}(f, \theta) = -2.6 (2\pi) E^2 k(\theta) \bar{f} \bar{k} S(f, \theta), \quad (4)$$

donde  $k(\theta)$  - número de onda de la componente  $S(f, \theta)$ ;  $\bar{f}$  y  $\bar{k}$  - frecuencia promedio del espectro y número de onda promedio en el

punto,  $E$  - dispersión de onda en el punto. Los valores promedio de  $E$ ,  $\bar{f}$  y  $\bar{k}$ , dependen en forma funcional del espectro.

Para la componente  $G_{nl}$  (función de interacción no-lineal del oleaje) se emplean las descripciones de *Hasselmann y Hasselmann* (1981), en las cuales, en una forma exacta (continua) se expresa:

$$G_{nl} = \frac{\partial^2}{\partial k_i \partial k_j} \left( D_{ijmn} \left[ S^2 \frac{\partial^2 S}{\partial k_m \partial k_n} - 2S \frac{\partial S}{\partial k_m} \frac{\partial S}{\partial k_n} \right] \right), \quad (5)$$

donde el tensor de difusión  $D_{ijmn}$  se da en la forma

$$D_{ijmn} = 2^{-10} \int d\mathbf{k}' d\mathbf{k}'' \sigma_b \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) (k'_m k'_n - k''_m k''_n) (k'_i k'_j - k''_i k''_j),$$

con las componentes  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  y  $\mathbf{k}_1 = (\mathbf{k} + \mathbf{k}')/2$ ;  $\mathbf{k}_2 = (\mathbf{k} - \mathbf{k}')/2$ ;  $\mathbf{k}_3 = (\mathbf{k} + \mathbf{k}'')/2$ ;  $\mathbf{k}_4 = (\mathbf{k} - \mathbf{k}'')/2$ ,

que se encuentran en interacción no-lineal. Aquí  $\sigma_b = \text{Const}$ ;  $\delta$  - delta-función de Dirak.

La parametrización (5) exige un desgaste bastante considerable de los recursos de hardware en la selección de todas las interacciones resonantes en el paquete de ondas. *Hasselmann* (1985) propuso un operador de interacción no-lineal en forma discreta, el cual tiene en cuenta un número no muy grande de configuraciones que participan en la interacción. Concretamente, para dos números de onda  $\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}$  se estudian las cifras  $\mathbf{k}_3(\mathbf{k}_1)$  y  $\mathbf{k}_4(\mathbf{k}_1)$ , de tal manera que:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} S \\ S_+ \\ S_- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ +1 \\ +1 \end{pmatrix} C g^{-8} f^{19} [S^2 (S_+ + S_-) - 2S S_+ S_-] \Delta \mathbf{k}, \quad (6)$$

donde,  $\partial S / \partial t$ ,  $\partial S_+ / \partial t$ ,  $\partial S_- / \partial t$  - velocidades de variación de la acción del oleaje para  $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{k}_+$  y  $\mathbf{k}_-$  debido a una interacción discreta con el elemento infinitamente pequeño  $\Delta \mathbf{k}$  en el espacio de fase;  $g$  - gravedad;  $C$  - constante numérica.

Analícemos la situación de las condiciones de contorno para el problema. Debido a que la forma de la función de forzamiento  $G_{in}$  depende del mismo espectro  $S(x, y, \omega, \theta, t)$ , entonces, al no existir un espectro inicial en el momento inicial del tiempo  $t = 0$  no podemos hacer uso del estado de calma  $S = 0$ , dado que en los demás momentos del tiempo  $t > 0$  obtendremos  $S = 0$ . De tal forma que en condiciones iniciales para la ecuación (1) se toma

$$S(x, y, \omega, \theta, t = t_0) = S_1(x, y, \omega, \theta, t_0), \quad (7)$$

donde  $S_1$  - espectro del ruido blanco, o cualquiera de los tipos de espectro del oleaje que son conocidos.

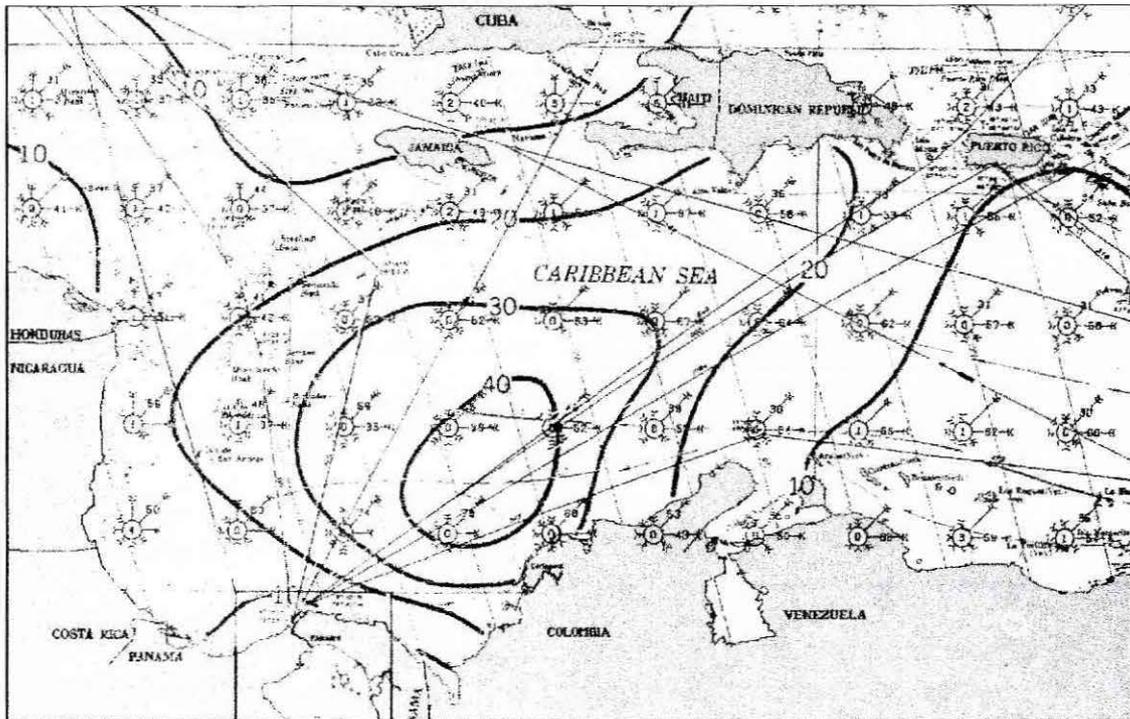


Fig.3. Distribución del viento climático y de las probabilidades (en %) de las alturas del oleaje, superiores a 8 pies, para el mes de enero según el Pilot Chart.

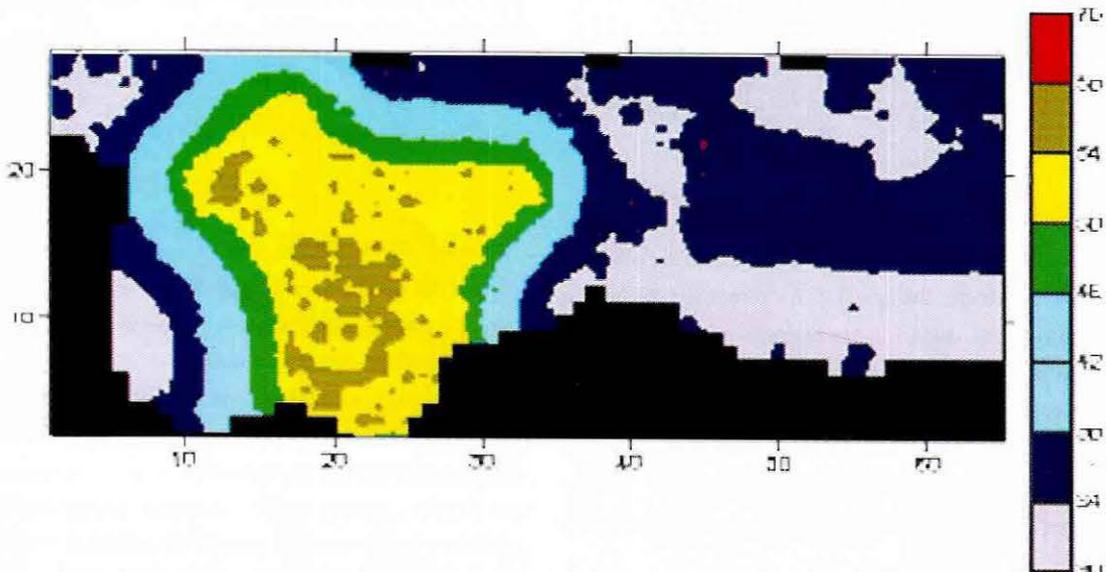


Fig.4. Cálculo de la altura del oleaje (en metros) con base en datos del viento según el Pilot Chart (ver Fig. 3). Tiempo simulación - 24 horas.

En la versión original del modelo NedWAM (Hasselmann, et al., 1973) se emplea el espectro JONSWAP

$$S_j(\omega, \theta) = (2\pi)^{-1} Q F_m \quad (8)$$

$$\text{donde } F_m = 1.08g^2 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^4\right] \exp\left\{\ln\gamma \exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\Delta^2\omega_0^2}\right]\right\},$$

$Q = \cos^2\varphi$ ;  $\varphi = |\alpha - \theta| \leq \pi$ ;  $\alpha$  - dirección del viento;  $\gamma = 3.3$ ;  $\Delta_1 = 0.07$  (para  $\omega < \omega_0$ );  $\Delta_1 = 0.09$  (para  $\omega > \omega_0$ );  $\omega_0$  - frecuencia del máximo valor en el espectro.

De tal manera que, tomando una condición patrón para la formación del oleaje durante el período anterior de pronóstico podemos estimar la frecuencia  $\omega_0$  por medio de la ecuación  $\omega_0 = 0.9g/U_{10}$ , donde  $U_{10}$  - velocidad del viento en la altura estandar de medición 10 metros durante el período anterior de pronóstico. En calidad de condiciones de contorno para la ecuación (1) en la frontera  $(x^*, y^*)$  se adopta

$$S(x, y, \omega, \theta, t) = S_2(x^*, y^*, \omega, \theta, t), \quad (9)$$

donde el espectro  $S_2$  se determina en dependencia de la orientación del campo de características, el cual está relacionado con la dirección de propagación  $\theta$ . Así, si la energía del oleaje se propaga en dirección de la frontera líquida, se adopta la condición de emisión del oleaje del tipo Orlandsky

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_{gn} \frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad (9')$$

donde  $C_{gn}$  - velocidad de grupo de propagación de las componentes en la normal  $n$  hacia la frontera. Si la energía del oleaje llega desde afuera, las características del espectro en la frontera deben ser dadas a partir de datos de observaciones efectuadas por fuera del área de estudio.

### 3. VERIFICACION DEL MODELO

Esta versión del modelo NedWAM se empleó anteriormente para el cálculo de los parámetros del oleaje en el mar Arábigo en 1992 y en el mar del sur de China en 1995. En forma preliminar se efectuaron cálculos de calibración de acuerdo con testes especiales del proyecto internacional SWAMP (The SWAMP group, 1995).

Los principales problemas de este proyecto, durante las primeras etapas del trabajo de 1979 a 1982, consistieron en una análisis de los métodos de modelación del oleaje, sistematización y clasificación de los modelos, elaboración de las tareas de verificación, comparación de los resultados y análisis de las

ventajas y desventajas de los modelos. Los resultados del análisis de los cálculos de verificación se presentaron en la tesis de Doctor de Omar Awadh G. Subeih (1992), efectuada bajo la dirección de los autores del presente artículo.

Sin embargo, durante la adaptación de esta versión del modelo para las condiciones del mar Caribe con un paso de grilla cercano a 40 kilómetros se observaron algunas particularidades de los esquemas numéricos de transporte de la energía del oleaje para la ecuación (1). Hasta ahora, en el modelo se ha empleado, ya sea un esquema "upward" o el esquema de Lax-Vendroff. El análisis de la solución para pasos  $\Delta x = \Delta y = 39408$  metros y el paso por el tiempo  $\Delta t = 600$  segundos demostró que, el primero de los esquemas produce pérdidas considerables de energía debido a la redistribución en el espacio, mientras que la segunda conduce a la aparición de oscilaciones incorrectas en la solución sin ser transportativo.

Debido a esto, se adoptaron pasos en la investigación de diferentes aproximaciones numéricas de la ecuación de transporte (1), en especial, además de los esquemas mencionados anteriormente, se analizaron diferentes modificaciones de los esquemas de corrección de flujos (algoritmo FCT) y algoritmo TVD (Total Variation Diminishing). A continuación se describe, en forma resumida, el comportamiento de cada uno de los esquemas en el ejemplo de la ecuación unidimensional de advección, de la forma:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_g \frac{\partial S}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

Esquema "dirigido hacia arriba" ("upward scheme").

Supongamos, para la aproximación de la ecuación (10), que  $C = C_g \Delta t / \Delta x$  en el punto  $j$  y obtendremos

$$S_j^{n+1} = S_j^n - C(S_j^n - S_{j-1}^n), \text{ para } C \geq 0 \quad (11)$$

donde  $n$  - número de orden del paso en el tiempo  $t$ . Este esquema no es conservativo, tiene un orden primero de aproximación en el tiempo y en el espacio, es decir  $O(\Delta t, \Delta x)$ , aunque es transportativo. Aquí y en adelante, se dan esquemas sólo para las velocidades positivas  $C_g$ .

Esquema de Lax - Vendroff

$$S_j^{n+1} = S_j^n - 0.5 C(S_{j+1}^n - S_{j-1}^n) + 0.5 C^2(S_{j+1}^n - 2S_j^n + S_{j-1}^n). \quad (12)$$

Este esquema presenta  $O(\Delta t^2, \Delta x^2)$ , teniendo alguna difusión (numérica) artificial (Ver el último término de (12)) y no es transportativo. Además, en los cálculos efectuados cerca de las fronteras del área de estudio, nos hemos visto obligados a utilizar el esquema de Euler (11), es decir, se emplearon diferencias dirigidas.

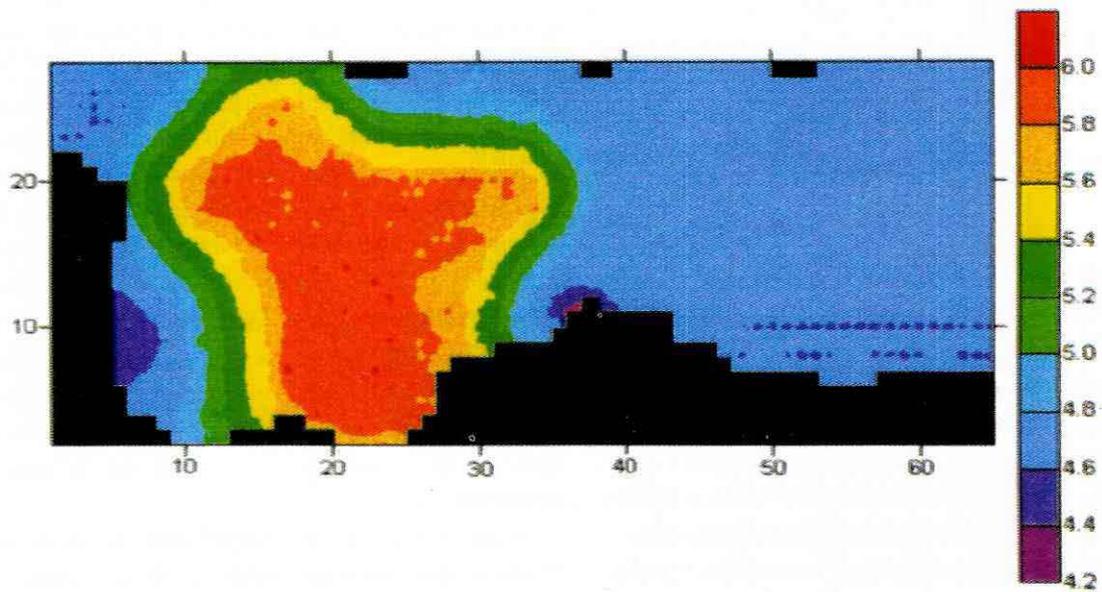


Fig.5. Cálculo del periodo del oleaje (en segundos) con base en datos del viento del Pilot Chart (ver Fig. 3). Tiempo simulación - 24 horas.

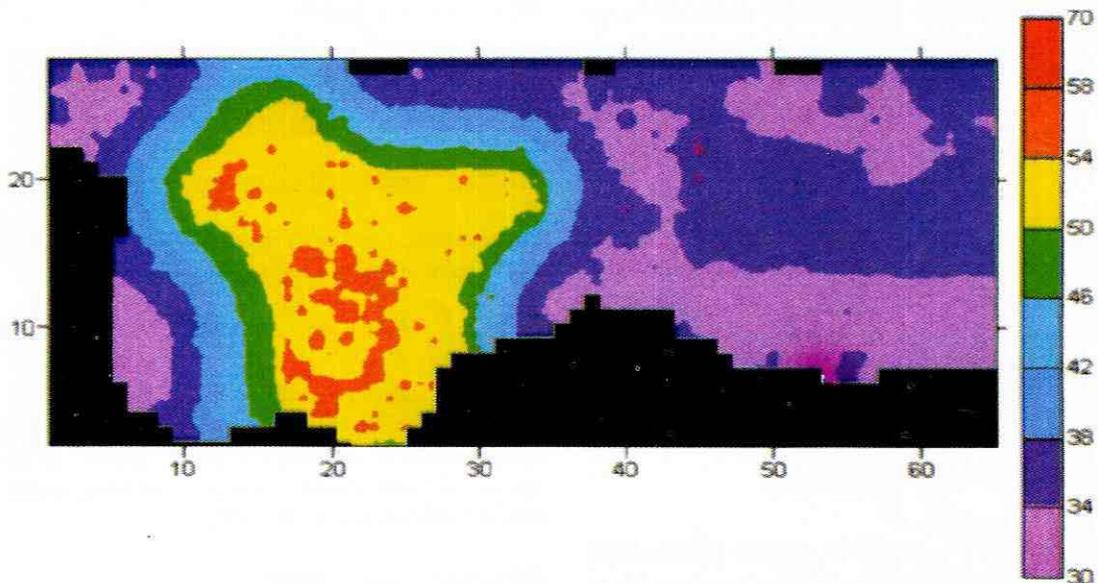


Fig.6. Cálculo de la longitud del oleaje (en metros) con base en datos del viento del Pilot Chart (ver Fig. 3). Tiempo simulación - 24 horas.

Esquema FCT (Flux Correction Transport)

$$S_j^* = S_j^n - 0.5 C(S_{j+1}^n - S_{j-1}^n) + (v + 0.5C^2)(S_{j+1}^n - 2S_j^n + S_{j-1}^n) \quad (13a)$$

$$S_j^{n+1} = S_j^* - \mu (S_{j+1}^* - 2S_j^* + S_{j-1}^*) \quad (13b)$$

donde  $S_j^*$  - valor de la solución en la fase del predictor (13a);  $v$  - coeficiente positivo de antidifusión (normalmente se toma igual a 1/8).

Señalamos que si  $v = 0$ , de la ecuación (13a) obtenemos el esquema de Lax - Vendroff. En la fase del corrector (13b) se introduce una antidifusión con un coeficiente  $\mu$ . Es posible una elección obvia  $v = \mu$ , sin embargo, se requiere que se garantice la conservatividad del esquema y los valores de  $v$  y  $\mu$  pueden ser diferentes. En particular, es posible considerar (Boris, Book, 1976):

$$v = 1/6 + C^2/3 ; \quad \mu = 1/6 - C^2/6. \quad (14)$$

El esquema FCT, bajo determinados valores de los parámetros  $v$  y  $\mu$  es cuasiconservativo y no tiene una huella de dispersión, definida por la no-transportatividad de todas las diferencias finitas centrales.

Esquema TVD (Total Variation Diminishing)

$$S_j^{n+1} = S_j^n - C (S_j^n - S_{j-1}^n) - (f_{j+1/2}^n - f_{j-1/2}^n), \quad (15)$$

donde  $f_{j+1/2} = \phi(r_j) [0.5C(1 - C)](S_{j+1} - S_j)$  y en forma análoga para  $f_{j-1/2}$ . La función  $\phi(r)$  se denomina limitante y se calcula por la siguiente fórmula

$$\phi(r) = \begin{cases} \min(2, r) & \text{para } r > 1 \\ \min(2r, 1) & \text{para } 0 < r \leq 1 \\ 0 & \text{para } r \leq 0 \end{cases}$$

$$\text{donde } r_j = \frac{S_j - S_{j-1}}{S_{j+1} - S_j}$$

Los esquemas TVD satisfacen la condición entrópica y no conducen a la formación de oscilaciones no físicas y con su ayuda, en las áreas de variación suavizada de la solución se puede obtener un segundo orden de exactitud.

Así, pasamos al análisis de los resultados obtenidos mediante el empleo de los esquemas mencionados anteriormente.

En la Figura 2 se presentan los resultados de experimentos numéricos sobre la distribución de la perturbación inicial, dada en forma de un histograma en la malla, que con exactitud corresponde a la malla de cálculo del modelo. Del análisis de esta Figura se observó que, con mayor exactitud se reflejan la forma de la perturbación inicial en la forma TVD (línea 5). Sin embargo, este esquema frena el "desplazamiento" de las perturbaciones.

Un frenamiento mucho menor se obtiene con el esquema de Lax - Vendroff y conserva la intensidad de las perturbaciones en el tiempo. Sin embargo, este esquema no posee la propiedad de transporte y no conduce a la formación de oscilaciones erróneas en la cola de las perturbaciones.

El esquema transportativo "upward", no tiene esta desventaja, pero presenta otra, no menos importante, que consiste en una gran pérdida de la energía de la perturbación inicial como resultado del transporte.

Fueron analizados también los esquemas FCT al darle los coeficientes  $v$  y  $\mu$  en la forma (14), y para  $v = \mu = 1/8$ ,  $v = \mu = 1/4$  y  $v = \mu = 1/6$ . En la Figura 2 se dan los resultados obtenidos sólo al dar los valores de  $v$  y  $\mu$  por la fórmula (14) y para  $v = \mu = 1/6$ . Se observó que la última selección de los coeficientes es dominante, es decir, cuando  $v = \mu = 1/6$ , debido a que, en este caso, la energía de la ola prácticamente se conserva, mientras que no aparecen oscilaciones erróneas no significativas.

Así, debe tenerse también en cuenta, que las perturbaciones iniciales, tomadas para el experimento, son bastante "difíciles" para dar en forma matemática el transporte. Teniendo en cuenta que el desarrollo del oleaje del viento ocurre bajo un campo de viento cuasiuniforme, es posible afirmar que el esquema seleccionado, describirá el fenómeno de transporte de la energía del oleaje en el espacio con mayor exactitud.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Lamentablemente, en la actualidad no se dispone de una descripción detallada del campo de viento en el mar Caribe, más aún, si se trata de información de pronósticos. Es de esperarse que en un tiempo cercano, cuando se disponga de un modelo atmosférico, el CIOH pueda producir sus propios campos de viento, los cuales serán utilizados en la aplicación del modelo descrito en este trabajo.

En la presente etapa el objetivo principal del trabajo ha sido el cálculo del campo de oleaje a partir de datos climáticos del viento para la comparación de los resultados con los datos suministrados por las Pilot Charts del Caribe. Fueron utilizadas las condiciones de viento dadas en este atlas para el mes de Enero (Figura 3). Para seleccionar las direcciones y velocidades del viento de las cartas se partió del principio de máxima frecuencia del viento para cada punto en cuadrados de  $2X2^\circ$ . La dirección general del viento en este período del año es noreste - este (alisios), las velocidades se encontraron en el rango de los 6 - 10 m/s. Los datos sobre el viento fueron interpolados desde los cuadrados de  $2X2^\circ$  a los puntos de la malla de cálculo, dada en la Figura 1. Los cálculos fueron efectuados para un período de pronóstico de 24 horas.

Los resultados de cálculo de altura, período y longitud de las

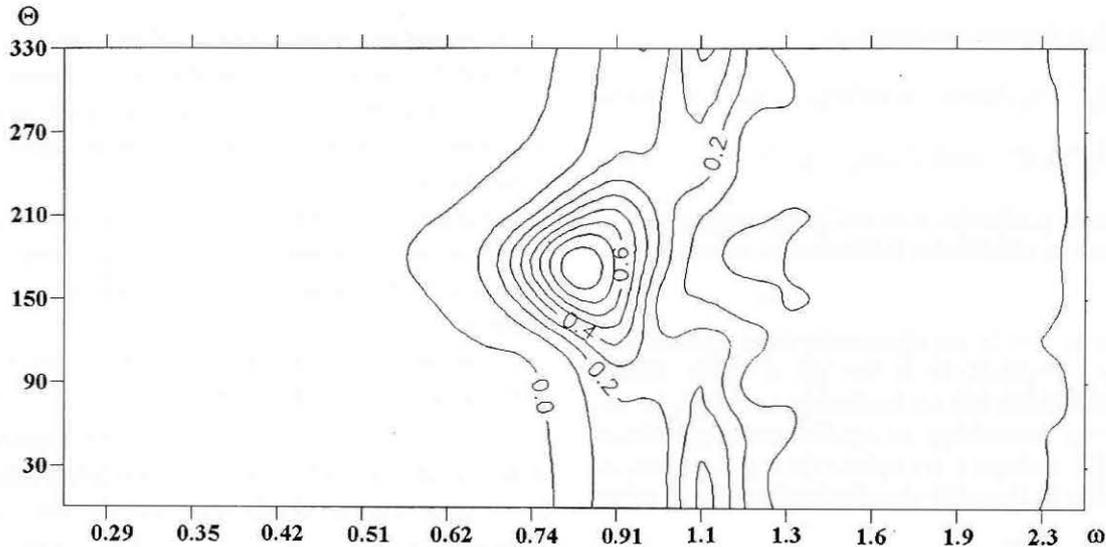


Fig.7. Espectro (en  $m^2s$ ) de frecuencia  $\omega$  (en rad/s) y dirección  $\Theta$  (en grados) para el punto (20,20) de la malla en el momento  $T = 24$  horas.

olas se presentan en las Figuras 4 - 6. Del análisis se concluye, que las alturas de onda obtenidas varían en un rango desde 0.7 hasta 1.8 metros, el período varió desde 4.2 hasta 6.0 segundos y las longitudes de onda desde 30 hasta 62 metros. Llama la atención la configuración bien definida de una propiedad del campo de oleaje, concretamente, en el sector ubicado entre las costas de Colombia, Panamá y Jamaica se observa un desarrollo máximo del oleaje. Este resultado se encuentra de acuerdo con los datos climatológicos, dados en la Figura 3. De acuerdo con esta Figura, en esta zona la probabilidad de figuración de alturas del oleaje superiores a 8 pies alcanza un 40%, lo que está relacionado con el aumento de la intensidad del viento, característico para esta región.

Llama también la atención otra propiedad. Según la Figura 3, la zona de máximo oleaje no va más allá de la isla de Jamaica, lo que está determinado por la limitación de la longitud del fetch para las olas que llegan desde el arco de las Antillas mayores. Sin embargo, los resultados de los cálculos presentan una dimensión mayor para el oleaje máximo. Esto parece estar relacionado con la falta de información de frontera en los contornos abiertos de la cuenca. Básicamente, toda definición artificial de las fronteras líquidas produce errores en los cálculos. Para salir de esta situación tenemos dos alternativas: 1) Extender la malla de cálculo hasta las fronteras duras, es decir, hasta las costas. Sin embargo, en este caso se aumentan considerablemente las exigencias de hardware y el tiempo para la obtención del pronóstico; 2) Obtención de información de contorno, suministrada por los Centros de pronóstico a través de Internet. Por regla, estos centros dan información obtenida a partir de modelos espectrales de oleaje. De

esta forma, puede ser utilizada sólo información pronosticada sobre los espectros del oleaje.

En la Figura 7 se da un ejemplo del espectro de frecuencias y direcciones, calculado por el modelo NedWAM para los puntos con coordenadas (20,20) en la malla de modelación. luego de 24 horas de cálculo. Este espectro tiene toda la información sobre el oleaje en el punto dado. Teniendo una información similar en los puntos de las fronteras líquidas abiertas, es posible tener en cuenta los procesos de transporte de la energía del oleaje desde afuera del área de cálculo.

Esta información es especialmente importante en aquellos casos cuando en la zona de estudio los ciclones tropicales, ubicados por fuera de la región, ejercen su influencia a través de las olas swell. Si por el contrario, el ciclón se encuentra sobre la región, éste deberá tenerse en cuenta en el campo de viento.

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha tenido un objetivo netamente práctico; el cual es, observar las posibilidades de un modelo espectral de oleaje en la práctica operativa. En el proceso del trabajo se observaron algunos detalles del comportamiento del modelo que exigen un mejoramiento; en particular, del esquema de diferencias finitas utilizado para la aproximación de la ecuación de transporte de la energía del oleaje.

Los cálculos efectuados están de acuerdo con los datos climatológicos sobre el oleaje en el mar Caribe. Esto da bases para proponer que la confiabilidad de los resultados obtenidos en el proceso de cálculo es bastante alta. Sin embargo, para la obtención

de un pronóstico de oleaje es necesario cumplir con dos condiciones:

1. Debe disponerse de información de contorno sobre el estado espectral del paquete de olas y
2. Disponerse de pronóstico del viento en el mar Caribe

Si el primero de los problemas puede ser resuelto con base en la información disponible en Internet, la segunda es más complicada; especialmente si tenemos en cuenta que las condiciones de viento en el Caribe son bastante no - uniformes y la resolución espacial de la información de viento que se consigue en Internet no es la mejor. Por lo tanto, debemos hablar sobre el aumento de la confiabilidad del pronóstico del viento sobre el mar Caribe, o por lo menos, en la parte oeste del mismo.

*Agradecimientos:* Los autores expresan su agradecimiento al Ing. Oceanólogo Luis Giraldo por la discusión de los resultados y preparación del artículo para su publicación, al CC Carlos Tejada por la lectura del borrador y las sugerencias hechas.

## BIBLIOGRAFIA

- Boris, J.P. and D.L. Book, *Methods Comput. Phys*, 16, pp, 85-129, 1976.
- Hasselmann, K., et al., Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. hydrogr. Z.*, 8, N. 12, 95 p., 1973.
- Hasselmann, S. and K. Hasselmann, A simmetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity wave spectrum. *Hamburg. Geophys. Einzelshr.*, 52, 138 p., 1981.
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J.H. Allender and T.P. Barnett, Computations and parametrizations of the nonlinear transfer in a gravity wave spectrum. Pt. 2: Parametrizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.* 15, N. 11, pp. 1378-1391, 1985.
- Subeih, O.A., *Mathematical Simulation of Wind Waves in the area of the Arabian Sea*. Tesis Ph.D., OGMI, Odessa, 287 p., 1992.
- The SWAMP group. *Ocean wave modeling*, N.Y; L.: Plenum press, 256 p., 1985.
- S. Lonin y I. Lonina, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, A.A. 982, Cartagena de Indias D.T. y C. Colombia.
- Y. Tuchkovenko, Instituto de Biología de los Mares del Sur, Odesa, 270011, Ucrania