

MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

INSTITUTO DE METEOROLOGIA

**MODELO DINAMICO PARA PRONOSTICAR LA SURGENCIA PROVOCADA
POR LOS CICLONES TROPICALES EN LAS COSTAS DE CUBA**

RESUMEN

Autor: Faustino Omar García Concepción

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias

Meteorológicas

LA HABANA

1998

INTRODUCCION

En Cuba los desastres naturales de mayor importancia son de índole meteorológicos, destacándose las intensas precipitaciones y las surgencias asociadas a los ciclones tropicales, siendo el último evento mencionado la causa de notables inundaciones costeras en zonas bajas del litoral. De ahí que sea imprescindible conocer a profundidad y pronosticar el comportamiento de la surgencia, lo cual redundará en un beneficio muy importante para la nación.

Por todo lo antes mencionado, se decide acometer esta investigación, cuyo **objetivo principal** es obtener un modelo dinámico bidimensional, (primero de su tipo en el país) para pronosticar la surgencia asociada a los ciclones tropicales sobre la plataforma insular y las costas de Cuba, debido a la compleja naturaleza física de este fenómeno, el modelo se desarrolla en diferentes versiones, aumentando la complejidad teórica y mejorando su comportamiento de una a otra.

Este objetivo está en línea con el Tercer Plan a Largo Plazo de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) correspondiente al período 1992 a 2001, aprobado por el XI Congreso en su Resolución 28, y donde se **ruega encarecidamente** a los Miembros que tengan en cuenta el Plan cuando preparen y ejecuten sus programas nacionales en materia de meteorología. También **pide** al Consejo Ejecutivo, a las Asociaciones Regionales, a las Comisiones Técnicas y al Secretario General que se adhieran a las políticas y estrategias establecidas en el Plan, y tal como se define en éste, organicen sus actividades para alcanzar los principales objetivos a largo plazo.

El Plan consta de siete programas y de ellos, el Programa de la Vigilancia Meteorológica Mundial, constituye la columna vertebral del programa general de la OMM y en él se incluye

un Programa sobre Ciclones Tropicales (PCT), en el cual participan más de 50 países.

El crecimiento demográfico y el desarrollo constante de las zonas costeras expuestas a los ciclones tropicales contribuirán a que se produzcan desastres a una escala jamás alcanzada, y se debe hacer todo lo posible para disminuir estos riesgos crecientes.

Se ha previsto que durante el período que abarca este Plan continuará siendo una necesidad principal la transferencia de tecnología y la creación de métodos eficientes para la predicción cuantitativa de la surgencia, la concentración de datos y su simulación. (OMM,1992).

Cumpliendo con una decisión del XI Congreso Meteorológico Mundial se celebró en Huatulco, México del 22 de noviembre al 1 de diciembre de 1993. el III Taller Internacional Sobre Ciclones Tropicales (IWTC- III). Entre las Recomendaciones de **mayor prioridad** emanadas de ese Taller se encuentran:

El desarrollo de modelos dinámicos bidimensionales con alta resolución batimétrica (y topográfica).

Una vez disponibles tales modelos en un país o región, deberá desarrollarse un atlas de surgencia, incluyendo composiciones con la Máxima Envolvente de las Aguas (MEOW). Además se estimula a los Centros Meteorológicos a archivar datos de la altura alcanzada por la surgencia con propósitos de validación. (WMO,1994).

La aplicación de las ciencias al desarrollo económico y social en Cuba, es una de las tareas aprobadas en el IV Congreso del Partido Comunista de Cuba. Esto se traduce en una orientación de las investigaciones para resolver problemas inmediatos, que se presentan en la producción y en los servicios de una forma práctica.

Una de las líneas principales de investigación del Instituto de Meteorología de la República de Cuba es la relacionada con los pronósticos de trayectoria y evolución de los distintos fenómenos asociados a los ciclones tropicales, entre los que se destaca la surgencia.

El presente trabajo constituye el primer modelo dinámico desarrollado en Cuba para pronosticar este peligroso evento y representa un salto cualitativo y cuantitativo de gran importancia para el Servicio Meteorológico Nacional, en primer lugar por proporcionarle al meteorólogo una técnica avanzada que contribuye a disminuir el carácter subjetivo en la predicción de uno de los fenómenos más peligroso y destructivo asociado a los ciclones tropicales. Con su implantación en el trabajo operativo ya se pueden tomar las medidas de protección necesarias en cualquier zona costera del país, con una antelación de hasta 18 horas en tiempo real, así como planificar construcciones y actividades de distintos tipos.

Este modelo ya ha sido utilizado para la construcción de los mapas de riesgos por penetraciones del mar para Cuba, cuestión de gran importancia para la toma de decisiones por la Defensa Civil, y en el manejo de la costa, lo que se traduce en una disminución considerable de pérdidas de vidas humanas y de recursos materiales y económicos.

La obtención del presente modelo constituyó un proceso difícil y laborioso en el que además de resolver el problema físico matemático planteado, fue necesario la obtención cuidadosa de una base batimétrica para los alrededores de Cuba.

La bibliografía consultada incluye dentro de su conjunto aquellos trabajos más importantes relacionados con la surgencia y las técnicas empleadas para su pronóstico, realizadas y por reconocidos autores de diferentes países, que constituye una valiosa fuente de información.

CONTENIDO PRINCIPAL DEL TRABAJO

En el Capítulo 1 se describen las características principales de la surgencia y se señalan los distintos factores que influyen en la amplificación de la misma.

También se realizó un análisis bibliográfico de carácter crítico, con el objetivo de mostrar el estado de los problemas de la modelación dinámica de la surgencia a nivel mundial y en el país.

Al llevar a cabo un resumen de este capítulo es necesario presentar las siguientes cuestiones:

La surgencia es para muchos especialistas (según lo manifestado en el Primer Taller Internacional sobre Ciclones Tropicales, Bangkok 1985, IWTC-I), el efecto más destructivo asociado a los huracanes, causante como promedio, del 90 % de las pérdidas materiales y de nueve de cada diez víctimas.

Definiéndola en su forma más simple, la surgencia es una elevación anormal y temporal del nivel del mar, sobre la marea astronómica pronosticada, causada por la tensión provocada por los fuertes vientos y (en menor grado) por la caída de la presión atmosférica, debido al paso de una tormenta. (Shore Protection Manual, 1984).

La surgencia es una onda gravitacional larga con una longitud escalar similar al tamaño del ciclón tropical que la genera, y durabilidad de algunas horas, dependiendo, entre otras cuestiones del tamaño y la velocidad de traslación del ciclón y afecta como promedio de 100 a 200 km. de costa, durante unas seis horas. Por lo tanto, es de una escala similar a la marea astronómica y no debe confundirse con las ondas de gravedad cortas producidas por el viento, las que poseen una longitud de onda del orden de metros y período de segundos. Generalmente la surgencia consiste del paso de una onda simple que eleva o descende la altura de las aguas, y en algunas situaciones especiales, principalmente cuando un huracán se mueve paralelo a la costa, pueden formarse ondas secundarias no despreciables detrás de esta onda principal (Jelesnianski, Chen y Shaffer 1992).

La respuesta del océano a la presencia de un ciclón tropical es diferente en aguas profundas y en aguas poco profundas. En el primer caso, lejos de la costa, la tensión del viento sobre la superficie oceánica crea un amontonamiento rotatorio de agua (un vórtice). La elevación del nivel del agua es pequeña, aproximadamente la elevación hidrostática, en respuesta a la presencia del centro de bajas presiones, (efecto de barómetro invertido) y en menor escala al efecto del término de Coriolis.

Los efectos dinámicos se vuelven predominantes a medida que el ciclón se acerca a la costa y la conservación de la vorticidad potencial del vórtice requiere del desarrollo de una marcada divergencia. Los canales y la reflexión de la costa también contribuyen substancialmente a amplificar la surgencia. (Jelesnianski . 1993).

En aguas profundas, como una primera aproximación se tiene que la elevación del nivel del mar será de 1 cm. por cada hPa que descienda la presión, por debajo de la presión normal de 1013 hPa. Por lo tanto para un huracán de gran intensidad como el Gilbert (1988), que alcanzó una presión mínima de 888 hPa (Ortiz y García 1989), el ascenso del nivel del mar será de aproximadamente 125 cm.

De lo expuesto en los dos párrafos anteriores se infiere que la surgencia sea considerada usualmente como un fenómeno costero, el cual presenta su máximo absoluto sobre la costa, a la derecha del punto de llegada del ciclón tropical a tierra y muy próximo al radio de vientos máximos.

Registros Históricos.

De acuerdo con los registros disponibles, las mayores elevaciones del nivel del mar en el mundo, debido al efecto combinado de la surgencia con la marea astronómica, ocurrieron en Bengala Occidental (1737) y Bangladesh (1876) con 12 m. sobre el nivel del mar, (Mandal, 1991), en fecha más reciente, noviembre de 1970, también en Bangladesh, se estimaron 9 m. de elevación y 500 000 vidas humanas perdidas y en abril de 1991 el número de víctimas fue de 140 000. En el hemisferio occidental aunque las pérdidas humanas no han sido tan espectaculares son impresionantes las surgencias asociadas con el huracán Camille (1969) con 7,4 m. en las proximidades de Pass. Christian, Mississippi, la producida por Hugo (1989) en Carolina del Sur con 6 m., la ocurrida en septiembre de 1900 en Galveston . Texas con 4.5 m. de elevación del nivel del mar y alrededor de 6 000 muertos.

Ejemplos de notables inundaciones del mar asociadas a este fenómeno en la Cuenca del Caribe, se han reportados entre otras: en la zona de Savannah de la Mar, Jamaica donde el mar en dos ocasiones ha penetrado hasta 10 km., pereciendo más de 1 000 personas.

El archipiélago cubano ha sido afectado en muchas ocasiones por huracanes que han traído aparejadas grandes surgencias. Así se tiene que la asociada al huracán de noviembre de 1932 produjo la mayor catástrofe natural ocurrida en Cuba, arrasó completamente el pueblo de Santa Cruz del Sur, ocasionando más de 2 500 muertes y el nivel de las aguas ascendieron más de 6 m, (Linares 1976). En octubre de 1944 en Guanímar y el Cajío, costa Sur de la provincia de La Habana, el mar penetró 10 y 6 km. respectivamente, (Ortiz, 1976). Otras surgencias significativas ocurrieron en octubre de 1926, septiembre de 1933 y más reciente, durante el paso del huracán Kate (noviembre de 1985) cuando se reportaron profundas invasiones del mar en zonas de la costa norte, principalmente en Caibarién, Isabela de Sagua y Cárdenas, (Ortiz y García . 1990).

Otros aspectos a señalar

La altura que alcanza la surgencia puede verse incrementada por la marea astronómica, en dependencia de la coincidencia de la pleamar con la incidencia del huracán. En ocasiones una surgencia puede ser catastrófica o no, en dependencia del estado en que se encuentre la marea astronómica al llegar a tierra la tormenta. Basado en observaciones históricas sobre las costas de China Zhang et. al., (1993) describen algunos casos donde se manifiesta este efecto.

A través del tiempo se ha observado que la necesaria interrelación entre los términos surgencia, (en inglés storm surge) y marea astronómica (astronomical tide) ha llevado a la definición de otro término, marea de tormenta (storm tide), originándose cierta confusión. Por tal motivo se señala que **surgencia** es la elevación del agua generada por un ciclón tropical, sobre o por debajo de la marea astronómica pronosticada. La marea de tormenta por otra parte, es la elevación total

(incluyendo la marea astronómica) sobre o por debajo de un nivel standard base.

Marea de tormenta = surgencia + marea astronómica

La surgencia puede ser calculada mediante modelos dinámicos o estadísticos pero el cálculo de la marea de tormenta es aún más difícil, debido a la incertidumbre existente al realizar la superposición entre la surgencia y la marea astronómica.

Los modelos dinámicos pueden correr considerando la interacción no lineal existente entre la surgencia y la marea astronómica, (Zenghao, 1993) Sin embargo, muchos investigadores consideran que los errores que presentan en la actualidad los pronósticos de trayectoria (Elsberry, 1995) e intensidad (Frank, 1993), particularmente el error medio de seis horas en los pronósticos de trayectoria (válidos para 24 horas) para la llegada a tierra de un ciclón tropical, en una primera aproximación coincide con la diferencia de tiempo que existe entre la pleamar y la baja mar. Por tal motivo, la mayoría de los pronosticadores de surgencia consideran inapropiado incluir directamente en un modelo operacional de surgencia la marea astronómica. En su lugar usan estimaciones subjetivas para superponer la marea astronómica a la surgencia calculada de acuerdo con la calidad del pronóstico de trayectoria.

En la altura que alcanza la surgencia y en la extensión de las inundaciones tierra adentro, desempeñan un papel fundamental: el tamaño, velocidad de traslación, tiempo sobre la plataforma, ángulo de incidencia entre el ciclón y la costa, viento máximo y su radio, y la presión central del ciclón. además la batimetría, la topografía del terreno, la elevación y la configuración de la costa, construcciones y edificaciones en el litoral, vegetación existente, etc.

Modelos de surgencia

Debido al alto potencial destructivo de la surgencia, desde finales de la década del 50 se han desarrollado distintos métodos para pronosticar este evento, los que se pueden agrupar en dos ramas: modelos estadísticos y modelos dinámicos. Estas dos ramas no son completamente

independientes, muchos de los modelos dinámicos contienen términos análogos a los términos de tensión de Reynolds los cuales deben ser evaluados empíricamente. Por otra parte, algún grado de razonamiento físico y dinámico es usualmente empleado en la selección de los posibles predictores en los métodos estadísticos.

Modelos estadísticos

Estos modelos se basan en el análisis de los datos históricos de las surgencias ocurridas y se utilizan los registros de las alturas alcanzadas por el agua y la marca en el área de interés. Es necesario la disponibilidad de una larga base de esos registros para que los mismos puedan ser considerados como representativos de las condiciones a esperar en el futuro y entonces desarrollar mediante técnicas de regresión u otro tipo un modelo de pronóstico. En algunos casos los registros de otras localidades similares pudieran ser usados.

Modelos dinámicos

En el pasado los modelos numéricos ofrecieron una solución alternativa al problema del cálculo de la surgencia, pero con el desarrollo y la renovación de las computadoras personales, la amplia aplicación de nuevas tecnologías en el monitoreo y comunicación de datos relacionados con las tormentas, y el desarrollo de distintos estudios ha llevado a que los mismos sean actualmente la vía más utilizada para calcular la surgencia, jugando un importante papel en la prevención y mitigación de desastres.

En un número considerable de modelos dinámicos las ecuaciones de la hidrodinámica utilizadas son la de continuidad y las de movimiento, integradas verticalmente desde el fondo hasta la superficie del mar y expresadas en términos de la velocidad media de la corriente horizontal y del transporte de masa, además se asume: el fluido homogéneo, se ignora la curvatura de la tierra y el efecto de las olas, el fondo impermeable y las aceleraciones verticales despreciables.

El conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el movimiento del fluido y la altura de

la surgencia es representado en forma de diferencia finita y aplicado a una rejilla que cubre el área de pronóstico. Estas ecuaciones en diferencia finita se resuelven hacia adelante en el tiempo en pequeños pasos partiendo de un conjunto de condiciones iniciales del nivel de las aguas. Al ser usado un dominio finito para cubrir el área de pronóstico, es necesario la imposición de valores de frontera a lo largo de los márgenes del dominio. También se necesita especificar el conjunto de **fuerzas conductoras** para representar la tensión superficial del viento (tan importante como el propio modelo) y la fuerza debido al gradiente de presión.

Al hacerse un modelo dinámico de surgencia, el modelador tiene que decidir:

Cuál esquema en diferencia finita usará?

Qué procesos físicos serán eliminados de la ecuación de movimiento?

Cómo incorporar algunos rasgos de escala subrejilla?

Cómo incorporar un modelo de viento para suministrar las **fuerzas conductoras**?

Cómo presentar el pronóstico, sin olvidar el uso que se le dará al modelo y la potencia de la computadora que utilizará?

Al consultar la bibliografía escrita sobre la modelación dinámica de la surgencia ocupan un lugar fundamental las investigaciones realizadas por Harris y Jelesnianski (1964), y Jelesnianski (1965, 1966, 1967, 1970, 1972, y 1976). Estos trabajos permiten conocer las principales dificultades en esta temática con son el problema de la inicialización y adaptación de los distintos campos, representación de las fuerzas conductoras, condiciones de fronteras y el cálculo de las tensiones superficiales y de fondo.

Antecedentes sobre el pronóstico de la surgencia en Cuba

El archipiélago cubano se encuentra situado en una zona geográfica propensa a la afectación de organismos tropicales, los cuales en algunos casos han producidos grandes y devastadoras surgencias. Sin embargo no es hasta la década de los años 70 en que se comienzan a realizar

diferentes investigaciones sobre esta temática. Pérez Parrado, (1974) confeccionó un método estadístico para determinar la altura máxima que puede alcanzar una surgencia en las costas cubanas.

Otros pasos importantes fueron la determinación de los tramos de costas con mayor peligro para la ocurrencia de surgencias (Moreno y Salas, 1976) y la creación de otro modelo estadístico Pérez Parrado (1981). Posteriormente Lezcano et. al.. (1993) elaboraron una primera versión del mapa de riesgo por penetraciones del mar para las costas de Cuba. Mas recientemente ha sido elaborado por Salas et. al., (1998) un trabajo donde se contempla los mapas de peligro por surgencia para las costas de Cuba.

En el primer taller internacional sobre ciclones tropicales (IWTC-I) celebrado en Bangkok. 1985. Jelesnianski (citado en WMO,1993) resumió los problemas relacionados con el monitoreo de los eventos de surgencia de la siguiente manera:

"(a) Las observaciones son deficientes, casuales y sujetas a cambios, (b) Los mareógrafos son pocos y situados muy lejos uno de otro y frecuentemente no funcionan bien. Un problema reconocido en la calibración y verificación de los modelos numéricos de surgencia es la falta de archivos de datos de este evento".

Cuba no está ajena a este problema ya que es aislada la informacion histórica que se tiene sobre esos eventos. Las pocas observaciones conque se cuentan están relacionadas con las marcas dejadas por el nivel de las aguas y las líneas dejadas por los restos de desperdicios, método ampliamente usado, pero que en nuestro caso no se conoce si se siguió la metodología adecuada (WMO, 1978) para realizar esas observaciones.

En el Capitulo 2 se presenta el diseño y las características del modelo dinámico creado para pronosticar la surgencia en las costas de Cuba.

Dada la complejidad e importancia del tema el modelo fue desarrollado en dos versiones. de esa

manera, desde 1993 se pudo contar con una primera versión del modelo (MONSAC1), el cual resolvió en parte las necesidades del Servicio Meteorológico Nacional y de otras instituciones del país.

Posteriormente, se obtuvo una versión mejorada del modelo antes mencionado, el cual se identifica por el acrónimo (MONSAC2) y cuya diferencia principal con el anterior consiste en la sustitución del fondo ficticio por datos batimétricos reales.

Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Primera versión. (MONSAC 1)

Este Capítulo se inicia con el establecimiento de toda la teoría físico-matemática del modelo presentado en la tesis, se parte de una forma linearizada de las ecuaciones de transporte, planteada por Harris y Jelesnianski (1964) y Jelesnianski (1966), y que tiene la forma siguiente:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = -gD_{(x,y)} \frac{\delta h}{\delta x} + fv + \frac{D_{(x,y)}}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} + \frac{\tau_s^{(x)}(x,y,t)}{\rho} + \frac{\tau_F^{(x)}(x,y,t)}{\rho}$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} = -gD_{(x,y)} \frac{\delta h}{\delta y} - fu + \frac{D_{(x,y)}}{\rho} \frac{\delta p}{\delta y} + \frac{\tau_s^{(y)}(x,y,t)}{\rho} + \frac{\tau_F^{(y)}(x,y,t)}{\rho}$$

$$\frac{\delta h}{\delta t} = - \frac{\delta u}{\delta x} - \frac{\delta v}{\delta y} \quad 1$$

donde:

u, v transporte de masa en las direcciones x, y respectivamente.

g aceleración de la gravedad .

$D_{(x,y)}$ profundidad del fluido no perturbado.

h altura de la surgencia (en metros), por encima del nivel medio del mar.

f parámetro de Coriolis.

ρ densidad del agua de mar.

P presión atmosférica.

$\tau_S^{(x)}$, $\tau_S^{(y)}$ componentes de la tensión de superficie.

$\tau_F^{(x)}$, $\tau_F^{(y)}$ componentes de la tensión de fondo

Cálculo de las tensiones de superficie y de fondo

Siguiendo la tendencia general utilizada en los diferentes modelos dinámicos de surgencia, las componentes de la tensión superficial se formula a través del viento en superficie. En este caso mediante una función cuadrática de la velocidad, (Jelesnianski, 1966), siendo:

$$\tau_S^{(x)} = K\rho_a|V| u$$

$$\tau_S^{(y)} = K\rho_a|V| v$$

donde:

ρ_a es la densidad del aire.

u, v componentes de la velocidad del viento en superficie.

k constante del modelo.

Como el modelo de surgencia requiere conocer los valores de la tensión superficial producida por el viento en diferentes puntos e instantes, cuestión casi imposible de conocer mediante valores observacionales, se utilizó un modelo teórico para conocer el campo de viento producido por un ciclón circular en movimiento, asimétrico en el viento y con un ángulo constante de entrada del viento. Este modelo de viento se inicializa de forma rápida y con parámetros meteorológicos simples

Considerando lo planteado por González y Pérez Parrado (1990), las componentes de la velocidad del viento en el sector derecho del ciclón tropical se pueden expresar por:

$$u = V_I \cos(\beta)$$

$$v = V_R + V_I \sin(\beta)$$

y en el izquierdo:

$$u = V_I \cos(\beta)$$

$$v = V_I \sin(\beta) - V_R$$

en las expresiones anteriores se tiene que:

β es el ángulo que forma el viento con la isobara (considerado como constante).

V_I representa la velocidad del viento para cada punto de un ciclón simétrico.

V_R es la velocidad de desplazamiento del ciclón en cada punto.

y según Pérez Parrado et. al. (1987), partiendo de la ecuación del viento gradiente se obtienen las siguientes expresiones:

$$V_I = V_M \left(\frac{R_M}{R} e^{(1 - R_M/R)} + \frac{f^2 R^2}{4 V_m^2} \right) - \frac{fR}{2}$$

$$V_R = V_C \left(\frac{R_M}{R} e^{(1 - R_M/R)} + \frac{f^2 R^2}{4 V_m^2} \right) - \frac{fR}{2}$$

donde:

V_C es la velocidad de desplazamiento del ciclón tropical.

R_M es el radio del viento máximo.

V_M velocidad máxima del viento.

Mediante este modelo se logran resultados similares a los obtenidos por Jelesnianski (1965) y por otros autores que mediante modelos teóricos calculan el perfil de viento en los ciclones tropicales.

De igual manera el campo de presión se obtiene considerando un vórtice en balance de gradiente y un perfil hiperbólico de la presión, según lo propuesto por Shloener (1954) y Holland (1980):

$$P = P_o + (P_\infty - P_o) e^{-\left(\frac{R_m}{R}\right)}$$

En la cual:

P_o presión mínima.

P_∞ presión en la periferia (valor de la última isobara cerrada).

R_m radio del viento máximo.

En la "Fig. 1" se presentan los perfiles de viento y presión calculados para el huracán Emily (31 de agosto de 1993) mediante el modelo teórico propuesto en esta investigación. En la "Fig. 2" se muestra una comparación entre el perfil real de viento y el calculado para el huracán antes mencionado.

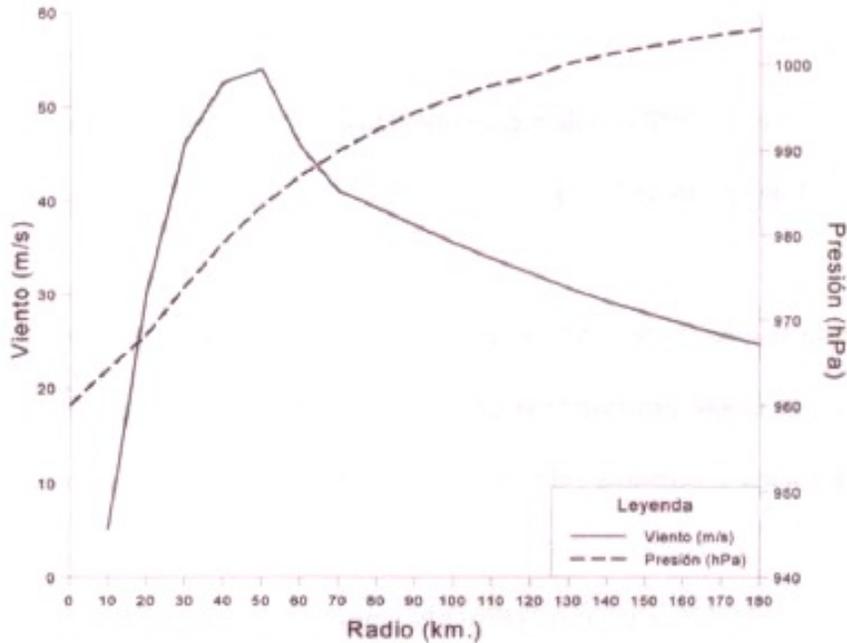


Fig. 1 Perfiles radiales de viento y presión calculados por el modelo teórico para el huracán Emily (31 de agosto de 1993).

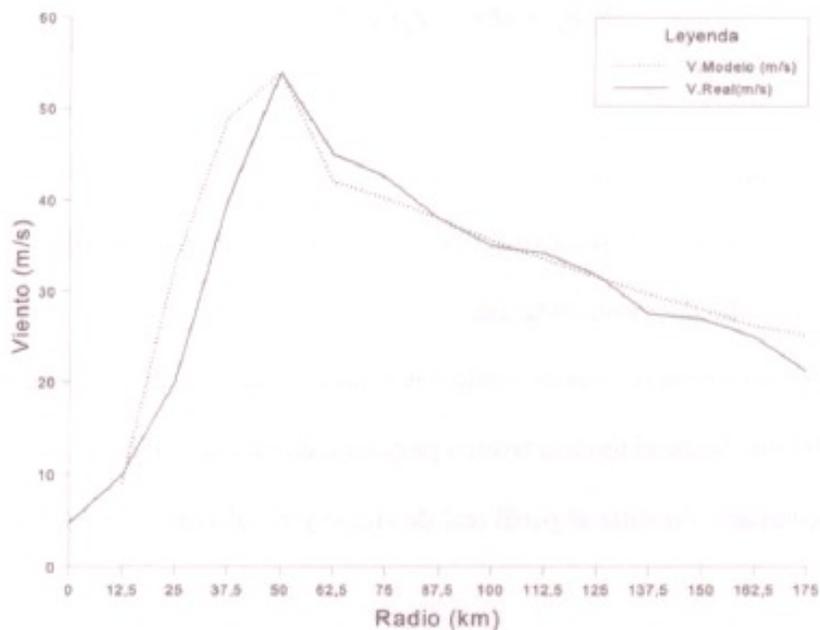


Fig.2 Comparación entre el perfil real de viento (tomado de Avila, 1993) y el modelado para el huracán Emily, 31 de agosto de 1993).

La incorporación de la tensión de fondo a las ecuaciones de transporte de masa es de gran importancia cuando se quiere generalizar el cálculo de la surgencia a ciclones tropicales que cruzan la costa con cualquier ángulo y velocidad de traslación, o que se desplazan paralelo a la misma.

De acuerdo con Miyasaki, Ueno y Unoki (1961) la tensión de fondo puede calcularse de la siguiente manera:

$$\tau_f^{(x)} = k_1 |V|u - k_2 \tau_S^{(x)}$$

y

$$\tau_f^{(y)} = k_1 |V|v - k_2 \tau_S^{(y)}$$

donde k_1 y k_2 representan constantes calculadas para el modelo.

Las constantes k_1 y k_2 al igual que la constante K (que aparece en la formulación usada para representar la tensión superficial) fueron calculadas empíricamente. Como primera aproximación se tomaron los valores calculados por otros autores.

En este capítulo también se plantean las condiciones iniciales del nivel de las aguas, lo cual consiste en adicionar al nivel medio de las aguas la elevación de la altura hidrostática debido a la caída de la presión por la presencia del ciclón tropical (efecto de barómetro invertido), este incremento se calcula a través de la ecuación de la hidrostática.

Características de la rejilla y de la cuenca

Para obtener una solución numérica del sistema de ecuaciones propuesto se tiene una rejilla rectangular de (70x140) puntos sobre Cuba y sus alrededores, con el extremo izquierdo inferior situado en (18N-87W). Esta rejilla se utiliza para los datos de batimetría (en esta versión mediante un fondo simulado). Una vez dada la posición inicial del huracán, mediante un algoritmo matemático se crea la rejilla de trabajo (30x30) puntos con el huracán situado en el centro; el paso espacial es de 0,1 grado de latitud y el temporal de 60 segundos.

Los datos batimétricos se obtuvieron de forma idealizada considerando que la profundidad de la cuenca se podía expresar mediante la siguiente ecuación siguiente:

$$D_{(y)} = (4 b / L^2) y^2 + (4 b / L) y + c$$

donde los parámetros b, c, L aparecen representados en la "Fig. 3". y fueron adaptados a las características de la plataforma insular de Cuba.

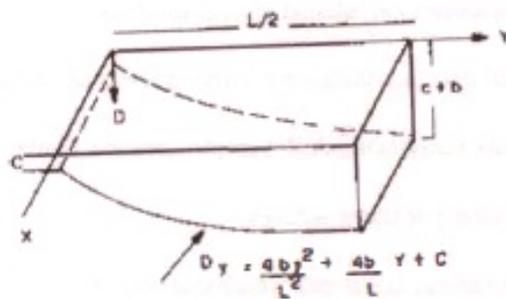


Fig.3 Representación esquemática de la profundidad de la cuenca.

La adaptación fue realizada de la siguiente manera: al analizar las características físico-geográficas de la plataforma insular cubana se determinaron nueve cuencas diferentes. Para cada una de esas cuencas se midió la distancia existente desde la costa hasta la isobata de 50 metros y esa distancia fue considerada como L/2 (ver fig.3), mientras que b+c = 25 metros. Estos valores se substituyeron en la ecuación planteada anteriormente obteniéndose de esta forma un fondo parabólico para las diferentes cuencas.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera establecidas después de diferentes exámenes para este modelo son las siguientes:

- La componente de transporte normal a la costa y a la frontera opuesta a la costa es cero ($V=0$), igual sucede con la derivada normal a ambas fronteras, o sea ($\partial u / \partial y = 0$).
- La componente de transporte normal a las fronteras laterales es cero ($U=0$), lo mismo sucede con la derivada normal a estas fronteras, ($\partial v / \partial x = 0$).
- Los valores de altura de la surgencia en las cuatro fronteras se sustituyen por los valores del punto interior inmediato (en cada paso del tiempo), este proceso también es válido para las componentes u y v no especificadas anteriormente.
- En los cuatro puntos de las esquinas (puntos donde se interceptan dos fronteras), los campos h , u y v toman los valores del punto inmediato interior que está en diagonal a dichos puntos.

Esquema numérico

Para obtener la solución aproximada del sistema de ecuaciones diferenciales (1) en los puntos interiores de la malla, se hace uso tanto espacial como temporalmente, de un esquema en diferencias finitas centrado (leap-frog).

Para calcular los valores de los campos u , v y h con el esquema numérico antes mencionado en el instante $t + 1$, es necesario tener los valores de estas variables en los tiempos t y $t-1$. Por tal motivo para calcular los valores de estos campos en $t=1$ se utilizó el esquema de diferencia finita progresivo propuesto por Harris y Jelesnianski (1964), quienes consideraron que en el primer intervalo de tiempo las ecuaciones de transporte de masa pueden aproximarse de la siguiente manera:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = f v + \frac{\tau_x^x}{\rho} + \frac{D}{\rho} \frac{\delta P}{\delta x}$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} = -f u + \frac{\tau_y^y}{\rho} + \frac{D}{\rho} \frac{\delta P}{\delta y}$$

Ecuaciones que expresadas en diferencia finitas progresivas en el tiempo se pueden aproximar finalmente a:

$$u_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_x^{(x)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta x} (P_{i+1,j}^1 - P_{i-1,j}^1) + \right.$$

$$\left. + f \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_y^{(y)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta y} (P_{i,j+1}^1 - P_{i,j-1}^1) \right] \right]$$

$$v_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_y^{(y)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta y} (P_{i,j+1}^1 - P_{i,j-1}^1) + \right.$$

$$\left. - f \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\tau_x^{(x)1}}{\rho} + \frac{D_{i,j}}{2 \rho \Delta x} (P_{i+1,j}^1 - P_{i-1,j}^1) \right] \right]$$

Sustituyendo en la ecuación de continuidad estos valores iniciales de los términos de transporte se tiene:

$$h_{i,j}^1 = \frac{\Delta t}{4\Delta s} (u_{i+1,j}^1 - u_{i-1,j}^1 + v_{i,j+1}^1 - v_{i,j-1}^1)$$

Una vez programado el esquema de cálculo en lenguaje FORTRAN, se realizaron diferentes corridas con huracanes hipotéticos, comprobándose la factibilidad del modelo ya que se obtuvieron valores de los distintos campos involucrados y de la surgencia acordes con los esperados desde un punto de vista teórico. También se efectuaron corridas con algunos ciclones reales que han afectado al territorio nacional, el ejemplo correspondiente al huracán de Santa Cruz del Sur (9 de noviembre de 1932) se muestra en la "Fig. 4". Los datos de entrada al modelo son los siguientes:

Plazo de pronóstico	18 horas
Posición geográfica del centro del huracán	18,9N - 80,4W
Dirección y velocidad de traslación	10° y 36 km/h
Viento máximo y presión mínima	250 km/h y 930 hPa
Cuenca	Sur de Camagüey
Radio del viento máximo	50 km

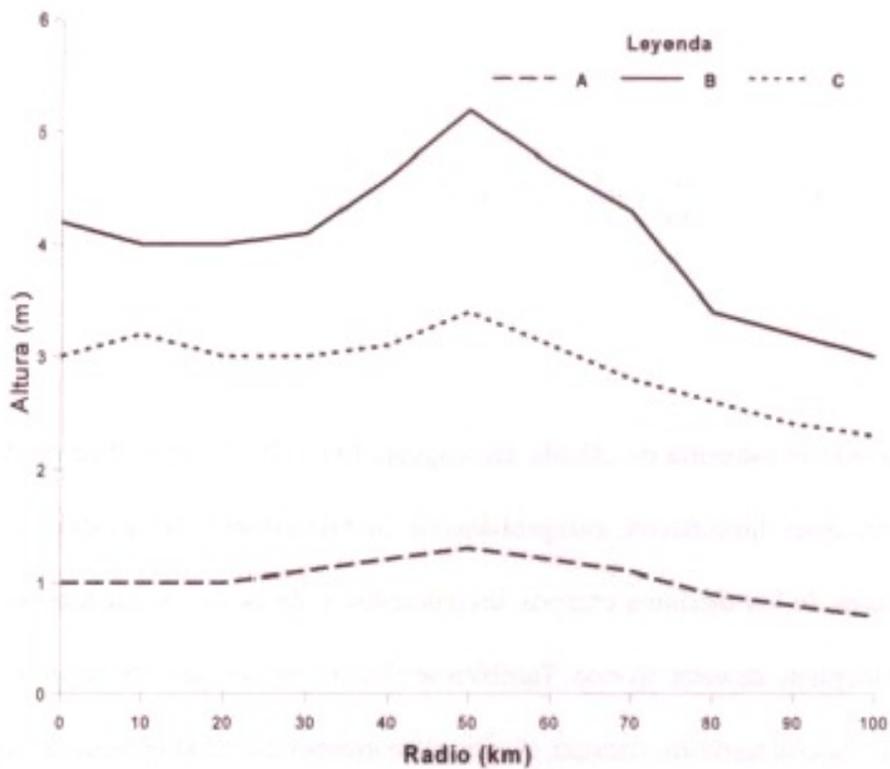


Fig.4 Comparación entre los perfiles de surgencia provocados por el huracán de Santa Cruz del Sur, 12 horas antes de penetrar en tierra, en el momento de llegada y tres horas después, según el modelo.

Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Segunda versión .MONSAC2.

En esta parte de la investigación se obtiene un modelo dinámico mejorado para pronosticar la altura alcanzada por la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba, para alcanzar esa meta se estudiaron las características y el comportamiento presentado por el modelo MONSAC1 (García y Pérez Parrado, 1994), sin olvidar las condiciones objetivas disponibles, esto es: base geográfica de datos, tipo de computadoras personales disponibles, etc.

Después de ese análisis se decidió mantener la filosofía utilizada en el MONSAC1 para resolver matemáticamente el sistema de ecuaciones diferenciales que describen la altura de la surgencia y el movimiento del fluido. No obstante, se realizaron diferentes pruebas con el esquema de rejilla "B" de Mesinger y Arakawa (1976), pero dada la resolución espacial del modelo y el incremento en tiempo computacional al utilizar este esquema no se realizó cambio en este sentido.

También se mantuvo invariable el modelo de viento utilizado anteriormente y el algoritmo para el cálculo de las tensiones superficiales y de fondo, partiendo del principio teórico-práctico de que la altura de la surgencia es un campo más conservativo que los campos auxiliares, siempre y cuando al modelo se le proporcionen parámetros de entrada exactos y las fuerzas usadas para calcular el viento estén en balance de gradiente.

A este nuevo modelo se le identificará como MONSAC2 (García y Pérez Parrado, 1995), el mismo representa un salto ascendente para el Servicio Meteorológico Nacional al lograrse un pronóstico objetivo del evento más dañino y peligroso de los asociados a los ciclones tropicales.

Batimetría

La sustitución del fondo ficticio por el real es un proceso altamente laborioso y requiere de sumo cuidado. Al desarrollar esta investigación la única fuente disponible en el Instituto de Meteorología de la República de Cuba para extraer los datos batimétricos en los alrededores de Cuba eran las cartas batimétricas en proyección cónica de Lambert con escala de 1:250 000 y 1:500 000 para las costas norte y sur respectivamente. Se extrajeron 9800 datos batimétricos distribuidos de manera uniforme en una rejilla rectangular con 11 km. de paso espacial, lo que constituye la base batimétrica para el modelo MONSAC2.

Resultados

Al efectuar diferentes corridas de pruebas para examinar y calibrar el modelo, una vez sustituido el fondo ficticio por el real se observó la necesidad de imponer nuevas condiciones de frontera al modelo, ya que cuando existe una marcada diferencia en los valores de la profundidad entre puntos cercanos de rejilla ocurren sumas algebraicas de distintos ordenes de magnitud, produciéndose inestabilidad computacional. Por este motivo, se impusieron las siguientes condiciones de frontera entre aguas poco profunda, mediana y profunda. (Jelesnianski, Chen y Shaffer 1992).

- Aguas profundas (mayor a 45 metros)

$$h_{i,j} = (h_0)_{i,j}$$

- Medianamente profundas (mayor que 23 metros y menor a 45 metros)

$$\left(\frac{\delta h}{\delta x}, \frac{\delta h}{\delta y}\right)_{i,j} = \left(\frac{\delta h_0}{\delta x}, \frac{\delta h_0}{\delta y}\right)_{i,j}$$

- Aguas poco profundas (menores a 23 metros)

$$\left((D)\frac{\delta h}{\delta x}, \frac{\delta h}{\delta y}\right)_{i,j} = \left((D)\frac{\delta h_0}{\delta x}, \frac{\delta h_0}{\delta y}\right)_{i-1,j}$$

donde h_0 es la altura estática.

Una vez considerado estas condiciones de frontera, los valores obtenidos eran aceptables desde un punto de vista teórico, coincidiendo en casos con los obtenidos mediante el modelo MONSACI, pero a la vez, presentándose rasgos en el campo de la surgencia imposibles de obtener en la primera versión.

En última instancia, la confianza en un modelo la determina la comparación entre los valores de surgencia dados por el mismo y los valores observados. Desafortunadamente, registros de observaciones simultaneas de los parámetros meteorológicos necesarios para correr el modelo y de la altura del nivel de las aguas alcanzada por la surgencia para huracanes pasados no existe en Cuba.

Las marcas dejadas por el agua y la línea de los desechos son de gran utilidad para conocer el comportamiento de la surgencia (sin olvidar que estas huellas también reflejan el efecto del oleaje, el cual es necesario eliminar), además de representar una vía económica para obtener información. en muchas ocasiones la única fuente.

Entre los huracanes que han cruzado sobre Cuba es el de octubre de 1944 el que presenta una mayor información histórica sobre el nivel alcanzado por las aguas. Aunque estos datos no son enteramente confiables por las siguientes razones: se desconoce la calidad de las mediciones de las marcas dejadas por el agua en los diferentes objetos, y el grado de contaminación de las mismas, tampoco es posible eliminar la marea astronómica de la curva obtenida para la marea de tormenta. No obstante, se señala que en la zona por donde penetró este huracán la máxima elevación del mar debido a la pleamar no excede los 0.5 metros.

A pesar de todo lo expresado anteriormente el huracán de octubre de 1944 es el único que permite realizar una evaluación aproximada de un modelo de este tipo.

Al correr el modelo con los datos referentes a ese huracán se obtuvieron resultados acordes con los reportados.

En la "Fig 5" se muestra un perfil de los valores de la surgencia dados por este modelo y el perfil de la marea de tormenta obtenido de acuerdo a los datos reportados según testigos presenciales.

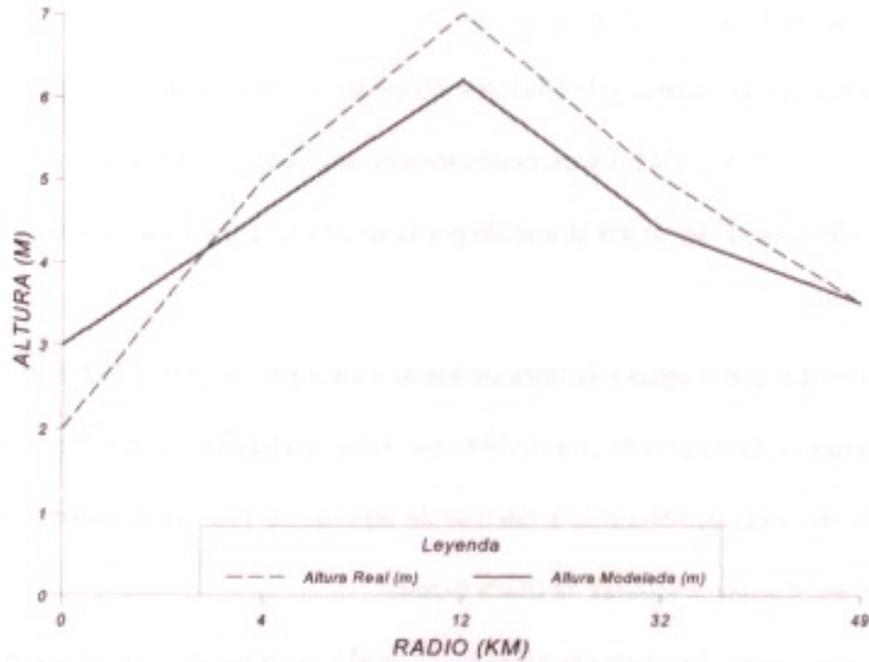


Fig. 5 Gráfico que presenta la altura alcanzada por la marea de tormenta en diferentes localidades durante el huracán de octubre de 1944. de acuerdo a testigos presenciales y el perfil de la surgencia de acuerdo al modelo.

Envoltura de la altura de las aguas (EOHW)

Un requisito previo para confeccionar planes de evacuación es la determinación de las áreas propensas a inundaciones debido a la surgencia. La inundación potencial podría ser especificada a través del estudio de eventos pasados ocurridos en la región de interés, pero los huracanes son eventos de rara ocurrencia para muchas regiones del mundo, en consecuencia, muchos de los

datos hidrometeorológicos no están disponibles para este fin.

Entre la utilidad de los modelos numéricos está la compensación de esa falta de datos. Un producto útil en ese aspecto es el EOHW (Jarvinen y Gebert, 1986).

El EOHW representa el valor máximo de la altura alcanzada por la surgencia para cada punto de rejilla (independiente del tiempo), al paso de un huracán sobre una cuenca determinada. Al obtener ese producto para diferentes huracanes se dispondrá de una información muy útil sobre el comportamiento potencial que podrá tener la altura de la surgencia en un escenario dado. Al construir los mapas de EOHW para una cuenca dada es necesario tomar en consideración la climatología de los ciclones que han afectado esa zona.

En este trabajo se obtiene el EOHW para las costas cubanas de la siguiente manera:

Para cada cuenca se corrieron huracanes en las direcciones más probables de afectación (desde un punto de vista climatológico), esto es: S, SE y SW en la costa sur y E y NE en la costa norte. Como presión central mínima y viento máximo sostenido se consideró el valor medio para cada rango de la escala de intensidad de Saffir / Simpson, (citada por Rappaport y Mc Adie, 1991), el radio de viento máximo se consideró como 20 km. y la velocidad de traslación de 20 km/h.

Estos resultados constituyen un valioso atlas que se encuentra disponible en el software creado para la explotación del modelo en computadoras personales.

La "Fig. 6" muestra el EOHW obtenido para un huracán de categoría cinco, penetrando perpendicularmente a la costa sur de las provincias habaneras.



Fig. 6 Representación gráfica del EOIW obtenido por el modelo para un huracán de categoría cinco (valor medio del rango) y movimiento perpendicular a la costa sur de las provincias habaneras.

En la "Fig. 7 " se muestra un ejemplo del campo de la surgencia obtenido por el modelo para una tormenta tropical hipotética que esté afectando las costas del territorio nacional, siendo este tipo de producto la finalidad principal del modelo, cuando el mismo es utilizado en tiempo real.



Fig. 7. Ejemplo del campo de la surgencia obtenido por el modelo para una tormenta tropical que ha penetrado perpendicularmente a la costa sur de las provincias habaneras, con una presión central mínima de 999 hPa, viento máximo de 100 km/h, radio de viento máximo 25 km y velocidad de traslación de 18 km/h.

El MONSAC2 ya ha sido utilizado en la práctica operativa y en la confección de los mapas de peligro por penetraciones del mar en las costas de Cuba (ver PNUD, 1998).

De igual manera, otro producto de gran ayuda e importancia al trabajar con modelos de surgencia es el cálculo de las mayores alturas posibles de la surgencia en los diferentes puntos de la rejilla para una familia de trayectorias de ciclones, este proceso dará un mapa conocido como Máxima Envolvente de las Aguas (MEOW), (Jelesnianski, 1993), a pesar de lo arduo que resulta su confección se recomienda la construcción del mismo en un futuro y su incorporación al software de explotación, al menos para las cuencas de mayor peligrosidad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los aportes fundamentales obtenidos en esta Tesis son:
- Se elaboró por primera vez en Cuba, un modelo dinámico bidimensional, para pronosticar

en tiempo real la surgencia asociada a cualquier ciclón tropical que represente una amenaza potencial para el país, con un plazo de 18 horas. Este modelo identificado por las siglas MONSAC2 tiene una resolución espacial de 11 kilómetros. Está programado en FORTRAN Power Station de Microsoft versión 1.0 y el tiempo de corrida es menor al minuto en una Pentium a 133 Mhz con 16 MB RAM.

-- Los resultados obtenidos por el MONSAC2 pueden ser visualizados de una forma rápida y práctica mediante el software elaborado.

-- Mediante dicho software es posible visualizar el atlas de EOHW creado durante esta investigación, producto de gran utilidad tanto para el pronóstico en tiempo real de la surgencia como en la confección de planes de evacuaciones y trabajos relacionados con el manejo de las costas.

- También se deben mencionar las siguientes conclusiones:

-- El cálculo de las tensiones superficial y de fondo fueron parametrizadas adecuadamente, lográndose reflejar la sensibilidad que presenta el cálculo de la altura de la surgencia a estos procesos.

-- El modelo utilizado para obtener los campos de viento y presión alrededor del ciclón tropical fue exitoso y el mismo no había sido usado con anterioridad en un modelo de surgencia.

-- El estudio de las características físico-geográficas de la plataforma insular de Cuba, permitió definir nueve cuencas con características diferentes para el pronóstico de la surgencia.

-- El diseño concebido para realizar esta investigación en diferentes versiones fue acertado, lográndose las siguientes ventajas:

- Desde finales de 1993 el Servicio Meteorológico Nacional disponía de la primera versión (MONSAC1) de un modelo dinámico, para pronosticar la surgencia producida por los ciclones tropicales que afectarían al país. Al concluirse esta investigación con la obtención del

MONSAC2, el MONSAC1 queda como un modelo de gran utilidad para probar el comportamiento de cualquier nuevo algoritmo que se desee introducir o cambiar para mejorar el cálculo de algunos de los parámetros o condiciones usadas en versiones futuras.

Sobre la base de la experiencia adquirida durante el desarrollo de esta investigación se elaboraron una serie de recomendaciones de gran importancia en la proyección futura de esta temática.

En primer lugar, se impone la necesidad de establecer por las autoridades oficiales, (Defensa Civil, Instituto de Meteorología, etc) un plan de rápida aplicación donde se contemple la realización de mediciones en diferentes puntos de la costa, de la altura alcanzada por las aguas, cuando algún organismo tropical afecte al territorio nacional, cuestión esta de vital importancia para la evaluación y calibración de los modelos de surgencia. También debe establecerse una metodología para la obtención de esos datos.

Se sugiere continuar trabajando e investigando esta temática, con la finalidad de obtener un modelo de malla fina donde la costa sea considerada como una pared móvil, lo que permitirá entre otras cuestiones, conocer las inundaciones tierra adentro.

De igual manera se recomienda (a pesar de lo arduo que resulta su confección), la construcción e incorporación al software de explotación del atlas que contenga el MEOW de las cuencas con mayor peligrosidad.

De forma general se puede señalar que con la puesta operativa del modelo MONSAC 2 en el Departamento de Meteorología Dinámica del Instituto de Meteorología concluye esta investigación, lográndose un pronóstico objetivo del evento más dañino y peligroso de los asociados con los ciclones tropicales. De esta manera el Servicio Meteorológico Nacional cuenta con una técnica avanzada para pronosticar uno de los fenómenos más peligrosos y destructivo asociado a los ciclones tropicales.

AUTOBIBLIOGRAFIA

En relación con el tema de la tesis se elaboraron los siguientes artículos:

1. García, O. y R. Pérez Parrado (1994): "Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Primera Versión. MONSAC1". En Memorias del VII Congreso Brasileiro de Meteorología. II Congreso Latino-Americano e Iberico de Meteorología. "La Meteorología en la Prevención de los Desastres". Vol.2 pp 502-509. Bello Horizonte, Brasil.
2. -----, y ----- (1998): "Modelo dinámico para pronosticar la surgencia que provocan los huracanes en las costas de Cuba. MONSAC2" (en prensa). Revista Cubana de Meteorología.
3. Pérez Parrado, R., O. García y I. Salas (1998) "Aplicaciones del modelo MONSAC2 en las costas de Cuba". En Memorias de la Conferencia Científica sobre Ciclones Tropicales "Rodríguez Ramírez in Memoriam" Ciudad de La Habana, Cuba pp 81-85.
4. Salas, I., R. Pérez Parrado y O. García (1998): "Mapa de peligro por surgencia de ciclones tropicales". En Memorias de la Conferencia Científica sobre Ciclones Tropicales "Rodríguez Ramírez in Memoriam" Ciudad de La Habana, Cuba pp 86-91.
5. R. Pérez Parrado, O. García, M. Portela, et. al. (1998). "Desarrollo de las técnicas de predicción de las inundaciones costeras, prevención y reducción de su acción destructiva." Monografía Proyecto Cuba/94/003. PNUD 172 pp. y Anexo de mapas, figuras y tablas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS FUNDAMENTALES

1. Avila, L. A. (1993): Forecaster report. Tropical Cyclone Structure. En WMO Tropical Meteorology Research Programme. Report Series. Report No. 46. WMO/TD No. 573, pp 37-54.
2. Elsberry, R. L. (1995): Tropical Cyclone Motion. En Global Perspectives on Tropical Cyclones. Chapter 4. WMO/TD No. 693. Report No. TCP-38, pp 106-197.
3. Frank, W. M. (1993): Tropical Cyclone Structure change and Formation. En WMO Tropical Meteorology Research Programme. Report Series. Report No. 46. WMO/TD No. 573. Annex. pp 1-10.
4. García, O. y R. Pérez Parrado (1994): Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Primera Versión MONSAC1. En Memorias del VIII Congreso Brasileiro de Meteorología. II Congreso Latino-Americano e Ibérico de Meteorología. "La Meteorología en la Prevención de los Desastres". Vol. 2 pp 502-509.

5. -----, ----- (1996): "Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Segunda versión. MONSAC2". En el BSMC, vol 2, No. 1, julio de 1996.
6. González O., y R. Pérez Parrado (1990): Modelo asimétrico de ciclón tropical. Presentado en el V Simposium Internacional de Meteorología Tropical. Obninsk, Rusia 2991.
7. Harris, D. L. y Ch. Jelesnianski (1964): Some problems involved in the numerical solutions of tidal hydraulics equations. MWR vol 92 No. 9 Dec. pp. 409-422.
8. Holland G. J., (1980): An analitic model of the wind and the pressure profiles in hurricanes. MWR vol. 108, pp 1212-1218.
9. Jarvinen, B. R. y J. Gebert (1986): Comparison of observed versus slosh model computed storm surge hydrographs along the Delaware and New Jersey shorelines for hurricane Gloria, September 1985. NOAA Technical Memorandum NWS NHC 32.
10. Jelesnianski, C. P. (1965): A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf. MWR vo. 93, No. 6. June pp. 343-358.
11. -----, (1966): Numerical computations of storm surges without botton stress MWR vol. 94 No. 6, June pp. 379-394.
12. -----, (1967): Numerical computations of storm surges with bottom stress. MWR vol. 95 No. 11, Nov. pp 740-756.
13. -----, (1970): Bottom stress time-history in linearized equations of motion of storm surges. Monthly Weather Review, Vol. 98, No. 6 pp. 462-478.
14. -----, (1972): SPLASH (Special Program to List Amplitudes of Surges from Hurricanes). NOAA Technical Memorandum NWS TDL- 46, Department of Commerce 33 pp.
15. -----, (1976): A sheared coordinate system for storm surge equations of motions with a mildy curved coast. NOAA Technical Memorandum. NWS TDL-61, Silver Spring, Md.
16. -----, (1993): Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. "Chapter 4". The Habitation Layer, WMO/TD No. 560.
17. -----, J. Chen y W. Shaffer (1992): SLOSH Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes. NOAA Technical Report NWS 48.
18. Lezcano, J. C., A. L. Pérez, R. Casals y A. Peñate (1993): Aspectos esenciales del mapa de riesgo por penetraciones del mar en las costas cubanas. En Geodinámica Ambiental y Riesgos Naturales. Tomo 1. Memorias del IV. Encuentro de Geógrafos de América Latina Mérida . Venezuela , pp 391-397.

19. Linares, E. (1976): El huracán de Camagüey de 1932. Crónica. UDICT del Inst. de Met. La Habana, Cuba 15 pp.
20. Mandal, G. S. (1991): Tropical cyclones and their forecasting and warning systems in the North Indian Ocean. WMO/TD No. 430. Tropical cyclone Programme. Report No TCP 28
21. Mesinger, F. y A. Arakawa (1976): Numerical methods used in atmospheric models. Global Atmospheric Research Programme. WMO-ICSU Joint Organizing Committee, GARP Publicacion Serie No. 17, 64 pp.
22. Miyasaki, M., T. Ueno y S. Unoki (1961): Reprinted from the Oceanographical Magazine Vol. 13. No. 1.
23. Moreno, A. y I. Salas (1976): Surgencias originadas por tormentas tropicales, sus causas y efectos Academia de Ciencias de Cuba. Instituto de Meteorología , La Habana 15 pp
24. OMM. (1992): Programa de la Vigilancia Meteorológica Mundial 1992-2001. Tercer Plan a Largo Plazo de la OMM. Parte II. Vol I. OMM. No. 761.
25. Ortiz, R. (1976): Descripción de los cinco huracanes más interesantes que han afectado a Cuba durante los últimos cincuenta años. UDICT del Inst. de Met. La Habana. ACC 14 pp.
26. ----- y O. García (1989): Resumen de la temporada ciclónica de 1988, UDICT de la ACC, Instituto de Meteorología , La Habana, Cuba, 33 pp.
27. ----- y ----- (1990): Análisis del huracán Kate de noviembre de 1985. En Rev. Cubana de Meteorología Vol. 3, No. 105-113.
28. Pérez Parrado, R. (1974): " Pronóstico de las mareas máximas en los ciclones tropicales" [inédito] UDICT del Instituto de Meteorología. Academia de Ciencias de Cuba, La Habana.
29. ----- (1981): "Mareas en los ciclones tropicales. Su amplitud y perfil". [inédito], UDICT del Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana.
30. -----; I. Mitrani y M. D' Estefano (1987): Método de inicialización y localización de los ciclones tropicales en rejillas de gran escala. [en ruso] Vo. 1 del III Simposium Internacional de Meteorología Tropical. Guidrometeoizdat, pp. 335-340.
31. PNUD (1998): Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las Inundaciones Costeras. Prevención y Reducción de su Acción Destructiva. Informe Técnico. Proyecto Cub94/003. 172 pp.
32. Riehl, H. (1963): Some relations between wind and thermal structure of steady state hurricanes. J. Atmos. Sci. Vol. 20, pp. 276-287.

33. Salas, I., R. Pérez Parrado, O. García, C. Rodríguez y A. L. Pérez (1995): Mapa de peligro por surgencias de ciclones tropicales. En Memorias Conferencia Científica sobre Ciclones Tropicales "Rodríguez Ramírez in Memoriam" La Habana, Cuba pp 86-91.
34. Shloemer, R. W (1954): Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okechobee, Fla. Hydromet. Rep. No. 31. US Weather Bureau, pp. 16-17.
35. Shore Protection Manual (1984): Department of the Army U.S.A. Corps of Engineers, Washington, D. C. 20402. Vol. 1. Fourth Edition, (Chapter 1 Through 5).
36. Willoughby, H. E. (1995): Mature structure and evolution. Chapter 2. En Global Perspective on Tropical Cyclones. WMO/TD- No. 693. Report No. TCP-38, pp 21-62.
37. WMO (1978): Chapter 7. Field Survey of Storm surges. En Report No. 13. Present Techniques of Tropical Storm Surge Prediction. WMO No. 500 pp 72-75.
38. (1993): Topic Rapporteur reports of the Third WMO/ICSU International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC- III). WMO/TD- No. 573.
39. ----- (1994): Proceedings of the Third WMO/ICSU International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC- III). Tropical Meteorology Research Programme Report Series. Report No. 49. WMO/TD- No. 624, 41 pp.
40. Zenghao, Q. (1993): Recent advances in storm surge prediction and research in China. En Tropical Cyclone Disasters. Proceedings of ICSU/WMO International Symposium. Peking University Press, Beijing, China, pp 423-437.