

Propuesta de un modelo dinámico para el pronóstico de surgencia de huracanes en las costas de Cuba (MODSUR)

Proposal of a dynamic model for numerical storm surge prediction in Cuban coastal zones (MODSUR)

Pedro Enrique Montoro González

Centro Meteorológico Provincial, Pinar del Río, Cuba

pedro@pri.insmet.cu

Oscar O. Díaz Rodríguez

Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba

oscar.diaz@insmet.cu

Recibido: 8 de marzo, 2012; aceptado 6 de octubre, 2012

Resumen

En este trabajo se desarrolla un modelo dinámico simple para el pronóstico numérico de la surgencia ciclónica en las costas de Cuba, así como con vistas a la localización de las zonas más sensibles a las inundaciones costeras. Este modelo se basa en el estudio y la modificación del Método Cuasiestático para la Predicción de Surgencia de Huracanes, propuesto por Bretschneider y Collins (citado en Bretschneider, 1990), y utiliza como datos de entrada los campos de presión y de viento correspondientes a las salidas de un modelo paramétrico de ciclón tropical desarrollado en el Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología (Alonso y Díaz, 2009). Se analizan los huracanes Iván (septiembre, 2004), Katrina (agosto, 2005), Wilma (octubre, 2005), Gustav (agosto-septiembre, 2008) e Ike (septiembre, 2008). Se examina la influencia de las variables utilizadas (presión mínima central, viento máximo, radio de vientos máximos, profundidad del mar en la posición del centro del ciclón) y de términos que intervienen en el pronóstico de la surgencia. Se estudia de forma preliminar el desempeño del modelo en el pronóstico de sobreelevación del nivel del mar en las costas cubanas. Se concluye que el modelo dinámico desarro-

llado mejora el pronóstico de surgencia ciclónica en las costas de Cuba, con un error relativo de menos de 17 % para los casos estudiados.

PALABRAS CLAVE: Surgencia ciclónica, huracán, inundaciones costeras, pronóstico numérico, efecto Ekman.

Abstract

A simple dynamical model for numerical storm surge prediction in Cuban coastal zones and the location of the most sensitive areas to coastal flooding is presented. This model is based on a modification of the “quasi-static method to forecast the storm surges due to hurricanes” proposed by Bretschneider and Collins (cited in Bretschneider 1990). As input data, the wind and sea level pressure fields from a parametric hurricane model output that was developed in the Atmospheric Physics’ Centre of the Institute of Meteorology (Alonso and Díaz 2009) were used. The following study cases were analyzed: Ivan (September, 2004), Katrina (August, 2005), Wilma (October, 2005), Gustav (August-September, 2008) and Ike (September, 2008). The influence of the main variables (central minimum pressure, maximum wind, maximum wind radius, sea depth at the position of

the cyclone center) and storm surge terms were studied. A preliminary analysis of the storm surge forecast efficiency in Cuban coastal zones is presented. As conclusion, the dynamical model developed improves the numerical storm surge prediction in Cuban coastal zones with a relative error less than 17 % for the cases studied.

KEYWORDS: Storm surge, hurricane, coastal flooding, numerical forecast, Ekman's effect.

Introducción

Los ciclones tropicales, en especial los huracanes, ejercen una fuerte acción sobre la superficie oceánica y provocan dos movimientos ondulatorios, que ocurren al unísono: el oleaje y la surgencia. La *surgencia de tormenta* se define como la elevación anormal y temporal del nivel del mar sobre la marea astronómica, causada por la presencia de un ciclón tropical (WMO 1978). El factor influyente principal es la fuerza de los vientos que empujan las aguas de la superficie del océano delante del ciclón, en su lado derecho para el caso del hemisferio norte (Jelesnianski, Chen y Shaffer, 1992).

De todos los peligros relacionados con un ciclón tropical, sobre todo cuando se trata de un huracán, la surgencia es la que representa una mayor amenaza en cuanto a la vida de la población; estadísticamente, a escala mundial, nueve de cada diez víctimas y 90 % de las pérdidas materiales se deben a este fenómeno (Salas y Pérez, 2005). El archipiélago cubano no ha estado ajeno a los efectos destructores de la surgencia; una muestra de ello lo constituye el mayor desastre natural ocurrido en Cuba, el 9 de noviembre de 1932, en el asentamiento costero de Santa Cruz del sur, en la provincia de Camagüey, donde hubo que lamentar la pérdida de más de 3 000 personas tras el paso de un huracán que sobreelevó el nivel medio del mar a más de 6 m de altura (Salas y Pérez, 2005).

El Instituto de Meteorología (INSMET) cuenta con

un modelo dinámico para pronosticar la surgencia provocada por huracanes (MONSAC 3), aunque entre sus principales limitaciones se aprecia que posee un paso de rejilla demasiado grande, tanto para el cálculo detallado de la surgencia, como para el modelo paramétrico del ciclón tropical, de donde proceden los datos meteorológicos de entrada (Pérez, Salas y Dole 2003).

El uso de modelos dinámicos para el cálculo numérico de la surgencia en la línea costera de Cuba, con una buena resolución (1 km) permite una mejor localización de las zonas más expuestas a las inundaciones costeras al paso de los huracanes, y sus salidas son muy útiles para la predicción del alcance de la inundación, la elaboración de mapas de peligro y de planes de contingencias para proteger a la población y a los objetos de interés socioeconómico.

Objetivos

El *objetivo fundamental* de este trabajo es crear, implementar y evaluar de manera preliminar un modelo dinámico simple de surgencia, capaz de mejorar el pronóstico numérico de este fenómeno.

Materiales y métodos

Modelos atmosféricos proveedores de datos iniciales

Los datos de entrada en el modelo de surgencia fueron adquiridos del modelo paramétrico de Alonso y Díaz (2009) desarrollado en el INSMET, y este, a su vez, toma las salidas del modelo atmosférico MM5V3 aplicado a la manera descrita por Mitrani, Borrajero y Álvarez (2003).

El modelo paramétrico de ciclón tropical mejora la representación de los campos de presión y viento, e incluye la asimetría de los huracanes. Se basa en una modificación al sistema de ecuaciones del método propuesto por Holland (citado en Alonso y Díaz,

2009) y realiza el pronóstico numérico de la trayectoria de los ciclones tropicales, así como de las variables de utilidad: presión y viento (Alonso y Díaz, 2009).

Zona de estudio y batimetría

El área de interés incluye a Cuba y los mares adyacentes, contiene datos batimétricos reales, con una resolución de 900 m, y comprende desde los 18.5° hasta 24.5° de latitud norte, y los 73.5° hasta 86.5° de longitud oeste (Fig. 1). Esta malla de puntos se obtuvo del software Atlas Digitales GEBCO, versión 2.12 (IOC, IHO, y BODC 2009). Se seleccionó esta zona dado que presenta la región de estudio y, además, posee un área adecuada para analizar varios casos de ciclones tropicales.

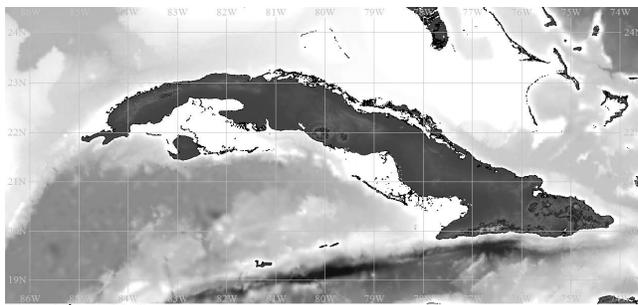


Figura 1: Área de interés seleccionada.

Fig. 1 Área de interés seleccionada.

Casos de estudio

Se seleccionaron las siguientes salidas del MM5V3 para los huracanes:

1. IVÁN (corridas de los días 10 y 13 de septiembre de 2004, a las 00 horas), encontrándose disponibles las salidas binarias del MM5V3 con plazos hasta las 96 horas para cada corrida.
2. KATRINA (corridas de los días 25 y 27 de agosto de 2005 a las 00 horas), con las salidas binarias del MM5V3 y plazos de hasta 72 horas.
3. WILMA (corridas de los días 19, 21 y 23 de octubre de 2005, a las 00 horas), con las salidas binarias del MM5V3 y plazos hasta las 72 horas.

4. GUSTAV (corrida del 30 de agosto de 2008, a las 00 horas), con una salida binaria del MM5V3 y plazos hasta las 72 horas.
5. IKE (corridas de los días 8 y 10 de septiembre de 2008, a las 00 horas), con las salidas binarias del MM5V3 y plazos hasta las 72 horas.

Todos estos ciclones transitaron por los mares adyacentes a Cuba (Mar Caribe, Golfo de México, Estrecho de la Florida) y, en distintos momentos, afectaron de algún modo diferentes regiones de nuestro territorio. El criterio de selección fue la disponibilidad de datos en el Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología.

Datos reales de referencia

Con miras a la comprobación de la predicción de la sobreelevación del nivel del mar se utilizaron los datos disponibles en los reportes de surgencia que se incluyen en los *Resúmenes de temporadas ciclónicas* (Ballester y Rubiera, 2005, 2006, 2009). Para el análisis de errores y estudio del desempeño del modelo se compararon los valores numéricos pronosticados de surgencia con los del MONSAC 3 incluidos en el *Atlas digital de surgencias provocadas por ciclones Tropicales en el archipiélago cubano* (Pérez et al., 2009), para los casos seleccionados.

Obtención del modelo dinámico para el cálculo de la surgencia de huracanes en las costas de Cuba

De acuerdo con el *Shore Protection Manual* (U. S. Army Corps of Engineers 1984), el nivel total del mar o marea de tormenta en la costa durante un huracán puede expresarse en función de los términos siguientes:

$$S_T = S_x + S_y + S_{DP} \quad (1)$$

Donde: S_T : nivel total, S_x : transporte directo por la acción del arrastre del viento o *wind setup* (normal a la costa), S_y : transporte de Ekman o marea de Coriolis

y S_{AP} : marea barométrica o efecto de barómetro invertido.

$$\frac{dS}{dx} = \frac{fW_y}{g} \sqrt{\frac{\rho_a C_d W_d}{\rho C_b |W_y|}} + \frac{\tau_{sx}}{\rho g D} \quad (4)$$

Transporte de Ekman y arrastre del viento

Se utilizó una formulación a partir de una modificación al Método Cuasiestático para la Predicción de la Surgencia de Huracanes propuesto por Bretschneider y Collins (citado en Bretschneider, 1990).

Este método para determinar la surgencia de tormenta en costas abiertas se basa en la aproximación teórica de las ecuaciones de la hidrodinámica. La solución numérica se obtiene integrando sucesivamente el arrastre superficial del viento sobre la plataforma continental o insular, desde la pared del ojo en los ciclones tropicales, hasta la línea costera para un intervalo de tiempo predeterminado. Con vistas a la simplificación del método se asume que la surgencia ciclónica responde al arrastre superficial del viento hacia la costa, la advección de momento no se considera, la superficie del mar a lo largo de la línea costera es uniforme y el flujo normal a la costa es nulo. Los efectos de la presión y la precipitación también pueden ignorarse. Sobre la base de las consideraciones anteriores se tiene lo siguiente:

$$gD = \frac{\partial S}{\partial x} = fV + \frac{\tau_{sx}}{\rho} \quad (2)$$

Ecuación del movimiento para el eje x

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{(\tau_{sx} \tau_{By})}{\rho} \quad (3)$$

Ecuación del movimiento para el eje y

Donde: S : sobreelevación del mar.

El término inercial en la ecuación (3) puede ser omitido ($\partial V/\partial t=0$) y el flujo de masa a lo largo de la costa se ajusta de modo que en el eje y la tensión superficial se equilibra con la del fondo. Se obtiene una aproximación similar a la del modelo de Bautista (Bautista, Silva y Salles, 2003), con inclusión de la componente paralela a la costa:

Integrando sobre x , desde la pared del ojo del ciclón, hasta la costa, se obtienen los términos *arrastre del viento* y *transporte de Ekman*, que se utilizan en el cálculo de la surgencia en este trabajo:

$$S_y = \frac{fLW_y}{g} \sqrt{\frac{\rho_a C_d W_d}{\rho C_b |W_y|}} \quad (5)$$

$$C_b = 2.5 \times 10^{-3}$$

$$S_x = \frac{\rho_a C_d}{\rho g D} W_x^2 X L n \frac{H}{S} \quad (6)$$

Donde: X (metros): distancia desde la pared del ojo del huracán hasta el punto de interés en la costa y W_x : componente perpendicular a la costa de la velocidad del viento W_d .

La ecuación (5) predice el aumento del nivel del mar en la costa por la acción de los vientos a lo largo de la línea del litoral y es directamente proporcional al ancho de la plataforma insular L y a la componente del viento paralela a la costa W_y . El término S_x en la ecuación (6) tiene en cuenta que H ($D = H + S$), expresada en *metros*, es la profundidad del mar en la posición donde se encuentra el ojo del ciclón.

Para el cálculo de C_d , varios autores han propuesto diversas parametrizaciones; en este trabajo se realizaron experimentos con cuatro de estas, lo cual permitió estudiar la sensibilidad del modelo a este término y seleccionar la formulación que brindó mejores resultados. La tabla 1 muestra las parametrizaciones empleadas (Garratt, 1977; Geernaert, 1999; Hsu, 2004).

TABLA 1

Parametrizaciones para el coeficiente de arrastre del viento

Parametrización	Formulación
Van Dorn (1963)	$C_d = 1.1 \cdot 10^6$ ($W_d > 7.19 m/s$)
	$C_d = 1.1 \cdot 10^6 + 2.5 \cdot 10^6 \cdot \frac{1-7.19}{W_d}$ ($W_d > 7.19 m/s$)
Garratt (1977)	$C_d = 1.0 \cdot 10^3$ ($0.75 + 0.067 \cdot W_d$) ($W_d \leq 33.5 m/s$)
	$C_d = 3.0 \cdot 10^3$ ($W_d > 33.5 m/s$)
Geernaert (1999)	$C_d = 1.0 \cdot 10^3$ ($0.58 + 0.085 \cdot W_d$)
Hsu (2004)	$C_d = 0.0036$

Efecto del barómetro invertido

Para el cálculo de este término se tiene en cuenta lo siguiente:

$$S_{\Delta P} = P_a / 100 \quad (7)$$

Donde: P_a : diferencia de presión atmosférica en el punto de evaluación ante la afectación de un ciclón tropical, con respecto a un valor normal; para el caso de este trabajo, se consideró como presión normal 1013 hPa.

Condición inicial

Se consideró que el valor del nivel del mar en la costa es igual al generado por el efecto del barómetro invertido.

Algoritmo para la determinación de zonas afectadas por inundaciones costeras

La frontera costera puede tratarse como una superficie de contacto tierra-agua, es decir, una frontera móvil de celdas que pueden ser inundadas por la marea de tormenta y secadas cuando el agua retrocede. Este método es adecuado con miras a pronósticos de alta resolución, así como el análisis de niveles de inundación, para el estudio de la surgencia ciclónica y para la planeación costera.

El algoritmo utilizado en este estudio se basa en una modificación al método de mojado y secado

propuesto por Hubert y McInes (1999), dependiendo solo de la altura de la superficie del mar en relación con la topografía, y a partir de aquí se definen las celdas inundadas o secas en los puntos de tierra adyacentes. El método original también tiene en cuenta la distancia recorrida sobre la línea de costa, basándose en la velocidad de la corriente más próxima a esta, pero para este trabajo se consideró nula la componente normal a la costa, a la manera descrita por Falconer y Owens (citados en Hubert y McInes, 1999).

Desarrollo numérico

Una vez creado el diseño teórico del modelo y analizados todos los términos de la ecuación (10), se implementaron las herramientas básicas para la lectura de los datos necesarios y se procedió a programar el modelo en FORTRAN 90.

Para la solución de la ecuación (1) se utilizó un método iterativo con la condición de parada $Error = 10^{-15}$.

Los valores de surgencia calculados en los puntos de línea costera se almacenan en diferentes ficheros y los mapas de cada hora del pronóstico son creados en MATLAB.

Resultados. Estudio general. Tensión superficial del viento

Se realizó un estudio de sensibilidad del modelo de surgencia para las cuatro parametrizaciones del coeficiente de arrastre del viento C_d . Los valores de surgencia calculados para el coeficiente propuesto por Garratt (1977) son los que mejor se aproximan a los reportados para algunos de los ciclones estudiados, como bien puede apreciarse en la tabla 2. La columna *Zona* representa donde se localizaron los valores de surgencia reportados, que se muestran en la segunda columna; en las demás columnas se observan los valores de surgencia calculados por el modelo dinámico para las diferentes parametrizaciones utilizadas en este trabajo.

TABLA 2

Comparación entre los valores de surgencia calculados con las diferentes parametrizaciones del coeficiente de arrastre y los valores reales reportados para algunos de los ciclones estudiados

Ciclón tropical	Zona	Valor reportado (m)	Garratt (m)	Geernaet (m)	Hsu (m)	Van Dorn (m)
Iván (13/09/2004)	La Coloma-Cabo San Antonio	1.8-3.7	1.00-3.00	2.00-9.00	1.05-3.10	0.50-1.00
Wilma (22/10/2005)	Playa Guanímar	1.00	0.50-1.00	1.00-1.50	1.10-1.42	0.20-0.53
	Playa Cajío y Batabanó	1.50	1.00-1.45	1.00-2.00	1.00-1.60	0.30-0.60
Wilma (24/10/2005)	Playa (CH)	1.53	1.45-1.51	3.00-3.50	1.30-1.55	0.10-0.35
Gustav (30/08/2008)	Cienfuegos	1.00	1.00-2.00	3.00-4.00	1.00-2.00	0.20-0.45

Influencia de la batimetría

El cálculo de la surgencia en este modelo depende, entre otras variables, de la profundidad del mar en la posición donde se encuentra situado el centro del ojo del ciclón. Los resultados obtenidos en el pronóstico de surgencia para todos los casos de estudio que corresponden a diferentes profundidades del mar concuerdan con la teoría sobre la influencia de la batimetría en la amplificación de la onda de surgencia (Jelesnianski, Chen y Shaffer, 1992). Para el estudio general de esta variable se agruparon, convenientemente, los casos de estudios en cuatro rangos de diferentes profundidades significativas. Los resultados obtenidos indican que, cuando el centro del ciclón se encuentra sobre tierra, los valores máximos de surgencia alcanzan 0.45 m y los valores medios están sobre 0.14m, y son determinados, en esencia, por el efecto de Ekman. La profundidad más favorable para la amplificación de la onda de surgencia es entre 0 m y 35 m, y, en promedio, puede alcanzar una magnitud máxima de 1.90 m y un valor medio de 0.47 m, donde el arrastre directo del viento es el factor determinante en la magnitud de la surgencia. A partir de estas profundidades, los valores máximo y medio de la surgencia disminuyen puesto que la onda ya no experimenta una fuerte interacción con el fondo marino, por lo cual tiende a conservar su energía interna. La influencia de la batimetría en la magnitud de la surgencia puede observarse en la figura 2:

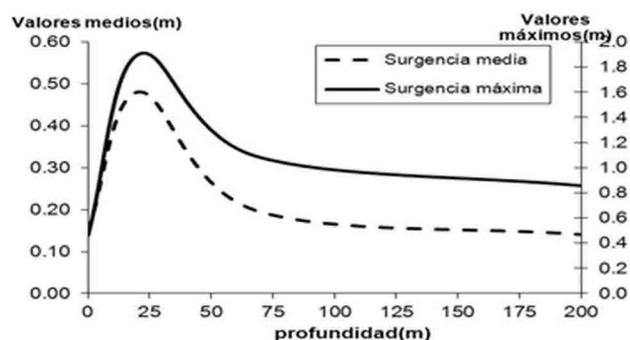


Fig. 2 Comportamiento general de las surgencias máxima y media en relación con la profundidad en el ojo del ciclón tropical.

Influencia del arrastre del viento, el transporte de Ekman y el efecto de barómetro invertido

Un estudio general sobre el aporte de cada uno de estos términos con respecto a los valores máximos y medios de surgencia, indica que el arrastre del viento es la componente más importante en los valores máximo y medio de la surgencia para todos los casos analizados (Fig 3), alcanzando 83 % para los valores máximos

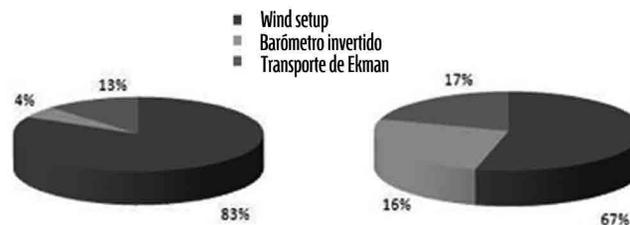


Fig. 3 Aporte (%) de los valores promediados de arrastre del viento, transporte de Ekman y efecto de barómetro invertido correspondientes al máximo (izquierda) y medio (derecha) de surgencia.

(izquierda) y 67 % para los medios (derecha). Por otra parte, el transporte de Ekman constituye el segundo término que más aporta a la magnitud del nivel del mar en la costa, con 13 % para los valores máximos y 17 % para los medios, lo cual indica que es un elemento muy importante. Sin embargo, para el pronóstico de surgencia en la línea costera, muchos de los modelos dinámicos unidimensionales que en la actualidad se utilizan solo consideran el aporte del arrastre del viento y el efecto del barómetro invertido, y omiten la acción de la fuerza de Coriolis en el flujo paralelo a la costa, y esta omisión podría ser una fuente de errores.

Influencia del radio de vientos máximos de los ciclones tropicales en el valor de la surgencia

A partir de un análisis del comportamiento de la surgencia pronosticada con relación a los valores de los radios de vientos máximos para cada uno de los ciclones

tropicales estudiados, se elaboró la figura 4a, donde se aprecia que las mayores surgencias ocurren en un rango de radio de vientos máximos de 10 km y 40 km. A partir de 40 km de radio comienzan a disminuir las fluctuaciones, sí como los valores de las surgencias máxima y media. La figura 4b muestra el comportamiento general de los valores máximo y medio, promediados para cada rango de valores de radio (10 km y 40 km, 40 km y 70 km, 70 km y 100 km, 100 y 130 km):

Influencia de la presión mínima central en el valor de la surgencia

Se graficaron los valores de surgencias máxima y media correspondientes a las presiones mínimas centrales en todos los casos de estudio para todas las horas de pronóstico (Fig. 5a y b). Se seleccionaron tres rangos de presiones en los cuales la surgencia presenta comportamientos similares, y se estudió su conducta general en función de la presión central de cada ciclón,

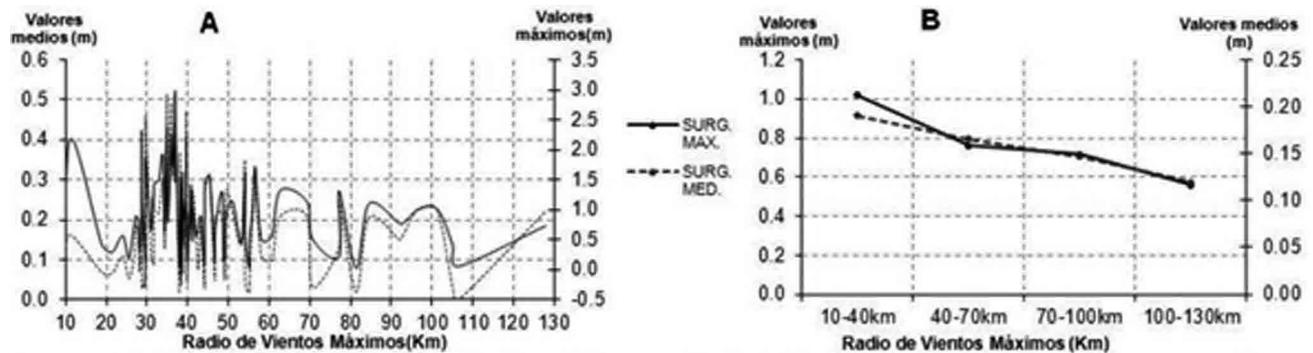


Fig. 4 Comportamientos particular (a) y general (b) de las surgencias máxima y media en relación con el radio de vientos máximos.

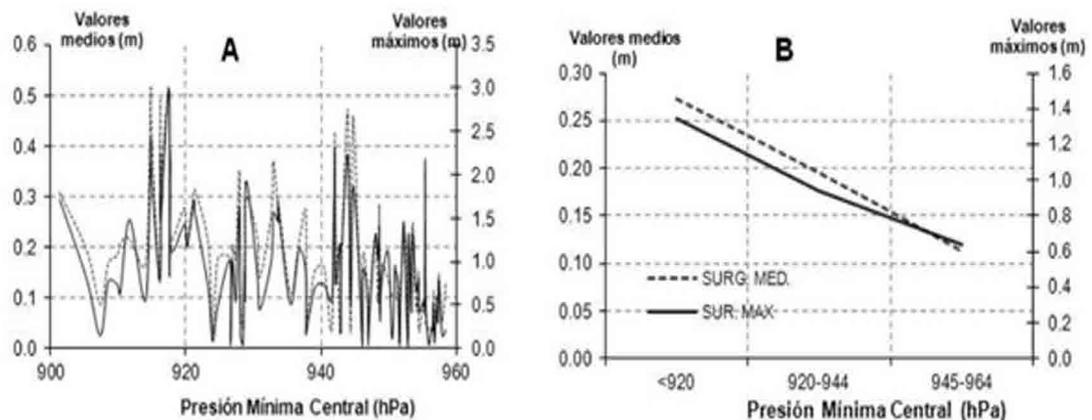


Fig. 5 Comportamientos particular (a) y general (b) de las surgencias máxima y media en relación con la presión mínima central.

según la escala Saffir-Simpson (Fig. 5b). Es importante aclarar que estos valores de surgencia no están mayormente determinados por el efecto del barómetro invertido, sino por la acción de arrastre del viento.

Influencia del viento máximo en el valor de la surgencia

Como era de esperarse, los valores máximos de surgencia se dieron bajo las condiciones de valores máximos de viento, con una tendencia a aumentar en la medida que lo hace también la velocidad del viento (Fig. 6a); a partir de 130 km/h, los valores de surgencia alcanzan magnitudes significativas. Asimismo, se observan marcadas variaciones en la magnitud de la sobreelevación entre 150 km/h y 165 km/h, lo que permitió estudiar el comportamiento general de las surgencias máxima y media promediadas para un rango específico de vientos máximos (Fig. 6b).

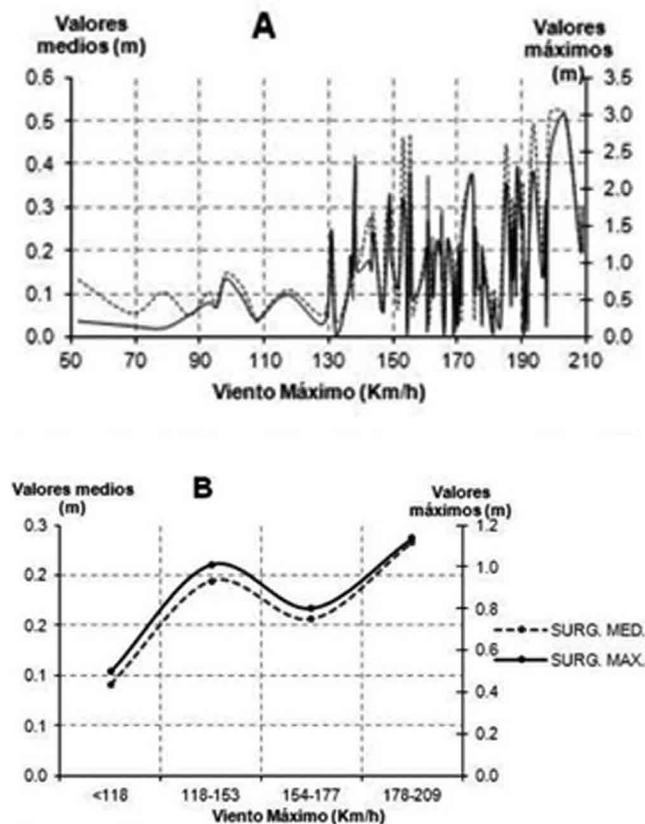


Fig. 6 Comportamientos particular (a) y general (b) de las surgencias máxima y media en relación con el viento máximo.

Este resultado infiere que la velocidad del viento es un factor importante en la magnitud de la surgencia, pero no determinante, puesto que también influyen las otras variables analizadas.

Influencia de la velocidad de traslación de los ciclones tropicales

Una de las variables que influye en el desarrollo de la surgencia —la cual no se tuvo en cuenta en el modelo de este trabajo— es la *persistencia del viento*, o sea, el tiempo que este actúa con una velocidad y dirección prácticamente constantes sobre un área determinada. Esta puede analizarse indirectamente a partir del estudio de la velocidad de traslación de los ciclones, donde velocidades bajas inducen mayores valores de surgencia, puesto que más tiempo está actuando el viento sobre la misma área de la superficie del mar, y ello favorece un mayor arrastre de agua hacia la costa.

A partir del análisis de la surgencia y la velocidad de traslación de los ciclones estudiados, se lograron los resultados que muestra la figura 7.

Se observa que los mayores valores de surgencias máxima y media promediados por intervalos se observan para movimientos muy lentos de los ciclones estudiados, y disminuyen a medida que estos se desplazan más rápidamente.

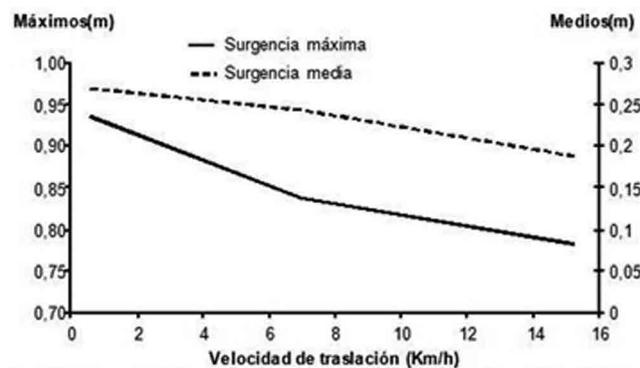


Fig. 7 Comportamiento general de las surgencias máxima y media en relación con la velocidad de traslación de los ciclones tropicales.

Ecuación de emergencia para el pronóstico de la altura máxima de surgencia de huracanes en la costa

A partir del estudio del comportamiento de la surgencia máxima en función de la presión mínima central, el radio de vientos máximos, los vientos máximos, y la velocidad de traslación de los ciclones estudiados, se formuló una ecuación de emergencia que relaciona los términos antes mencionados:

$$S_x = Ln \frac{V_x^\alpha}{R_x^\beta} + \gamma P_c^\delta + (3.0e^{\lambda V_t}) - 0.85385 \quad (8)$$

Donde: S_x : surgencia máxima (m), V_x : viento máximo (km/h), R_x : radio de vientos máximos (km), P_c : presión mínima central (mb) y V_t : velocidad de traslación (km/h).

TABLA 3
Coeficientes de la ecuación de emergencia

α	0.7373
β	0.474475
γ	1.28405×10^{-23}
δ	7.8990
λ	-0.0765

La figura 8 representa los valores de surgencia calculados a partir de la ecuación de emergencia variando: P_c entre 900 y 1 000 hPa, V_x entre 100 y 260 km/h, R_x entre 10 km y 100 km, para $V_t = 0.0$ km/h.

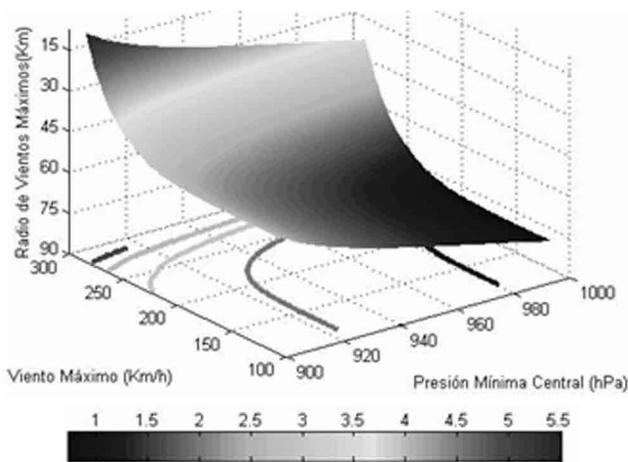


Fig. 8 Valores de surgencia calculados al variar la presión central, el viento máximo, el radio de vientos máximos y considerando la velocidad de traslación igual a 0.0 km/h.

Se aprecia que los valores máximos se registran para las condiciones de mayores intensidades de los ciclones y tienden a disminuir la surgencia a medida que lo hace el viento máximo con el incremento de la presión mínima y el radio de vientos máximos.

Estudio de casos

IVÁN 2 (24 septiembre de 2004):

Un estudio similar al que se presentará a continuación se realizó con todos los huracanes seleccionados.

CORRIDA (13 de septiembre de 2004, 00 horas):

El pronóstico se realizó cuando Iván se encontraba al sur de la Isla de la Juventud.

La figura 9 muestra el comportamiento de los valores máximo y medio de surgencia para cada hora del pronóstico, así como la influencia del arrastre del

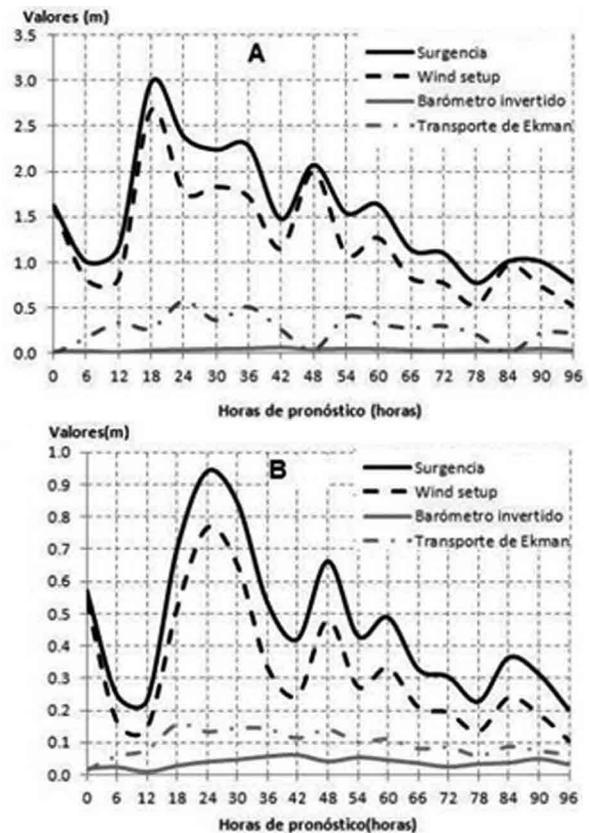


Fig. 9 Valores máximos (a) y medio (b) en relación con los plazos de tiempo.

viento, el transporte de Ekman y el barómetro invertido en su magnitud. Los valores máximo y medio de surgencia responden, fundamentalmente, al arrastre directo del viento, aunque no debe omitirse el aporte del transporte de Ekman.

Surgencias máxima y media en relación con variables fundamentales

A partir del cálculo de la surgencia y la influencia de la presión mínima central del ciclón, puede concluirse que los valores mayores se produjeron para las condiciones de valor menor para la presión mínima (entre 914 y 918 hPa), con una tendencia a disminuir en la medida que aumenta la presión central (Fig. 10a). En el caso del viento máximo (Fig. 10b), se observa el aumento de los valores de surgencia a medida que se incrementa la velocidad del viento. En relación con el plazo de pronóstico de mayor velocidad del viento, hay una disminución en el valor de la surgencia, que alcanzó 1.17 m (para el máximo) y 0.24 m (para el medio), instante en que el centro de Iván se pronosticó en los 20.2° de latitud norte y 83.8° de longitud oeste, posición algo distante de las costas del sur de Cuba, donde la influencia de sus campos de presión y viento no era muy manifiesta. La figura 10c muestra la relación de la sobre-elevación del nivel del mar con los valores de radio de vientos máximos, mientras que la figura 10d presenta los valores máximo y medio de surgencia pronosticada, considerando el arrastre del viento y barómetro invertido, para un caso, y estos dos y el transporte de Ekman, para el otro caso. Como se aprecia, el efecto de Ekman tiene un aporte significativo en la magnitud de la surgencia (hasta 0.50 m en los valores máximos para las 18 horas de pronóstico), lo cual demuestra que es un término que ha de tenerse en cuenta a la hora de realizar el pronóstico de surgencia en las costas de Cuba.

La figura 10e muestra el comportamiento de la surgencia media en función de la distancia prome-

dio desde la pared del ojo del ciclón hasta la costa. Se observa una tendencia al aumento en la medida que lo hace la distancia, hasta alcanzar un punto crítico a partir del cual comienza a disminuir nuevamente la surgencia media. Esta conducta irregular explica que cuando el ciclón se acerca a tierra disminuye la distancia sobre la cual el viento actúa arrastrando agua hacia la costa, y en la medida que el ciclón se aleja aumenta esta distancia, pero disminuyen los efectos de los campos de presión y de viento.

A partir del *Resumen de la temporada ciclónica para 2004* que se realiza en el Instituto de Meteorología (Ballester y Rubiera, 2005) para el día 13 de septiembre en la costa sur de la Isla de la Juventud y las playas que se encuentran en la zona este, se produjeron inundaciones costeras, al igual que en las áreas bajas de la costa sur de la región occidental de Cuba.

La altura de la surgencia reportada para la costa sur de Pinar del Río, desde La Coloma, hasta el Cabo de San Antonio, estuvo en el rango de 1.8 m a 3.7 m, correspondiéndole el valor máximo a La Bajada, mientras que los valores pronosticados por este modelo para la propia zona oscila entre 1.00 m y 3.08 m, con el valor máximo pronosticado en los 21.77° de latitud norte y 84.52° de longitud oeste (Fig. 11).

En el pronóstico de inundaciones, las zonas calculadas coinciden con las reportadas en el resumen, lo cual indica que el modelo define muy bien las áreas de mayor peligro ante las inundaciones costeras, a partir del cálculo de la surgencia en la costa (Fig. 12).

La tabla 4 presenta una comparación entre los valores pronosticados por el MONSAC 3 y el modelo de este trabajo, con los reportados en el *Resumen de la temporada ciclónica 2004* (Ballester y Rubiera, 2005) para este caso de estudio. Como se aprecia, los valores pronosticados por este último modelo se aproximan mejor a los reales que los del MONSAC 3; además, los errores absolutos y relativos medios oscilan alrededor de 0.30 m y 12 %, respectivamente, para el MODSUR, y 1.8 m y 92 %, para el MONSAC 3, respec-

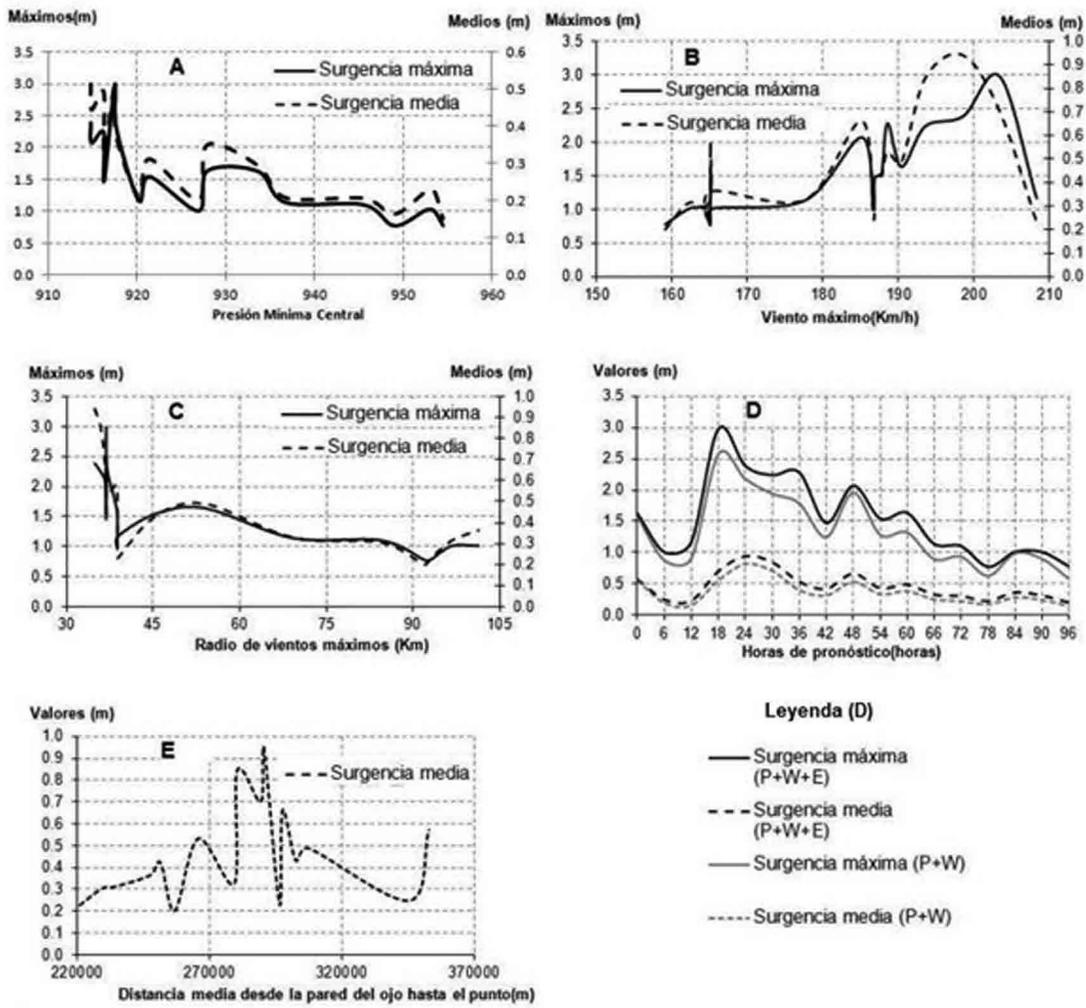


Fig 10 Surgencias máxima y media en relación con: la presión mínima central (a), el viento máximo (b), el radio de vientos máximos (c). Importancia del efecto Ekman (d). Surgencia media en relación con la distancia de la pared del ojo hasta la costa (e).

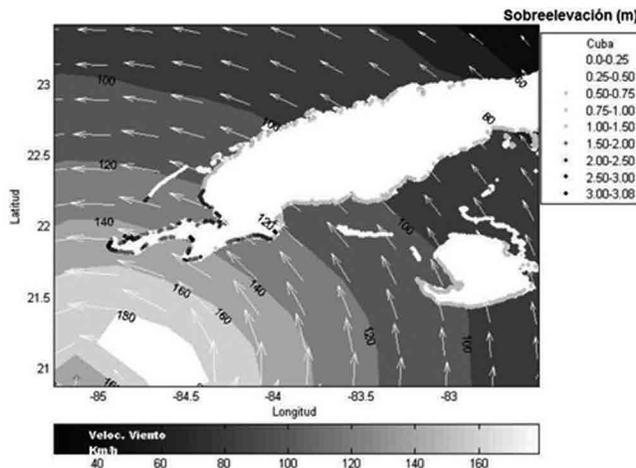


Fig. 11 Pronóstico de sobreelevación del nivel del mar en la costa, a las 18 horas.

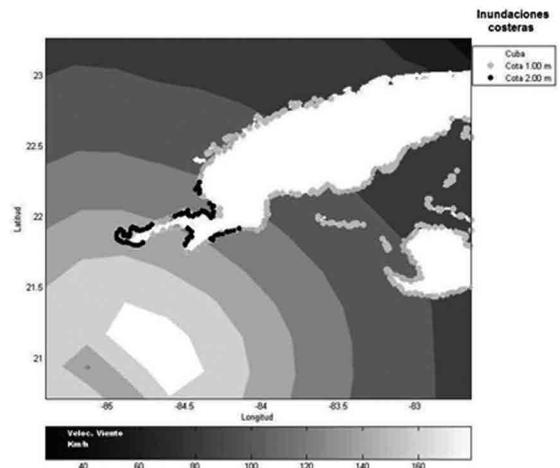


Fig. 12 Pronóstico de inundaciones costeras, a las 18 horas.

tivamente (Tabla 5). Este modelo propuesto representa los valores con una mejor resolución (1 km) y permite identificar las zonas más desfavorables para la ocurrencia de inundaciones costeras; asimismo, asimila las salidas numéricas de cualquier modelo atmosférico, por lo que se logra mejorar el pronóstico de surgencia de huracanes en las costas de Cuba.

Tabla 4

Surgencias pronosticadas por MONSAC3 y MODSUR para el huracán Iván, así como algunos valores reportados para este caso de estudio

Ciclón tropical	Zona	MODSUR (m)	Valor reportado (m)	MONSAC3 (m)
Iván 13/09/2004	Playa Bailén	2.0	1.8	4.8
	Boca Galafre	2.0	1.8	3.6
	Playa Cortés	1.5	1.8	4.2
	La Bajada	3.08	3.7	2.8
	Playa María la Gorda	2.7	2.5	1.6

Tabla 5

Comparación de los errores absolutos y relativos entre MODSUR y MONSAC 3 para el huracán Iván

Ciclón tropical	Zona	Errores absolutos		Errores relativos	
		MODSUR (m)	MONSAC 3 (m)	MODSUR	MONSAC 3
Iván 13/09/2004	Playa Bailén	0.2	3.0	0.11	1.66
	Boca Galafre	0.2	1.8	0.11	1.0
	Playa Cortés	0.3	2.4	0.16	1.33
	La Bajada	0.62	0.9	0.17	0.24
	Playa María la Gorda	0.2	0.9	0.08	0.36
Valor promedio		0.30	1.8	0.12	0.92

Conclusiones

A partir del análisis de los resultados obtenidos en este trabajo y presentados en el capítulo anterior, se arriba a las conclusiones siguientes:

1. El modelo numérico elaborado mejora el pronóstico de surgencia ciclónica en las costas de Cuba, pues-

to que los valores calculados de sobreelevación del mar se aproximan a los reportados en los *Resúmenes de temporadas ciclónicas* de 2004, 2005 y 2008, con errores relativos de menos de 17 %, mientras que el MONSAC 3 mostró errores relativos superiores a 90 %, para los casos estudiados.

- El modelo de surgencia puede asimilar las salidas numéricas de cualquier modelo de pronóstico atmosférico, así como también puede utilizarse para predecir la surgencia de huracanes en otras regiones costeras. Además, puede ajustarse con modelos de oleaje con vistas a obtener una salida más completa de sobreelevación del nivel del mar.
- El modelo muestra una sensibilidad manifiesta al coeficiente de arrastre, y la selección de una u otra parametrización para el mismo puede variar, como mínimo, en ± 0.50 m el valor pronosticado de la surgencia. Los resultados que mejor se aproximan a los reportados en los *Resúmenes de temporadas ciclónicas* son los calculados con el coeficiente de Garratt.
- De los términos que intervienen en el cálculo de la surgencia ciclónica en las costas de Cuba, el arrastre del viento es el factor que más aporta a los valores máximo y medio de la sobreelevación (con 83 % y 67 %, respectivamente), seguido del transporte de Ekman (con 13 %, para los valores máximos, y 17 %, para los valores medios), lo cual evidencia la importancia de este efecto en las zonas costeras. Por último, el aporte del efecto de barómetro invertido sobre las surgencias máxima y media (con 4 % y 16 %, respectivamente).
- A partir del análisis de la surgencia con las variables presión mínima central, viento máximo, radio de vientos máximos y velocidad de traslación de los ciclones, se concluye que los mayores valores de sobreelevación se obtienen para las intensidades mayores y para movimientos de desplazamiento lento de los ciclones estudiados.
- El modelo desarrollado muestra un comportamiento regular de la surgencia con la distancia

desde la pared del ojo del ciclón hasta la costa, y evidencia la existencia de un valor crítico de esta distancia, que corresponde a un punto de inflexión donde se alcanza el máximo de surgencia.

7. Las zonas de mayor peligro de inundaciones costeras pronosticadas con el método propuesto coinciden con las reportadas en los *Resúmenes de temporada ciclónica*, lo que indica que el modelo define muy bien las áreas de mayor peligro de inundaciones costeras.
8. Las salidas del modelo de surgencia implementado en este trabajo aportan datos valiosos para la prevención y la toma de decisiones estratégicas ante la presencia de un ciclón tropical.

Recomendaciones

Para aclarar algunas de las interrogantes que no tuvieron respuestas en este trabajo, y con vistas a realizar una evaluación detallada del desempeño del modelo, se plantean las recomendaciones siguientes:

1. Extender el estudio realizado en este trabajo para un mayor número de casos de estudio.
2. Realizar un estudio más detallado sobre la relación de la surgencia media con la distancia promedio desde la pared del ojo del ciclón hasta la costa, para analizar si se mantiene el mismo comportamiento de la distancia crítica en la cual se obtiene el máximo de sobre elevación del nivel del mar, y encontrar un valor más exacto del punto de inflexión.
3. Mejorar el cálculo de la distancia desde la pared del ojo del ciclón hasta la costa, puesto que, en esta aproximación, es estrictamente válida siempre que se determine sobre el mar; cuando existen porciones de tierra pequeñas, hay que tomar ciertas consideraciones adicionales. Lo ideal sería incluirlas en este modelo de surgencia.
4. Insertar en futuros estudios el pronóstico de surgencia de huracanes en otras regiones costeras que

sean afectadas por ciclones tropicales, y realizar la respectiva comparación de los resultados.

5. Extender el uso de este modelo de surgencia utilizando como proveedor de datos otro modelo numérico atmosférico de mesoescala.
6. Ajustar las salidas numéricas de un modelo de oleaje al cálculo de surgencia, lo cual constituiría un resultado más completo para el pronóstico de la sobre elevación del nivel del mar.
7. Implementar, y establecer como operativa, una aplicación basada en el modelo de surgencia que sirva de herramienta de pronóstico a partir de la próxima temporada ciclónica.

Referencias bibliográficas

- Adams, WC 1993, Measurement of breathing rate and volume in tourinely performed activities: Final Report, California Air Sources Board, Contract No. A033-205, June 1993
- Álvarez, O 1991, Diagnostico y pronóstico de la contaminación del aire por SO₂ y H₂S. Modelación con consideraciones de terreno plano, tesis, Universidad de La Habana.
- Álvarez, R y Álvarez, L 2000, 'El efecto de la acumulación y su influencia en el patrón de dispersión de contaminantes', Revista Brasileña de Meteorología, vol.15, no.1, pp.103-111.
- Berlyand, ME 1975, Sobrienmienniie problemi atmosfiernoi diffuzii y zagriasnieniya atmosferi, Gidrometeoizdat Leningrad.
- El-Samara, GH & Abdel Salam, MS 1984, 'Environmental pollution impacts of industrial activities in Egypt', Egyptian Journal of Occupational Medicine, vol. 8, no. 114.
- EPA 1972, Factores de Emisiones y AP 42: compilación de Factores de emisión de contaminantes del aire.
- Fustel, EA y Martínez, T 2005, 'Evaluación en cinco ciudades españolas del impacto en la salud de la contaminación atmosférica, por partículas', Re-

- vista Española de Salud Pública, vol. 79, no. 002.
- Korc, ME 1988, Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire: Manual de autoinstrucción adaptado del manual de autoinstrucción “SI: 049 Basic Air pollution meteorology course” del Instituto de Capacitación en la Contaminación del Aire de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA, 2nd. edn.
- Layton, DW 1993 ‘Metabolically consistent breathing rates for use in dose assessments’, *Health Phys*, vol. 64, no. 1, pp. 23-36.
- López, C 1984, Factores Meteorológicos de la Contaminación Regional del Aire en Cuba, Editorial Academia, La Habana.
- Martínez, CL 2001, Valores medios mensuales de algunas variables meteorológicas y rosa de los vientos de las provincias habaneras, Matanzas, Holguín, Santiago de Cuba, Guantánamo e Isla de la Juventud, INSMET-AMA- CITMA, La Habana.
- Nakai, S, Nitta, H 1995, ‘Respiratory health associated with exposure to automobile exhaust. II. Personal NO₂ exposure levels according to distance from the roadside’, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, vol. 5, pp. 125-136.
- CEN 1986, Norma Cubana 93-02-104: Atmósfera, Reglas para la vigilancia de la calidad del aire, La Habana.
- CEN 1987, Norma Cubana 93-02-102: Atmósfera, Términos y Definiciones, La Habana.
- Nitta, H, Sato, T 1993, ‘Respiratory health associated with exposure to automobile exhaust. I. Results of cross-sectional studies in 1979 1982, and 1983’, *Archives of Environmental Health*, vol.48, pp. 53-58.
- Ono, M & Nitta, H 1990, ‘Epidemiological studies of air pollution and health effects in area near roadways with heavy traffic in Tokyo’, *Japanese Journal of Public Health*, vol. 37, pp. 321-332.
- Organización Panamericana de la Salud 2003, Metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados.
- Sánchez, P, Cuesta, O 1992, ‘Smog en la ciudad de La Habana: situación meteorológica asociada’, *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 5, no. 1, pp.3-8.
- Sánchez, P 2001, Evaluación de la presencia del SO₂ en la atmósfera en Cuba, sus causas y efectos potenciales, tesis, Universidad de la Habana.
- Sánchez, P, Wallo, A, Roque, A, Cuesta, O, Collazo A.y Echevarria, E 2003, Principales características de la calidad del aire en el municipio de la Habana Vieja. Proyecto 003079 para la evaluación del medio ambiente atmosférico en el municipio de la Habana Vieja y su repercusión en la salud, AMA, CITMA.
- USEPA 1991, Risk Assessment for Toxic Air Pollutants: A Citizen’s Guide. EPA 450/3-90-024, March.
- World Health Organization, Regional Office for Europe 1999a, Air Quality Guidelines for Europe, WHO Regional Publications, European Series, Copenhagen [in press].
- (Octubre 4, 2002). Contaminación Ambiental, Santo Domingo, República Dominicana UASD.