

Desarrollo y Calibración de un Modelo para la Determinación del Campo de Velocidades de Vientos Huracanados en la Península de Yucatán

Development and Calibration of a Model for the Determination of Hurricane Wind Speed Field at the Peninsula of Yucatan

L.E. Fernández-Baqueiro

*Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México.
E-mail: luis.fernandez@uady.mx*

J.L. Varela-Rivera

*Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México.
E-mail: vrivera@uady.mx*

E.J. Félix-Solís

*Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México.
E-mail: efelix82@hotmail.com*

(Recibido: agosto de 2006; aceptado: septiembre de 2008)

Resumen

En este trabajo se desarrolla un modelo para determinar el campo de velocidades de viento que producen los huracanes al pasar por la Península de Yucatán. Las variables del modelo son calculadas empleando ecuaciones desarrolladas recientemente, que incluyen nuevos avances de la meteorología. Se describen los pasos contenidos en el modelo, los cuales han sido implementados en un programa de cómputo para sistematizar y facilitar su uso. El modelo y el programa son calibrados empleando dos bases de datos; la primera incluye las trayectorias y velocidades de viento máximas de los huracanes; la segunda los registros de velocidades de viento obtenidas en Estaciones Meteorológicas Automáticas del Servicio Meteorológico Nacional. La primera base de datos alimenta al modelo para que éste genere el campo de velocidades de vientos huracanados. Los resultados del modelo son comparados con los registros de la segunda base de datos. El modelo se calibra, por medio del ajuste del parámetro B del perfil radial de presiones de Holland, para tres registros de huracanes: Isidoro, Emily y Wilma. Se concluye que el valor del parámetro B de 1.3 ajusta de manera global los tres registros de huracanes y que el modelo desarrollado es capaz de reproducir satisfactoriamente los registros de velocidades de viento.

Descriptores: Huracán, campo de velocidades de vientos huracanados, registros de velocidades de viento, perfil radial de presiones de Holland, Isidoro, Emily, Wilma

Abstract

In this work a model to calculate the wind speed field produced by hurricanes that hit the Yucatan Peninsula is developed. The model variables are calculated using equations recently developed, that include new advances in meteorology. The steps in the model are described and implemented in a computer program to systematize and facilitate the use of this model. The model and the program are calibrated using two data bases; the first one

includes trajectories and maximum wind velocities of hurricanes; the second one includes records of wind velocities obtained from the Automatic Meteorology Stations of the National Meteorology Service. The hurricane wind velocity field is calculated using the model and information of the first data base. The model results are compared with field data from the second data base. The model is calibrated adjusting the Holland's pressure radial profile parameter B ; this is carried out for three hurricane records: Isidore, Emily and Wilma. It is concluded that a value of B of 1.3 adjusts globally the three hurricane records and that the developed model is capable of reproducing satisfactorily the wind velocity records.

Keywords: Hurricane, hurricane wind speed field, wind velocity records, Holland's pressure radial profile, Isidore, Emily, Wilma

Introducción

La península de Yucatán ha experimentado el embate de numerosos huracanes de gran magnitud, por lo que la infraestructura civil debe ser diseñada estructuralmente para que sea capaz de resistir las acciones producidas por dichos eventos meteóricos. En el diseño estructural, se requiere conocer la máxima velocidad del viento a la cual estará sometida una estructura durante su vida útil, con el objeto de determinar los empujes que el viento produce sobre ella. Esta velocidad se puede determinar con base en modelos que reproduzcan el campo de velocidades de vientos huracanados y la historia de huracanes que han ocurrido en el área cercana al sitio de interés.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un modelo del campo de velocidades de vientos

huracanados y calibrarlo con registros de campo. El modelo desarrollado considera las principales variables que caracterizan a los huracanes (figura 1), tales como la velocidad superficial máxima V_{s-max} , el radio de velocidades máximas R_{max} , la velocidad de traslación V_t , la presión central P_o , la localización geográfica del ciclón (latitud y longitud), la relación entre velocidad superficial y velocidad a la altura gradiente H . Las expresiones empleadas para el cálculo de dichas variables están basadas en la literatura técnica reciente e incluyen los avances en el área de la meteorología. El modelo desarrollado se basa en el equilibrio de fuerzas a la altura gradiente y en el modelo propuesto por Holland en 1980. En la literatura técnica existen modelos que tienen bases teóricas similares al desarrollado en este trabajo, tales como el de Sánchez-Sesma *et al.* (1988), Simiu y Scanlan (1996), Vickery *et al.* (2000) y Mounton *et al.* (2005); sin

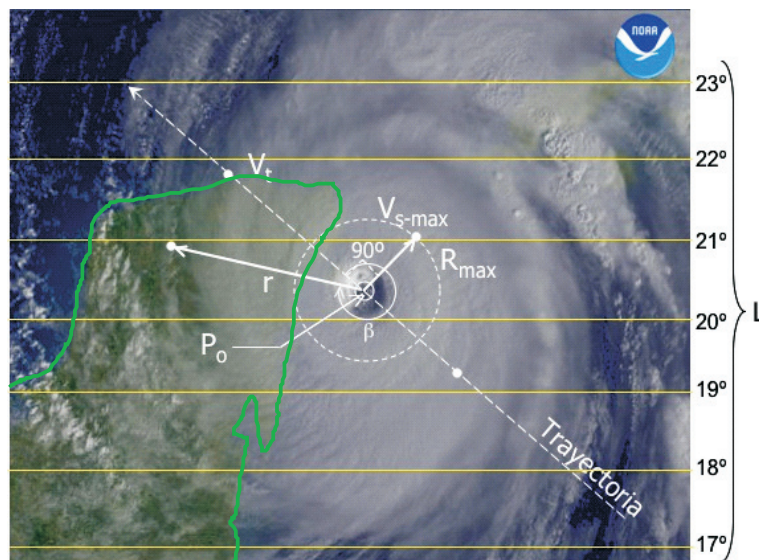


Figura 1. Principales variables de un huracán

embargo, en esta investigación se propone un modelo desarrollado *ad hoc* para la Península de Yucatán, el cual esté debidamente calibrado.

En este artículo se describen cada uno de los pasos contenidos en el modelo desarrollado. En cada paso se presentan las variables y las ecuaciones empleadas para su cálculo. Se realiza la calibración del modelo con base en las mediciones de campo obtenidas por las Estaciones Meteorológicas Automáticas del Servicio Meteorológico Nacional, localizadas en la Península de Yucatán. En la calibración se emplean registros obtenidos de los huracanes Isidoro en 2002, Emily y Wilma en el 2005.

Modelo del campo de velocidades de vientos huracanados

El modelo del campo de velocidades de vientos huracanados está basado en el equilibrio de fuerzas a la altura gradiente. El modelo requiere como datos de entrada la posición geográfica (latitud y longitud) y la velocidad superficial máxima del viento en un instante de tiempo. El modelo calcula la velocidad superficial del viento para cualquier sitio de interés. A continuación, se presentan los pasos contenidos en el procedimiento del modelo desarrollado.

Paso 1

Obtener los datos de entrada del modelo: velocidad superficial máxima V_{s-max} (m/s), velocidad de traslación V_t (m/s), latitud L (grados) y categoría del terreno donde se localiza el huracán.

Paso 2

Obtener la presión central superficial P_{os} (mb):

$$P_{os} = 1013 - \left(\frac{V_{s-max}}{12.016} \right)^{\frac{1}{0.5337}}. \quad (1)$$

En esta ecuación la velocidad superficial máxima está en nudos. La ecuación (1) fue propuesta por Landsea *et al.* (2003) y está basada en la regresión de datos medidos de 1970 a 1997, en distintas latitudes de la cuenca del Atlántico.

Paso 3

Calcular el radio de velocidades máximas R_{max} (km):

$$R_{max} = e^{[2.636 - 0.00005026(P_{os} - P_{os})^2 + 0.0394899(L)]}. \quad (2)$$

La ecuación (2) fue desarrollada por Vickery *et al.* (2000) y se caracteriza por tener un buen ajuste de los datos medidos en la cuenca del Atlántico, además de ser recomendada por Landsea *et al.* (2003) en el proyecto de reanálisis de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de América (NOAA).

Paso 4

Calcular, en el radio de velocidades máximas, el parámetro H (adimensional) que relaciona la velocidad gradiente (V_g) y la velocidad superficial (V_s):

$$\begin{aligned} H &= 0.865 && \text{si } R_n \leq 1 \\ H &= -0.02045R_n + 0.88545 && \text{si } 1 < R_n \leq 12 \\ H &= 0.64 && \text{si } R_n > 12 \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_n = \frac{r}{R_{max}}, \quad (4)$$

donde R_n es el radio normalizado y r es el radio (km). La ecuación (3) ha sido propuesta por los autores debido a que el valor de $H=0.865$ es ampliamente empleado en la literatura para el radio de velocidades máximas, (Simiu y Scanlan, 1996; Springall, 1974; Graham y Nunn, 1959).

El valor de H igual a 0.64 corresponde al inverso del factor de rugosidad y altura (F_{rz}), que establece la variación de la velocidad del viento con la altura z ; este factor se determina para la altura gradiente ($\delta = 315$ m) y el grado de rugosidad del terreno (categoría 2) indicados en el Manual de Diseño de Obras Civiles para el Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993). Con base en mediciones recientes obtenidas del reconocimiento aéreo de huracanes y el despliegue de sistemas de posicionamientos globales de la NOAA, Franklin *et al.*, (2000) ha determinado que el parámetro H es de 0.73 para la zona comprendida de la pared del ojo del huracán hasta 320 km del centro del huracán; este valor es aproximado por medio de la función lineal de la ecuación (3).

Paso 5

Calcular la velocidad gradiente máxima V_{g-max} (m/s):

$$V_{g-max} = \frac{V_{s-max}}{H}. \quad (5)$$

Paso 6

Calcular la presión central a la altura gradiente P_{og} (mb):

$$P_{og} = P_n - \frac{\rho R_n^B [V_{g-\max}^2 + (V_{g-\max} r a)]}{10.197 B e^{(-R_n^B)}}, \quad (6)$$

donde P_n es la presión atmosférica en la periferia del ciclón (mb); ρ es la densidad del aire ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$); B es el parámetro del perfil radial de presiones de Holland (adimensional) y a es la variable que considera el efecto de la velocidad de traslación (s^{-1}) de acuerdo con la ecuación:

$$a = f - \frac{V_t \sin(\beta)}{r}, \quad (7)$$

$$f = 2\omega \sin(L), \quad (8)$$

donde f es el parámetro de Coriolis (s^{-1}); β es el ángulo (grados) medido de la trayectoria del huracán hacia el sitio de interés, el cual toma el valor de 90° en este paso; ω es la velocidad angular de rotación de la tierra (rad/s). Se introduce la constante 10.197 en las ecuaciones (6) y (9), debido a las unidades empleadas, ya que 1mb equivale a $10.197\text{kg}/\text{m}^2$.

Paso 7

Obtener la velocidad gradiente (V_g) para los sitios de interés localizados a un radio (r) del centro del huracán y a un ángulo β respecto a la trayectoria del huracán (figura 1), empleando la ecuación:

$$V_g = -\frac{ra}{2} + \sqrt{\left(\frac{ra}{2}\right)^2 + \frac{10.197(P_n - P_o B)}{\rho} \left(\frac{1}{R_n}\right)^B e^{-\left(\frac{1}{R_n}\right)^B}} \quad (9)$$

Paso 8

Calcular el parámetro H para los diferentes sitios de interés empleando la ecuación (3).

Paso 9

Obtener la velocidad superficial (V_s) para los diferentes sitios de interés empleando la ecuación:

$$V_s = V_g H. \quad (10)$$

Paso 10

Calcular el factor de ráfaga $F_{t(J)/t(I)}$ (adimensional) que permite cambiar de un tiempo de promediación $t_{(I)}$ de la velocidad superficial a otro tiempo de promediación $t_{(J)}$ empleando la ecuación (11), que es función de la categoría del terreno donde se localiza el huracán.

$$F_{t(J)/t(I)} = \frac{F_{t(J)/t(3600)}}{F_{t(I)/t(3600)}}, \quad (11)$$

donde $F_{t(I)/t(3600)}$ y $F_{t(J)/t(3600)}$ es el factor de ráfaga del tiempo de promediación $t_{(I)}$ y del tiempo de promediación $t_{(J)}$, con respecto a un tiempo de promediación horario $t_{(3600)}$. Estos factores de ráfaga (adimensional) se calculan de acuerdo con la ecuación (12) y son función de la categoría del terreno donde se localiza el huracán (CFE, 1993):

$$F_{t(I)/t(3600)} = 1 - \left\{ 0.6226 [I_V]^{1.2716} \ln(t_{(I)} / t_{(3600)}) \right\} \quad (12)$$

$$I_V = \kappa \left(\frac{z}{\delta} \right)^\eta - \xi, \quad (13)$$

donde I_V es el índice de turbulencia (adimensional) calculado con la ecuación (13) y asociado a una velocidad media (km/h) promediada, considerando el intervalo $t_{(3600)}$; κ , η y ξ son constantes (adimensionales) que dependen de la turbulencia y rugosidad del sitio; δ es la altura gradiente (metros).

Paso 11

Calcular el factor de rugosidad $F_{r(N)/r(M)}$ (adimensional) que permite cambiar de la categoría del terreno donde se localiza el huracán $r_{(M)}$ a la categoría del terreno del sitio de interés $r_{(N)}$ (Simiu y Scanlan, 1996; CFE, 1993), empleando la ecuación:

$$F_{r(N)/r(M)} = \left(\frac{\delta_{r(M)}}{z_{r(M)}} \right)^{\alpha_{r(M)}} \left(\frac{z_{r(N)}}{\delta_{r(N)}} \right)^{\alpha_{r(N)}}, \quad (14)$$

donde α es una constante función de la categoría del terreno y de la estructura; δ es la altura gradiente, que es función de la categoría del terreno.

Paso 12

Calcular la velocidad superficial modificada por los factores de ráfaga y rugosidad $V_s(t_{(J)}, r_{(N)})$ para el sitio de interés, de acuerdo con la ecuación:

$$V_s(t_{(J)}, r_{(N)}) = F_{t(J)/t(I)} F_{r(N)/r(M)} V_s(t_{(I)}, r_{(M)}). \quad (15)$$

Los pasos contenidos en el procedimiento del modelo desarrollado se ilustran de forma esquemática en la figura 2.

Calibración del modelo

El modelo descrito en la sección anterior ha sido implementado en un programa de cómputo hecho en lenguaje Fortran para sistematizar los cálculos numéricos. Tanto el modelo, como el programa de cómputo, deben ser capaces de reproducir satisfactoriamente el campo de velocidades de vientos huracanados en la Península de Yucatán. Para este propósito se procede a realizar la calibración del modelo con base en información de las bases de datos del HURDAT y de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS). La primera base de datos contiene trayectorias y velocidades superficiales máximas de los ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico de 1851 a 2003 (Landsea *et al.*, 2003) y la segunda contiene mediciones meteorológicas, entre las cuales está la velocidad superficial máxima del viento, realizadas en Estaciones Meteorológicas Automáticas

recientemente instaladas por el Servicio Meteorológico Nacional (2005).

Las trayectorias y las velocidades superficiales máximas de la base de datos del HURDAT proporcionan los datos de entrada del modelo del campo de velocidades de viento huracanado (MCVVH) y del programa de cómputo. Se le indica al programa de cómputo la localización geográfica de las EMAS, se calculan las velocidades de viento para los sitios donde se localizan las EMAS empleando el programa del MCVVH y se comparan los resultados con los registros de las EMAS. La calibración del MCVVH se ha realizado para los tres últimos huracanes más intensos: Isidoro en 2002 y Emily y Wilma en 2005.

En la calibración del modelo se ajusta el parámetro B del perfil radial de presiones de Holland. En un primer análisis comparativo se asume un valor de B igual a uno en el MCVVH, el cual es un valor frecuentemente utilizado en la literatura técnica, y se compara con las mediciones de campo de las EMAS. Los resultados de este análisis se presentan en la figura 3, en la cual se grafican las máximas velocidades superficiales de las EMAS y del MCVVH en función del radio normalizado (R_n) para los huracanes Isidoro (2002), Emily (2005) y Wilma (2005). Se observa en esta figura que las máximas velocidades superficiales calculadas con el programa del MCVVH (marcadas con viñetas sólidas) son mayores que las velocidades medidas por las EMAS (marcadas con viñetas vacías) para la zona de mayor afectación contenida en una distancia radial de doce veces el radio normalizado.

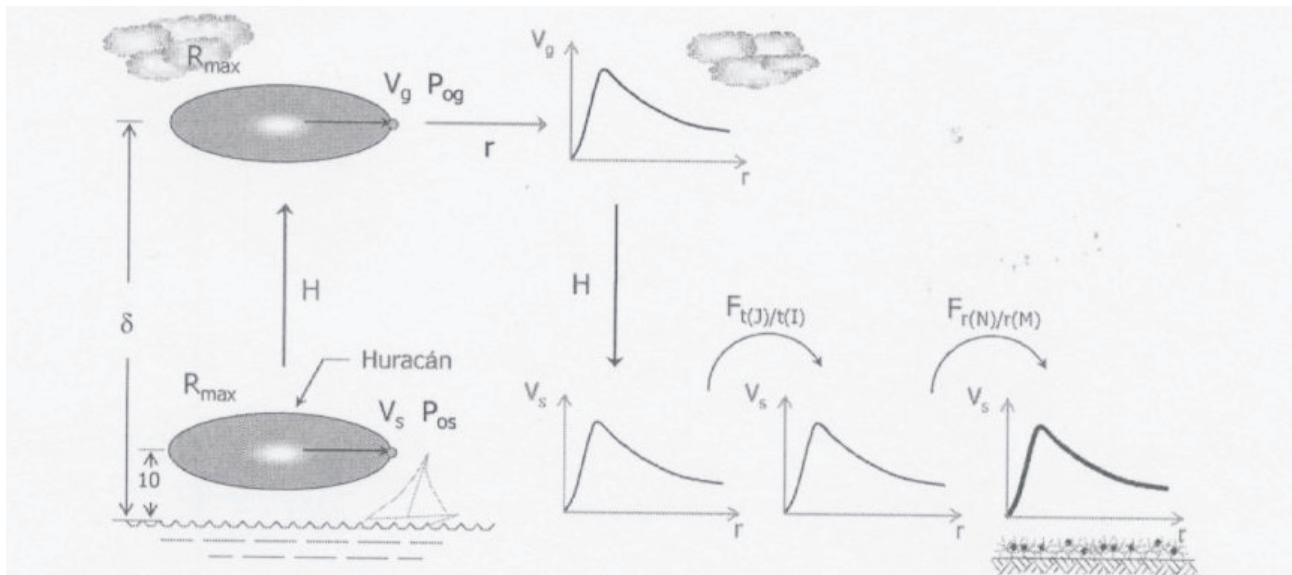


Figura 2. Esquema conceptual del modelo del campo de velocidades de vientos huracanados

Esto indica que emplear el MCVVH con un valor de $B=1$ es conservador, ya que sobreestima la magnitud en el campo de velocidades.

Para conocer el efecto del perfil radial de presiones de Holland se realiza un análisis de sensibilidad de dicho parámetro sobre el campo de velocidades calculado con el MCVVH. En la figura 4 se grafica la velocidad

superficial en función del radio para distintos valores del parámetro B , contenidos entre 0.8 y 1.6. En esta figura se grafican las velocidades generadas por un huracán con una velocidad superficial máxima de 198 km/h, correspondiente a un huracán categoría 4. Se observa que conforme aumenta el parámetro B , disminuye la magnitud en el campo de velocidades.

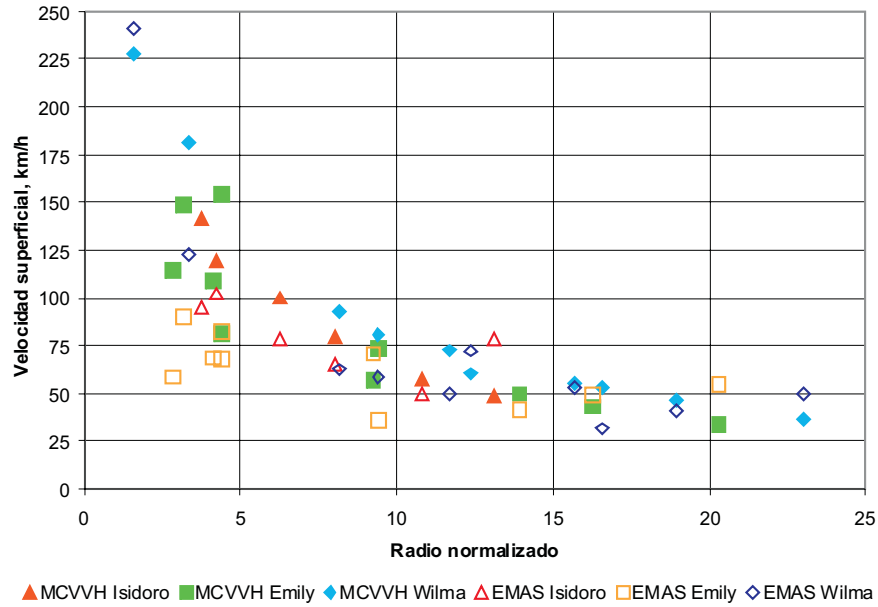


Figura 3. Velocidades superficiales máximas de viento de las EMAS y el MCVVH para los huracanes Isidoro, Emily y Wilma ($B = 1.0$)

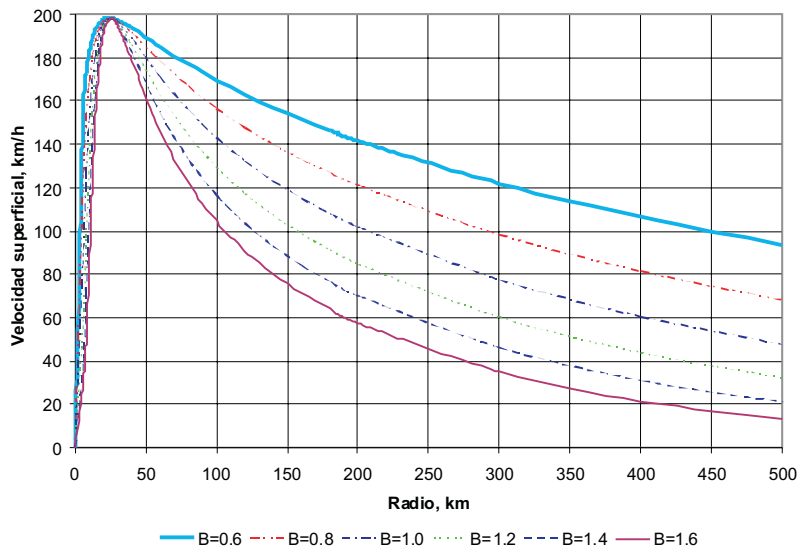


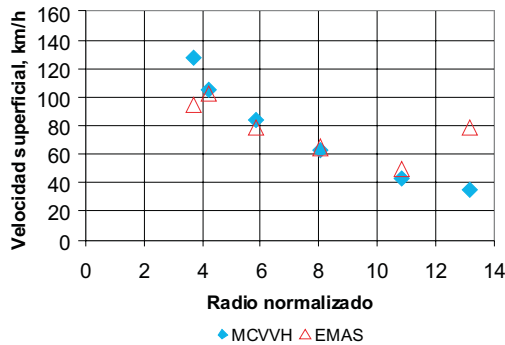
Figura 4. Efecto del parámetro B en el campo de velocidades

La calibración del MCVVH se realiza por medio del ajuste del valor del parámetro B , para lo cual se emplea el método de mínimos cuadrados. En la tabla 1 se presentan los resultados del ajuste del parámetro B para los huracanes Isidoro, Emily y Wilma, considerando los datos de los huracanes de manera individual y de manera agrupada (global). El ajuste global del valor del parámetro B es de 1.3 para los tres huracanes analizados. En esta tabla se puede observar que el ajuste individual del parámetro B para los distintos huracanes analizados arroja valores diferentes.

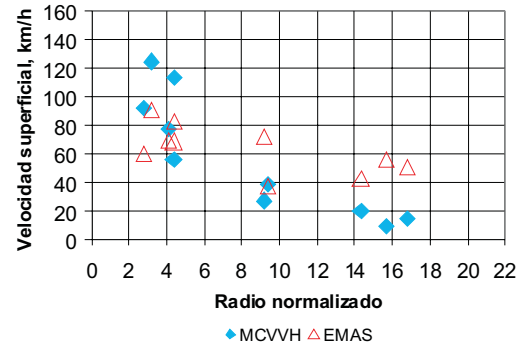
Tabla 1. Valores del parámetro B

Huracán	Parámetro B
Isidoro	1.20
Emily	1.52
Wilma	1.23
Global	1.30

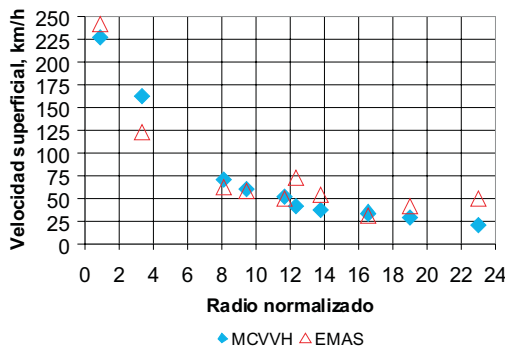
En la figura 5 se presentan las máximas velocidades superficiales registradas en las EMAS y las calculadas con el MCVVH, en función del radio normalizado. En las figuras 5(a), 5(b) y 5(c) se presenta el cálculo de las velocidades con el MCVVH considerando el parámetro B que mejor ajusta de manera individual a cada uno de los huracanes analizados. En la figura 5 (d) se presenta el resultado del MCVVH considerando el valor global del parámetro B igual a 1.3. Se observa en esta figura que las máximas velocidades superficiales calculadas con el modelo MCVVH (marcadas con viñetas sólidas) aproximan satisfactoriamente a las medidas en las EMAS (marcadas con viñetas vacías). Esta figura contrasta con la figura 3, en la que se observan mayores diferencias entre ambas velocidades considerando el parámetro B igual a 1.0. Adicionalmente, en la figura 5 se observa mayor dispersión entre las máximas velocidades superficiales de las EMAS y del MCVVH, cuando el radio normalizado es mayor a 12, que corresponde a la zona de menor afectación, ya que se experimentan velocidades superficiales menores de 70 km/h (correspondiente a tormenta tropical).



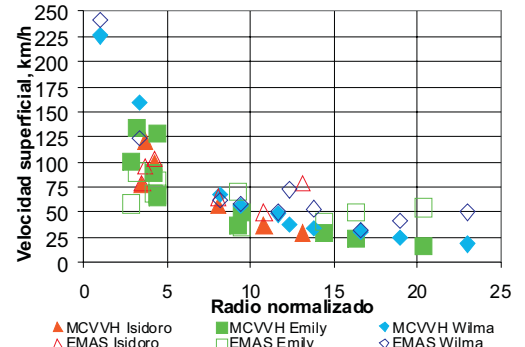
(a) Huracán Isidoro ($B=1.20$)



(b) Huracán Emily ($B=1.52$)



(c) Huracán Wilma ($B=1.23$)



(d) Huracanes Isidoro, Emily y Wilma ($B = 1.30$)

Figura 5. Máximas velocidades superficiales de las EMAS y del MCVVH

Conclusiones

En este trabajo de investigación se ha desarrollado un modelo del campo de velocidades de vientos huracanados para la Península de Yucatán. El modelo desarrollado ha sido calibrado empleando la base de datos del HURDAT y la de las Estaciones Meteorológicas Automáticas del Servicio Meteorológico Nacional. La calibración se ha realizado para los huracanes Isidoro en 2002 y Emily y Wilma en 2005. Se concluye que el modelo desarrollado arroja valores conservadores si se emplea un valor unitario del perfil radial de presiones de Holland (B); el modelo reproduce satisfactoriamente los registros de velocidades de vientos huracanados al emplear un valor de B igual a 1.3; sin embargo, es posible tener resultados del MCVVH que tengan un mejor ajuste con relación a las mediciones de campo si se emplean los valores individuales de B calculados en este trabajo.

Agradecimientos

El tercer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de sus estudios de posgrado. Se agradece a la Comisión Nacional del Agua delegación Yucatán y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán el apoyo brindado para la realización de la presente investigación.

Referencias

- CFE-Comisión Federal de Electricidad. *Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Viento*. Instituto de Investigaciones Eléctricas. México. 1993.
- Félix E. Modelación del campo de velocidades de vientos huracanados en la Península de Yucatán. Tesis (Maestría). México. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. 2006.
- Franklin J., Black M. y Valde K. [en línea] Eyewall wind profiles in hurricanes determined by GPS dropwind sondes. Hurricane Research Division, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory. 2000. Disponible en: <http://www.nhc.noaa.gov/aboutwindprofile.shtml>.
- Graham H. y Nunn D. Meteorological Considerations Pertinent to Standard Project Hurricane, Atlantic and Gulf coast of the United States. *National Hurricanes Research Project*. Reporte No. 33. E.U.A. 1959.
- Landsea Ch., Anderson C., Charles N., Clark G., Dunion J., Fernandez-Partagaz J., Hungerford P., Neumann Ch. y Zimmer M. [en línea] *Re-analysis Project: The Atlantic hurricane database Re-analysis Project documentation for 1851-1910 alterations and addition to the HURDAT database*. Hurricane Research Division, Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory. 2003. Disponible en: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/Documentation.html#Best%20Track%20Files>.
- Mouton F., Nordbeck O. y Peduzzi P. [en línea] *Cyclone Database Manager, United Nations Environment Programme (UNEP), Division of Early Warning and Assessment (DEWA), Global Resource Information Database (GRID)*. 2005. Disponible en: http://www.grid.unep.ch/product/publication/download/article_PREVIEW_TropCyclones.
- Sánchez-Sesma J., Aguirre J. y Sen Mihir Simple Modeling Procedure for Estimation of Cyclonic Wind Speeds. *Journal of Structural Engineering*, 114(2):352-370. 1988.
- Servicio Meteorológico Nacional –SMN. EMAS. [en línea] *Comisión Nacional del Agua*. 2005. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/productos/emas/doc/estacion.html>.
- Simiu E. y Scanlan R. *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*. 3ª edición. Publicaciones Wiley-Interscience. E.U.A. 1996.
- Springall R. Estudio y análisis estadístico del oleaje generado por huracanes en el suroeste del Golfo de México. Tesis (Doctorado). México. Universidad Autónoma de México. 1974.
- Vickery P., Skerlj P. y Twisdale L. Simulation of Hurricane Risk in the U.S. Using Empirical Track Model. *Journal of Structural Engineering*, 126(10):1222-1237. 2000.

Semblanza de los autores

Luis Enrique Fernández-Baqueiro. Ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Yucatán (1995). Maestro en ingeniería y doctor en ingeniería (Estructuras) por la Universidad Nacional Autónoma de México (1997 y 2002). Actualmente es profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Ha impartido cursos en la licenciatura en ingeniería civil y en la maestría en ingeniería de la UADY. Ha participado en proyectos de investigación en mecánica numérica, ingeniería de puentes, eólica y sísmica. Es candidato a investigador nacional del SNI y tiene el reconocimiento al perfil deseable del PROMEP.

Jorge Luis Varela-Rivera. Ingeniero civil con especialidad en estructuras por la Universidad Autónoma de Yucatán (1993), maestro en ingeniería (Estructuras) por la Universidad Nacional Autónoma de México (1997), y doctor en ingeniería (Estructuras) por la Universidad de Texas en Austin (2003). Actualmente es profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, tiene el reconocimiento al perfil deseable del PROMEP y es candidato a investigador nacional del SNI. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con la ingeniería sísmica y eólica, así como el comportamiento de estructuras de mampostería, concreto reforzado y concreto celular de autoclave.

Evérica Janeth Félix-Solís. Ingeniero civil por el Instituto Tecnológico de Villahermosa, Tabasco (2004). Maestra en ingeniería (Estructuras) por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (2006).