

Simulación de los campos de viento y oleaje asociados a huracanes

Dr. Ing. Luis F. Córdova López
Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE
e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Ing. Roberto Lamazares González
Centro de Investigaciones Hidráulicas. CUJAE
e-mail: rlamazares@cih.cujae.edu.cu

RESUMEN

En la presente investigación ha sido utilizado el modelo matemático SWAN como plataforma para calibrar las variables principales de dos de los campos de vientos empíricos más utilizados en la modelación de fenómenos meteorológicos, más específicamente en los huracanes. Para ello se seleccionó como caso de estudio uno de los más fuertes huracanes que han pasado cerca o sobre la isla de Cuba, el huracán Iván. La calibración se llevó a cabo a partir de comparar los resultados obtenidos por la modelación con las mediciones de dos boyas de la NOAA ubicadas en el golfo de México. Para comprobar la veracidad de los resultados alcanzados en la calibración se hizo otra comparación contra mediciones satelitales y una boya de la NOAA, pero ahora utilizando otro huracán como caso de estudio, el huracán Wilma.

Palabras clave: huracanes, modelación matemática, campos de vientos, oleaje

Simulation of wind and wave fields associated to hurricanes

ABSTRACT

A mathematical model has been used (SWAN) as a platform to calibrate the main variables of two empiric winds fields very used in the simulation of meteorological phenomena, more specifically of hurricanes. To this end a study case was selected choosing one of the strongest hurricanes that have ever come close or accross the Cuban island: hurricane Iván. The calibration was carried out by comparing simulation results against measurements obtained from two buoys of the NOAA located in the gulf of Mexico. In order to substantiate the truthfulness of the calibration results another comparison was made against altimetry data taken from satellite and with a buoy of the NOAA, but now using another hurricane as study case, the hurricane Wilma.

Keywords: hurricanes, mathematical models, winds fields, waves

INTRODUCCIÓN

La región del golfo de México es anualmente sometida a los efectos de tormentas tropicales y huracanes. Los fuertes vientos, las intensas lluvias y la sobreelevación del mar causan grandes daños en esta área del planeta. Las comunidades costeras, especialmente, tienen el riesgo de ser afectadas por estas condiciones climatológicas y sobre todo por las penetraciones del mar. La isla de Cuba se localiza entre los 74°07' y 84°58' oeste, y entre los 19°49' y 23°18' norte, en la zona tropical del Atlántico Norte y muy cercana al golfo de México, por lo cual es atacada frecuentemente por huracanes, los que no siempre resultan catastróficos, pero sí pueden crear condiciones muy desfavorables. La temporada ciclónica se extiende en esta zona tropical desde junio hasta noviembre, aunque se pueden presentar algunos en mayo y diciembre. Por tanto es una necesidad para el país, el estudio y seguimiento de estos fenómenos, desarrollando conocimientos, procedimientos y metodologías que permitan predecir con bajos niveles de error los niveles de inundación costera y su comportamiento en tiempo y espacio.

Para esto es necesario utilizar modelos numéricos de oleaje y surgencia, con el objetivo de simular huracanes hipotéticos o determinar cuál podría ser la trayectoria y características más desfavorables para una región determinada, además de dotar a esa población de una base de datos que contribuya a minimizar los daños que pudieran ocurrir frente a la presencia de un fenómeno de este tipo. El trabajo que se presenta forma parte de las investigaciones realizadas por el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la CUJAE dentro del proyecto MEGACOSTAS donde se realiza, además de otros trabajos, la calibración de las variables principales contenidas en las formulaciones utilizadas en la modelación matemática, con el objetivo de que la simulación sea lo más parecida posible a lo acontecido en la realidad.

DESARROLLO

Para la calibración del campo de viento paramétrico fue utilizado como plataforma principal el modelo matemático de tercera generación SWAN (Booij et al. 1999), el cual es utilizado para obtener estimados reales de parámetros de olas en áreas costeras, lagos y estuarios, a partir de vientos, fondos y condiciones de corriente.

Los principales procesos que tiene en cuenta el modelo (Booij et al. 2004) son:

Procesos de generación y disipación de oleaje:

- Generación por viento.
- Disipación por corte de la zona de espuma de la cresta por el viento (whitecapping).
- Disipación por rompiente de la ola debido al fondo.
- Disipación por fricción con el fondo.
- Interacción ola-ola tanto en aguas profundas como en aguas poco profundas.

Procesos de propagación de oleaje:

- Propagación a través de un espacio geográfico.
- Refracción debida a variaciones espaciales en el fondo y las corrientes.
- Difracción.
- Pérdidas de profundidad debida a variaciones espaciales en el fondo y las corrientes.

Para garantizar una similitud entre la simulación y las mediciones de las boyas y los satélites (las cuales se explicarán posteriormente) se determinó trabajar en coordenadas náuticas, además

de realizar las corridas en modo NO estacionario debido a que el fenómeno que se estudia es un huracán y siempre está en movimiento, a la cantidad de horas de simulación y a la comodidad para la obtención de los resultados.

Para el huracán Wilma la simulación se comenzó a las 00 UTC del día 21 de octubre hasta las 00 UTC del día 25 de octubre de 2005 (fecha en que ocurrió el fenómeno) con un total de 97 horas de cálculo. Para el huracán Iván se comenzó a las 18 UTC del día 12 de septiembre hasta las 06 UTC del día 16 de septiembre de 2004, con un total de 85 horas de modelación.

Para la modelación se deberá seleccionar un dominio amplio, ya que deberá abarcar desde el Golfo de México hasta la parte más oriental de Cuba y desde la parte central de la Florida hasta la latitud de 19 grados aproximadamente. Esto se debe a que al simular un ciclón en forma no estacionaria para lograr una buena estabilidad numérica y resultados con buena precisión en el modelo es necesario comenzar los cálculos con tiempo suficiente de antelación antes que alcance la región de interés.

La batimetría seleccionada (figura 1) para el área de estudio tiene 24 grados por las abscisas (x) y 12 grados por las ordenadas (y), y se decidió construir la malla de cálculo igual a la malla de cómputo con un tamaño de cuadrícula de 0,05 grados, por lo que se obtuvieron 480 y 240 cuadrículas en (x) y en (y) respectivamente, al igual que en la generación de la malla de sobreelevación del mar y la malla creada para la generación de los vientos.

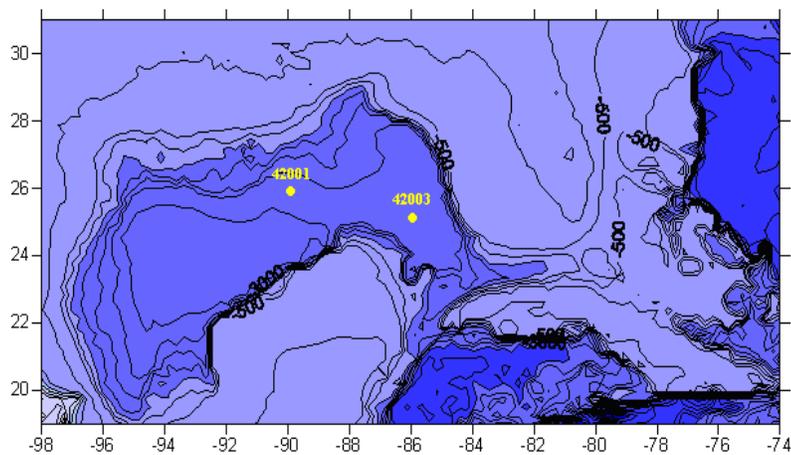


Figura 1. Batimetría seleccionada para la simulación de los huracanes Wilma e Iván, obtenida de National Geophysical Data Center (NGDC 2011).

El valor máximo establecido por SWAN para la frecuencia máxima es uno, pero el utilizado en la modelación fue de 0,35 debido a que las boyas tienen una frecuencia máxima de 0.35 según Dykes et al. (2002).

El modo físico empleado para la modelación fue el KOMEN, después de realizar varios trabajos de comparación con otros modos como el de JANSSEN, siendo este último descartado. Dentro de la gran cantidad de fenómenos físicos soportados por SWAN, se tuvieron en cuenta solamente la fricción con el fondo y el efecto cuádruple entre las olas.

Para realizar la comparación con las fuentes de medición, en el caso de los satélites se crearon la misma cantidad de ficheros que de los tracks del satélite seleccionado, que contenían los mismos puntos donde este había realizado la medición y se procuró obtener las salidas de SWAN también en la misma fecha, con el objetivo de realizar una exacta sincronización para obtener buenos resultados. Estas salidas de SWAN fueron en forma de tablas, en las cuales se obtuvieron las coordenadas de cada punto, la altura de ola significativa y la velocidad del viento.

En el caso de las boyas se siguió un proceso similar. Se tomaron las mediciones de altura, período, dirección de la ola y la velocidad de viento de las boyas 42001 y 42003 en las 97 horas de simulación y se comparó con estos mismos parámetros obtenidos de SWAN.

MODELOS PARAMÉTRICOS DE VIENTO

Los campos de viento y de presión de un huracán son generados por un modelo paramétrico basado en círculos concéntricos, donde la velocidad del viento es cero en el núcleo u ojo del huracán, aumenta radialmente hasta llegar al radio de máximos vientos (R_{mv}) y comienza a disminuir a medida que se aleja de esta distancia.

El campo de presión del modelo es computado como una distribución exponencial, donde la presión más baja se encuentra en el núcleo del huracán y va aumentando exponencialmente a medida que se va alejando del centro, hasta llegar a la presión atmosférica. Para generar los campos de viento se utilizó un script en Matlab 7.0 (Laboratorio matricial), a partir de dos formulaciones diferentes: Modified Rankine Vortex (RVM) (Hughes 1952), y el modelo propuesto por Holland (Holland 1980).

El modelo de Rankine Vortex (RVM) es el único que sigue una distribución de velocidad en la dirección radial, en el cual la velocidad del viento a una distancia determinada del centro del huracán se calcula utilizando las siguientes formulaciones, en dependencia de la distancia que exista entre el centro del huracán y el punto de interés.

$$V(r) = V_{max} \left(\frac{r}{R_{vm}} \right)^x \quad \text{para } r < R_{mv} \quad (1)$$

$$V(r) = V_{max} \left(\frac{R_{vm}}{r} \right)^x \quad \text{para } r > R_{mv} \quad (2)$$

donde r (m) es la distancia desde el centro del huracán hasta el punto de análisis, R_{mv} (m) es el radio de máximos vientos y V_{max} (m/s) es la máxima velocidad de los vientos. Las ecuaciones (1) y (2) se ajustan variando el parámetro de forma X , el cual tiene un rango entre 0,4 y 0,6 (Hughes 1952).

Este coeficiente X será una de las dos variables a calibrar en este trabajo, con el objetivo de establecer un único valor que se ajuste a todas las situaciones. Para este método la V_{max} se determina utilizando la siguiente ecuación (3):

$$V_{max} = 3.44(d_p^{0.644}) \quad (3)$$

donde dp (mbar) es la variación de presión en el punto de análisis.

El modelo de Holland (1980) contiene también dentro de su fórmula principal los parámetros de Rmv y $Vmax$, y adiciona un coeficiente B que varía el perfil de la distribución de vientos de un huracán. Este coeficiente se encuentra en un rango entre 0.75 y 1.5 y será la segunda variable a calibrar en este trabajo. En la figura 2 se muestra la variación de los perfiles de viento a partir de cada valor de B .

La fórmula principal que describe el modelo de Holland es la siguiente ecuación (4):

$$V(r) = V \max \sqrt{\left(\frac{Rmv}{r}\right)^B \exp\left[1 - \left(\frac{Rvm}{r}\right)^B\right]} \quad (4)$$

En este modelo, la velocidad de máximos vientos está definida por la ecuación (5):

$$V \max = \sqrt{\frac{B(Pn - Pc)}{\rho e}} \quad (5)$$

donde: B : parámetro de Holland (adim.).
 ρ : densidad del aire (kg/m^3).
 Pn : presión en el punto de evaluación (mbar).
 Pc : presión central del huracán (mbar).
 e : número de Euler (base logaritmos neperianos)

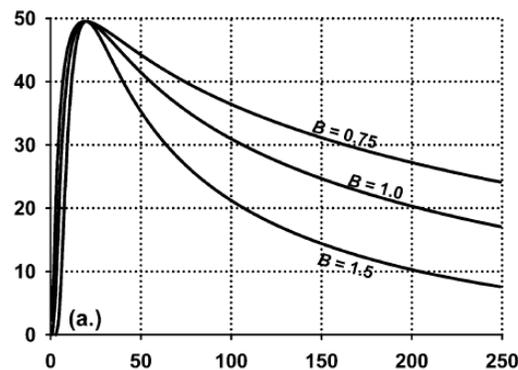


Figura 2. Variación de los perfiles de viento para cada valor de B .
 (Willoughby and Rahn 2004).

En ambos métodos el radio de máximos vientos (Rmv) se calcula utilizando la ecuación (6) siguiente (Lizano 2001):

$$Rmv = 46.29 \exp(0.0153 V \max + 0.0166 l) \quad (6)$$

donde: l : latitud del punto en cuestión.
 $Vmax$: velocidad máxima del viento (m/s)

Las velocidades de viento calculadas anteriormente por cada uno de los métodos, se ajustan a la velocidad estándar de 10m sobre el NMM multiplicándola por un factor de corrección K_m , el cual varía en dependencia del modelo utilizado, ecuación (7):

$$V_{10} = V(r)K_m \quad (7)$$

Teniendo en cuenta estudios antes realizados, a partir de este trabajo, los autores decidieron utilizar dos valores de K_m , uno para $r < R_{mv}$ y otro para $R_{mv} < r$, siendo en este último caso el valor de K_m menor que en el caso anterior, los cuales también van a variar para la calibración de los modelos, es decir, para un mismo valor de X o B (en dependencia del modelo que sea) se propusieron dos pares de valores de K_m .

En el caso de Holland los pares fueron $K_{m1} = 0.7$, $K_{m2} = 0.6$ y $K_{m1} = 0.9$, $K_{m2} = 0.8$, dando como resultados que el mejor par fue el primero.

En el caso de Modified Rankine Vortex (RVM) los pares fueron $K_{m1} = 0.9$, $K_{m2} = 0.8$ y $K_{m1} = 0.8$, $K_{m2} = 0.7$, dando como resultados que el mejor par fue el segundo.

CASOS DE ESTUDIO

Para llevar a cabo la calibración se estudiaron dos huracanes: Iván, ocurrido en el 2004 y Wilma, en el 2005.

Huracán Iván

La novena depresión tropical del 2004 surgió en el seno de una fuerte onda tropical en la tarde del 2 de septiembre a unos 970 kilómetros al suroeste de Cabo Verde. La depresión fue ganando en organización e intensidad y en la madrugada del siguiente día se clasificó como la tormenta tropical Iván, según la información recibida de los satélites meteorológicos. Desde finales de la tarde del día 10 comenzó a azotar a Jamaica y el centro pasó muy cerca de la costa sur de esta isla en la noche del 10, entonces en dirección oeste. Esta inclinación estuvo dada fundamentalmente por la influencia de la orografía de la isla.

En la madrugada del 12 se degradó a Categoría 4 y en la mañana su centro pasó por los mares al sur y muy cerca de Caimán Grande. En la noche alcanzó de nuevo la Categoría 5 en el noroeste del Caribe. En la madrugada del 13, cuando se hallaba al sur – suroeste de la Isla de la Juventud, inclinó la trayectoria hacia el noroeste, arrastrado por la dorsal anticiclónica subtropical. En la figura 3 se muestra un segmento de la trayectoria de Iván al pasar cerca de Cuba y la influencia de los vientos huracanados, con fuerza de tormenta tropical y de depresión tropical sobre Pinar del Río, la Isla de la Juventud y las provincias habaneras.

El huracán al encontrarse el día 14 sobre el Golfo de México, también ocasionó ligeras inundaciones costeras en el Malecón de Ciudad de La Habana debido a la mar de leva. Iván resultó ser un huracán tan peligroso con una trayectoria por el sur y próximo a Cuba, que obligó a tomar todo tipo de medidas de protección. Fueron evacuadas 2 266 068 personas. Hubo gran daño a la agricultura, la electricidad y los teléfonos, así como en las viviendas. En áreas cercanas a Santiago de Cuba, en la región oriental de Cuba, las lluvias provocaron deslizamientos de

tierra. Las pérdidas materiales se estimaron en 1 223 millones de dólares estadounidenses. No hubo muertes.



Figura 3. Trayectoria del huracán Iván

Huracán Wilma

Este sistema parece haber sido reforzado por una extensa área de un flujo difluente hacia el sur y suroeste de un ciclón de nivel superior sobre el Atlántico sudoccidental. La porción más oriental de esta área de baja presión se trasladó hacia el noreste y se fusionó con un ciclón extratropical. Las clasificaciones del satélite Dvorak se iniciaron en este sistema a las 1200 UTC del 15 de octubre. A las 1800 UTC este sistema determinó que la depresión tropical se había formado, con el centro a una distancia alrededor de 190 millas náuticas al este-sureste de Gran Caimán. Wilma mantuvo su categoría 5 hasta el 20 de octubre, cuando sus vientos disminuyeron a 130 nudos, y el ojo pequeño fue reemplazado por uno de cerca de 40 millas náuticas de diámetro. En la figura 4 se muestra su trayectoria.



Figura 4. Trayectoria del huracán Iván

El 22 de octubre, las áreas de altas presiones de la troposfera al norte de Wilma se disiparon y el huracán se movía lentamente hacia el norte, después de haber causado grandes daños en la península de Yucatán. El 23 de octubre a las 0000 UTC Wilma se encontraba en el sur del Golfo de México con velocidades máximas de 85 nudos. Aunque la intensidad se había reducido debido a su paso por la tierra, seguía siendo un huracán grande y poderoso.

Una extensa área de altas presiones, que incrementaba rápidamente su intensidad y se movía desde cerca del huracán hacia el sudeste, hizo que Wilma se desplazara rápidamente hacia el sur de la Florida, para tocar tierra cerca de Cape Romano a las 1030 UTC aproximadamente del 24 de octubre, con vientos máximos de 105 nudos (categoría 3). Continuó su paso y se movía a 25

nudos, y cruzó la península de la Florida en 4 o 5 horas, para salir al Atlántico al sureste de Júpiter a las 15 UTC, con vientos de 95 nudos (categoría 2).

Muy poco después de salir de la Florida, el huracán se intensificó por última vez, y sus vientos alcanzaron de nuevo alrededor de 110 nudos a las 0000 UTC del 25 de octubre. Posteriormente, Wilma, finalmente sucumbió en un medio ambiente atmosférico desfavorable y perdió fuerzas, por lo que se convirtió en un ciclón extratropical en torno a las 0000 UTC del 26 de octubre.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Selección de las boyas

Las boyas fueron seleccionadas lo más cercana posible a la trayectoria del huracán, una un poco al Oeste (42001) y la otra al Este (42003) de la posición donde el huracán tuvo su mayor intensidad y sus datos fueron obtenidos de National Data Buoy Center (NDBC 2011). Existen otros equipos más cercanos pero no miden características del oleaje ni velocidad del viento, sino características innatas del mar, como son la salinidad, temperatura, etc. Por tanto se determinó utilizar las boyas 42001 (25.86 N 89.67 W) y la 42003 (25.01 N 85.91 W).

Selección de los satélites

La información satelital utilizada para realizar la comprobación de los valores obtenidos durante la calibración de los campos de viento, fue obtenida a partir de la colaboración del Profesor Eugenio Pugliese Carratelli y Dr. Ferdinando Reales de la Universidad de Salerno, Italia. Esta información consta de datos altimétricos procesados de alturas de ola significativas y velocidad de vientos, agrupados en cuatro satélites:

- 146 mediciones (tracks) del satélite Envisat 1, divididas en dos ciclos, 41 y 42.
- 71 mediciones del satélite ERS 2, divididas en dos ciclos, 109 y 110.
- 49 mediciones del satélite Geosat 1, divididas en dos ciclos, 160 y 161.
- 15 mediciones del satélite Jason 1, divididas en dos ciclos.

El proceso de selección de los satélites se basó fundamentalmente en la fecha de la medición, es decir, un satélite para ser seleccionado tendría que haber realizado su medición en la fecha de simulación del huracán Wilma (del 21 de octubre al 25 de octubre del 2005).

Posteriormente a esta selección se decidió utilizar las trayectorias que más cerca estuvieran de la posición de las boyas así como que pasaran próximas a la trayectoria del huracán.

Después de analizar todas las mediciones satelitales se decidió utilizar tres trayectorias de tres satélites, el Envisat 1 (track 996), el ERS 2 (track 996) y el Geosat 1 (track 7), como se muestra en la figura 5.

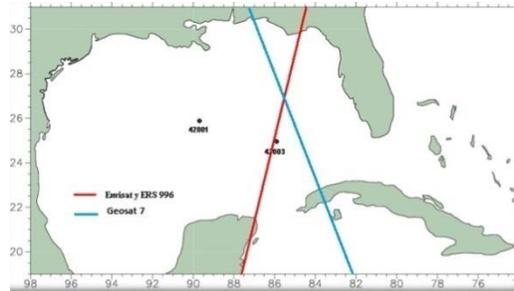


Figura 5. Trayectorias de satélites utilizadas para la comprobación de la calibración

Calibración de los modelos de viento

Utilizando SWAN como plataforma principal, se realizó la calibración de dos modelos empíricos de viento, Holland (1980) y Modified Rankine Vortex (RVM) (Hughes 1952). Este trabajo consistió en realizar simulaciones del huracán Iván obteniendo como resultados las características del viento como son su velocidad y dirección y del oleaje provocado por este como son la altura de ola, su período asociado, y su dirección. En la figura 6 se muestra una imagen que representa una hora de la simulación.

A partir de la página web del National Data Buoy Center (NDBC 2011) se obtuvieron de dos de sus boyas (42001 y 42003) los mismos datos anteriormente explicados y se realizó la comparación para determinar el mejor valor de X en el caso de Modified Rankine Vortex (RVM) y el mejor valor de B en el caso de Holland.

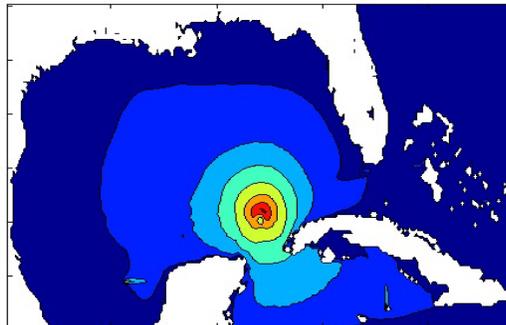


Figura 6. Posición del ojo del huracán Iván el día 14 de septiembre a las 13 horas

Para determinar qué valor de las variables antes indicada era el óptimo se emplea la habilidad del modelo en representar la realidad, esta variable estadística denominada SKILL (habilidad) se calcula a partir de la siguiente expresión (8):

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (medición - mod elación)^2}{\sum_{i=1}^N (medición)^2} \quad (8)$$

donde N es el número de mediciones realizadas.

Si el Skill es igual a uno la modelación es perfecta y si es igual o cercana a cero es una mala simulación. El fragmento de tabla (tabla 1) representa la forma en que se organizan los datos después de la modelación para que se haga sencilla la aplicación del Skill.

Tabla 1. Datos organizados para aplicar el Skill

Hora de modelación	Mediciones (Boya 42003)			Modelación (SWAN - Holland)		
	Vv	Hs	Período medio	Vv	Hs	Período medio
	(m/s)	(m)	(seg)	(m/s)	(m)	(seg)
12	8.99	1.86	5.72	10.22	1.77	4.08
13	9.07	1.87	5.75	10.30	1.81	4.14
14	9.23	1.91	5.78	10.25	1.85	4.20
15	9.41	1.95	5.81	10.23	1.88	4.25

En la figura 7 se muestra la comparación entre la simulación utilizando Holland con $B=1.25$ y los datos de la boya 42003 en cuanto a la velocidad de los vientos, la altura de ola y el período pico.

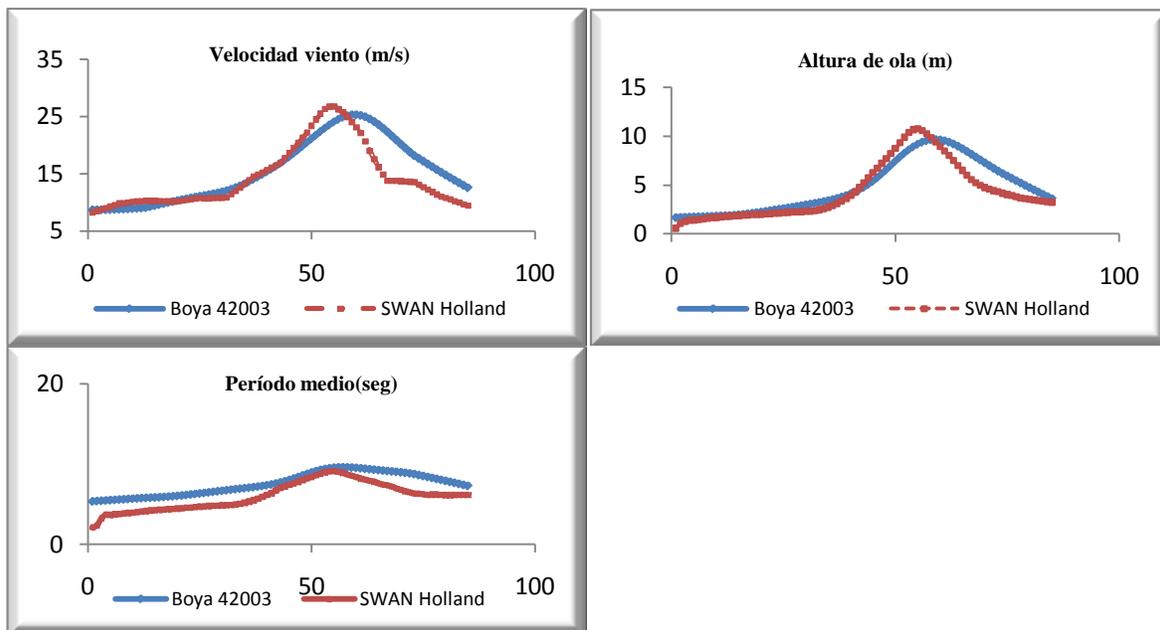


Figura 7. Comparación entre simulación Holland con $B=1.25$ y datos de la boya 42003

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS

En las siguientes tablas y figuras se observan los resultados obtenidos después de la aplicación de la fórmula del Skill en cada caso.

Modelo de Modified Rankine Vortex (RVM) (determinación del valor óptimo de X).

Los resultados se aprecian en las tablas 2,3,4,5,6,7 y las figuras 8,9,10.

Tabla 2. Skill para Hs -Modified Rankine Vortex (RVM)

SKILL Hs (Boya 42001)			
		<i>Km=0.8 Km=0.7</i>	<i>Km=0.9 Km=0.8</i>
X =	0.4	0.91	0.93
X =	0.5	0.95	0.96
X =	0.6	0.87	0.94
X =	0.7	0.76	0.86

Tabla 3. Skill para Hs -Modified Rankine Vortex (RVM)

SKILL Hs (Boya 42003)			
		<i>Km=0.8 Km=0.7</i>	<i>Km=0.9 Km=0.8</i>
X =	0.4	0.89	0.89
X =	0.5	0.96	0.92
X =	0.6	0.90	0.94
X =	0.7	0.82	0.89

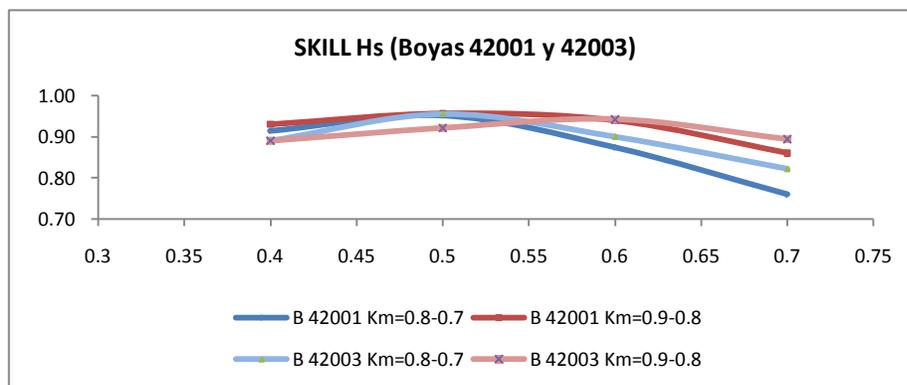


Figura 8. Skill para Hs -Modified Rankine Vortex (RVM)

Tabla 4. Skill para Vv -Modified Rankine Vortex (RVM)

SKILL Vv (Boya 42001)			
		<i>Km=0.8 Km=0.7</i>	<i>Km=0.9 Km=0.8</i>
X =	0.4	0.89	0.92
X =	0.5	0.98	0.99
X =	0.6	0.94	0.98
X =	0.7	0.85	0.90

Tabla 5. Skill para Vv -Modified Rankine Vortex (RVM)

<i>SKILL Vv (Boya 42003)</i>		
	<i>Km=0.8 Km=0.7</i>	<i>Km=0.9 Km=0.8</i>
X = 0.4	0.94	0.95
X = 0.5	0.98	0.97
X = 0.6	0.92	0.93
X = 0.7	0.85	0.90

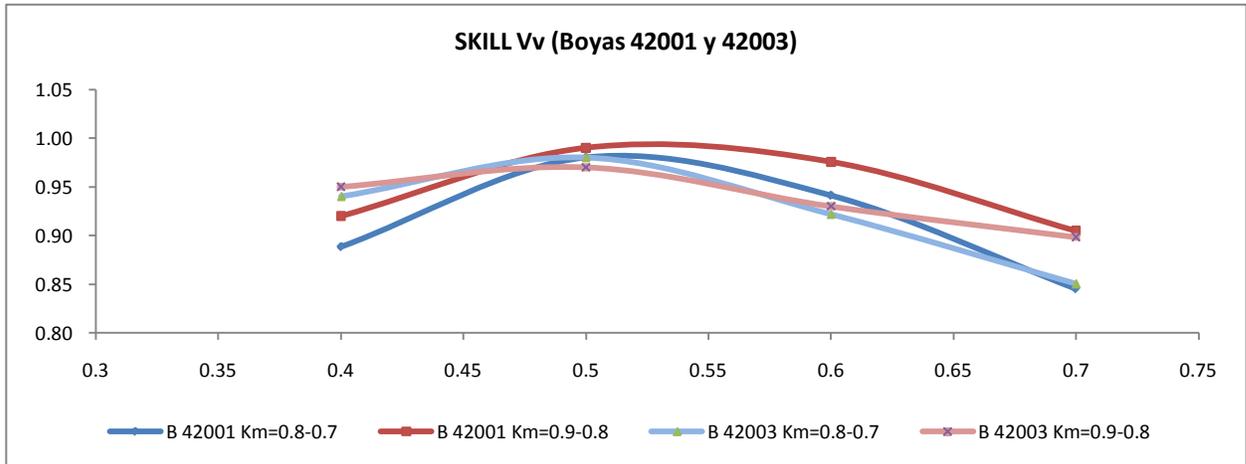


Figura 9. Skill para Vv -Modified Rankine Vortex (RVM)

Tabla 6. Skill para Ts -Modified Rankine Vortex (RVM)

<i>SKILL Ts (Boya 42001)</i>		
	<i>Km=0.8 Km=0.7</i>	<i>Km=0.9 Km=0.8</i>
X = 0.4	0.98	0.98
X = 0.5	0.99	0.99
X = 0.6	0.97	0.98
X = 0.7	0.92	0.97

Tabla 7. Skill para Ts -Modified Rankine Vortex (RVM)

<i>SKILL Ts (Boya 42003)</i>		
	<i>Km=0.8 Km=0.7</i>	<i>Km=0.9 Km=0.8</i>
X = 0.4	0.99	0.97
X = 0.5	0.96	0.98
X = 0.6	0.93	0.95
X = 0.7	0.90	0.93

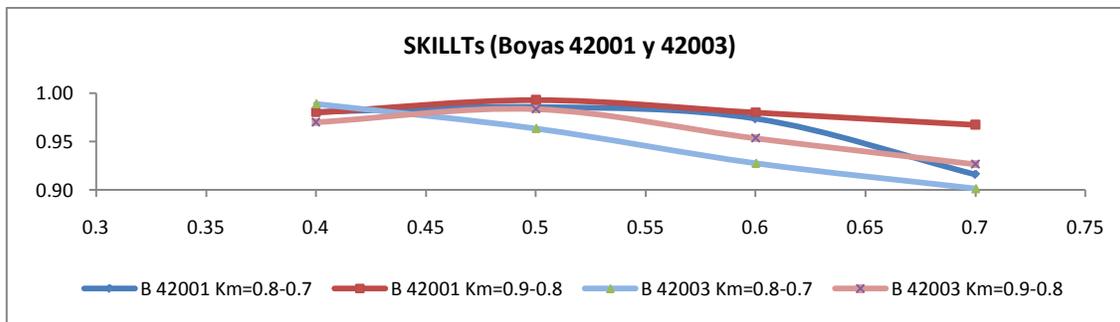


Figura 10. Skill para Ts -Modified Rankine Vortex (RVM)

Después de analizar los resultados se determinó que el valor de X que dio mejores valores de Skill fue $X = 0.5$ con la combinación de $Km_1 = 0.8$, $Km_2 = 0.7$.

Modelo de Holland (determinación del valor óptimo de B).

Los resultados se aprecian en las tablas 8,9,10,11,12,13 y las figuras 11,12,13.

Tabla 8. Skill Hs (Holland)

		<i>SKILL Hs (Boya 42001)</i>	
		<i>Km=0.7 Km=0.6</i>	<i>Km=0.9 Km=0.8</i>
<i>B =</i>	0.75	0.91	0.07
<i>B =</i>	1	0.93	0.61
<i>B =</i>	1.25	0.97	0.950
<i>B =</i>	1.5	0.88	0.92

Tabla 9. Skill Hs (Holland)

		<i>SKILL Hs (Boya 42003)</i>	
		<i>Km=0.7 Km=0.6</i>	<i>Km=0.9 Km=0.8</i>
<i>B =</i>	0.75	0.92	0.25
<i>B =</i>	1	0.96	0.53
<i>B =</i>	1.25	0.95	0.90
<i>B =</i>	1.5	0.92	0.82

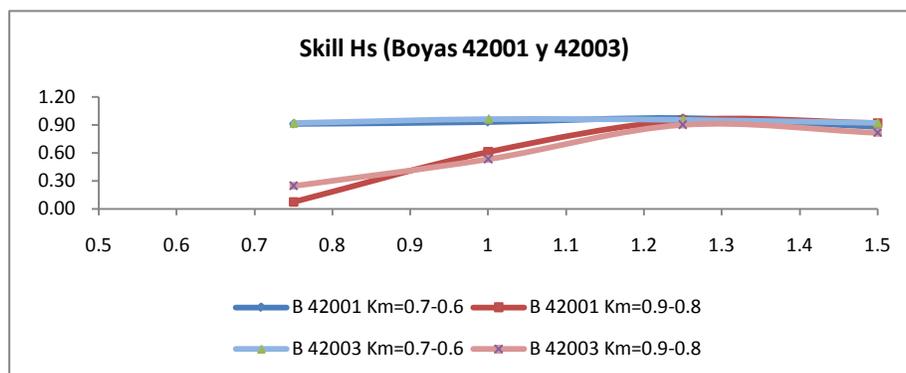


Figura 11. Skill para Hs (Holland)

Tabla 10. Skill para Vv (Holland)

SKILL Vv (Boya 42001)			
		Km=0.7 Km=0.6	Km=0.9 Km=0.8
B =	0.75	0.87	0.41
B =	1	0.96	0.69
B =	1.25	0.982	0.98
B =	1.5	0.94	0.97

Tabla 11. Skill para Vv (Holland)

SKILL Vv (Boya 42003)			
		Km=0.7 Km=0.6	Km=0.9 Km=0.8
B =	0.75	0.94	0.74
B =	1	0.97	0.83
B =	1.25	0.965	0.94
B =	1.5	0.93	0.93

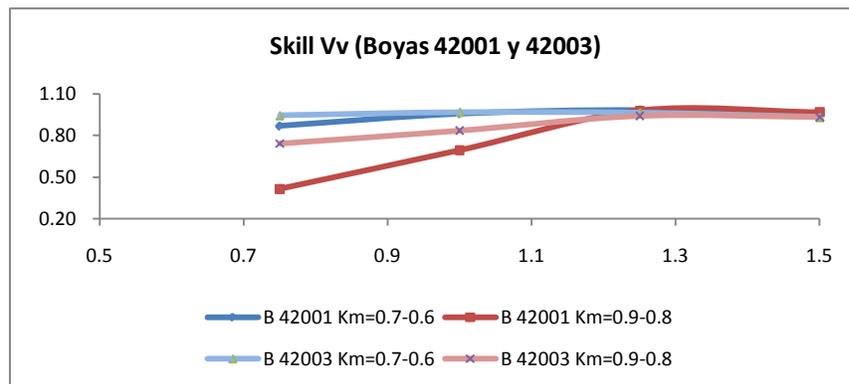


Figura 12. Skill para Vv (Holland)

Tabla 12. Skill para Ts (Holland)

SKILL Ts (Boya 42001)			
		Km=0.7 Km=0.6	Km=0.9 Km=0.8
B =	0.75	0.97	0.88
B =	1	0.99	0.96
B =	1.25	0.980	0.98
B =	1.5	0.97	0.99

Tabla 13. Skill para Ts (Holland)

SKILL Ts (Boya 42003)			
		Km=0.7 Km=0.6	Km=0.9 Km=0.8
B =	0.75	0.98	0.97
B =	1	0.98	0.99
B =	1.25	0.990	0.98
B =	1.5	0.93	0.97

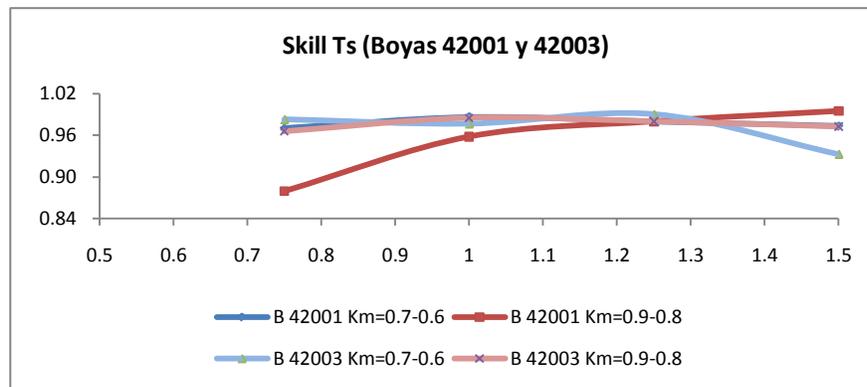


Figura 13. Skill para Ts (Holland)

Después de analizar todos los resultados del SKILL se determinó que el valor de B que mejores resultados aportó fue $B = 1.25$.

Comprobación de los resultados obtenidos

Una forma de comprobar que fueron óptimos los valores de X y B obtenidos anteriormente, fue realizar dos nuevas simulaciones (una para cada campo de viento) utilizando el huracán Wilma con las combinaciones obtenidas de B , X y Km para comparar estos resultados con mediciones satelitales y una vez más con la boya 42003 de la NOAA. Posteriormente a realizar las modelaciones se calculó el Skill en cada caso obteniéndose los siguientes resultados.

Modelo de Modified Rankine Vortex (RVM)

Tabla 14. Resultados del Skill para modelación huracán Wilma -Modified Rankine Vortex (RVM)

<i>SKILL</i>		
	Hs	Vv
Boya 42003	0.74	0.89
Envisat 1	0.70	0.77
ERS 2	0.67	0.78
Geosat 1	0.69	0.83

Modelo de Holland

Tabla 15. Resultados del Skill para modelación huracán Wilma (Holland)

<i>SKILL</i>		
	Hs	Vv
Boya 42003	0.73	0.90
Envisat 1	0.71	0.75
ERS 2	0.67	0.76
Geosat 1	0.68	0.84

Por estudios antes realizados se conoce que para que la habilidad del modelo de representar la realidad (SKILL) sea buena, este valor deberá ser mayor o igual que 0.7. Y aunque en algunos casos este valor se queda ligeramente por debajo se considera que es un buen resultado.

CONCLUSIONES

A partir del proceso de calibración realizado se obtuvieron los valores óptimos para las variables principales de las formulaciones de los campos de viento de Holland y Modified Rankine Vortex (RVM). En el primer caso $B = 1.25$ con $K_{m1} = 0.7$, $K_{m2} = 0.6$. En el caso de Modified Rankine Vortex (RVM) el mejor valor de X fue $X = 0.5$ con $K_{m1} = 0.8$, $K_{m2} = 0.7$.

RECOMENDACIONES

- Seguir profundizando en el tema de la información satelital.
- Seguir trabajando en la calibración de los campos de viento utilizando más huracanes.

REFERENCIAS.

- Booij, N.C.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H.** (1999). "A third-generation wave model for coastal regions. Part I, Model description and validation". *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), 7649-7666.
- Booij, N.; Haagsma, J.; Van der Westhuysen, A.** (2004). "SWAN User Manual", Delft University of Technology.
- Dykes, J.D., Hsu, Y.L.; Rogers, W.E.** (2002). "The development of an operational SWAN model for NGLI". Submitted to: Proc. MTS/IEEE Oceans 2002, Biloxi, Mississippi.
- Holland, G.J.** (1980). "An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes". *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, volumen 108(8), 1212-1218.
- Hughes, L.A.** (1952). "On the low level wind structure of tropical cyclones". *Journal of meteorology*, 9, 422-428.
- Lizano, O.** (2001). "Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México". *Top. Meteor. Oceanog.*, 8(1):40-49.
- NGDC** (2011). "Datos de mallas batimétricas". National Geophysical Data Center (NGDC). NOAA, consultado el 14 de diciembre 2011, disponible en: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html.
- NDBC** (2011). "Datos de características del oleaje". National Data Buoy Center (NDBC), consultado el 14 de diciembre 2011, disponible en: <http://www.ndbc.noaa.gov.html>.
- Willoughby, H.E. and Rahn, M.E.** (2004). "Parametric Representation of the Primary Hurricane Vortex. Part I: Observations and Evaluation of the Holland (1980) Model". *Monthly weather review*, American Meteorological Society, volumen 132, dec. 2004.