

## Simulación de la inundación costera en la zona del Malecón Tradicional, huracán Wilma 2005

Ing. Daniela Córdova de Horta

Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).

e-mail: [dcorovah@cih.cujae.edu.cu](mailto:dcorovah@cih.cujae.edu.cu)

Dr. Ing. Luis F. Córdova López

Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).

e-mail: [cordova@tesla.cujae.edu.cu](mailto:cordova@tesla.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

El 23 de octubre de 2005 el Huracán Wilma se alejaba de Cuba, a pesar de estar a más de 200 km en el Golfo de México dejó sus huellas en La Habana. La necesidad de proteger el Malecón habanero de los embates del mar conduce al estudio del comportamiento de las inundaciones costeras en el tramo del Malecón tradicional. En este trabajo se presentan las ecuaciones para el cálculo del rebase promedio. Se definen las características del oleaje mediante el establecimiento de un tren de modelos numéricos que permiten obtener los hidrogramas para alimentar el modelo hidrodinámico Iber, y se realiza la simulación de la inundación en la zona de estudio, lo que permite definir los puntos de mayor calado en la zona estudiada.

**Palabras clave:** huracán, inundaciones costeras, modelo iber, oleaje.

## Coastal flood simulation in the Traditional Malecón, Wilma hurricane 2005

### ABSTRACT

The octubre 23th of 2005 the Wilma hurricane live the water near of Cuba, despite being more than 200 km in the Gulf of Mexico, he left his footprints in Havana. It is e necessity to protect the city form the attack of the hurricanes and other severe events, for that reason several studies in order to kwon the behavior of the flooding have been done. In this paper are presented the formulas to compute the average wave overtopping, it is define the wave characteristics by mean a train of numerical model that allow to obtain the hydrographs to force the Iber model, and were done different flooding simulation of the study area, it allow define the location with more hazard.

**Keywords:** hurricanes, coastal flooding, iber model, wave.

## **INTRODUCCIÓN**

El Caribe es una de las rutas mundiales más transitadas por sistemas ciclónicos cada año, los que unidos a otros eventos hidrometeorológicos como los frentes fríos, que al igual que los ciclones azotan estacionalmente, colocan a Cuba en una situación de riesgo constante de inundaciones costeras por penetración del mar.

La Habana posee características en sus costas que hacen que el riesgo de ocurrencia de inundaciones costeras por penetraciones del mar sea realmente muy alto. A esta situación se le agrega la alta urbanización de su litoral. El malecón de La Habana con una longitud de aproximadamente 7 km protege un área densamente poblada de los municipios Plaza, Centro Habana y Habana Vieja. Es un sector de costa donde ocurren fuertes penetraciones de las olas generadas por eventos meteorológicos extremos, ocasionando grandes daños económicos y sociales.

Por esta razón resulta indispensable contar con un conocimiento detallado de ese entorno para conocer los peligros asociados a cada zona, con el fin de preparar los planes de contingencia y evacuación necesarios. Es una necesidad desarrollar conocimientos y metodologías que permitan simular estos fenómenos con mayor precisión, para así realizar el diseño de obras de defensa de costa que protejan y minimicen los efectos asociados a estos desastres.

En el presente trabajo se simula el comportamiento de la inundación en el área conocida como malecón Tradicional con la ayuda del modelo hidrodinámico Iber, el cual es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre de régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. Mediante el acoplado de un tren de modelos numéricos, y la aplicación de un conjunto de ecuaciones para el cálculo del rebase, se obtienen los hidrogramas para 39 horas de simulación del huracán Wilma 2005, los cuales alimentan el modelo numérico Iber, simulando la inundación en el área de estudio permitiendo definir los calados máximos y tiempo de permanencia. Estos resultados permiten definir y evaluar la eficacia de obras de defensa costera, y de obras hidráulicas para el control de inundaciones.

## **DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. TRAMO COSTERO DEL MALECÓN TRADICIONAL DE LA CIUDAD DE LA HABANA**

El malecón Tradicional ocupa la franja costera del municipio Centro Habana y parte del municipio Habana Vieja. La zona de estudio escogida en el presente trabajo se encuentra ubicada en estos municipios por dos razones fundamentales. La primera es la relacionada con la importancia histórica, económica y social de la misma, y en segundo lugar por haber sido objeto de grandes prejuicios por eventos meteorológicos extremos que han afectado las zonas aledañas a la zona costera cercana al malecón habanero. Ver figura 1.



**Figura 1. Localización del área de estudio tomado de Oficina del Historiador de La Habana**

### **Descripción del muro de protección costera, sistema de drenaje pluvial y topografía de la zona de estudio.**

El Malecón habanero es un sistema complejo con diversas funciones que se superponen, pero son fácilmente distinguibles. Entre las principales funciones de este sistema se encuentran: defensa del sobrepaso del oleaje, vía de tránsito y social. La primera es su principal función al construirse primariamente como defensa de las tierras interiores de inundaciones por oleaje, aunque en casos de eventos meteorológicos extremos esta defensa es insuficiente. En términos generales representa una protección que permite la circulación vial y social. Se considera que en situaciones de huracanes el sistema de drenaje pluvial no funciona entre 8 y 10 horas causando la acumulación del agua rebasada debido al fuerte oleaje y sobreelevación del nivel del mar.

La topografía del área de estudio se caracteriza por ser llana, en forma de terrazas, desde la costa hasta la parte sur de los municipios que la componen. Las variaciones son pequeñas y en las zonas más cercanas al Malecón no sobrepasan en algunos casos los 3,00 m respecto al nivel medio del mar, con una pendiente ascendente hacia el sur, hasta encontrarse un parte aguas alrededor de la Calle Salvador Allende.

### **Desarrollo del modelo digital del terreno**

La realización del modelo digital del terreno (MDT) se hace con el fin de obtener una geometría que represente lo mejor posible la topografía de la zona de estudio para que la simulación hidrodinámica sea la más cercana a la realidad del fenómeno ocurrido. Los límites del dominio seleccionado son las calles malecón por el Norte, Neptuno por el Sur, Prado por el Este y Humboldt - Malecón por el Oeste figura 2, para con esto obtener los resultados con un alto grado de confiabilidad y con mayor exactitud como ocurre en la realidad. El modelo se confecciona con los datos representativos de la superficie del terreno (cotas topográficas, curvas de nivel, descripción de edificios y manzanas de la zona, dichos datos fueron suministrados por la dirección de inversiones de la Oficina del Historiador de La Habana, el sistema de proyección es NAD27 Cuba Norte.



**Figura 2. Límites geográficos del área de estudio**

## METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL SOBREPASO PROMEDIO DEL OLEAJE

Para el cálculo del rebase en el caso de un muro vertical según Eurotop (2007) se define la siguiente metodología.

Obtener el comportamiento del oleaje frente a la estructura, este puede ser de dos tipos, ola impulsiva (zona de rotura) o no impulsiva. (fuera de la zona de rotura), para ello se determina el coeficiente  $h^*$

$$h^* = 1.35 \frac{hs}{Hs} * \frac{2*\pi*hs}{g*Tm^2} \quad (1)$$

Si  $h^* < 0.2$  impulsiva si  $h^* > 0.2$  no impulsiva

Donde:  $hs$ : profundidad al pie de la estructura (m),  $Tm$ : período medio de la ola (s),  $Hs$ : altura de la ola significativa (m), siendo la fórmula propuesta la siguientes que dependen del ángulo de ataque del oleaje.

Se realiza el cálculo de la relación  $h * \frac{Rc}{Hs} < 0.2$ , definiendo el uso de la ecuación 2 ó 3 para el cálculo del caudal de rebase promedio específico ( $q$ ) en las ecuaciones 2 ó 3.

$$\frac{q}{(h^*^2)*\sqrt{g*hs^3}} = 1.5 * 10^{-4} * [h * \frac{Rc}{Hs}]^{-3.1} \quad \text{Para } \beta=15^\circ; h * \frac{Rc}{Hs} < 0.2 \quad (2)$$

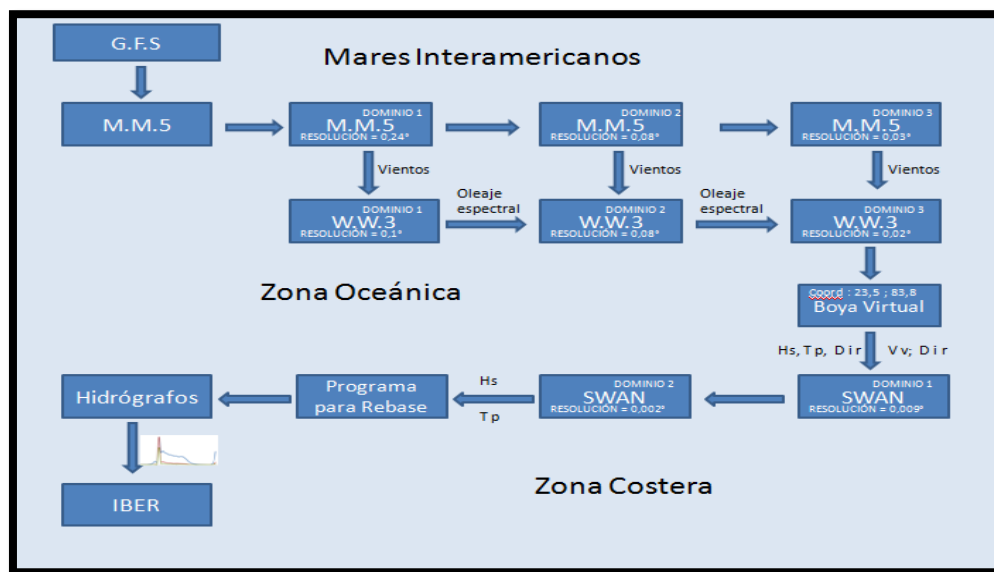
$$\frac{q}{(h^*^2)*\sqrt{g*hs^3}} = 5.8 * 10^{-5} * [h * \frac{Rc}{Hs}]^{-3.7} \quad \text{Para } \beta=15^\circ; h * \frac{Rc}{Hs} \geq 0.2 \quad (3)$$

Donde:  $h^*$ : Se obtiene de la ecuación 1,  $Rc$ : borde libre de la estructura (m),  $q$ : sobrepaso específico promedio (L/sm).

## PROCESO DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Para poder calcular el rebase promedio del oleaje para cada hora de simulación, confeccionar los hidrogramas que relacionan el caudal de rebase versus tiempo de simulación, y posteriormente modelar el comportamiento de la inundación en el área de estudio, aplicando el modelo hidrodinámico Iber, se define el período a modelar para el huracán Wilma (2005), tomando entre las 21:00 horas UTC (3:00 pm del 23 de octubre) hasta el día 25 a las 12:00 horas UTC (6:00 am del propio día), para un total de 39 horas de simulación, donde se conoce que se

generaron las máximas inundaciones. A continuación, se muestra la figura 3, donde se presenta el tren de modelos numéricos aplicados, así como el sistema de anidado para los dominios seleccionados, y su correspondiente resolución.



**Figura 3. Sistema de Ingeniería de Costa del CIH versión 1.00**

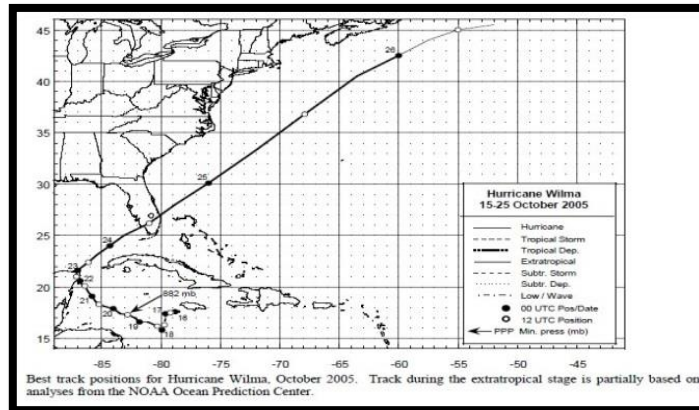
### Breve descripción del huracán Wilma (2005)

Este poderoso huracán se gestó en un área de bajas presiones en la tarde del 15 de octubre a unos 120 km al sursuroeste de Montego Bay, Jamaica. En la madrugada del 17 de octubre se clasificó como la Tormenta Tropical Wilma, atendiendo a la explosión convectiva que se produjo cerca de su centro. Con Wilma, se igualaba el récord de 21 tormentas tropicales originadas en una temporada ciclónica, ocurrido en el año 1933.

Ganó paulatinamente en intensidad hasta convertirse en huracán en la mañana del día 18 de octubre del 2005. El día 20 las estaciones meteorológicas de La Fe y de Punta del Este, ambas ubicadas en la Isla de la Juventud, registraron rachas de viento de 94 km/h y de 92 km/h, respectivamente.

En la costa sur habanera las inundaciones comenzaron a producirse desde el día 22 de octubre y continuaron durante el 24 de octubre. En Playa Guanímar el agua avanzó 2500 m, y alcanzó hasta un metro de altura. En Playa Cajío se extendió más de 1000 m de distancia con la misma altura y en Playa Majana el nivel del agua llegó hasta 1,5 m. El pueblo de Surgidero de Batabanó quedó cubierto hasta la distancia de 3000 m con una altura de 1,5 m. En Playa Mayabeque el agua penetró hasta los 2000 m y en Playa Rosario hasta 1300 m, alcanzando la altura de 1,2 m.

En la costa norte de La Habana comenzaron en la noche del 23 de octubre y se extendieron en la madrugada del 24 de octubre. La marejada derribó secciones del muro del Malecón habanero en Lealtad, Escobar y Belascoáin. Desde el Parque Maceo hasta Infanta el agua se internó más allá del Malecón hasta Hospital. Ver figura 4.



**Figura 4. Wilma (2005) mejor trayectoria, tomado Wikipedia (2012)**

### **Descripción de los modelos que forman parte en el Sistema**

El modelo GFS (Global Forecasting System): Creado por la NOAA brinda los parámetros Meteorológicos (campos de vientos y presión asociados al huracán), a nivel Global los cuales son utilizados como condiciones iniciales del modelo MM5.

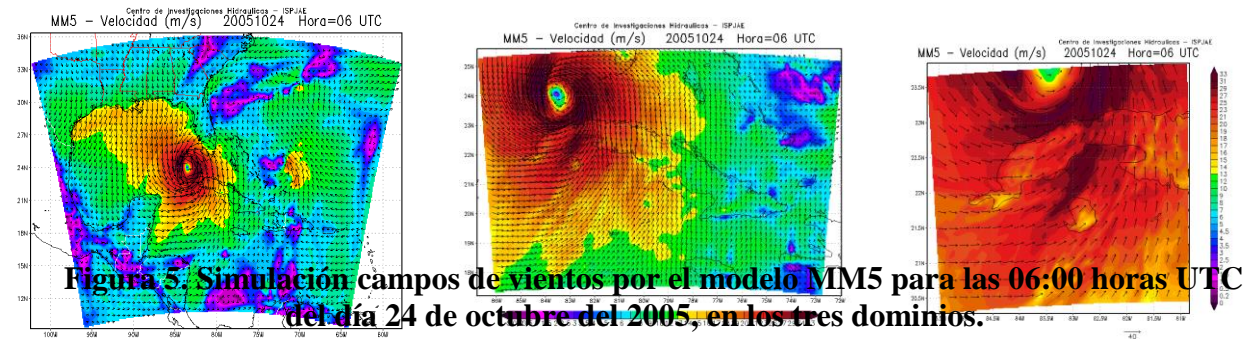
Modelo Matemático MM5: Es un modelo mesoescala de quinta generación creado por especialistas de Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research (Penn State/NCAR model) en la década de los 70. El MM5V3 es su tercera versión. Está preparado para ser usado en el pronóstico numérico del tiempo, ser aplicado en una amplia gama de estudios teóricos y en tiempo real, incluyendo la simulación y la asimilación tetra-dimensional de datos de eventos de interés como son los monzones, los ciclones extra tropicales y los tropicales. En las mínimas escalas de tipo meso-beta y meso-gamma (2 - 200Km), puede ser utilizado para estudios relacionados con sistemas convectivos a mesoescala, brisas, frentes, circulación orográfica e islas de calor. Salgueiros et al. (2014).

Modelo de Generación del Oleaje WW3: WAVEWATCH III, Tolman (2009) es un modelo de generación y propagación de oleaje de tercera generación desarrollado en la NOAA / NCEP sobre la base del modelo WAM.

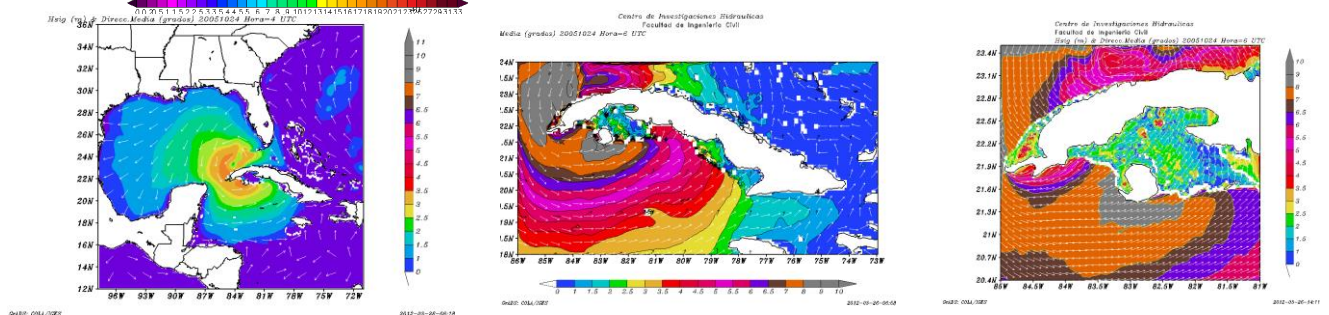
Modelo de generación y propagación de oleaje SWAN: SWAN, acrónimo de Simulating Waves Nearshore, es un modelo de tercera generación que describe la evolución del espectro de energía del oleaje tomando en cuenta las condiciones del viento, corrientes y batimetría, calculando procesos de generación, disipación e interacciones no lineales. Holthuijsen et al. (2004).

A continuación, se presenta un ejemplo de la aplicación de los modelos MM5 donde se aprecian los campos de vientos asociados al huracán , figura 5, y los campos de oleaje obtenidos mediante el modelo WW3 en la figura 6 respectivamente para los tres dominios.





**Figura 5. Simulación campos de vientos por el modelo MM5 para las 06:00 horas UTC del día 24 de octubre del 2005, en los tres dominios.**



**Figura 6. Simulación de la altura de ola significativa por el modelo WW3 para las 06:00 horas UTC del 24 de octubre del 2005 en los tres dominios.**

### APLICACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO IBER

Para el establecimiento del modelo Iber, Bladí et al. (2012), se hacen necesarios una serie de pasos previos los cuales consisten en definir los hidrogramas que representan la condición de flujo por la frontera de entrada de flujo, la confección de la malla de cómputo basada en el modelo digital del terreno, y definir las condiciones iniciales.

Para la determinación del número de tramos a dividir la frontera de entrada del flujo de sobrepaso al modelo se realiza un análisis riguroso de acuerdo con las cotas de coronación del muro tomadas cada 20 m a lo largo de la obra de defensa, quedando conformado tres tramos.

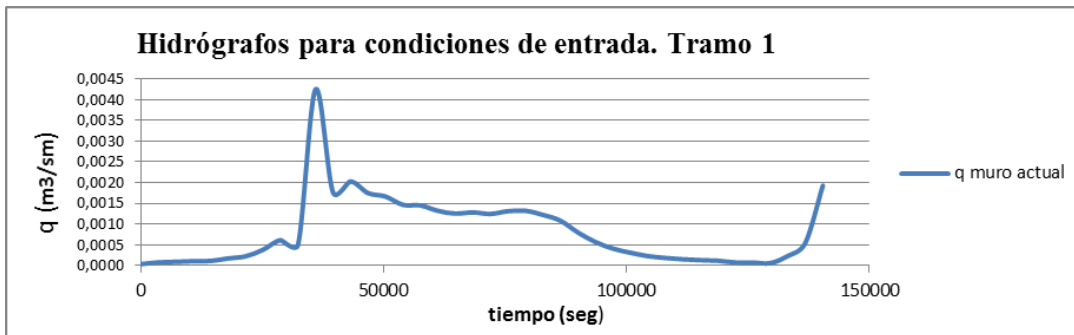
Los tramos son los siguientes: Desde calle Humboldt y Ave. Antonio Maceo hasta Ave. Antonio Maceo (Malecón) y calle Oquendo, su longitud es de 274,46 m y una cota de 3,90 m. (Tramo 1). Desde Ave. Antonio Maceo (Malecón) y calle Oquendo hasta calle Perseverancia y Malecón, su longitud es de 579,15m y una cota de 4,30 m. (Tramo 2). Desde calle Perseverancia y Malecón hasta Prado y Malecón, su longitud es de 1076,15 m y una cota de 3,96 m. (Tramo 3).

Inicialmente se le asignó un calado cero para todo el dominio. Posteriormente se le asignan las condiciones de entradas y salidas por tramos. Las condiciones de entradas fueron asignadas mediante el gasto específico en régimen subcrítico, se toma un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,0010 de acuerdo con estudios previos realizados por Morales (2011) para un sector de la zona de estudio. A continuación en la figura 7, se muestran las asignaciones de las condiciones de entrada y salida.

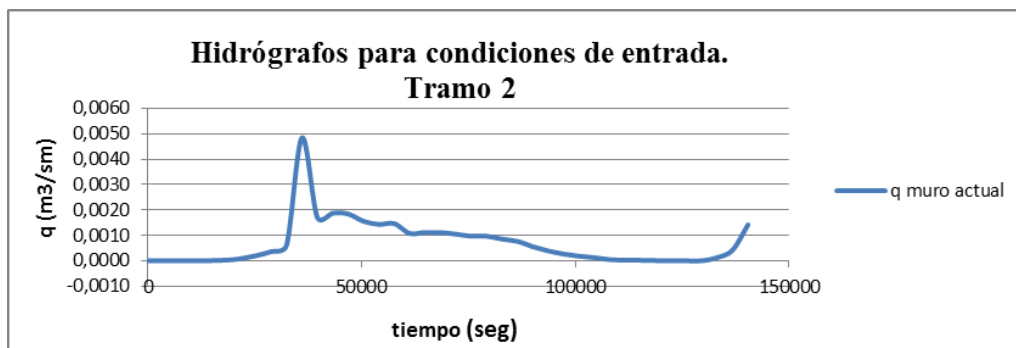


**Figura 7. Asignación de las condiciones de entrada y salida**

Las figuras 8, 9 y 10 que se presentan a continuación son los hidrógrafos por tramos que se les asignan a las condiciones de entradas para el huracán Wilma 2005.



**Figura 8. Hidrógrafo de caudal de entrada para el tramo 1.**



**Figura 9. Hidrógrafo de caudal de entrada para el tramo 2.**



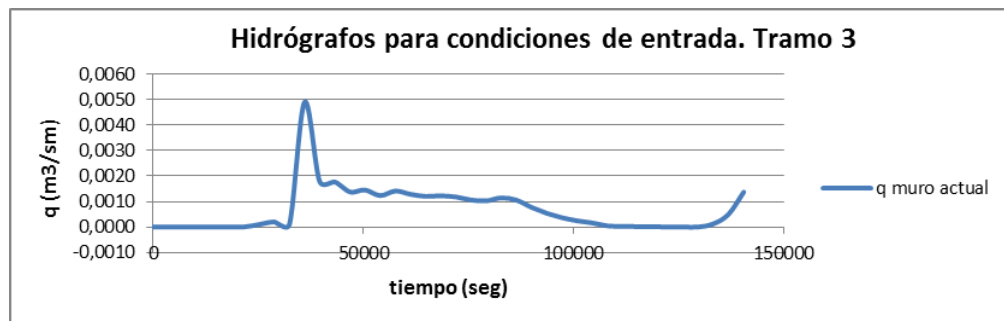


Figura 10. Hidrógrafo de caudal de entrada para el tramo 3.

### COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS EXPUESTOS POR LA DEFENSA CIVIL Y LAS ENTREVISTAS REALIZADAS EN LAS ZONAS Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La figura 11 que se muestra a continuación se realiza una comparación del área de inundación presentada por La Defensa Civil a partir de los de análisis y observaciones realizadas al finalizar la inundación, y resultado del Modelo Hidrodinámico Iber, se destaca que durante la investigación se realizaron un conjunto de las entrevistas a pobladores del lugar para mejorar el nivel de análisis, permitiendo verificar o confirmar la calidad de la simulación realizada.



Figura 11. Mapa de inundación definido por la Defensa Civil Nacional y resultados de la simulación para la máxima cota y distancia de inundación.

Como se puede observar en la figura anterior, la Defensa Civil presenta un área de inundación que abarca desde la calle Humboldt por el Oeste hasta Prado por el Este, limitado por el muro del malecón habanero por el Norte y al Sur por varias calles llegando hasta las calles de Marina y San Lázaro, luego se extiende por San Lázaro interceptando varias calles hasta llegar a Manrique, en la cual se interna llegando casi hasta las calles de Virtudes y Águila.

Las entrevistas realizadas en la zona de estudio señalan un área de inundación que es limitada al Oeste por Humboldt, al Este por Prado, al Norte por el Malecón y al Sur por las calles de Animas y Oquendo, siguiendo por San Lázaro hasta la calle Perseverancia (en la intersección de las calles San Lázaro y Escobar se registraron calados de 0,40 m), a partir de ese punto hasta la calle Galiano no se produjeron inundaciones, en el cual se interna hasta las calles de Virtudes y

Águila (en las intersección de las calles Galeano y Trocadero se registraron 0,25 m, y en Marina y Jovellar llegaba casi a tapar a una persona.

Se presenta una gran coincidencia entre las áreas de inundación presentadas por la Defensa Civil y resultado del Modelo Hidrodinámico Iber, pero existe una zona ubicada en la calle San Lázaro entre Perseverancia y San Nicolás en la que las áreas no coinciden. Se considera que no es posible que la inundación llegase a la calle de San Lázaro por Campanario, Manrique y San Nicolás como se presenta por la Defensa Civil, debido a que tiene una cota topográfica de 4,0 m y la cota corona del Malecón es de 3,85 m, esto provocaría el funcionamiento del muro similar a un vertedor, descargando agua hacia el mar.

En caso de que el agua sobrepasara la calle de San Lázaro por Campanario el área de inundación llegaría como mínimo a la calle Lagunas y no hasta donde se presenta en la figura, debido a que esta última posee una cota de 3,5 m con una pendiente entre San Lázaro y Lagunas de 0,6%, con tendencia a la acumulación del agua en calle Lagunas, porque a partir de ella comienza nuevamente a aumentar las cotas topográficas hasta llegar a Animas donde se registra la cota de 4,0m. Esto ocurre muy similar en las restantes calles de Manrique y San Nicolás en las cuales las pendientes son de 0,9% y 1,3% respectivamente, lo que provocaría que el límite del área de inundación fuera entre las calles de Lagunas y Animas y no como se muestra en la figura, que llega hasta mediado de la calle de Campanario entre San Lázaro y Lagunas.

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA INUNDACIÓN PARA EL HURACÁN WILMA 2005.

Para el estudio del comportamiento de la inundación se definen “Puntos de Control” situados en diferentes lugares de la zona de estudio, en los cuales se solicitará como salida del modelo que entrega cada hora los valores de calado y velocidad del agua. La localización de los mismos responde a puntos representativos de toda el área, lo cual permitirá una descripción integral de la inundación, puntos en la Avenida Malecón como primera línea de inundación, así como puntos en el interior donde las cotas topográficas son bajas. Se escogieron intercepciones de calles los cuales se muestran a continuación. PC1-Ave. Malecón y calle Vapor, PC2-calles Marina y Jovellar, PC3-calles San Lázaro y Marqués González, PC4-Ave. Malecón y calle Belascoain, PC5-Ave. Malecón e/ Calle Belascoain y Gervasio, PC6-Ave. Malecón y calle Escobar, PC7-Ave. Malecón y calle Galeano, PC8-Ave. Malecón y calle Crespo, PC9-calles Crespo y Refugio, ver figura 12.

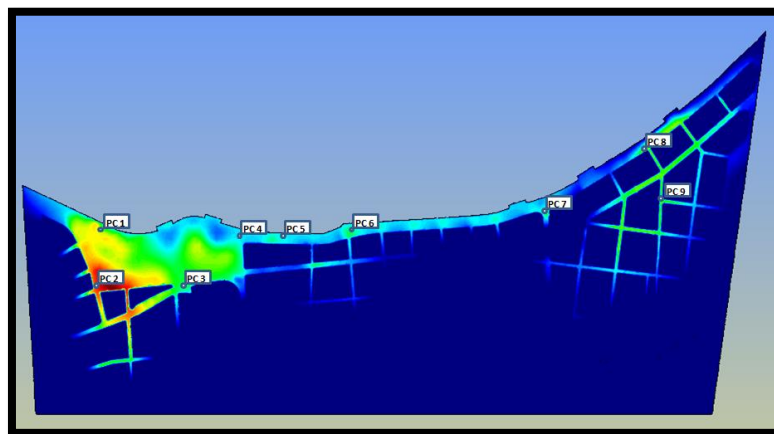


Figura 12. Localización de los puntos de control en el área de estudio

La tabla 1 muestra los resultados de la simulación del calado en la zona de estudio para los 9 puntos de control, cada 5 horas de modelación.

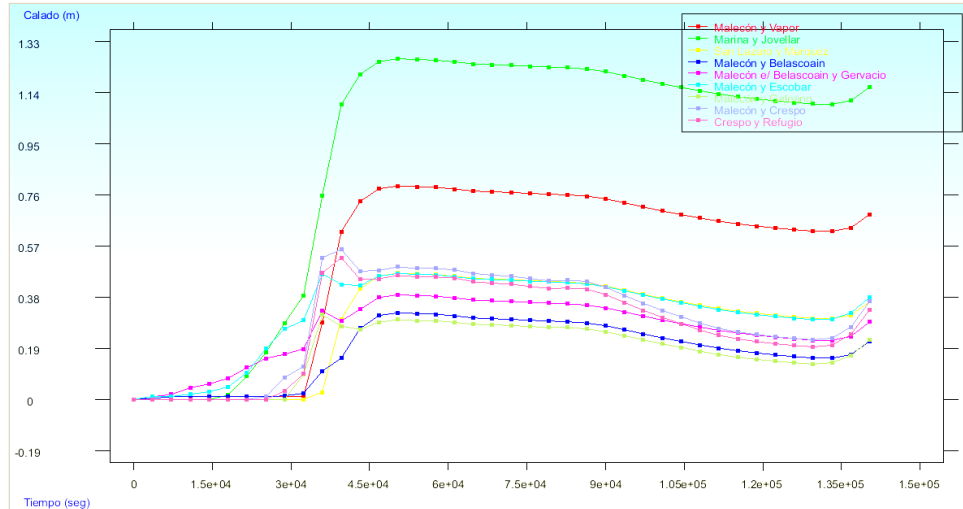
**Tabla 1. Calado para cada punto de control. Huracán Wilma 2005**

Pto de control	Cota (m)	Calado (m)							
		07/24/10	12/24/10	17/24/10	22/24/10	03/25/10	08/25/10	13/25/10	18/25/10
1	2,03	0,096	0,11	<b>0,921</b>	0,899	0,88	0,82	0,77	0,82
2	2,06	0	0,335	<b>1,216</b>	1,194	1,18	1,11	1,06	1,11
3	2,84	0	0	0,486	0,46	0,45	0,38	0,33	0,38
4	3,06	0,009	0,02	0,421	0,39	0,38	0,31	0,26	0,32
5	3,02	0,087	0,217	0,418	0,39	0,38	0,31	0,26	0,32
6	2,9	0,03	0,291	0,465	0,44	0,43	0,36	0,30	0,38
7	2,91	0	0,226	0,43	0,41	0,40	0,33	0,28	0,35
8	2	0	0,103	0,474	0,44	0,42	0,29	0,21	0,34
9	2,04	0	0,098	0,464	0,43	0,41	0,29	0,21	0,34

En la tabla 1 se observa que la inundación comienza a las 07:00 horas (hora local) de la mañana del 24 de octubre de 2005, desarrollándose de forma rápida en las primeras 17 horas, los PC 1 y PC 2 son los de mayor calado con 0,92 m y 1,21m respectivamente (ver gráficos 5 y 6), a las 17:00 horas del propio día 24 de octubre, aunque en ese momento se generaron los máximos para los 9 puntos de control de acuerdo con los resultados arrojados por la simulación. Se destaca que se genera este pico en el calado de inundación 7 horas después de haber ocurrido el máximo sobrepaso del oleaje de acuerdo con las figuras 13, 14 y 15, lo que significa que el reservorio se llena rápidamente, debido a los grandes caudales de rebase combinado con un drenaje nulo debido al colapso del sistema de drenaje, lo cual se refleja en el gráfico 4, donde para todos los puntos de control el calado disminuye muy poco hasta el final de la simulación donde aún se mantiene la inundación para un total de 40 horas.

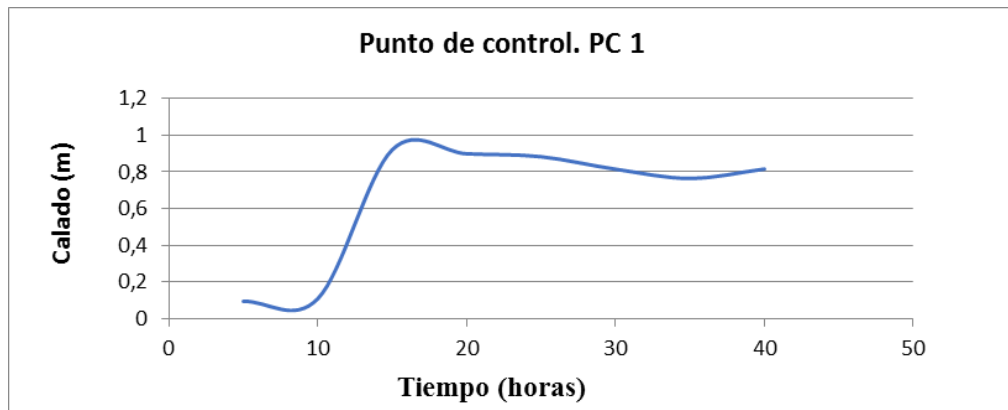
El huracán produjo una inundación muy peculiar al tener dos picos de máximo calado; uno a las 17:00 horas del 24 de octubre y otro a las 18:00 horas del día 25 de octubre (ver tabla 1), este comportamiento es provocado por la ubicación del huracán y dirección de las olas con respecto al muro del malecón habanero. Por lo que se puede concluir que el momento más crítico para el huracán es a las 17:00 horas del 24 de octubre y a las 18:00 horas del día 25, se destaca que los mayores caudales de rebase del oleaje ocurren a las 13:00 horas (hora local) dígame cuatro horas antes de producirse los máximos calados, siendo esta el momento de mayor daño estructural, tanto al pavimento como al muro actual.

En la figura 13 se muestra el comportamiento del de cada punto de control para el huracán Wilma 2005.

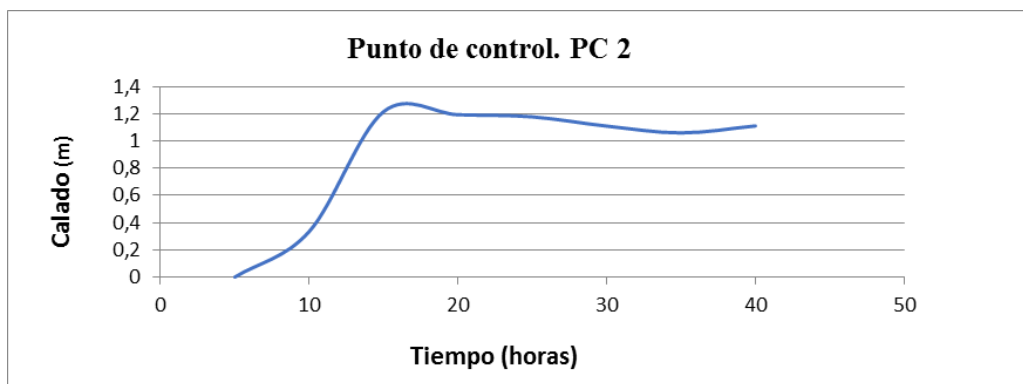


**Figura 13. Calado del agua en los puntos de control**

A continuación se presentan las figuras 14 y 15 donde se pueden ver los comportamientos de los Puntos de Control más críticos respecto al calado, para la variante de estudio aplicada al Huracán Wilma (2005).



**Figura 14. Comportamiento de la variante de estudio en el PC 1. Huracán Wilma 2005**



**Figura 15. Comportamiento de la variante de estudio en el PC 2. Huracán Wilma 2005**

## CONCLUSIONES

Se profundizó en conceptos y métodos utilizados para la estimación de los volúmenes de sobrepaso al utilizarse el Manual de Sobrepaso EuroTop (2007) para el cálculo del muro vertical.

Se construyó un Modelo Digital del Terreno a partir de la topografía detallada 1:2000 de la zona de estudio, incorporándose al relieve, las edificaciones y el Muro del Malecón. La creación de este modelo permitió la realización de la simulación más real para ambos fenómenos por rebase en el tramo del Malecón tradicional.

Para las condiciones de contorno (entrada) se definieron 3 tramos a lo largo de todo el tramo de estudio:

- Desde calle Humboldt y Ave. Antonio Maceo hasta Ave. Antonio Maceo (Malecón) y calle Oquendo, su longitud es de 274,46 m y una cota de 3,9 m. (Tramo 1)
- Desde Ave. Antonio Maceo (Malecón) y calle Oquendo hasta calle Perseverancia y Malecón, su longitud es de 579,15m y una cota de 4,3m. (Tramo 2).
- Desde calle Perseverancia y Malecón hasta Prado y Malecón, su longitud es de 1076,15m y una cota de 3,96m. (Tramo 3).

Como resultado de la simulación con el modelo hidrodinámico Iber, se obtiene que las zonas de mayor nivel de inundación son: Zona del Parque Maceo y Avenida Malecón y calle San Lázaro entre las calles Blanco e Industria.

Se recomienda aplicar el Modelo Hidrodinámico Iber para futuras simulaciones de inundación costera en el Malecón habanero y en otras zonas costeras de Cuba, además como elemento de sistema de ingeniería costera SICOM, la realización de simulaciones con datos de batimetría de la zona de estudio con una mayor resolución.

## REFERENCIAS

**Bladí E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cedón E., Dolz J. y Colla A.** (2012). “Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos”, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, vol.30, no.1, pp 1-10, ISSN 02131315, Elsevier España. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004> en septiembre del 2018.

**Eurotop.** (2007). European Manual for the Assessment of Wave Overtopping. Pullen, T, Allsop, N.W.H. Bruce, T. Kortenhaus, A. Schüttrumpf, H. and Van der Meer, J.W. At: [www.overtoppingmanual.com](http://www.overtoppingmanual.com).

**Holthuijsen L. H., Booji N., Haagsma J. G., Kieftenburg A. T. M. M., Ris R. C., Van Der Westhuysen A. J. and Zijlema M.** (2004). “WAN Cycle III version 40.41 user’s manual”, Delft University of Technology Press, Delft, The Netherlands.

**Morales E.** (2011). “Simulación de la inundación costera por penetración del mar e intensas lluvias en un tramo del malecón de la Ciudad de La Habana aplicando el modelo hidrodinámico IBER”. Tesis de Diploma, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana



**Tolman H.** (2009). “User manual and system documentation of WAVEWATCH III Version 3.14”. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp, USA.

**Wikipedia** (2012). “Huracán Wilma”. Wikipedia, la enciclopedia libre, extraído de: <[http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hurac%C3%A1n\\_Wilma&oldid=56688708](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hurac%C3%A1n_Wilma&oldid=56688708)> en junio 2012.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### **Contribución de los autores**

*Daniela Córdova de Horta*     <https://orcid.org/0000-0002-7284-9682>

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación y en la redacción final.

*Luis Fermín Córdova López*     <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.