

## **Atlas Digital de Surgencias provocadas por los Ciclones Tropicales en el Archipiélago Cubano.**

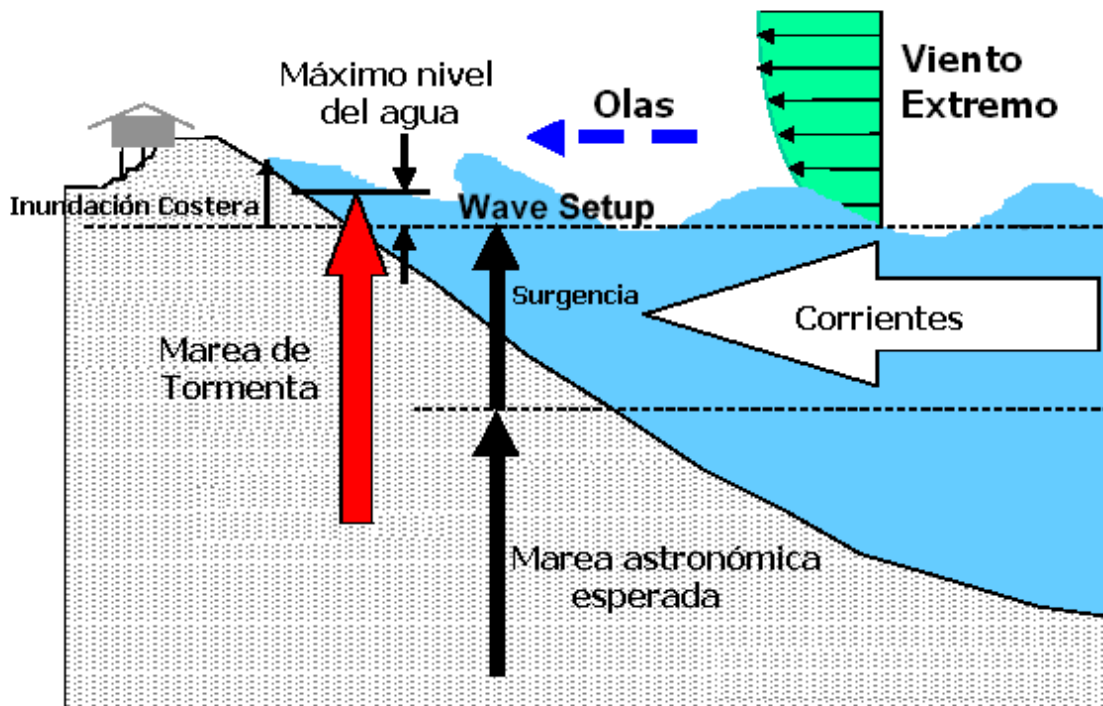
Rafael Pérez Parrado, Isidro Salas García, Sandra Samper Trimiño y Jesús Dole Chávez  
Instituto de Meteorología. República de Cuba  
Email: isidro.salas@insmet.cu

### **Introducción.**

Los principales problemas costeros en Cuba son las afectaciones a la diversidad biológica, la erosión costera, la pérdida de la calidad de las playas, la contaminación, la merma de los recursos pesqueros, formas de uso inadecuadas, el aumento del nivel medio del mar y las inundaciones costeras por penetraciones del mar. El objetivo de estudio de este proyecto se relaciona con este último aspecto, específicamente las inundaciones originadas por la surgencia asociada a los ciclones tropicales (CT), la que constituye la causa del mayor desastre de origen natural ocurrido en el país en el asentamiento costero de Santa Cruz del Sur, provincia de Camagüey, el 9 de noviembre de 1932, donde perdieron la vida 3 033 personas por el efecto de una surgencia que sobre pasó los 7 m de altura (Salas et. al., 2006).

En Cuba los desastres provocados por eventos naturales de mayor importancia son de índole meteorológico, destacándose sobre todos, los asociados a los CT. Estos organismos tropicales vienen acompañados de fenómenos peligrosos, tales como intensas precipitaciones, fuertes vientos, tornados, oleaje y surgencia, siendo este último el más peligroso y el causante cada año de los mayores desastres provocados por los CT, baste señalar que de cada diez personas que mueren a causa de un huracán nueve vidas se pierden a causa de la surgencia y el 90 % de las afectaciones materiales pertenecen a este dañino fenómeno; por este motivo es de vital importancia poder pronosticar el comportamiento de la surgencia con suficiente antelación y así prevenir los efectos nocivos que ocasiona.

La surgencia se define como la elevación anormal y temporal del nivel medio del mar, sobre la marea astronómica, causada por la tensión ejercida por los fuertes vientos, y en menos grado, por la caída de la presión atmosférica, debido al paso de un ciclón tropical o extratropical, aunque las más devastadoras que han ocurrido en el mundo están asociadas a los CT. La surgencia está constituida por una onda gravitacional larga con longitud escalar similar al tamaño del CT que la genera, con durabilidad de algunas horas y afecta como promedio 200 km de costas. A su vez existe otro término asociado a la surgencia al que se le denomina marea de tormenta, la cual consiste en el efecto combinado de la surgencia, la marea astronómica y en los últimos años se ha aceptado incluir en ella los efectos de sobre elevación del nivel medio del mar por las olas rompientes en la línea costera, el cual es conocido en lengua de habla inglesa por el término "wave setup" (Wagenseil, 2000 y WMO, 2006) (Figura 1).



**Figura 1. Componentes de la Marea de Tormenta.**

**Fuente: WMO (2006): Observations and forecasts of storm tides. Workshop Topic Reports. Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclone (IWTC-VI). Report Series TMRP No. 72. San José. Costa Rica. 21-30 November 2006.**

En la altura que alcanza la surgencia y la extensión de las inundaciones tierra adentro, desempeñan un papel fundamental: el tamaño, velocidad de traslación, tiempo sobre la plataforma insular o continental, ángulo de incidencia entre la trayectoria del ciclón y la costa, velocidad máxima del viento, radio de vientos máximos y presión central, además influye la batimetría, la topografía del terreno y la configuración de la costa, las construcciones y edificaciones en el litoral, la vegetación existente, etc. La característica espacial del fondo oceánico es en particular el factor más importante en la amplificación de la onda de surgencia, las mayores se originan en regiones con plataformas amplias y poco profundas, contribuyendo a ello la morfología de la costa. En este último aspecto desempeña un papel muy importante el tipo de costa y su pendiente tierra adentro.

Generalmente la surgencia consiste en el paso de una onda simple que eleva el nivel medio del mar, y en algunas situaciones especiales, principalmente cuando un CT se mueve paralelo a la costa, pueden formarse ondas secundarias no despreciables detrás de esta onda principal (Jelesnianski, Chen y Shaffer, 1992).

La respuesta del océano a la presencia de un CT es diferente en aguas profundas y en aguas poco profundas. En la primera, lejos de la costa, la tensión del viento sobre la superficie oceánica acumula agua en forma de vórtice. La elevación del nivel medio del mar es pequeña, equivalente aproximadamente a la elevación hidrostática, en respuesta a la presencia del centro de bajas

presiones, conocido como efecto de barómetro invertido, y en menor escala al efecto del término de Coriolis. Los efectos dinámicos se vuelven predominantes a medida que el CT se acerca a la costa y la conservación de la vorticidad potencial del vórtice requiere del desarrollo de una marcada divergencia. Los canales y la reflexión de las costas también contribuyen substancialmente a amplificar la onda de surgencia (Jelesnianski, 1993).

En Cuba se ha trabajado fuertemente en esta temática desarrollándose proyectos de investigación para obtener un modelo numérico que permita el cálculo de la surgencia y la confección de los mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de este dañino fenómeno (Salas et. al., 2006).

Debe destacarse que trabajos de este tipo se han desarrollado en los Estados Unidos utilizando el modelo numérico "SLOSH" (Jelesnianski, 1992).

Las técnicas para la confección de un Atlas de Surgencias por Huracanes en los Estados Unidos se han desarrollado a partir del antes mencionado modelo, utilizando para ello la Envoltante de la Altura de las Aguas (EOHW) y la categoría de los huracanes a partir de la Escala Saffir-Simpson.

Como se puede apreciar dada la alta peligrosidad del fenómeno que se analiza, para Cuba el poder contar con un Atlas Digital de Surgencias que cubra todo el territorio del Archipiélago Cubano, constituye una necesidad para proteger los cuantiosos recursos materiales albergados en su zona costera y salvaguardar la vida de las personas que residen en esas regiones geográficas.

#### Objetivo general:

- Obtener un Atlas Digital de Surgencias provocadas por los Ciclones Tropicales en el Archipiélago Cubano.

#### Objetivos específicos:

- Seleccionar los Asentamientos costeros, cayos y viales a estudiar.
- Actualizar la base de datos de CT para a Cuenca Atlántica en el período 1851 al año 2005, y a partir de ella realizar el estudio estadístico de los CT que han podido provocar surgencias en el área de estudio.
- Determinar el ángulo de mayor afectación de los CT en cada lugar de cálculo.
- Simulación de la altura que puede alcanzar la surgencia en dependencia de la categoría del huracán de acuerdo a la Escala Saffir-Simpson y las tormentas tropicales.
- Elaboración del software que permita la utilización gráfica de la información obtenida en las simulaciones numéricas de la surgencia.
- Capacitación de los usuarios en la aplicación del resultado obtenido.

#### Región geográfica de estudio.



Figura 2. Región de estudio

La región de estudio comprende el Archipiélago Cubano, donde se incluyen los Archipiélagos Insulares de Los Canarreos, Sabana-Camagüey, Jardines de La Reina y Los Colorados (Figura 2).

En las simulaciones numéricas de la altura que alcanza la surgencia se llega hasta el nivel de municipio en la Isla de Cuba, en los casos donde no se encuentre localizado geográficamente ningún asentamiento costero se procedió a realizar los cálculos para un punto en la línea de costa. Mientras que en la Cayería Insular se trabajó en todos los Polos Turísticos y Viales que a ellos conducen.

### **Bases de datos y metodologías empleadas.**

Se utilizaron las bases de datos para ciclones tropicales pertenecientes al INSMET, las del Centro de Predicción Tropical del Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos (1851 al año 2005) (Landsea et. al., 2005), las que aparecen en el Sitio Web <http://www.nhc.noaa.gov/pastall.shtml>. Fue procesada con los Sistemas computacionales “Eye of The Storm 2006” y “HURREVAC 2006”. La modelación numérica de la surgencia se realizó con el Modelo Numérico “MONSAC” (*MOdelación Numérica de la Surgencia en los Alrededores de Cuba*), versión 3.1 (Pérez Parrado et. al., 2006), y su correspondiente base de datos batimétricos. Ella tiene como características principales estar conformada por una rejilla rectangular de 241 filas y 561 columnas, cubrir el área entre los 18 y 24° de latitud norte y los 73 y 87° de longitud oeste, para un total de 135 201 puntos y el paso espacial es de 2.775 km

El cálculo de los Regímenes Extremales se realizó por el Método de las Frecuencias Picos (Martín, et. al., 1990; Martín y Martínez, 1996), ordenando los datos en forma descendentes de acuerdo a la Escala Internacional Saffir-Simpson que norma la intensidad de los CT atendiendo a la intensidad del viento.

En lo que respecta a la evaluación del peligro, esta se efectuó a través de la metodología planteada por Salas et. al., 2006.

### **Asentamientos costeros, cayos y viales a estudiar.**

En la región a estudiar (Figura 1) se cubren las costas de la Isla de Cuba hasta el nivel de municipio, y los cayos de mayor interés ubicados en los Archipiélagos de Los Colorados, Los Canarreos, Sabana-Camagüey y Jardines de La Reina (Tabla 1 y Figura 1).

**Tabla 1. Cantidad de puntos a calcular. En ellos se realizaron simulaciones numéricas de la altura que puede alcanzar la surgencia al paso de un CT en la región de estudio. Se encuentran distribuidos por provincias y municipios, además de los cayos y viales que conducen a estos últimos.**

<b>Archipiélago Cubano</b>	<b>Totales</b>	<b>Cantidad de puntos de cálculos</b>
Provincias	14	118
Municipios Costeros	90	
Cayos	49	31
Viales	3	2
<b>Total</b>		<b>151</b>

## **Estadística de los ciclones tropicales que han podido provocar surgencias en la región de estudio.**

Para realizar los estudios correspondientes a los CT fue utilizada la base de datos perteneciente al Centro de Predicción Tropical Nacional de Huracanes de Estados Unidos, para los archivos de temporadas de huracanes pasadas de 1851 al año 2002 al norte del Océano Atlántico (Landsea et. al., 2005), la cual fue actualizada hasta el año 2005, así como los resultados de las investigaciones obtenidas por Pérez Suárez et. al., 2000, donde elaboró una base de datos correspondiente a la cronológica de todos los huracanes que han afectado a Cuba desde 1799 hasta el año 2000, ampliada posteriormente hasta el 2001 al paso del huracán Michelle de ese propio año por el territorio del Archipiélago Cubano.

Utilizando el Sistema Computacional para CT “Eye of The Storm”, 2006 y “HURREVAC”, 2006 y tomando la base datos para ciclones tropicales ya citada, se determinó la cantidad de organismos tropicales que afectaron cada uno de los asentamientos costeros, cayos y viales a estudiar en este proyecto. Para ello se partió de la metodología elaborada por Pérez Parrado et. al., 2006. Se debe señalar que en este estudio en las investigaciones sobre los CT se procesaron un total de 1 353 organismos tropicales, desde Tormentas Tropicales a Huracanes Categoría 5.

### **1.7 Cálculo de los períodos de retorno.**

Para el cálculo de los períodos de retorno de la surgencia se partió del Método de los Valores Picos (Martín y Martínez, 1990), el cual se explica detalladamente en (Pérez Parrado et. al., 2005). Este método se aplicó para el caso de los CT y la surgencia asociada a los mismos donde la formula utilizada se expresa de la siguiente forma:

$$F = \gamma \lambda = \frac{N_i}{T_e} \frac{(n) = 1 \dots N_t}{N_t}$$

Donde:

**(N<sub>t</sub>)** es la cantidad total de ciclones tropicales ocurridos en el área Atlántica durante el período de tiempo (**T<sub>e</sub>**) años, **(N<sub>i</sub>)** es el número de CT que han azotado el lugar de estudio, dentro de un radio de 100 km para un radio efectivo de 80 km (Pérez Parrado et. al., 2006), y **(n)** es el número de CT clasificados en orden descendente, por grado de intensidad y que llega a tomar el valor **(N<sub>t</sub>)** cuando se consideran todos los estratos de intensidad.

### **Simulación numérica de la altura que puede alcanzar la surgencia en la región de estudio.**

La sobre elevación que puede alcanzar el nivel medio del mar al paso de un CT para una determinada zona de la región de estudio se realizó con el Modelo Numérico MONSAC3.1 (Pérez Parrado et. al., 2006). Los cálculos se realizaron para 151 puntos del Archipiélago Cubano (Tabla 1). Se tuvo en cuenta la categoría del organismo tropical de acuerdo a la Escala Internacional Saffir-Simpson, la cual norma la intensidad de los huracanes atendiendo a la intensidad del viento. Además se consideraron las direcciones de los CT más probables, tomando en cuenta los ángulos a partir de los 45° rotando hacia el sur hasta los 315°, este proceso se ejecutó para los 151 puntos seleccionados a ser investigados (Tabla 1), siempre teniendo en cuenta las direcciones de las trayectorias de los CT que más pueden afectar cada punto de cálculo.

## Resultados obtenidos.

A continuación se presenta la imagen de la Página Principal del Atlas (Figura 3).



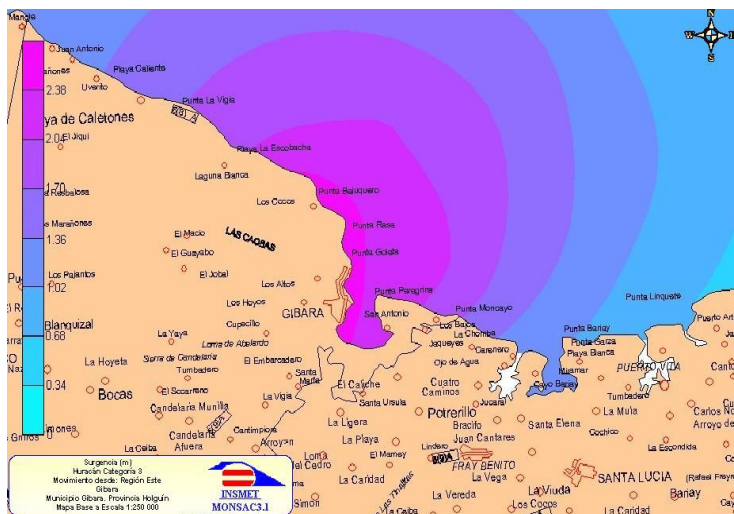
Figura 3. Portada del Atlas Digital de Surgencias provocadas por los Ciclones Tropicales en el Archipiélago Cubano.

## Afectaciones por surgencias ocurridas durante la temporada ciclónica del año 2008 en el Archipiélago Cubano.

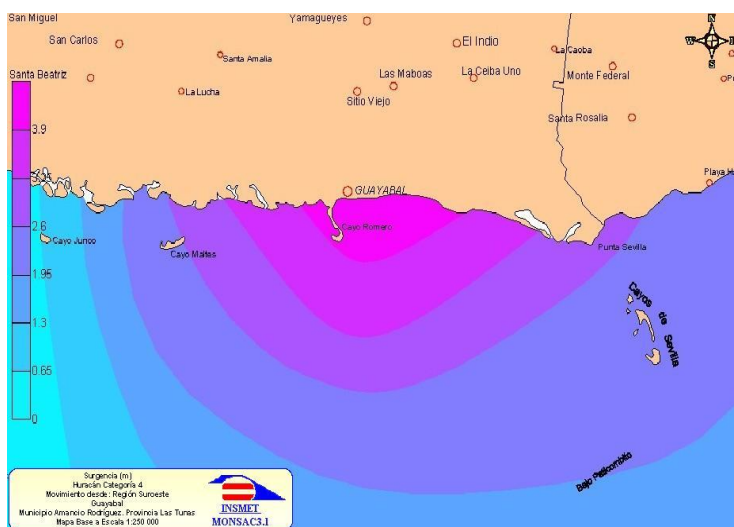
Los huracanes Gustav, Ike y Paloma del año 2008, con la surgencia asociada a ellos, afectaron severamente el Archipiélago Cubano. Seguidamente se muestran algunas de las simulaciones numéricas tomadas del Atlas Digital de Surgencias Cuba, con las cuales se realizaron los pronósticos de surgencias para las diferentes localidades con posibles afectaciones, lo que permitió la toma de medidas oportunas y con suficiente antelación a la Defensa Civil Cubana, no teniendo que lamentarse la pérdida de vidas humanas por inundaciones costeras provocadas por la surgencia, aunque si fueron severos los daños materiales ocasionados (Figuras 4, 5 y 6).



Figura 4. Altura de la surgencia provocada por el huracán Gustav del 2008 en Playa Bibijagua, Isla de la Juventud, Archipiélago de Los Canarreos, Cuba.



**Figura 5. Altura de la surgencia provocada por el huracán Ike del 2008 en el Asentamiento Costero de Gibara, provincia de Holguín, Cuba.**



**Figura 6. Altura de la surgencia provocada por el huracán Paloma del 2008 en el Asentamiento Costero de Guayabal, provincia Las Tunas, Cuba.**

## Conclusiones generales.

Al contar el Servicio Meteorológico de Cuba con un Atlas Digital de Surgencias provocadas por los Ciclones Tropicales, que cubre todo el territorio del Archipiélago Cubano, posibilitó realizar los pronósticos de surgencias que fueron necesarios, durante la temporada ciclónica del año 2008. Todo lo cual permitió tomar, por parte de las autoridades competentes y la Defensa Civil Nacional, las medidas preventivas adecuadas a cada situación de peligro por surgencias, en las diferentes localidades que se verían afectadas por tan dañino fenómeno, durante una de las temporadas ciclónicas más activas que históricamente se conoce en la región oceánica Atlántica. Todo ello favoreció a no tener que lamentar pérdidas de vidas humanas por inundaciones costeras provocadas por la surgencia, aunque si se tuvieron sensibles pérdidas materiales a lo largo de una gran parte de la zona costera del Archipiélago Cubano.

A todo lo anterior también contribuyeron los avances que se han tenido en el país, en los estudios realizados sobre esta materia por un equipo de especialistas del Instituto de Meteorología de la República de Cuba durante más de 30 años. Ello muestra el desarrollo alcanzado en esta temática en Cuba, y los resultados favorables en las labores de prevención ante tan dañino fenómeno de origen natural.

### **Bibliografía.**

- Eye of The Storm (2006): Sistema Computacional para la visualización de la base de datos de ciclones tropicales (DEMO). The Atlantic Hurricane Database Re-analysis Project Documentation. NOAA/Hurricane Research Division, Miami, Florida. Sitio Web <http://www.starstonesoftware.com/>.
- HURREVAC (2006): Sitio Web <http://www.hurrevac.com/plugings.htm>.
- Jelesnianski, C. P., J. Chen y W. Shaffer (1992): SLOSH. Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes. NOAA Technical Report NWS 48.
- Jelesnianski, C. P. (1993): Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. Chapter 4. The Habitation Layer, WMO/TD No. 560.
- Landsea W. Christopher, C. Anderson, N. Charles, G. Clark, J. Dunion, J. Fernandez Partagas P. Hungerford, C. Neumann y M. Zimmer (2005): The Atlantic Hurricane Database Re-analysis Project Documentation. NOAA/Hurricane Research Division, Miami, Florida. NOAA/Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado. Florida International University, Miami. SAIC, Miami. Deceased. Contributed as a Chapter for the RPI Book. 6 January 2003.
- Martín Sol de Villa y J. Martínez Aranzabal (1990): Análisis Medio y Extremal del Oleaje. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, España. pp. 72.
- Martín Sol de Villa, M. Jesús, J. María Grassa y J. Carlos Solás (1996): Descripción de las frecuencias de distribución más utilizadas en estudio de climas marinos. Curso Hispano-Cubano de Acciones en Costas. Cap. 6 Oleaje. Centro de Estudios de Puertos y Costas. Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente, España.
- Pérez Parrado, R., I. Salas García y Jesús Dole Chávez (2006): Proyecto de Investigación 01309168 (Informe final) "Impacto de la surgencia en el archipiélago cubano, considerando los Cambios Climáticos". Capítulo 3 "Metodologías y Bases de Datos". INSMET. La Habana, Cuba .pp 113- 138.
- Pérez Suárez, R., R. Vega, M. Limia, M. Sarmientos y demás colaboradores (2000): Los Ciclones tropicales en Cuba, su variabilidad y posible vinculación con los cambios globales. Capítulos III y IV. Proyecto de Investigación 01301094. La Habana, Cuba. 172 pp.
- Salas García, I., R. Pérez Parrado, S. Samper Trimiño, J. Dole Chávez, A. Pérez Hernández, C. Rodríguez y B. Pantaleón Orozco (2006): Mapas de Peligro por surgencia para el archipiélago cubano. Escenario actual y previsto por Cambio Climático. Informe de resultado del Proyecto de Investigación No. 01309168 (Informe final) "Impacto de la surgencia en el archipiélago cubano, considerando los Cambios Climáticos", perteneciente al Programa Nacional de Cambio Climático en Cuba. INSMET. La Habana, Cuba. 207 pp.
- Wagenseil R. (2000): Atlas of Probable Storm Effects in the Caribbean Sea. Caribbean Disaster Mitigation Project. Models and data output by Watson Technical Consulting, Inc. Editing and presentation by Ross Wagenseil, Ph.D. March 2000.
- WMO (2006): Observations and forecasts of storm tides. Workshop Topic Reports. Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclone (IWTC-VI). Report Series TMRP No. 72. San José, Costa Rica, 21-30 November 2006.