

Atlas digital de surgencias provocadas por los ciclones tropicales en el archipiélago cubano

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

Resumen

El objetivo fundamental de este proyecto de investigación consiste en elaborar un atlas digital de surgencias provocadas por los ciclones tropicales para el archipiélago cubano. En él se realiza el estudio estadístico de los ciclones tropicales (CT) que han afectado los asentamientos costeros, cayos y viales que conducen a la cayería insular del archipiélago cubano, todo ello para la base de datos sobre CT «HURDAT» del Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos de América en la etapa que abarca desde el año 1851 al 2005. Se determinan los objetos a estudiar en la región a investigar, los ángulos de afectación de los CT, puntos de cálculos, y a continuación se ejecuta la simulación de la altura que alcanza la surgencia al paso de estos organismos tropicales con el Modelo Numérico de Alta Resolución MONSAC3.1 (Modelación Numérica de la Surgencia en los Alrededores de Cuba). Para ello se considera el valor máximo de la envolvente de la altura de las aguas. Todo este proceso de cálculo se realiza para las distintas intensidades de los CT de acuerdo con la escala internacional Saffir-Simpson, tomando los valores iniciales de presión atmosférica mínima y viento máximo para cada intervalo de la escala, también se simulan las afectaciones de las tormentas tropicales. Se incluyen los mapas de peligro por surgencia para varios períodos de retorno.

El atlas digital de surgencias que se propone se visualiza en computadoras personales a través de un software de fácil aplicación para cualquier usuario. El trabajo operativo que se ejecuta en tiempo real permite conocer con suficiente antelación cual es la posible situación, con respecto a la surgencia, a la que deban enfrentarse por afectación de un CT en una determinada región del archipiélago cubano. El resultado final va dirigido fundamentalmente al servicio operativo del Instituto de Meteorología de la República de Cuba, a través de los Centros de Meteorología Marina, Pronósticos y los centros meteorológicos provinciales. Se concluye con un informe final que incluye el manual de usuario del atlas digital y su correspondiente versión electrónica.

Palabras claves: Ciclones tropicales, surgencia, mapa de peligro, atlas digital.

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 con las inundaciones originadas por la surgencia asociada a los ciclones tropicales (CT), la cual es 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, sobre todo, se destacan 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 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.

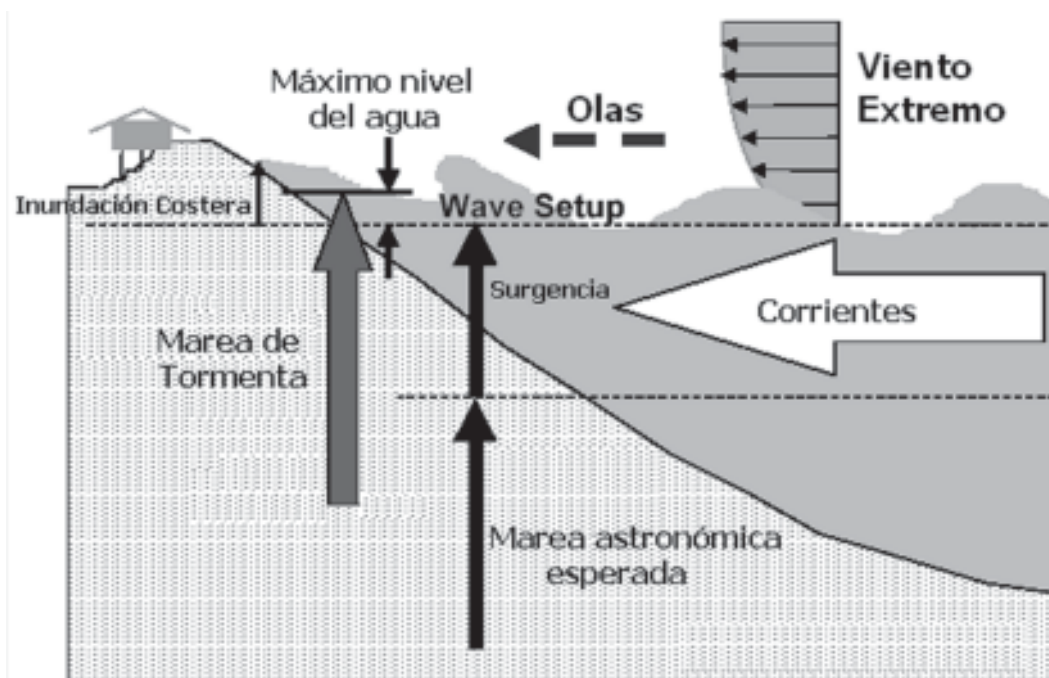
La surgencia se define como la elevación anormal y temporal del nivel medio del mar, sobre la marea astronómica, causada por la tensión ejercida por los fuertes vientos, y en menor grado, por la caída de la presión atmosférica, debido al paso de un ciclón tropical o extratropical, aunque las más devastadoras 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 sobreelevación del nivel medio del mar por las olas rompiendo en la línea costera, el cual es conocido en lengua de habla inglesa por el término *wave setup* (WMO, 2006) (Fig. 1).

En la altura que alcanza la surgencia y la extensión de las inundaciones tierra adentro desempeñan un papel fundamental: 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, topografía del terreno y configuración de la costa, las construcciones y edificaciones en el litoral, la vegetación existente, entre otros. 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; a ello contribuye la morfología de la costa. En este último aspecto desempeña también 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, sobre todo 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 inver-



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.

Fig. 1. Componentes de la marea de tormenta.

tido, 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 desde la década de los años 70 hasta la fecha, se han desarrollado proyectos de investigaciones para obtener modelos estadísticos y luego numéricos, que permitan el cálculo de la surgencia y la confección de los mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de este dañino fenómeno (Salas *et al.*, 1999 y 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 mencionado modelo; para ello se ha utilizado la envolvente de la altura de las aguas (EOHW) y la categoría de los huracanes a partir de la escala Saffir-Simpson (Jarvinen *et al.*, 1985 y 1990). La utilización en los modelos de la EOHW, a la hora de confeccionar un atlas por surgencia y en las simulaciones en tiempo real, resulta de gran utilidad ya que tiende a compensar la falta de información hidrometeorológica de la región en que se esté trabajando (Jarvinen y Gelbert, 1986).

Esta consiste en representar el valor máximo de la altura alcanzada por la surgencia para cada punto de la rejilla de cálculo, independiente del tiempo, y brinda una información sobre el comportamiento que tendrá la altura de la surgencia en un escenario dado para distintos CT. Se recomienda elaborar los mapas de EOHW para cada cuenca, tomando en cuenta la climatología de los CT que han afectado la región de estudio.

Otro esfuerzo notable en el desarrollo de la modelación numérica de la surgencia y la confección de un atlas de surgencias, lo constituyó la aparición del modelo «TAOS» (Watson, 1995) utilizado en los Estados Unidos y en el Caribe, con el objetivo de elaborar un atlas de surgencia para esta región oceánica (Wagenseil, 2000).

Como puede apreciarse 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 cuan-

tiosos recursos materiales albergados en su zona costera y salvaguardar la vida de las personas que residen en esas regiones geográficas.

Síntesis bibliográfica sobre la surgencia

Se hace un recorrido por la historia sobre la modelación de la surgencia internacionalmente y en Cuba, así como de los diferentes hitos en el estudio del peligro, la vulnerabilidad y el riesgo de las costas del archipiélago cubano. En esta se pone de manifiesto el interés de los científicos del Instituto de Meteorología (INSMET) y de otras instituciones nacionales como el Instituto de Planificación Física (IPF), en el dominio de los métodos de diagnóstico y pronóstico de la surgencia y de las inundaciones costeras para la salvaguarda de la vida humana y bienes materiales de la sociedad cubana. Se hace un recuento de los primeros trabajos de tipo descriptivo realizados por los meteorólogos de la etapa prerrevolucionaria, antes del año 1959, y de lo acometido a partir de la graduación de los primeros meteorólogos de nivel superior en Cuba en la década de los años 60.

Asimismo, se pone de manifiesto que el interés por los CT y el impacto de las penetraciones del mar por efecto de la surgencia en la zona costera que han provocado severos desastres en Cuba, durante todo el siglo pasado fue y es patrimonio de meteorólogos de todas las épocas desde Millas (1932), Ortiz (1984), Linares (1976) todos de la etapa prerrevolucionaria y Pérez Parrado (1974, 1981, 1994, 2003, 2005, 2006), Moreno (1976), García (1996 y 1998), Salas (1999, 2005 y 2006), Mitrani (en PNUD, 1998 y 2001) y Juantorena *et al.* (1996 y 1998), estos últimos profesionales graduados en la Escuela de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba, en Facultades de la Universidad de La Habana y en instituciones de la URSS. Los trabajos iniciados por estos investigadores comenzaron en la década del 70 y han continuado hasta el presente, lo que ha dado como resultado un superior conocimiento y mejores métodos para poder enfrentar esta amenaza y dar una respuesta adecuada.

También se mencionan los trabajos más importantes en lo referente al peligro y el riesgo por surgencia producidas por los ciclones tropicales y el papel que han jugado el Instituto de Meteorología, el Instituto de Planificación Física y el Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil de Cuba (EMNDC) en su conocimiento y determinación, así como de su predicción y prevención.

La cooperación multi-institucional (INSMET, IPF y EMNDC) en las investigaciones realizadas ha resultado muy eficaz, y ha demostrado que este

es el método de trabajo adecuado para obtener los mejores resultados.

¿Cómo se modela la surgencia?

En la franja tropical adquieren gran importancia los desastres naturales de índole meteorológicos, entre ellos se destacan los causados por los CT con los fenómenos naturales asociados a ellos y en primer orden la surgencia.

Por todo lo expuesto con anterioridad resulta de suma importancia el conocer al detalle las características físico-geográficas de las regiones a estudiar. En este sentido existe una gran cantidad de autores que han incursionado en esta temática en el archipiélago cubano, tales como Alcolado (2003), Esquemas de Desarrollo del IPF (IPF 1995, 1997 y 2002), GEF/PNUD (1999 y 2003).

Debido al alto potencial destructivo de la surgencia, desde finales de la década del 50 se han desarrollado distintos métodos para pronosticar este evento, los que se pueden agrupar en dos ramas: modelos estadísticos y modelos dinámicos. Ellas no son completamente independientes, muchos de los modelos dinámicos contienen términos análogos a los términos de tensión de Reynolds los cuales deben ser evaluados empíricamente. Por otra parte, algún grado de razonamiento físico y dinámico es usualmente empleado en la selección de los posibles predictores en los métodos estadísticos.

Modelos estadísticos

Estos modelos se basan en el análisis de los datos históricos de las surgencias ocurridas y se utilizan los registros de las alturas alcanzadas por el agua y la marea astronómica en el área de interés. Es necesaria la disponibilidad de una larga base de esos registros para que puedan ser considerados como representativos de las condiciones a esperar en el futuro y entonces desarrollar mediante técnicas de regresión u otro tipo un modelo de pronóstico. En algunos casos los registros de otras localidades similares pudieran ser usados. Los primeros modelos estadísticos fueron elaborados en la década de los años cincuenta (Conner *et al.*, 1957 y Hoover, 1957).

Pérez Parrado en 1974, elaboró en Cuba, el primer modelo de corte empírico estadístico, una segunda versión apareció en 1981, que tenía en cuenta no solo la intensidad del ciclón tropical, sino también su velocidad de traslación, el ángulo de entrada en tierra y la distancia a la costa de la isobata de 20 m, lo que incorporaba de manera indirecta la influencia de la batimetría.

Modelos dinámicos

Los modelos numéricos pasados ofrecieron una solución alternativa al problema del cálculo de la surgencia, pero con el desarrollo y la renovación de las computadoras personales, la amplia aplicación de nuevas tecnologías en el monitoreo y comunicación de datos relacionados con los CT, y el desarrollo de distintos estudios ha llevado a que sean actualmente la vía más utilizada para calcular la surgencia, jugando un importante papel en la prevención y mitigación de desastres.

En un número considerable de modelos dinámicos las ecuaciones de la hidrodinámica utilizadas son la de continuidad y las de movimiento, integradas verticalmente desde el fondo hasta la superficie del mar y expresadas en términos de la velocidad media de la corriente horizontal y del transporte de masa, además se asume: el fluido homogéneo, se ignora la curvatura de la tierra y el efecto de las olas, el fondo impermeable y las aceleraciones verticales despreciables.

Pioneros de la modelación numérica fueron los trabajos de Platzman (1963), citados por Miyazaki (1965), Harris y Jelesnianski (1964) y Jelesnianski (1965 y 1992), posteriormente la modelación numérica dio un gran paso en su desarrollo al salir a la luz el modelo numérico SLOSH (Surgencia por huracanes en océanos, lagos y sobre tierra) (Jelesnianski *et al.*, 1993), modelo operativo en los Estados Unidos y adaptado a otros países.

Para la mayoría de las cuencas en que está el operativo usa una rejilla telescópica polar, lo que permite una magnífica resolución en el área de mayor interés, además de superar muchos de los problemas asociados con las condiciones de frontera impuestas a los modelos anteriores, donde para mejorar la resolución en la zona de mayor interés era necesario imponer una condición de frontera en una región de significativa actividad de la surgencia, convirtiéndolas en complejas y variables espacial y temporalmente. Aunque está creado para correr operativamente en tiempo real, hoy es usado también para identificar las áreas costeras propicias a inundaciones por surgencias (para una mayor información consultar a Jelesnianski *et al.* (1993).

El primer modelo dinámico aparece en 1994, en Cuba, con el MONSAC 1 (Pérez Parrado y García, 1994) que utilizaba una batimetría ficticia, construida a partir de la pendiente de la plataforma, en 1998 García y Pérez Parrado elaboran el MONSAC 2, que utilizaba una batimetría real y finalmente en el 2003, aparece el MONSAC 3, que tenía mejorada la resolución y permitía trabajar en la cayería insular

de Cuba (Pérez Parrado *et al.*, 2003). Una versión del modelo llamada MONSAC3.1 se obtiene en el año 2005 (Pérez Parrado *et al.*, 2005).

Registros históricos de las inundaciones costeras por surgencias en Cuba

El archipiélago cubano ha sido afectado en muchas ocasiones por huracanes que han traído aparejadas grandes surgencias. Así se tiene que la asociada al huracán de noviembre de 1932, produjo la mayor catástrofe natural ocurrida en Cuba, arrasó completamente el asentamiento costero de Santa Cruz del Sur, que ocasionó 3 033 muertes y el nivel de las aguas ascendió más de 6 m (Linares 1976), por simulación numérica realizada con el modelo MONSAC3.1 se determinó que la altura del mar alcanzó 7,13 m (Salas *et al.*, 2005). En octubre de 1944 en Guanímar y el Cajío, costa sur de la provincia de La Habana, el mar penetró 10 y 6 km respectivamente (Ortiz, 1976).

Otras surgencias significativas ocurrieron en octubre de 1926, septiembre de 1933 y reciente, durante el paso del huracán Kate de 1985 cuando se reportaron profundas invasiones del mar en zonas de la costa norte, principalmente en Caibarién, Isabela de Sagua y Cárdenas, y durante el paso de los ciclones tropicales Lili de 1996, Irene de 1999 y Michelle del 2001 en el sur de La Habana, Matanzas, Cienfuegos y el Archipiélago de Los Canarreos, con posterioridad el huracán Charley con una surgencia de 4 m arrasó de nuevo el asentamiento costero de Playa del Cajío desapareciéndolo prácticamente en su totalidad; aunque en esta ocasión no hubo que lamentar muertes, debido a la rapidez y eficacia con que actuó Defensa Civil de Cuba.

Impacto notable lo tuvo la inundación producida en el litoral habanero por el ciclón tropical Wilma en el 2005, al pasar por el norte de la isla de Cuba y que produjo una surgencia de 1,54 m, lo que unido al oleaje que colisionaba perpendicularmente con la costa permitió la penetración del agua profundamente en el territorio.

Por último, las surgencias provocadas por los huracanes Gustav e Ike del 2008, ocasionaron fuertes inundaciones costeras combinadas con el oleaje en gran parte del territorio del archipiélago cubano.

Estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo

Los primeros estudios en esta dirección se realizaron a principios de los años 90, por Lezcano *et al.* (1993), posteriormente con la realización del proyecto Cuba/94/003, que involucró al Instituto de

Meteorología como entidad rectora y a los Institutos de Planificación Física, Oceanología, Geografía Tropical y a la Defensa Civil de Cuba como participantes, se dio un paso de avance significativo, pues se logró confeccionar los mapas de peligro y riesgo para la isla de Cuba y la Isla de la Juventud, un resultado que nunca antes se había obtenido.

Además de los avances mencionados de gran valor práctico, la obra tuvo una gran valía metodológica al establecer métodos de trabajo que han sido utilizados en investigaciones posteriores.

Investigaciones apreciables han sido los trabajos de Mitrani, 1998 (en PNUD 1998) y 2001, así como Casals, 2001. Estos trabajos y los de surgencia ofrecen una panorámica sobre inundaciones costeras en Cuba. De muy importante pueden catalogarse los trabajos, Las Zonas Costeras y los Cambios Globales, en la monografía «Los Asentamientos Humanos, el uso de la Tierra y los Cambios Globales en Cuba», publicado por la Editora del Instituto de Planificación Física (Rodríguez *et al.*, 2001) y la monografía «Las penetraciones del mar en las costas de Cuba, las zonas más expuestas y su sensibilidad al Cambio Climático» (Mitrani *et al.*, 2001).

Situación actual y futura

Con la culminación del proyecto de investigación «Impacto de la surgencia en el archipiélago cubano, considerando los cambios climáticos» (Salas *et al.*, 2006), se resuelve uno de los problemas existentes en la determinación del riesgo por inundaciones costeras provocadas por la surgencia en el archipiélago cubano, ya que era necesario poseer un modelo con resolución capaz de reproducir la surgencia a escala de la cayería insular. El estudio se realizó tomando la base de datos de CT para el período 1851 al año 2002. En este trabajo, además de la modelación numérica de la surgencia, se realizó el estudio de riesgo para los archipiélagos de Los Canarreos y Sabana-Camagüey, con un grado de precisión y detalle muy alto pues se hizo hasta el nivel de playas, edificaciones construidas y parcelas propuestas para un futuro próximo.

El Atlas digital de surgencias para el archipiélago cubano, que se está confeccionando en el marco de un proyecto de investigación ejecutado por el grupo de Meteorología Dinámica del INSMET, comenzó en el año 2007 y debe culminar en año 2010. Al mismo tiempo se realizan investigaciones sobre la surgencia para el archipiélago cubano teniendo en cuenta los escenarios de sobre elevación del nivel medio del mar por cambio climático para Cuba representados por los años 2050 y 2100. Es-

tos estudios de surgencia serán el cierre de un ciclo de investigaciones dedicado a la modelación y estudios de peligro y riesgo por surgencia provocada por los ciclones tropicales que se extendió por más de 30 años y que ha permitido dar respuesta, en materia de surgencia, a los requerimientos actuales del país.

Objetivos del proyecto «Atlas digital de surgencias provocadas por los ciclones tropicales en el archipiélago cubano»

El objetivo fundamental de este estudio es obtener el Atlas digital de surgencias provocadas por los ciclones tropicales en el archipiélago cubano.

Mientras que los objetivos específicos son los siguientes:

- Determinar los asentamientos costeros, cayos y viales a estudiar en la región de estudio.
- Estudio estadístico de los ciclones tropicales en el área de estudio para el período 1851 al año 2005.
- Determinar los ciclones tropicales que han podido ocasionar surgencias en las regiones de estudio y los ángulos de afectación del organismo.
- Cálculo de los períodos de retorno de los ciclones tropicales por asentamientos costeros, cayos y viales del área de estudio.
- Simulación numérica de la altura de la surgencia en la región de estudio con el Modelo Numérico «MONSAC» en su versión 3.1 del año 2006, teniendo en cuenta la categoría del organismo tropical y el ángulo de afectación a tierra.

Región geográfica 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 (Fig. 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.

Las simulaciones numéricas se realizaron con el modelo numérico «MONSAC» en su versión 3.1 (Pérez Parrado *et al.*, 2006).

Materiales y métodos

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 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 de alta resolución MONSAC3.1 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 extremos se realizó por el método de las frecuencias picos (Martín, *et*

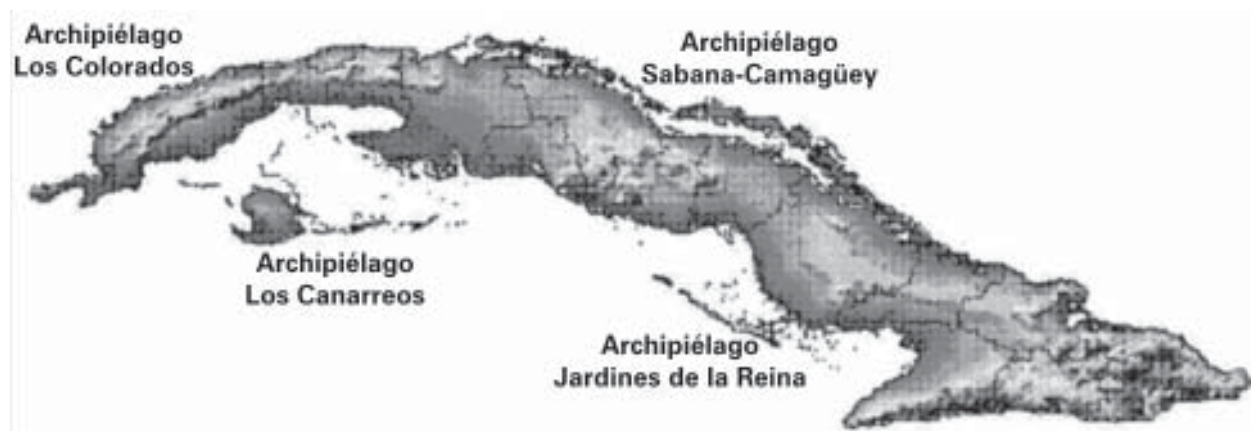


Fig. 2. Región de estudio. Isla de Cuba y los archipiélagos insulares de Los Colorados, Sabana-Camagüey, Los Canarreos y Jardines de la Reina.

al., 1990; Martín y Martínez, 1996), ordenando los datos en forma descendentes de acuerdo con la escala internacional Saffir-Simpson que norma la intensidad de los CT atendiendo a la intensidad del viento.

La evaluación del peligro 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 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 Fig. 2).

Tabla 1. Cantidad de puntos a calcular

Archipiélago cubano	Totales	Cantidad de puntos de cálculos
Provincias	14	
Municipios costeros	90	118
Cayos	31	31
Viales	2	2
Total		151

Nota: 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.

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 metodo-

logía 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.

A continuación se presentan dos ejemplos (Figs. 3 y 4), de los 151 puntos de cálculos escogidos para este estudio (Tabla 1), donde se muestran las trayectorias de los CT que han podido provocar surgencias en la localidad de Las Tumbas, extremo más occidental de la provincia de Pinar del Río, y el asentamiento costero de Guayabal, costa sur de la provincia de Las Tunas, para el período 1851 al año 2005. Estos dos casos son representativos de las situaciones con más y menos afectaciones por CT que han podido provocar surgencia respectivamente, del total de la muestra investigada.

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 estos donde la fórmula utilizada se expresa de la siguiente forma:

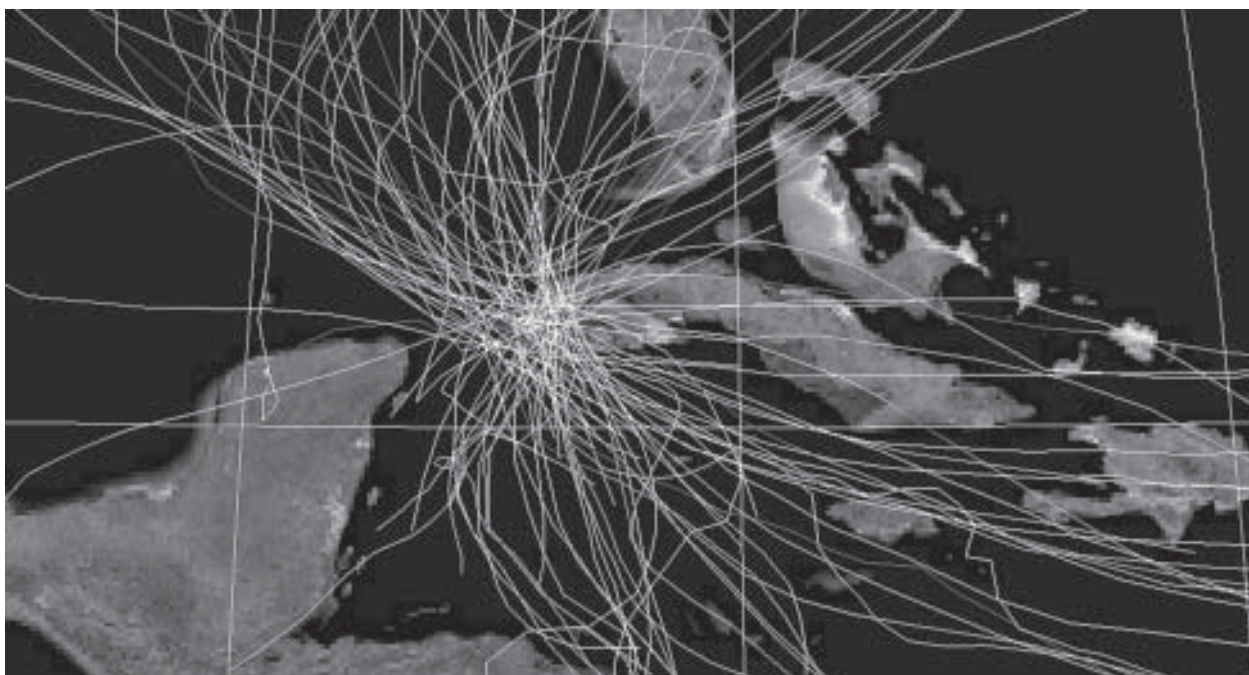
$$F = \gamma \lambda = \frac{N_i}{T_e} \frac{(n) = 1 \dots N_i}{N_i}$$

Donde:

(N_i) es la cantidad total de ciclones tropicales ocurridos en el área Atlántica durante el período de tiempo (T_e) años, (N_i) 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_i) cuando se consideran todos los estratos de intensidad.

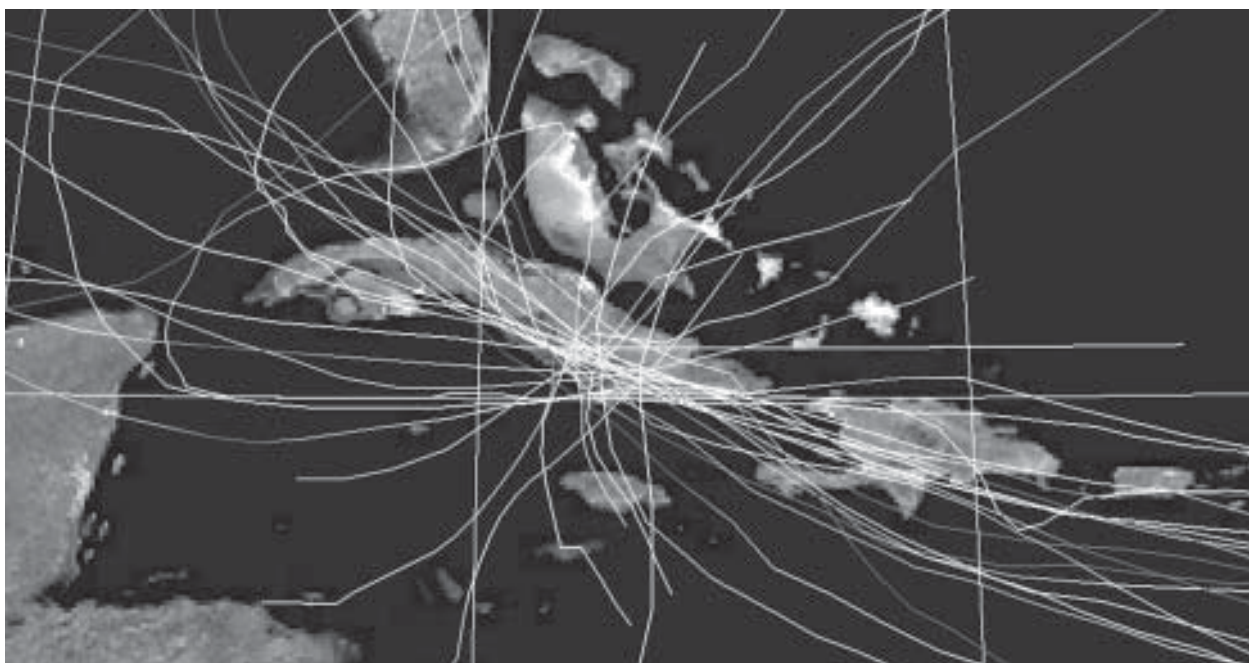
Simulación numérica de la altura que puede alcanzar la surgencia en la región de estudio

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 con la escala internacional Saffir-Simpson, la



Fuente: Sistema Computacional Eye of the Store, 2006 (DEMO). Sitio Web <http://www.starstonesoftware.com/>

Fig. 3. Trayectorias de los CT que han podido provocar surgencias en la localidad de Las Tumbas, extremo occidental de la provincia de Pinar del Río. Período 1851 al año 2005.



Fuente: Sistema Computacional Eye of the Store, 2006 (DEMO). Sitio Web <http://www.starstonesoftware.com/>

Fig. 4. Trayectorias de los 29 CT que han podido provocar surgencias en el asentamiento costero Guayabal, sur de la provincia de Las Tunas. Período 1851 al año 2005.

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.

Análisis y discusión de resultados

Dado que la ejecución del proyecto no termina hasta el año 2010 y la extensión del trabajo, a con-

tinuación se presenta la imagen de la página principal del atlas que se está elaborando y varios ejemplos de los mapas confeccionados (Figs. 5-9).



Fig. 5. Portada del Atlas digital de surgencias provocadas por los ciclones tropicales en el archipiélago cubano.

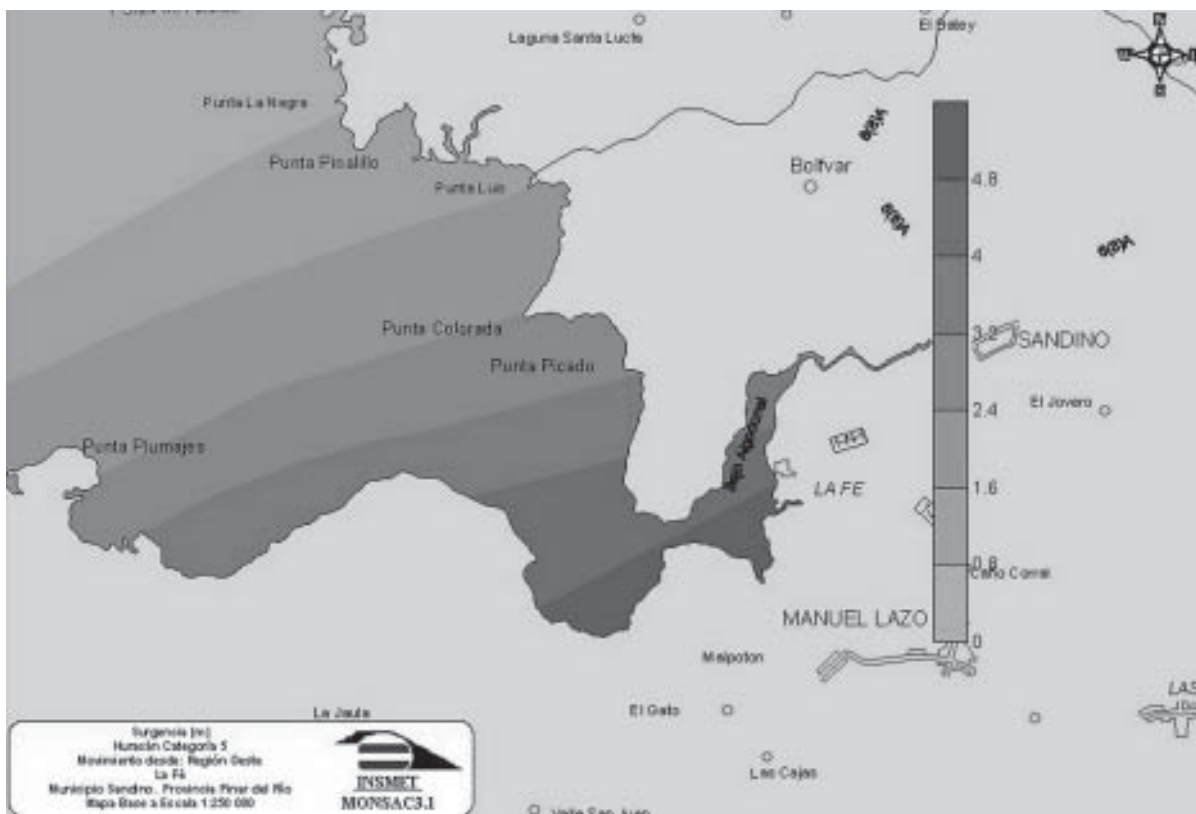


Fig. 6. Surgencia provocada por un huracán categoría 5, moviéndose desde región oeste. Asentamiento costero de La Fe, provincia de Pinar del Río.



Nota: Para las áreas en color blanco no se realizaron cálculos.

Fig. 7. Surgencia provocada por un huracán categoría 3, moviéndose desde región oeste. Asentamiento costero de La Herradura, provincia La Habana.



Fig. 8. Surgencia provocada por un huracán categoría 2, moviéndose desde región nordeste. Punta Cunaguas, provincia Sancti Spiritus.



Fig. 9. Surgencia provocada por un huracán categoría 1, moviéndose desde región nordeste. Playa Nazabal, provincia Villa Clara.

Conclusiones

El proyecto se desarrolla exitosamente. A pesar de no concluir hasta el año 2010, ya en el 2008 se han utilizado algunos de los resultados obtenidos durante la presente temporada ciclónica.

Bibliografía

- Alcolado, P. (2003): «Necesidad y características del Manejo Integrado Costero. El caso de estudio Sabana Camagüey». En Taller de capacidad 21. Experiencias y lecciones aprendidas en del Proyecto PNUD/GEF Sabana Camagüey.
- Casals, T. R. (2001): «Los procesos de transformación del oleaje e incremento del nivel medio del mar en Cayo Largo del Sur, archipiélago de Los Canarreos». Tesis de Maestría en Meteorología, INSMET, Cuba, 55 p.
- Conner, W. C.; R. H. Kraft y D. L. Harris (1957): «Empirical Methods for Forecasting the Maximum Storm Tide Due to Hurricanes and Other Tropical storm», *M. W. R.*, 85 (4): 113-116.
- Eye of the Storm (2006): «Sistema Computacional para la visualización de la base de datos de ciclones tro-

picales (DEMO)». The Atlantic Hurricane Database Re-analysis Project Documentation. NOAA/Hurricane Research Division, Miami, Florida. Sitio Web <http://www.starstonesoftware.com/>.

- García, O. (1998): «Modelo Dinámico para pronosticar la Surgencia provocada por los ciclones tropicales en las costas de Cuba». Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas, INSMET, La Habana, Cuba, 73 p.
- García, O. y R. Pérez Parrado (1996): «Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba». Segunda versión. MONSAC2. En el *BSMC*, 2 (1): julio de 1996.
- GEF/PNUD (1999): Protección de la Biodiversidad y Desarrollo Sostenible del Ecosistema.
- GEF/PNUD (2003): Ciclo de manejo integrado costero: Marco Teórico Metodológico.
- Harris, D. L. y Ch. Jelesnianski (1964): «Some problems involved in the numerical solutions of tidal hydraulics equations». *M. W. R.*, 92 (9): 409-422.
- Hoover, R. A. (1957): «Empirical relationships of the central pressures in hurricanes to the maximum surge and storm tide». *M. W. R.*, 85 (5): 167-174.
- HURREVAC (2006): Sitio Web <http://www.hurrevac.com/plugings.htm>.

- Jarvinen, R. Brian; A. Barry Damiano and Gloria J. D. Lockett (1985): *Strom Surge Atlas for Corpus Christi, Texas*.
- Jarvinen R. Brian y J. Gelbert (1986): *Comparison of observed versus SLOSH Model computer storm surge hydrographs along the Delaware and New Jersey shorelines for hurricane Gloria*.
- Jarvinen R. Brian *et al.* (1990): «Hurricane Storm Tide Atlas». National Weather Service, Melbourne, Florida. Web Site <http://www.srh.noaa.gov/mlb/VOLUS.html>
- IPF (1995): *Potencial turístico*. Departamento de Planeamiento Turístico, Instituto de Planificación Física, 3T. La Habana, Cuba. (publicación interna).
- _____ (1997): *Esquema para el Desarrollo Turístico del Sur de la Isla de la Juventud y el Archipiélago de los Canarreos*. Instituto de Planificación Física, La Habana, Cuba.
- _____ (2002): *Dirección de Turismo*. Instituto de Planificación Física, Cuba.
- Jelesnianski, C. P. (1965): «A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf». *M. W. R.*, 93 (6): 343-358.
- _____ (1993): «Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting». Chapter 4. The Habitation Layer, WMO/TD No. 560.
- Jelesnianski, C. P.; J. Chen y W. Shaffer (1992): «SLOSH. Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes». NOAA Technical Report NWS 48.
- Juantorena Alén, Y. y P. Beauballet (1996): «Método de cálculo para la predicción del mar de leva». Departamento de Meteorología Marina, INSMET.
- Juantorena Alén, Y.; I. Mitrani Arenal y P. Beauballet (1998): «Las inundaciones por oleaje en el Malecón Habanero con el escenario actual y el previsto por posible Cambio Climático», INSMET, La Habana, Cuba, 20 p.
- Landsea, W. Christopher *et al.* (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.
- Lezcano, J. C.; A. L. Pérez; R. Casals y A. Peñate (1993): «Aspectos esenciales del mapa de riesgo por penetraciones del mar en las costas cubanas». En *Geodinámica Ambiental y Riesgos Naturales*. T. 1, Memorias del IV. Encuentro de Geógrafos de América Latina Mérida, Venezuela, pp. 391-397.
- Linares, E. (1976): «El huracán de 1932». Crónica, UDICT del INSMET, La Habana, Cuba, 15 p.
- 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, 72 p.
- 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.
- Millas, J. C. (1932): *Resumen de Huracanes de 1932*. UDICT, INSMET.
- Miyasaki, M. (1965): «A numerical computation of the storm surge of hurricane Carla 1961 in the Gulf of México». Reprinted from the *Oceanographical Magazine*, 17 (1-2), nov.
- Mitrani Arenal, I. *et al.* (2001): *Las penetraciones del mar en las costas de Cuba, las zonas más expuestas y su sensibilidad al Cambio Climático*. Monografía, UDICT-INSMET, La Habana, Cuba, 150 p.
- Moreno, A. R.; I. Salas García y R. Pérez Parrado (1976): *Surgencias originadas por las tormentas tropicales, sus causas y efectos*. Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba, 20 p.
- Ortiz Hector, R. (1984): «Crónica del Huracán de 1846», INSMET. La Habana, 3 p.
- Pérez Parrado, R. (1974): «Pronóstico de las mareas máximas en los ciclones tropicales» [inédito] UDICT del Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana.
- _____ (1981): «Mareas en los ciclones tropicales. Su amplitud y perfil». [Inédito], UDICT del Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana.
- Pérez Parrado R. y O. García (1994): «Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba». Primera Versión MONSAC1. En *Memorias del VIII Congreso Brasileiro de Meteorología, II Congreso Latino-Americano e Ibérico de Meteorología*. «La Meteorología en la Prevención de los Desastres», vol. 2, pp. 502-509.
- Pérez Parrado R.; I. Salas y J. Dole (2003): «Modelo Numérico para pronosticar la surgencia que provocan los huracanes en las costas de Cuba (MONSAC3)». *Revista Cubana de Meteorología*, 10 (2): 66-70.
- Pérez Parrado, R.; I. Salas García y Jesús Dole Chávez (2005): Proyecto de Investigación 01309168 (Informe parcial) «Impacto de la surgencia en el archipiélago cubano, considerando los Cambios Climáticos». Cap. 3 «Metodologías y Bases de Datos», INSMET, La Habana, Cuba, pp. 113-138.
- _____ (2006): Proyecto de Investigación 01309168 (Informe final) «Impacto de la surgencia en el archipiélago cubano, considerando los Cambios Climáticos». Cap. 3 «Metodologías y Bases de Datos», INSMET, La Habana, Cuba, pp. 113-138.
- Pérez Suárez, R. *et al.* (2000): «Los Ciclones tropicales en Cuba, su variabilidad y posible vinculación con los cambios globales». Cap. III y IV, Proyecto de Investigación 01301094, La Habana, Cuba, 172 p.

- Platzman, G. W. (1963): «The dynamical prediction of wind tides on lake Erie». *Meteorological Monographs. Amer. Meteor. Soc.*, pp. 4-44.
- PNUD (1998): *Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las inundaciones costeras, Prevención y Reducción de su acción Destructiva. Monografía*, Proyecto de Investigación auspiciado por el Gobierno Cubano y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, 172 p.
- Rodríguez Otero, C. *et al.* (2001): *Los Asentamientos Humanos, el Uso de la Tierra y los Cambios Globales en Cuba*. Monografía, Instituto de Planificación Física, La Habana, Cuba, 373 p.
- Salas García, I. *et al.* (1999): «Mapa de peligro por surgencias de ciclones tropicales». *Rev. Cub. de Met.*, 6 (1): 33-37.
- Salas García, I. *et al.* (2005): «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 parcial) «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 p.
- Salas García, I. *et al.* (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 p.
- 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.
- Watson, C., Jr. (1995): «The Arbiter Of Storms (TAOS): a high resolution, GIS based storm hazard model», *National Weather Digest*, 20, 2-9.
- 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.

Abstract

The main objective of this research project was to develop an « Storm Surge Digital Atlas of for the Cuban archipelago. It performs statistical analysis of tropical cyclones (TC) that have affected coastal settlements, keys and roads leading to the keys of the Cuban archipelago, using on CT HURDAT database from the NHC of The United States in the stage that covers the period from 1851 to 2005. Where established the objects to study in the region to investigate, the angle of impact of CT, points calculation, and the n run the simulation of high the Storm surge to the passage of these tropical organisms with the High Resolution Numerical Model MONSAC3.1 (Numerical Modeling of storm surges around Cuba), displaying the maximum envelope of the Waters. This whole process is done for different intensities of the CT according to the International Saffir-Simpson scale, taking the initial values of minimum air pressure and maximum wind for each interval of the scale; it also simulates the effects from tropical storms. Hazard maps for Storm surges for different return periods are presented.

The Storm surge Digital Atlas is displayed on personal computers through a simple software application for any user. In real time works the Atlas allows sufficient time to know what could be the possible situation with respect to the storm surge. This Atlas is intended to use in the operational forecasting service in the Institute of Meteorology of the Republic of Cuba. It concludes with a final report that includes the User Manual Digital Atlas and its corresponding electronic version.

Key words: Tropical cyclones, storm surge, hazard charts, digital atlas.