Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2019, Vol.20, No. 1 pp. 30-43, ISSN 1729-3790

Modelación numérica de las inundaciones costeras provocadas por eventos extremos en el sector Peñas Altas -Rincón de Guanabo, La Habana

Luis Manuel Cortés-Consuegra* (1), Osvaldo Enrique Pérez-López (2) y Juan Manuel Fernández-Lorenzo (3)

(1) Departamento de Geología Ambiental Geofísica y Riesgos. Instituto de Geofísica y Astronomía. Cuba. Email: luis@iga.cu (2) Departamento de Meteorología Marina. Instituto de Meteorología. Cuba. Email: osvaldo.perez@insmet.cu(3) Facultad de Geografía. Universidad de La Habana. Cuba. Email: juanma@geo.uh.cu

Recibido: Julio 2018	*Aceptado: Noviembre 2018*

Resumen

El sector Peñas Altas– Rincón de Guanabo, constituye actualmente uno de los espacios más afectados por las penetraciones del mar, convirtiéndose en un área de estudio importante. El presente trabajo se realizó con el objetivo de analizar el comportamiento de las inundaciones costeras generadas por un huracán categoría 5 durante 12 y 24 horas de afectación, a partir del empleo de información de Vuelo Aéreo No Tripulado(VANT), su modelación numérica y el análisis espacial en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se consultaron diversas fuentes bibliográficas, mapas y ortofotos de alta resolución espacial, que permitieron la cartografía de los diferentes usos y coeficientes de rugosidad de la vegetación para la modelación numérica de las inundaciones costeras en el área de estudio en función de variables identificadas. Obteniéndose escenarios de inundación sobre modelos digital del terreno de alta resolución, su representación cartográfica y análisis de afectaciones.

Palabras clave: Lisflood, ortofoto, shapefile, VANT.

Numerical modeling of coastal floods caused by extreme events in the PeñasAltas - Rincon de Guanabo sector, Havana

Abstract

The PeñasAltas - Rincón de Guanabosector is currently one of the most affected areas by the penetrations of the sea, becoming an important studyarea. The present work was carried out with the objective of analyzing the behavior of the coastal floods generated by a category 5 hurricane during 12 and 24 hours of affectation, from the use of information of Unmanned Aerial Flight (UAV), its numerical modeling and the spatial analysis in Geographic Information Systems (GIS). Various bibliographic sources, maps and orthophotos of high spatial resolution were consulted, which allowed the mapping of the different uses and vegetation roughness coefficients for the numerical modeling of the coastal floods in the study area based on identified variables. Obtaining flood scenarios on high resolution digital terrain models, their cartographic representation and analysis of affectations.

Keywords: Lisflood, orthophoto, shapefile, UAV.

1.Introducción

Dentro del municipio Habana del Este, el sector Peñas Altas – Rincón de Guanabo se encuentra en la zona Playas del Este, el cual constituye nuestra área de estudio. Este sector se caracteriza por presentar playas de buena calidad, las que frecuentemente se ven afectadas por las penetraciones del mar durante eventos extremos. De acuerdo a lo anterior, se hace de vital importancia el conocimiento con detalle de los escenarios de inundaciones costeras y las afectaciones que estos originan ante los eventos meteorológicos extremos, teniendo en cuenta diversos factores que influyen en las inundaciones como es el caso de la topografía, rugosidad de la vegetación, duración del evento, configuración de su costa, etc.

Los resultados de este trabajo analizan a través de la representación cartográfica y modelación numérica, las diferencias existentes en los escenarios de inundación costera para 12 y 24 horas de afectación por un huracán categoría 5, teniendo en cuenta el coeficiente de rugosidad de Manning, además de las áreas de viviendas, infraestructuras y viales que se afectarían en los diferentes escenarios. De esta manera, surge la necesidad de modelar el alcance de la inundación, para diferentes escenarios, su cartografía, análisis espacial y cuantificar las afectaciones en función de los indicadores analizados en el estudio.

El objetivo fundamental de la investigación es determinar el alcance de las inundaciones costeras por penetraciones del mar producidas por eventos hidrometeorológicos extremos mediante el empleo de modelos numéricos. Donde hubo que procesar imágenes satelitales para obtener los coeficientes de rugosidad de la vegetación de manglar y distintos usos de la tierra a partir de información del VANT, obtener la línea de costa a partir de información topográfica e imágenes de alta resolución obtenida con VANT, modelar el alcance de la inundación costera ante un evento extremo con una afectación de 12 y 24 horas mediante el empleo del modelo LISFLOOD - FP versión 5.9.6 y analizar espacialmente los planos de inundación obtenidos con diferentes variables de información y las afectaciones esperadas.

Durante el desarrollo de esta investigación fue posible determinar las áreas que se inundarían, ante un huracán categoría 5 para escenarios de 12 y 24 horas de afectación, donde se añadió el coeficiente de rugosidad de Manning y se realizó la comparación con la rugosidad y sin esta para ambos escenarios. Dentro de las superficies inundadas se cuantificaron las áreas de viales, viviendas e infraestructuras que se ubicaban dentro del plano de inundación para los escenarios descritos.

2. Materiales y métodos

2.1. Fenómenos meteorológicos que provocan las inundaciones costeras

Los principales fenómenos meteorológicos que provocan las inundaciones costeras en el área de estudio son los ciclones tropicales durante la temporada ciclónica, y los frentes fríos y bajas extratropicales que predominan en los meses de invierno, aunque hay que destacar que estos fenómenos ocasionalmente pueden ocurrir fuera de su temporada habitual.Para la ocurrencia de las penetraciones del mar en el área de estudio, es necesario que se den condiciones específicas de velocidad, dirección, alcance y persistencia del viento, que aseguren la formación de fuertes marejadas en el sudeste del Golfo de México y Estrecho de La Florida, y que al recalar en la costa noroccidental de Cuba generen un ascenso anormal del nivel del mar.

Este ascenso anormal es consecuencia de la integración de varios factores(Pérez, P., Casals, R. y Díaz, L, 2001 en Alfonso, 2015).

- La transformación de la ola por efecto del fondo marino, que contribuye a incrementar el transporte de masa.
- El apilamiento de agua, generado por la acción del viento en superficie.
- Efecto de los centros de mínima presión atmosférica, asociados a huracanes.
- Influencia de la marea astronómica.
- Altura de la cresta de la ola.

2.2. Obtención del coeficiente de rugosidad de Manning

Se describe el empleo del coeficiente de rugosidad de Manning, el cual es uno de los parámetros tenidos en cuenta en este trabajo para la modelación de la inundación costera. Han sido desarrolladas diversas fórmulas de flujo uniforme en canales abiertos, "las más conocidas y ampliamente utilizadas son las fórmulas de Chézy y Manning"(Chow, 1959).En 1769 el ingeniero francés AntoineChézy desarrolló probablemente la primera fórmula de flujo uniforme, expresada como:

$$V(h) = C\sqrt{R(h) * S}$$

V: velocidad media en fps, R: radio hidráulico en ft, S: la pendiente de la línea de energía, C: factor de resistencia de flujo, llamado Chézy C.

La fórmula de Manning es una evolución de la fórmula de Chézy para el cálculo de la velocidad del agua en canales abiertos y tuberías, propuesta por el ingeniero irlandés Robert Manning, en 1889:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

V(h): velocidad media del agua en m/s, que es función del tirante hidráulico h, S: la pendiente de la línea de agua en m/m, R: radio hidráulico, en m, función del tirante hidráulico h, n: es un parámetro que depende de la rugosidad de la pared.

En el presente trabajo, la estimación de los valores de Manning se seleccionó a partir de numerosa bibliografía publicada al respecto y la existente en manuales de varios modelos numéricos hidráulicos, como es el caso de IBER versión 1.9.En particular para los manglares, se utilizó la información de las campañas de campo que proporciona los valores de la densidad de los bosques de mangle tomadas del proyecto Macro 1 "Tendencias y respuesta del manglar ante la elevación del nivel medio del mar y los humedales costeros"(Menéndez, 2012), a partir de la estimación de la densidad y grosor de los individuos para diferentes estratos. Estos valores fueron tomados partiendo de las asociaciones dadas en el trabajo deMcIvor, et al., (2012), "Storm surge reductionbymangroves".

2.3. Obtención del mapa de uso de la tierra y la línea de costa

Para la realización del mapa de uso de la tierra se utilizó el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis en su versión 10.4. Para ello se contó con ortofotos tomadas del área de estudio por un vuelo aéreo no tripulado (VAR o VANT), elaborado por Geocuba Investigación y Consultoría (Geocuba IC) en el año 2015 y facilitadas por el proyecto Nro.7 " Modelación de la surgencia y oleaje generada por eventos hidrometeorológicos extremos" Instituto de Meteorología (INSMET), en el marco del Macroproyecto "Escenarios de peligro y vulnerabilidad de la zona costera cubana debido al ascenso del nivel medio del mar para los años 2050 y 2100".Primeramente se abre ArcMap, una de las herramientas de ArcGis, para luego ircargando y visualizando las ortofotos sobre las cuales se iba a hacer todo el proceso de análisis espacial, y descartar las queno eran de interés.

Para digitalizar la línea de costa se siguió el mismo procedimiento, con la diferencia de que al crear la capa de uso de la tierra se eligió una geometría poligonal puesto que se pretende representar elementos areales, mientras que para la línea de costa se eligió una geometría lineal debido al tipo de elemento que se quería representar. Luego se pusieron editables los shapefiles creados y se comenzó con la digitalización de los diferentes usos de la tierra y la línea de costa respectivamente encima de las ortofotos del VANT, hasta cubrir toda el área de nuestro interés. Una vez digitalizados todos los polígonos y la línea de costa se pasó a trabajar en la tabla de atributos, donde a cada polígono se le asignó el uso de la tierra correspondiente, el valor del coeficiente de rugosidad de Manning en dependencia del uso, además con el propio SIG se calculó el área para cado tipo de uso.

Modelo digital de elevación del terreno

El modelo digital de elevación del terreno (MDE) empleado en este trabajo para realizar las simulaciones de las inundaciones costeras de carácter temporal generadas por eventos hidrometeorológicos extremos, fue entregado por Geocuba Investigación y Consultoría (GeocubaIC) en el año 2015 en el marco del servicio "Completamiento de los

modelos digitales de elevación del terreno". Dicho modelo fue elaborado a partir del levantamiento con VANT en el sector de estudio con una resolución espacial de 5 metros, en el cual fue necesario varios trabajos de revisión en algunos sectores costeros al identificarse errores en la obtención de los datos.Este MDE tiene técnicamente como mínima unidad de análisis 1mm, el cual representa 5 metros en el terreno. Es por ello, que se toma el tamaño de esta rejilla y se preparan y elaboran todos los elementos y datos de entrada hacia el modelo (INPUTS) para la modelación sobre esta base y se representan cartográficamente los planos de inundación costera para el análisis de las vulnerabilidades en la zona.Primeramente se procesan y visualizan los datos espaciales mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) Arcgis 10.4, como preparación de los INPUTS de entrada al modelo numérico Lisflood - FP, las diferentes capas a emplear, la frontera hacia el mar y se exporta el MDE en formato ascii para utilizarse en el modelo LISFLOOD.

Obtención de las curvas hidráulicas para la modelación

Para el cálculo de la sobreelevación máxima, se utilizan las curvas de período de retorno actualizadas para todo el archipiélago cubano, incorporando la marea máxima para cada región de estudio del proyecto "Estimación de las anomalías, tendencia, proyección del nivel del mar partir de mediciones de la Red Mareográfica Nacional" de Hernández et al. (2012), la surgencia máxima del proyecto de (Pérez Parrado, et al., 2009) combinado con los resultados de la sobreelevación del nivel medio del mar por efecto del oleaje (wavesep-up) deotros trabajos y actualizado en(Álvarez , 2010).Con los valores, en(Álvarez et al, 2013)para un período de tiempo de 12 horas y posteriormente para 24 horas en(Álvarez et al, 2014), generadas por la afectación de un huracán categoría 5 en la Escala Saffir – Simpson en todo el territorio nacional.

Modelación de la inundación costera temporal generada por un huracán categoría 5

El procedimiento a aplicar en el área de estudio, para determinar el alcance de la inundación costera a través de la modelación físico matemática sobre un modelo de 5 metros de píxeles, fue establecido en (Casals Taylor, et al., 2012)y empleando las curvas obtenidas por(Álvarez et al, 2013)con una duración de 12 horas y (Álvarez et al, 2014)con una duración de 24 horas.Se definen como parámetros internos del INPUT del modelo numérico LISFLOOD (Pérez López, 2015), el paso de tiempo de cómputo a 1,5 segundos, la salva de las corridas cada 4 horas, la identificación de la frontera variable para el empleo de las curvas hidráulicas, incluir el coeficiente de fricción de la vegetación y los usos de la tierra (MANNING); así como la identificación de las variables a obtener en las salidas del modelo como es el caso del alcance máximo en tierra, altura máxima del agua y tiempo de ocurrencia, antes de pasar al procesamiento y edición en GIS para su análisis espacial.

Caracterización físico-geográfica del área de estudio

El área de estudio está ubicada al noreste de La Habana en el municipio Habana del Este, comprende la franja costera desde la calle 500 del asentamiento de Guanabo hasta el Rincón de Guanabo. Su límite hacia el norte son las aguas del Golfo de México, hacia el oeste la calle 500 del asentamiento mencionado anteriormente, hacia el este el Rincón de Guanabo y hacia el sur su límite máximo está representado por las coordenadas geográficas 23º 9' 53" latitud norte y 82º 6' 30" longitud oeste (**Fig.1**).



Fig.1. Esquema de localización del área de estudio.

El área de estudio se encuentra en los límites más septentrionales del anticlinal Habana - Matanzas, estando cortada por fallas, aflorando hacia el flanco norte rocas carbonatadas de la cobertura del Neógeno al Cuaternario. Así, el territorio se encuentra constituido desde el punto de vista litológico por rocas carbonatado - terrígenas y carbonatadas – organógenas(Acevedo, 2011). Constituye una llanura litoral, siendo una superficie cársica de origen marino, abrasivo – acumulativa, aterrazada, de estructura monoclinal; suavemente inclinada hacia el mar, donde se conservan tres niveles de terrazas marinas cuaternarias(Cortés, 2012), la altura va aumentando de norte a sur pudiendo ser mayor que 9 metros en el sur del territorio. El clima está representado por veranos cálidos y lluviosos (Aw), según la clasificación de Köppen, existiendo una dependencia dada por la relación mar - tierra, en la cual el mar desempeña una función de regulador térmico (Abad, 2012).Los recursos hídricos del área de estudio, se encuentran representados fundamentalmente por la corriente superficial del río Guanabo; además de las aguas subterráneas y algunas lagunas litorales como es el caso de la existente en Rincón de Guanabo al noreste del territorio (Cortés, 2012), también destacar las cuencas tributarias a la Ensenada de Sibarimar. Los suelos y la vegetación están muy degradados producto de la antropización, quedando solo algunos lugares que conservan características naturales como es el Rincón de Guanabo, con la presencia de manglares de gran interés ambiental para el territorio

Caracterización socio-económica

En el territorio juega un papel importante el turismo, puesto que el área de estudio se encuentra dentro del polo turístico Playas del Este, particularmente ocupando los sectores de Guanabo y Veneciana-Brisas del Mar, con playas de muy buena calidad.El consejo popular de Guanabo tenía en 2012 una población de 24 808 habitantes, distribuida en diferentes repartos como Guanabo, Playa Veneciana -Brisas del Mar, Marbella, Sibarimar, Santa María, Boca Ciega y Peñas Altas(ONEI, 2015). En la actualidad gran parte de las actividades económicas que se desarrollan en el sectorestán estrechamente ligadas al turismo, siendo uno de los tramos de mayor potencial dentro del Polo Turístico Playas del Este.

3. Análisis de los resultados

3.1. Uso de la tierra y valor del coeficiente de rugosidad (Manning)

En el mapa siguiente (**Fig.2**) se observa que hacia el oeste del área de estudio, el uso de la tierra predominante es de viviendas debido a la urbanización y concentración de servicios existentes en esta parte, mientras que hacia el este predomina la vegetación dispersa.De manera general en todo el sector estudiado el uso de la tierra está representado fundamentalmente por vegetación dispersa con 0,674 km^2, superficie de pasto corto con 0,513 km^2 y viviendas con 0,470 km^2. Hacia el este del sector, asociado a las lagunas costeras existentes en el Rincón de Guanabo se localizan áreas cubiertas por manglares que son muy importantes para la conservación de los paisajes en esta zona.



Fig.2. Uso de la tierra sector Peñas Altas – Rincón de Guanabo

Luego de identificar los principales usos de la tierra y añadir su respectivo valor del coeficiente de rugosidad (**Tabla.I**) en el área de estudio, se elaboró el mapa correspondiente (**Fig.3**), donde se puede ver que al oeste del sector se concentran las área con mayor coeficiente de rugosidad (0,081 a 0,180) asociadas fundamentalmente a las viviendas e instalaciones, permitiendo mayor resistencia ante las penetraciones del mar por un evento meteorológico, al este del territorio (Rincón de Guanabo) también se encuentran valores del coeficiente de rugosidad entre 0,081 y 0,180 en las superficies cubiertas por mangle denso. Los menores valores están en el rango de 0,013 a 0,023 (color amarillo) y se localizan fundamentalmente en toda la franja norte y otras áreas al interior, también se pueden encontrar valores inferiores en algunas partes con rangos de 0,010 a 0,012 (color azul claro).

Tabla.I. Coeficiente de rugosidad de Manning para cada uso de la tierra sector Peñas Altas–Rincón de Guanabo.

Uso	amd	cmd	h	i	pá	sd	hcm	sc	spc	vden	vdis	via	viv	áa
CR_ Manning	0,07	0,18	0,025	0,02	0,035	0,023	0,022	0,01	0,025	0,18	0,08	0,012	0,15	0,08

Nota: Arbustos medianos y densos (amd), Cobertura de mangle denso (cmd), Hidrografía (h), Infraestructura (i), Pequeños árboles (pá), Suelo desnudo (sd), Hierba corta y poca maleza (hcm), Superficie de cemento (sc), Superficie de pasto corto (spc), Vegetación densa (vden), Vegetación dispersa (vdis), Viales (via), Viviendas (viv), Áreas agropecuarias (áa).

Para poder realizar la modelación con "LISFLOOD", fue necesario convertir la capa vectorial del coeficiente de rugosidad mencionado con anterioridad a raster,donde se obtuvo una imagen que luego se emplearía como base para modelar las inundaciones por penetraciones del mar en el sector Peñas Altas – Rincón de Guanabo.

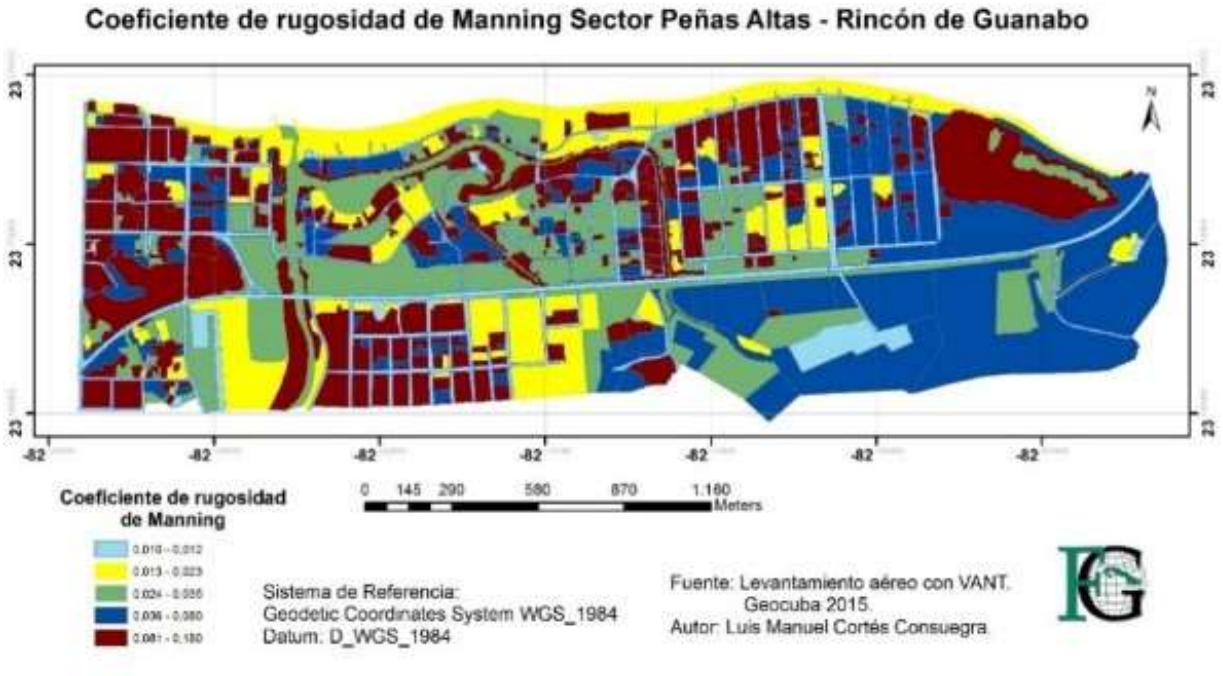


Fig.3. Coeficiente de rugosidad de Manningsector Peñas Altas – Rincón de Guanabo

3.2. Modelación numérica del alcance de las inundaciones costeras con el modelo LISFLOOD-FP

Fueron empleadas las curvas de sobreelevación del nivel medio del mar obtenidas en (Álvarez et al, 2013) y (Álvarez et al, 2014)para un período de 12 y 24 horas respectivamente. Dichas curvas, fueron creadas en base a un evento extremo de huracán categoría 5 en la escala Saffir-Simpson.Con dirección perpendicular a la costa, es cuando ocurre la máxima afectación y elevación del nivel medio del mar, al combinarse los valores de surgencia, marea astronómica y la sobrelevación del nivel del mar por efecto del oleaje en la costa. Para la modelación se tomaron dos alternativas, modelar solamente con información de la topografía del terreno y modelar incorporando el coeficiente de rugosidad de la vegetación a la alternativa anterior.

3.2.1. Análisis de las inundaciones costeras por un huracán categoría 5 durante 12 horas en el área de estudio

La obtención del escenario de inundación costera de forma temporal ante un evento de esta intensidad y duración y teniendo en cuenta solamente la topografía del terreno, se obtiene una superficie sumergida de 1,653 km^2, que representa el 53,88% del total del área de estudio (**Fig.4**).En la zona más próxima a la costa, se localizan los mayores valores de elevación del nivel medio del mar, las zonas con menos cota de inundación se encuentran en la porción suroeste del área de estudio.

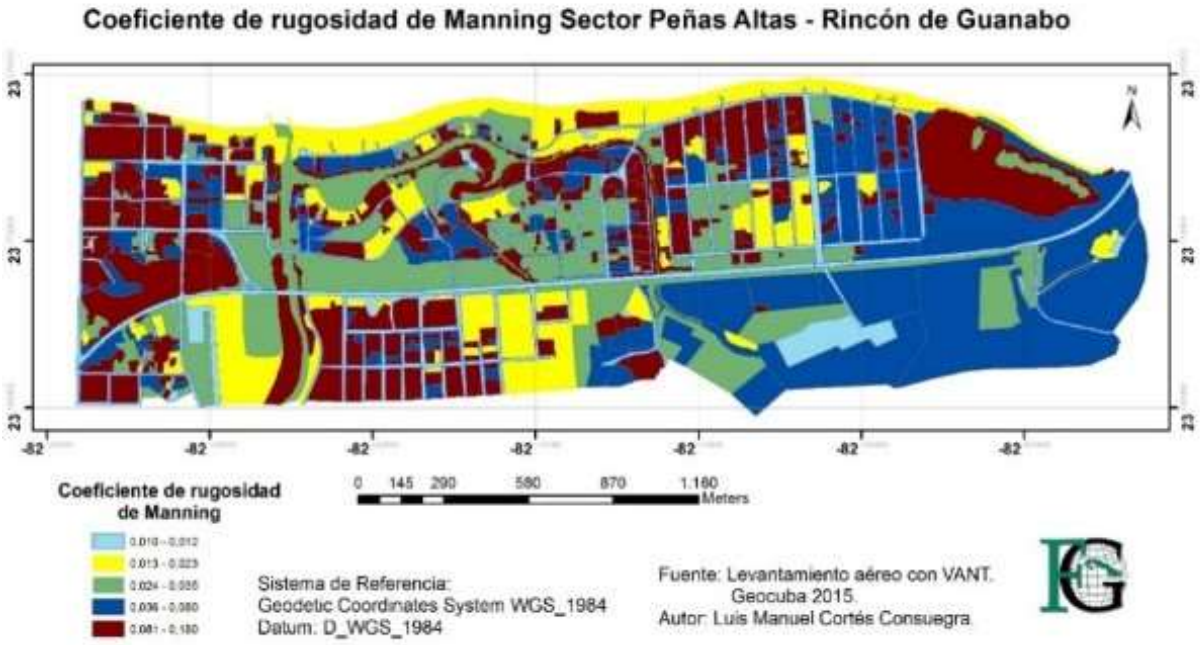


Fig.4. Escenario de inundación por un huracán categoría 5 para 12 horas de afectación sin rugosidad.

Incorporando información del coeficiente de rugosidad de la vegetación al modelo "LISFLOOD-FP", se alcanza un plano de inundación temporal de 1,652 km^{2}y que representa el 53,85% del total del área en estudio (**Fig.5**).Se obtiene además una reducción del área de inundación de 0,001 km^2 y 0,012 km de perímetro respecto al plano de inundación del terreno solamente (sin rugosidad).



Fig.5. Escenario de inundación por un huracán categoría 5 para 12 horas de afectación con rugosidad.

Los estudios de riesgos de desastres en Cuba, basan su análisis en la vulnerabilidad de los elementos expuestos dentro de un plano de inundación determinado, visto este como una superficie sobre el terreno, siendo un aspecto clave a evaluar en el análisis peligros variables como la velocidad del flujo o corriente durante el proceso de inundación.Teniendo en cuenta la rugosidad, se observa en la (**Fig.6**) como se localizan zonas de color amarillo – rojo, donde la combinación de la componente de la velocidad del agua tanto en el eje X como en el Y, y la cota de altura máxima del agua durante el evento, limitan cualquier proceso de evacuación, aspecto muy importante en la toma de decisiones, aumentando de esta manera la manifestación del peligro. Como se puede ver esta zona ocupa todo el norte de la superficie inundada, lo que demuestra el peligro existente en las áreas más próximas a la costa.

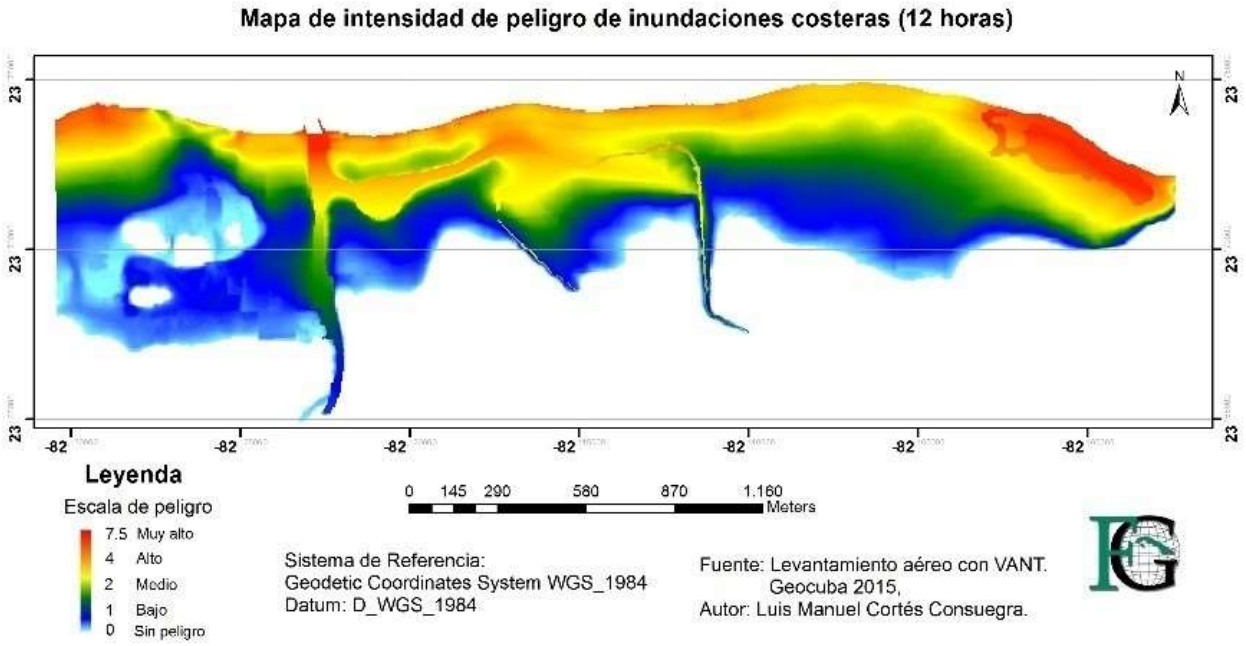


Fig.6. Intensidad del peligro de inundaciones costeras para 12 horas.

3.2.2. Análisis de las inundaciones costeras ante la afectación de un huracán categoría 5 durante 24 horas en el área de estudio

En el caso de este evento y teniendo en cuenta solamente las características físico-geográficas del terreno emergido del área de estudio, la modelación arrojó un plano de inundación de 1,902 km^2, lo cual constituye el 61,99% de la superficie en análisis (**Fig.7**).



Fig.7. Escenario de inundación por un huracán categoría 5 para 24 horas de afectación sin rugosidad.

Si analizamos un escenario de igual intensidad pero incorporando la información de rugosidad de la vegetación al modelo de inundación, se provoca una superficie sumergida de 1,901 km^2lo que equivale al 61,96% (0,001 km^2 menos) respecto al evento con el terreno solamente (**Fig.8**).



Fig.8. Escenario de inundación por un huracán categoría 5 para 24 horas de afectación con rugosidad.

Si evaluamos las zonas con limitación significativa de operaciones de evacuación ante un evento de 24 horas (**Fig.9**) debido a la combinación de la velocidad del agua en el eje X e Y, y la cota máxima de altura de agua durante el evento, las zonas de color rojo - amarillo ocupan el 35,3% del total de la superficie inundada, con un valor de 0,71 km^2, además estas zonas son las de mayor peligrosidad debido a que presentan la mayor cota de altura del agua durante la inundación, mientras que las áreas con menor peligrosidad están representadas con el color azul oscuro como se observa al sur de la superficie inundada.

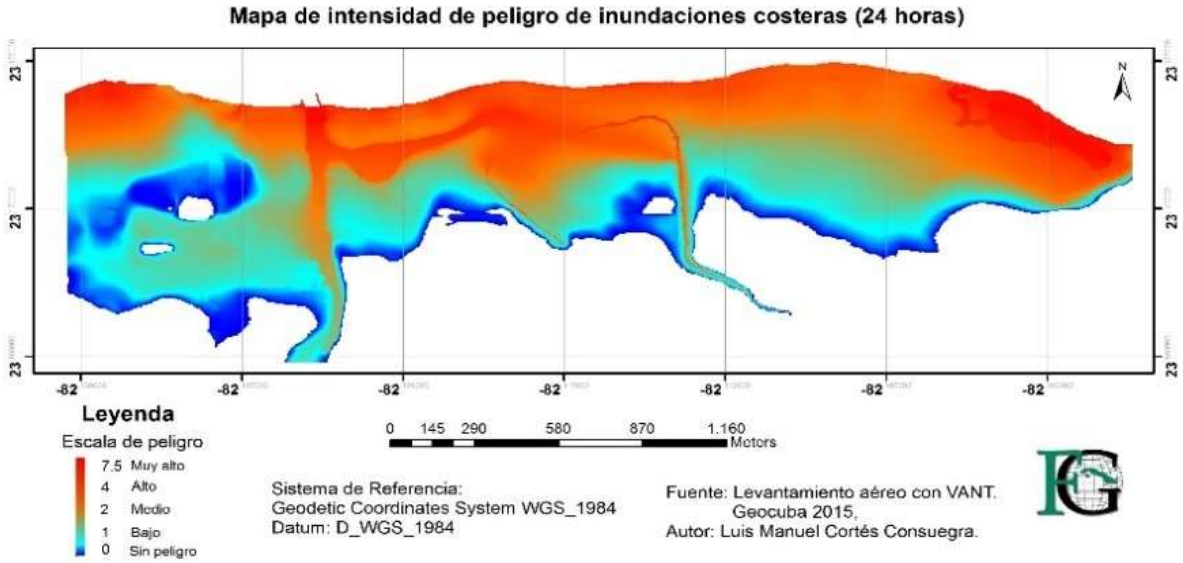


Fig.9. Intensidad de peligro de inundaciones costeras para 24 horas

Es necesario destacar, aunque no se producen cambios significativos en el plano de inundación del estudio al analizar estos dos eventos, teniendo en cuenta el coeficiente de rugosidad de la vegetación o no en la modelación numérica, es un resultado transcendental en el proceso del perfeccionamiento de las herramientas de modelación de inundaciones costeras, al realizar el estudio con un modelo digital del terreno de 5 metros de pixel, siendo posible evaluar y comprender los procesos físicos que lo soportan.

3.3. Evaluación de las afectaciones esperadas en el área de estudio

Para poder apreciar cartográficamente las diferencias existentes entre ambos escenarios de inundación, se realizó una superposición con la capa de usos de la tierra y la de los escenarios de inundación para 12 y 24 horas de afectación asumiendo la rugosidad, obteniéndose como resultado que el área afectada en 24 horas era mayor con un valor de 0,249 km^2 más que la afectada en 12 horas, confirmándose de esta forma que mientras más prolongado sea el tiempo de afectación mayor será el área ocupada por las penetraciones del mar.

Las penetraciones del mar en este sector pueden provocar afectaciones sociales como daños a la población, viales, viviendas e instalaciones. Según las modelaciones realizadas se comprobó que para 12 horas de afectación se inundaban 0,253 km^2de la superficie ocupada por viviendas e instalaciones, lo que equivale al 45,10% del área total de las mismas (0,561 km^2).Al analizar el escenario de inundación por penetraciones del mar para 24 horas de afectación teniendo en cuenta la rugosidad, se apreció que un área de 0,285 km^2 de viviendas e instalaciones se ubicaban dentro del plano de inundación, lo que representa el 50,80% del total de estas. Para conocer las diferencias que habían en cuanto a las áreas de viviendas e instalaciones afectadas en ambos escenarios de inundación, también se hizo una superposición, pero en este caso aparte de las capas mencionadas anteriormente se añadió la de viviendas e instalaciones (figura 34), lo que demostró que durante 24 horas de afectación había un superficie dentro del plano de inundación de 0,032 km^2más que para 12 horas (**Fig.10**), incrementándose de esta forma los daños sociales.

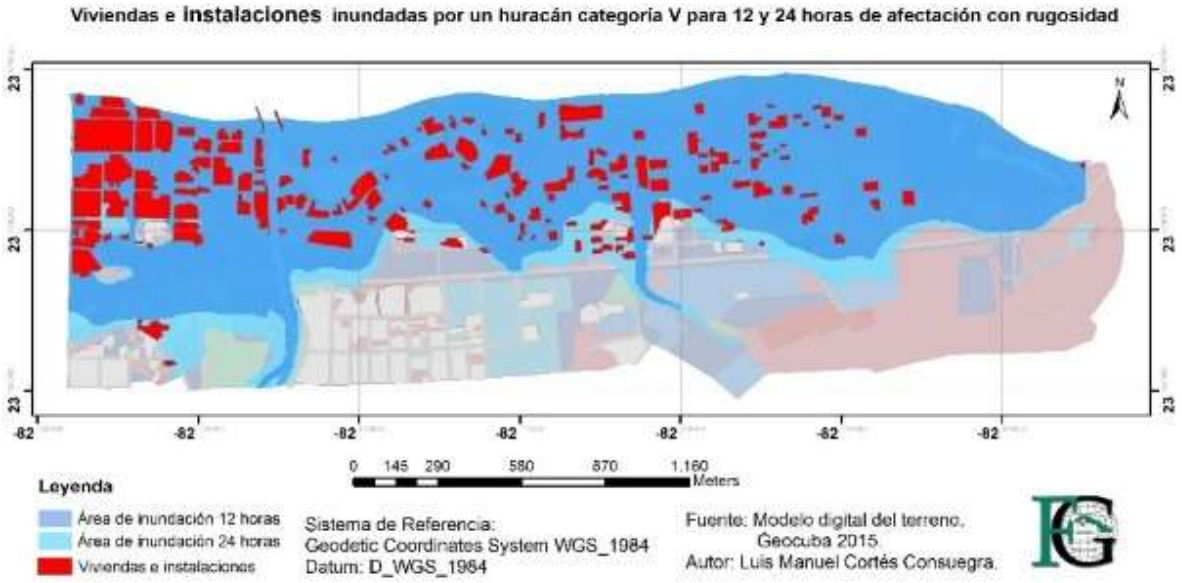


Fig.10.Área de viviendas e instalaciones inundadas por un huracán categoría 5 para 12 y 24 horas de afectación con rugosidad.

Otro elemento a tener en cuenta en el área de estudio debido a su importancia son los viales, ya que constituyen la principal vía de acceso hacia el territorio, a través de ellos es que se establecen las comunicaciones con otras partes de La Habana y lugares aledaños. El sector de estudio cuenta con un área total de viales de 0,305 km^2.Analizando el escenario de inundación costera por un huracán categoría 5 para 12 horas de afectación e incorporando la rugosidad, se observó que un área de 0,172 km^2 de viales, lo que equivale al 56,39% del área total de estos, se ubicaban dentro del plano de inundación. En el caso del escenario de inundación para 24 horas quedaba inundada un área de 0,207 km^2, representando el 67,87% del total de viales. Se comprobó que para el escenario de 24 horas de afectación quedaba sumergida un área de viales de 0,035 km^2 más que para el escenario de 12 horas de afectación (**Fig.11**).Del análisis realizado en este capítulo, se evidenció la importancia de incorporar los coeficientes de rugosidad de la vegetación y una mejor resolución de los MDE, para obtener una mejor representación de la cartografía del peligro de las penetraciones del mar. Esto constituye una herramienta básica de análisis de los tomadores de decisiones en el proceso de gestión de riesgos de desastres, lo que permite reducir las vulnerabilidades de los elementos expuestos en la zona de inundación y su incorporación en los planes de ordenamiento territorial y urbanístico.

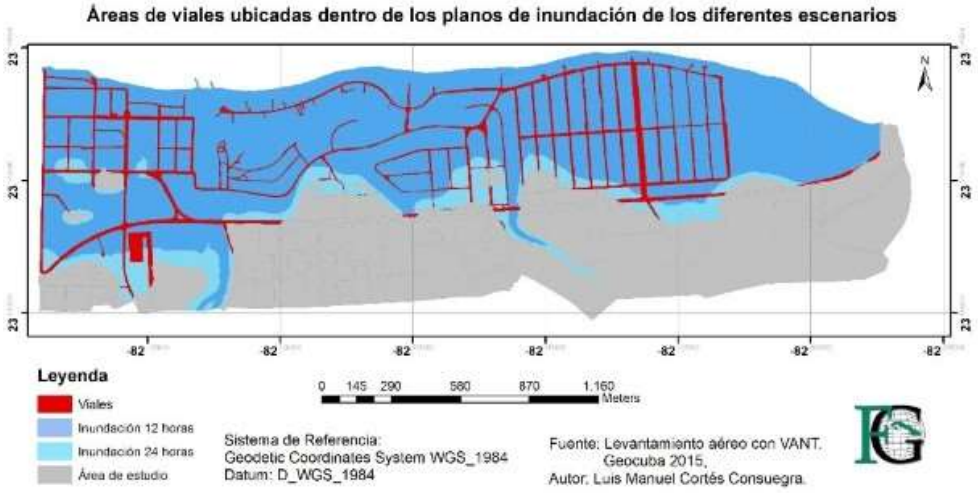


Fig.11. Área de los viales inundados por penetraciones del mar para 12 y 24 horas de afectación

Conclusiones

-La metodología empleada permitió determinar las áreas propensas a inundaciones por un huracán categoría 5, para escenarios de inundación de 12 y 24 horas de afectación, en el sector Peñas Altas - Rincón de Guanabo.

-Se obtuvo a partir del procesamiento de imágenes de alta resolución procedentes del VANTla línea de costa como elemento clave en la entrada de datos al modelo Lisflood y los usos de la tierra con sus respectivos coeficientes de rugosidad de Manning para el área de estudio.

-La modelación numérica de un huracán categoría 5 teniendo en cuenta la rugosidad de la vegetación, arrojó una superficieinundada de 0,001 km^2 menos que sin tener encuentra la rugosidad en ambos escenarios.

-Se identificó un área de 0,253 km^2 de viviendas e instalaciones que representa el 45,10% del área total en zonas de inundación ante la afectación de un huracán categoría V con 12 horas de afectación, y para el escenario de 24 horas un área 0,285 km^2 que representa el 50,80% del total de estas, además de un área de viales inundada de 0,172 km^2 y 0,207 km^2 para 12 y 24 horas respectivamente.

-Se identificaron las áreas con mayor cota de altura del agua durante la inundación (mayor peligrosidad) para ambos escenarios, correspondiendo con las zonas más próximas a la costa (norte del área de estudio).

-

Referencias

Abad, M., 2012. Análisis de la capacidad natural de recuperación de los paisajes ante el cambio climático en las cuencas hidrográficas tributarias a la ensenada de Sibarimar. *Facultad de Geografía. Universidad de La Habana, Cuba.* .

Acevedo, P., 2011. Análisis de la potencialidad (favorabilidad) a la recuperación natural de los paisajes de Playas del Este, La Habana, Cuba. *Facultad de Geografía, Universidad de la Habana..*

Alfonso, C., 2015. El estado del malecón habanero en el año 2013. Fenómenos meteorológicos y variables que más influyen en su deterioro. (Tesis de diploma).. *Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, Cuba..*

Álvarez et al, 2014. Inundación costera producida por la surgencia y oleaje generado por eventos meteorológicos extremos. Situación actual y máximo previsto por el cambio climático para el 2050 y 2100.. *INSMET.*

Álvarez et al, 2013. Inundación costera producida por la surgencia y oleaje generado por eventos meteorológicos extremos. Escenario de huracán categoría 5 para 24 horas de afectación.. *INSMET.*

Álvarez , e. a., 2010. Oleaje generado por eventos meteorológicos extremos. Macroproyecto "Escenarios de Peligro y vulnerabilidad de la zona costera cubana ante el ascenso del nivel medio del mar para los años 2050 y 2100". *INSMET.*

Casals Taylor, R. y otros, 2012. Inundación costera producida por la surgencia y oleaje generado por eventos meteorológicos extremos. *INSMET.*

Chow, V. T., 1959. Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill. p. 680.

Cortés, e. a., 2012. La Degradación Ambiental de los paisajes de las cuencas Guanabo-Itabo. *Universidad de Málaga y Universidad de La Habana. EAE. Editorial Académica Española..*

Hernández, et al, 2012. Estimación de las anomalías, tendencia y proyección durante el presente siglo, del nivel medio del mar en Cuba y estimar los períodos de retorno de los valores extremos del nivel del mar en cuba a partir de mediciones de la red mareográfica nacional. *Instituto de Oceanología..*

McIvor, A., Spencer, T., Moller, I. & Spalding, M., 2012. Storm surge reduction by mangroves. (Tech. Rep. No. ISSN 2050-7941). *Cambridge University.*

Menéndez, L., 2012. Tendencias y respuestas del manglar ante la elevación del nivel del mar y los humedales costeros y vegetación de las dunas (Tech. Rep.). *Instituto de Ecología y Sistemática. (Macroproyecto, Escenarios de peligro y vulnerabilidad de la Zona Costera Cubana asociados al ascenso del nivel medio del mar).*

ONEI, 2015. Anauario estadístico de Habana del Este. Población calculada por Consejos Populares. Año 2012. *La Habana.*

Pérez López, e. a., 2015. Inundación costera producida por la surgencia y oleaje generado por eventos meteorológicos extremos. Escenario de huracán categoría 5 para 24 horas de afectación.. *INSMET.*

Pérez Parrado, R., Salar García, I. & Sandra Samper, T., 2009. Surgencia provocada por los ciclones tropicales en el archipiélago cubano. Escenarios previstos por el cambio climático para los años 2050 y 2100. Macroproyecto. *Instituto de Meteorología.*

Acerca de los autores:

Luis Manuel Cortés Consuegra

Licenciado en Geografía, graduado en la facultad de Geografía de la Universidad de La Habana en 2018. Actualmente cumpliendo su periodo de adiestramiento en el Instituto de Geofísica y Astronomía con participación en eventos como la el Taller Nacional "El espacio Ultraterrestre y su Uso Pacífico", Simposio Internacional Sobre Medio Ambiente y Varaplayas 2019, etc. Ha realizado cursos de posgrado en Hidrología Aplicada y en Astrofísica, además ha participado en varias conferencias científicas de importantes especialistas.

Osvaldo Enríquez Pérez López:

Especialista principal Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología, Cuba. Máster en Geografía por la facultad de Geografía de la universidad de La Habana. Publicaciones en varias revistas nacionales e internacionales.

Juan Manuel Fernández Lorenzo:

Doctor en Ciencias Geográficas, profesor Departamento de Hidroclimatología y Cuenca, facultad de Geografía, Universidad de La Habana, Cuba. Diversas publicaciones en revistas de impacto nacional e internacional.