

Modelación de inundaciones costeras en Surgidero de Batabanó para los años 2050 y 2100

Modeling of coastal floods in Surgidero de Batabanó for the years 2050 and 2100



<https://cu-id.com/2377/v30nspe03>

 Christian Lam Cervantes^{1*},  Reinaldo Casals Taylor²,  Bárbara Garea Moreda³

¹Oficina Principal de Vigilancia Meteorológica, Empresa Cubana de Navegación Aérea (ECNA). Carretera Panamericana y Final, Edificio ATC, Boyeros, La Habana, Cuba.

²Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología (INSMET). Carretera del Asilo S/N, Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba.

³Cátedra Unesco de Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana (InSTEC-UH). Ave. Salvador Allende No. 1110 entre Infanta y Ave. Rancho Boyeros, Quinta de los Molinos, Plaza de la Revolución. La Habana, Cuba.

RESUMEN: Se realizó una modelación numérica con el objetivo de determinar el alcance de la inundación costera generada por un huracán en el asentamiento costero de Surgidero de Batabanó. La simulación se realizó para dos escenarios de ascenso del nivel medio del mar por cambio climático: un primer escenario donde se prevé una sobre elevación del nivel medio del mar de 29.3 cm para el año 2050, y otro donde se prevé una sobre elevación de 95 cm para el año 2100. Fue empleado en la modelación un caso de estudio real: el huracán Charley, que afectó a la región en el año 2004. Para la simulación de la marea de tormenta fue empleada la modelación acoplada con ADCIRC+SWAN utilizando una malla no estructurada. Para la determinación del alcance de la inundación en el asentamiento fue empleado el modelo LISFLOOD-FP, cuyas salidas fueron visualizadas con el software QGIS. Se obtuvo que la marea de tormenta simulada en el asentamiento alcanzó 4.00 m, 1.20 m superior a la reportada, y que la totalidad del asentamiento es vulnerable a la inundación costera generada por un huracán categoría 3 de la escala de huracanes Saffir-Simpson, con alcances de 2200 m para el escenario del año 2050 y de 2300 m para el año 2100.

Palabras Clave: inundación costera, modelación numérica, escenarios, cambio climático.

ABSTRACT: Numerical modeling was carried out to examine the extent of the coastal flooding due to a hurricane in the coastal settlement of Surgidero de Batabanó. The simulation was carried out for two scenarios of rise in the mean sea level due to climate change: a first scenario where a rise in the mean sea level of 29.3 cm is expected for the year 2050, and another where a rise of 95 cm is expected for the year 2100. A real case study was used in the modeling: Hurricane Charley, which affected the region in 2004. For the simulation of the storm surge, modeling coupled with ADCIRC+SWAN was used with a unstructured mesh. To determine the extent of the flooding in the settlement, the LISFLOOD-FP model was used, whose outputs were visualized with the QGIS software. It was found that the simulated storm surge in the settlement reached 4.00 meters, 1.20 meters higher than the reported, and that the entire settlement is vulnerable to coastal flooding generated by a Category 3 hurricane on the Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale, with ranges of 2200 meters for the year 2050 scenario and 2300 meters for the year 2100.

Key words: coastal flooding, numerical modelling, scenarios, climate change.

*Autor para correspondencia: Christian Lam Cervantes. E-mail: christian.lam@aeronav.avianet.cu

Recibido: 02/10/2023

Aceptado: 02/03/2024

Christian Lam Cervantes. Oficina Principal de Vigilancia Meteorológica, Empresa Cubana de Navegación Aérea (ECNA). Carretera Panamericana y Final, Edificio ATC, Boyeros, La Habana, Cuba. E-mail: christian.lam@aeronav.avianet.cu

Reinaldo Casals Taylor. Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología (INSMET). Carretera del Asilo S/N, Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba. E-mail: reinaldo.casals@insmet.cu

Bárbara Garea Moreda. Cátedra Unesco de Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana (InSTEC-UH). Ave. Salvador Allende No. 1110 entre Infanta y Ave. Rancho Boyeros, Quinta de los Molinos, Plaza de la Revolución. La Habana, Cuba. E-mail: bgarea@instec.cu

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Contribución de los autores: **Conceptualización:** Christian Lam Cervantes, Reinaldo Casals Taylor, Bárbara Garea Moreda. **Conservación de datos:** Christian Lam Cervantes, Reinaldo Casals Taylor. **Análisis formal:** Christian Lam Cervantes, Reinaldo Casals Taylor. **Investigación:** Christian Lam Cervantes, Reinaldo Casals Taylor. **Metodología:** Christian Lam Cervantes, Reinaldo Casals Taylor, Bárbara Garea Moreda. **Supervisión:** Reinaldo Casals Taylor, Bárbara Garea Moreda. **Redacción - primera redacción:** Christian Lam Cervantes. **Redacción - revisión y edición:** Christian Lam Cervantes, Bárbara Garea Moreda, Reinaldo Casals Taylor.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

Cuba se encuentra entre los países más afectados por el ascenso del nivel medio del mar debido al cambio climático previsto, tanto por su insularidad, configuración físico-geográfica, como por la existencia de zonas bajas en gran parte de su perímetro costero. Las inundaciones costeras en este territorio son provocadas, generalmente, por eventos meteorológicos extremos como los ciclones tropicales, sistemas frontales y vientos de región sur asociados a bajas extratropicales. Estas inundaciones incrementarían su frecuencia, intensidad y alcance horizontal en las nuevas condiciones previstas por el cambio climático (Mitrani *et al.*, 2017).

Se ha determinado la relación entre el incremento de las concentraciones de los gases de invernadero, el incremento de la temperatura planetaria y el aumento del nivel del mar por la expansión térmica y la fusión de los hielos polares (Mitrani, 2017). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) prevé que el aumento del nivel medio global del mar sea aproximadamente 0.1 m inferior con un incremento de la temperatura media global del aire de 1.5 °C que con uno de 2.0 °C (IPCC, 2018). Las afectaciones provocadas por este fenómeno en Cuba serían considerables si se tiene en cuenta que más del 10 % de la población vive a menos de un kilómetro de la línea costera, fundamentalmente en zonas bajas, donde se desarrollan importantes actividades industriales, portuarias, turísticas y pesqueras (Mitrani *et al.*, 2017).

La modelación numérica juega un papel fundamental en la predicción de inundaciones costeras, siendo una herramienta indispensable para la toma de decisiones frente a escenarios climáticos futuros. El continuo desarrollo de la modelación permite obtener resultados más confiables para la identificación de vulnerabilidades de la zona costera en estos escenarios, siendo objeto de investigaciones tanto en el ámbito internacional como en el nacional.

Álvarez *et al.* (2014) obtuvieron las áreas ocupadas por la inundación costera generada por eventos meteorológicos extremos, teniendo en cuenta el efecto de la vegetación costera, la marea astronómica y la elevación prevista del nivel del mar. Los escenarios fueron actualizados por Pérez *et al.* (2015), incorporando la rugosidad del terreno en el modelo numérico como una nueva variable de información a utilizar, obteniendo nuevos cambios en los planos de inundaciones costeras. Pérez *et al.* (2018) realizaron una actualización de los escenarios de inundación permanente de la región occidental de Cuba para los escenarios de 2050 y 2100, empleando una línea de costa actualizada a partir de imágenes de satélite de alta resolución.

Pérez (2019) actualizó las magnitudes medias del ascenso del nivel medio del mar para Cuba,

obteniendo 29.3 cm y 95 cm para los años 2050 y 2100, respectivamente, que fueron empleadas en las nuevas modelaciones de inundaciones costeras del proyecto “Inundación costera producida por la surgencia y el oleaje generado por eventos hidrometeorológicos extremos para los años 2050 y 2100”, del 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” (Pérez *et al.*, 2021). En este proyecto se utilizó el modelo hidrodinámico LISFLOOD-FP, obteniendo las representaciones de inundaciones en asentamientos costeros cubanos vulnerables a este evento hidrometeorológico. El estudio tuvo en cuenta los valores de elevación del nivel del mar para un evento extremo (huracán categoría 5 en la escala Saffir-Simpson). Se utilizaron las curvas de período de retorno actualizadas para todo el archipiélago cubano y se preparó con rutinas programadas en ambiente *Matlab* la curva hidráulica para un período de afectación de 12 horas, con un pico de intensidad del evento de 6 horas.

Entre los asentamientos costeros estudiados por Pérez *et al.* (2021) se encuentra Surgidero de Batabanó, donde se obtuvo para 2050 un área inundada de 9.28 km² con alcances significativos del agua en tierra, los cuales oscilan entre 1.6 y 2.7 km; y para 2100 un área inundada de 7.59 km² y penetraciones del mar con alcances entre 1.3 y 2.5 km. Este será el área de estudio seleccionada en la presente investigación, donde se realizará la modelación con un caso de estudio real, empleando para la obtención de la curva hidráulica el Modelo Avanzado de Circulación para Océanos, Costas y Estuarios (ADCRIC) y el modelo de simulación de olas en aguas poco profundas (SWAN). Por tanto, este trabajo tiene como **objetivo**: determinar el alcance de la inundación costera generada por un huracán en Surgidero de Batabanó para los escenarios de ascenso del nivel medio del mar por cambio climático de 2050 y 2100.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El asentamiento costero de Surgidero de Batabanó se localiza en el municipio de Batabanó, en el sur de la provincia de Mayabeque, limitando al norte con el municipio San José de las Lajas; al este con Melena del Sur; al oeste con los municipios Quivicán y Güira de Melena, y al sur con el golfo de Batabanó (Figura 1). Tiene una extensión de 185.5 km² y una población de 26 614 habitantes por km². Cuenta con 1 614 viviendas y una población total de 4 697 habitantes. En esta localidad se ubica el puerto costero y pesquero más importante de la costa sur. Su economía se sustenta en la planta pesquera y de

mariscos que procesa y exporta productos frescos, en particular especies como langostas y camarones (UNDP, 2021).

Esta región es una zona muy llana propensa a inundaciones y está fundamentalmente cubierta por paisajes agrícolas y ganaderos, así como humedales costeros. Los demás ecosistemas aledaños a la costa son mayormente 164 hectáreas de manglares y 291 hectáreas de bosques de ciénaga con un alto grado de deterioro. El asentamiento se encuentra en la región del país con los índices de erosión costera más altos, siendo afectadas las zonas agrícolas por la intrusión salina (UNDP, 2021). El peligro por inundaciones, fundamentalmente por surgencia de huracán, es muy alto hacia la zona costera del golfo de Batabanó (Mitrani *et al.*, 2017).

Huracán Charley como caso de estudio

Como caso de estudio se seleccionó el huracán Charley, que afectó con gran intensidad a la región. Charley fue categoría 3 en la escala de huracanes Saffir-Simpson. Tocó tierra con vientos máximos sostenidos de 180 km/h cerca de Punta Cayamas, entre Playa Guanímar y Playa del Cajío, en la costa sur de la actual provincia de Artemisa, cerca de la medianoche (04:00 UTC) del día 13 de agosto de 2004 (Figura 2). Fue un ciclón tropical muy pequeño, cuyo centro tenía un diámetro de 18 km y los vientos con fuerza de huracán se extendieron hasta 23 km a la derecha y 19 km a la izquierda de la trayectoria. El movimiento medio sobre Cuba fue en dirección al norte noroeste, con una velocidad de traslación de 25 km/h. Provocó fuertes inundaciones costeras en la costa sur, donde la marea de tormenta hizo avanzar el mar varios kilómetros. En Playa del Cajío se observó una marea de tormenta de 4 m por encima del nivel del mar y las aguas llegaron hasta 2.6 km tierra adentro, barriendo 360 casas. En Surgidero de Batabanó la marea de tormenta fue de 2.8 m de altura y el mar penetró hasta 1.5 km (Rubiera & Ballester, 2005).

Modelación acoplada ADCIRC+SWAN

Para la modelación numérica de la marea de tormenta y el oleaje generado por el huracán Charley se emplearon los modelos ADCIRC (empleado para calcular la sobreelevación del nivel del mar considerando el arrastre del viento y el descenso de la presión atmosférica) y SWAN (para el cálculo de las características del oleaje a partir de condiciones dadas de viento, fondo y corriente) acoplados.

Ambos modelos pueden correr en modo acoplado, tanto en serie como en paralelo, ejecutándose primero ADCIRC para obtener los resultados de tensión superficial del viento, fricción de fondo, corrientes en aguas poco profundas y niveles de agua que son empleados por el modelo SWAN para generar los



Figura 1. Localización del área de estudio

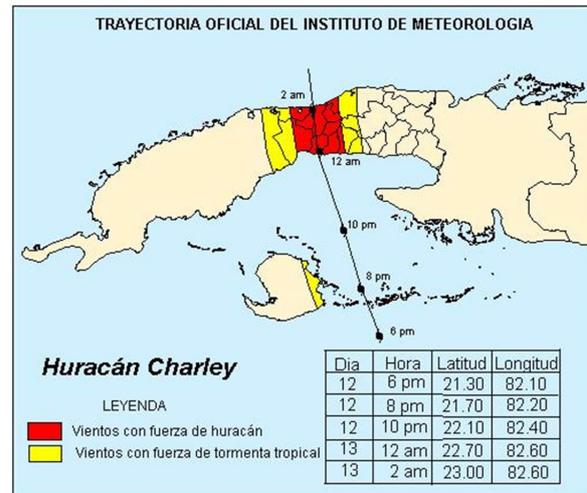


Figura 2. Trayectoria del huracán Charley sobre el territorio cubano (Rubiera & Ballester, 2005)

gradientes de tensión de radiación de fondo marino en aguas someras. Para la simulación es necesaria la creación de varios ficheros de entrada de datos que portarán los forzadores del modelo y las condiciones de frontera. En el fichero de configuración de corrida queda establecido que ADCIRC y SWAN intercambiarán resultados internamente cada 600 s, y que el paso temporal de ADCIRC es de 1 s, lo que garantiza resultados estables de SWAN (Casals & Marrero, 2022).

Para la simulación se empleó una malla no estructurada de elementos finitos, que consta de 25087 nodos y 44948 elementos triangulares. Con este diseño, la malla garantiza una alta resolución espacial hacia las costas. Este dominio abarca toda la línea costera sur del occidente de Cuba, así como el archipiélago de los Canarreos (Figura 3).

Para la determinación de la evolución de la marea de tormenta en Surgidero de Batabanó se seleccionó un punto en la línea de costa (frontera principal), que coincide con un punto costero en el sector oriental del asentamiento, en las coordenadas 22.681° de latitud Norte y 82.288° de longitud Oeste. También se seleccionó un punto en la localidad de Playa del Cajío, en las coordenadas 22.682° de latitud Norte y 82.461° de longitud Oeste, para establecer comparaciones

entre los valores de marea de tormenta observados y los simulados en estas localidades.

Los datos del fichero de entrada que contiene las posiciones del ciclón tropical, el radio de vientos y los valores mínimos de la presión atmosférica en cada posición, fueron tomados de la base de datos revisada de los huracanes en el Atlántico (HURDAT2) (Landsea & Franklin, 2013), disponible en la página web del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (NHC).

Una vez obtenidos los valores de marea de tormenta se grafica la curva hidráulica, que es una representación de la evolución periódica del nivel del mar. Para ello fueron reorganizados los datos del fichero resultante empleando hojas de cálculo de Excel. Se graficaron las curvas para ambas localidades: Surgidero de Batabanó y Playa del Cajío.

Modelación del alcance de la inundación costera

El modelo hidrodinámico LISFLOOD-FP será utilizado para simular la inundación costera. Este programa produce una eficiente predicción de la máxima inundación costera al acoplar un modelo hidráulico 1D y 2D basado en una rejilla ráster que permite una interacción inmediata con los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se definieron como parámetros internos de entrada: el paso de tiempo de cómputo, la salva de las corridas cada cuatro horas, la frontera variable para el empleo de la curva hidráulica, así como las variables a obtener como son el alcance máximo en tierra y el tiempo de ocurrencia. Fue empleado el Modelo Digital de Elevación del Terreno (MDE), disponible para realizar las simulaciones numéricas de las inundaciones costeras de carácter temporal, que cuenta con una resolución espacial de 12 m de píxel (Pérez et al., 2021).

La simulación del caso de estudio fue realizada para los escenarios climáticos previstos de 2050 y 2100. En estas proyecciones se tienen en cuenta las magnitudes medias obtenidas por Pérez (2019) de 29.3 cm y 95 cm, respectivamente. Tomando como base estos escenarios, se emplearán las nuevas líneas de costa obtenidas por Pérez et al. (2021), quienes determinaron para 2050 una disminución de 1.02 km² de tierra firme y 640 m de línea de costa, mientras que para 2100 la pérdida de superficie emergida es de 5.9 km² (que representa el 31.2 % del área emergida actual) y 12.71 km de línea de costa (Figura 4).

Una vez realizadas las corridas se procesaron las salidas mediante el SIG "QGIS" en su versión 3.18, permitiendo obtener los mapas correspondientes para cada escenario estudiado. Se preparó la región de estudio con imagen satelital que presenta un área de 19 km² y 12.92 km de línea de costa en el escenario actual. Dicha área abarca desde la línea de costa hasta la cota de altura de 10 m sobre el nivel del mar, estando alrededor del 95 % de su superficie emergida por debajo de los 2 m de altura.

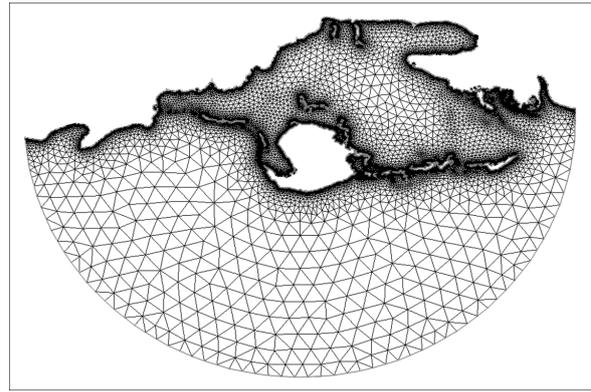


Figura 3. Malla utilizada para la simulación con ADCIRC+SWAN

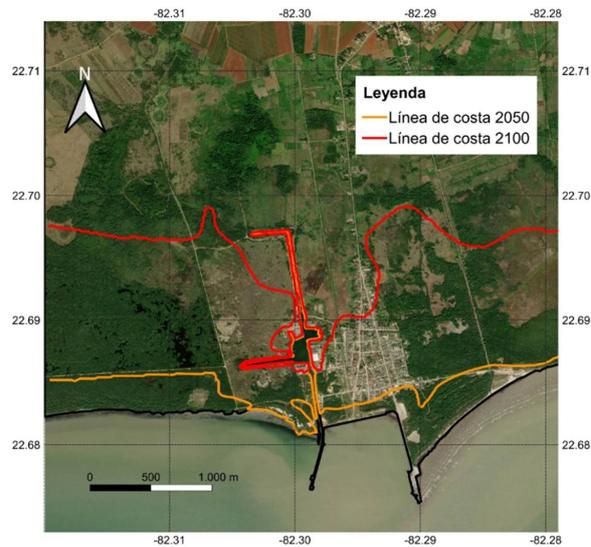


Figura 4. Líneas de costa para los escenarios de 2050 y 2100

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las salidas de la modelación acoplada

A partir de la modelación acoplada ADCIRC+SWAN, los mayores valores de altura significativa de la ola se obtienen al paso del huracán Charley en las aguas profundas al sur del archipiélago de los Canarreos, con alturas de ola que superan los 11 m en algunas áreas. Sin embargo, hacia el área de plataforma el oleaje no supera los 3 m de altura. Este comportamiento responde al cambio en la profundidad del fondo marino, donde las condiciones de profundidades reducidas en el golfo de Batabanó afectan el desarrollo del oleaje. Los mayores valores de velocidad del viento se encuentran en la pared derecha del centro de circulación, precisamente donde resulta mayor el valor de la marea de tormenta.

Para el punto seleccionado en el asentamiento de Surgidero de Batabanó se obtuvo un comportamiento de la marea de tormenta como se muestra en la Figura 5. A partir de las 11 horas de corrida del modelo, el nivel del mar comienza a descender

ligeramente hasta alcanzar los -0.01 m, por debajo de la línea de costa. Este descenso se produce debido a la dirección inicial del viento de componente nordeste, a medida que se aproxima huracán, que provoca un desplazamiento de la masa de agua desde tierra hacia mar abierto.

No obstante, una vez que el área de vientos máximos del huracán comienza a aproximarse rápidamente al área de estudio, con un giro del viento a componente sur, se produce un brusco ascenso del nivel de mar en apenas 3 horas. La marea de tormenta en la simulación alcanza los 4.00 m por encima del nivel del mar a las 5:00 UTC del 13 de agosto y luego comienza a descender, primero rápidamente y luego de manera gradual, a medida que el radio de vientos máximos del ciclón tropical se aleja del territorio. Los mayores valores de marea de tormenta se obtienen en las áreas que quedaron a la derecha del centro de circulación del sistema, dentro del radio de vientos máximos (Figura 6).

En el caso de la marea de tormenta simulada en el punto seleccionado en Playa del Cajío se obtuvo un valor máximo de 2.63 m, en el mismo horario que el máximo en Surgidero de Batabanó (Figura 7).

Estableciendo una comparación entre los valores reportados y simulados se aprecia que el modelo sobrestima en 1.20 m el valor de la marea de tormenta para Surgidero de Batabanó, mientras que subestima en 1.37 m el valor para Playa del Cajío (Tabla 1). Esto pudiera atribuirse a un desplazamiento hacia el este de los valores máximos en la simulación, que puede estar en el orden de la distancia lineal entre ambas localidades (aproximadamente 17 km). Para el cálculo del alcance máximo de la inundación costera en Surgidero de Batabanó se asumió el valor simulado de 4.00 m.

Alcance de la inundación costera en los escenarios de 2050 y 2100

La modelación numérica de la inundación costera temporal ocasionada por el huracán Charley arrojó un área inundada de aproximadamente el 50% de la superficie emergida para el escenario del año 2050. Se observa la afectación total del asentamiento y sus infraestructuras, además de alcances significativos del agua en tierra, los cuales oscilan entre 1300 m en el extremo oeste del sector y los máximos en la porción central del mismo con 2200 m (Figura 8a).

Durante el proceso de inundación temporal por este evento extremo, se producen las mayores alturas de sobreelevación del mar producto del oleaje y la

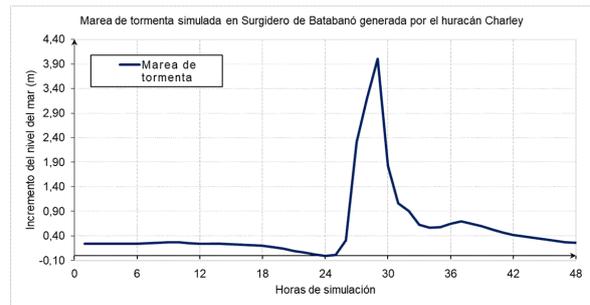


Figura 5. Evolución de la marea de tormenta simulada en Surgidero de Batabanó

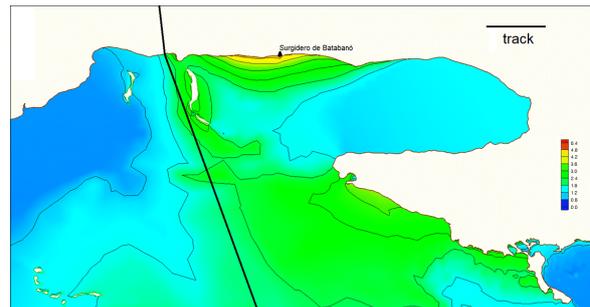


Figura 6. Simulación de la marea de tormenta y trayectoria del huracán Charley



Figura 7. Evolución de la marea de tormenta simulada en Playa del Cajío

surgencia en la línea de costa y hacia el interior del canal o puerto existe en este asentamiento, con valores cercanos a los 4 m. Se obtienen valores entre 2.0 m y 2.5 m de altura a una distancia de 800 m dentro del asentamiento, siendo los inferiores a 0.5 m en la porción este del sector a una distancia de 1800 m en tierra (Figura 8b).

Para el escenario del año 2100 se identifica la desaparición total del asentamiento e infraestructuras, la base de pesca y gran parte del bosque de mangle existente en ambos extremos del área de estudio. En este escenario, la magnitud de las inundaciones costeras temporales provocadas por la afectación del huracán Charley se aprecia en la Figura 9a.

Tabla 1. Valores simulados y reportados de marea de tormenta en Surgidero de Batabanó y Playa del Cajío

Marea de tormenta	Surgidero de Batabanó	Playa del Cajío
Simulada	4.00 m	2.63 m
Reportada	2.80 m	4.00 m
Diferencia	1.20 m	-1.37 m

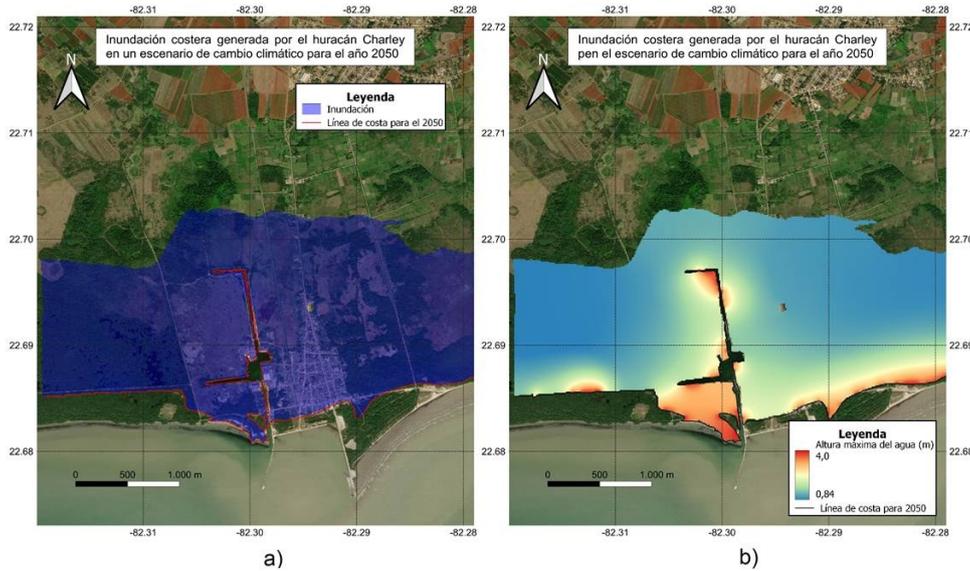


Figura 8. Inundación costera temporal generada por el huracán Charley en un escenario de cambio climático para el año 2050: a) alcance máximo, b) alcance máximo y altura máxima del agua sobre el terreno

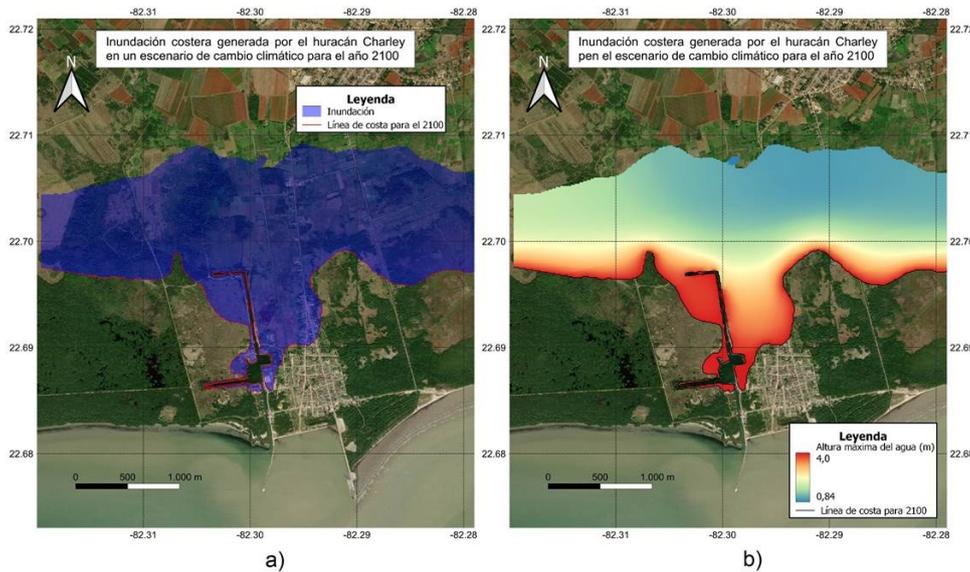


Figura 9. Inundación costera temporal generada por el huracán Charley en un escenario de cambio climático para el año 2100: a) alcance máximo, b) alcance máximo y altura máxima del agua sobre el terreno

Las penetraciones del mar alcanzan distancias máximas de 2300 m tierra adentro en la parte central, 1000 m en el extremo este y 800 m en el oeste, mientras que se obtienen valores cercanos a los 4 m de altura en todo el perímetro de la línea costera, siendo más prominente en la parte central del asentamiento (Figura 9b).

Los resultados arrojan alcances del agua inferiores a los determinados por Pérez *et al.* (2021) para un huracán categoría 5 con 12 horas de afectación, con diferencias de alcance que van desde 300 hasta 500 m. Se evidencia como un huracán categoría 3 en la escala Saffir-Simpson, con un tiempo de afectación menor, es capaz de producir en ambos escenarios una inundación costera temporal significativa que abarca la totalidad

del asentamiento, de manera similar a un huracán de categoría superior.

CONCLUSIONES

- La simulación de la inundación costera generada por el huracán Charley arrojó una marea de tormenta en Surgidero de Batabanó de 4.00 m a las 05:00 UTC del 13 de agosto de 2004.
- La modelación sobrestimó en 1.20 m el valor de la marea de tormenta en Surgidero de Batabanó.
- La totalidad del asentamiento es vulnerable a la inundación costera generada por el huracán, con un alcance máximo de 2200 m para el escenario del año 2050 y de 2300 m para el año 2100.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos por sus contribuciones a este trabajo a los especialistas Osvaldo Enrique Pérez López, Laura Marrero Malvarez y Frank Ernesto Ortega Pereira, del Centro de Meteorología Marina del Instituto de Meteorología (INSMET).

REFERENCIAS

- Álvarez, A., Casals, R., López, O., Gutiérrez, A., Pérez, P., Córdoba, L., González, J., Guzmán, J., Menéndez, L., Torres, A., Marzo, O., Montero, D., Vázquez, M., Martínez, R., Hernández, I., Santiago, Y., & García, A. (2014). *Inundación costera producida por la surgencia y oleaje generado por eventos meteorológicos extremos. Situación prevista para el 2100. Proyecto 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* (p. 125) [Informe Técnico de Resultado]. Instituto de Meteorología.
- Casals, R., & Marrero, L. (2022). *Generación de una malla no estructurada para la simulación de niveles del mar en la costa norte de la región central de Cuba* (p. 46) [Informe Técnico de Resultado]. Instituto de Meteorología.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2018). *Calentamiento global de 1,5 °C* (Informe Especial Del IPCC Sobre Los Impactos Del Calentamiento Global de 1,5 °C Con Respecto a Los Niveles Preindustriales y Las Trayectorias Correspondientes Que Deberían Seguir Las Emisiones Mundiales de Gases de Efecto Invernadero, En El Contexto Del Reforzamiento de La Respuesta Mundial a La Amenaza Del Cambio Climático, El Desarrollo Sostenible y Los Esfuerzos Por Erradicar La Pobreza ISBN: 978-92-9169-351-1). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-R eport-1.5-SPM_es.pdf
- Landsea, C. W., & Franklin, J. L. (2013). Atlantic hurricane database uncertainty and presentation of a new database format. *Monthly Weather Review*, 141(10), 3576–3592. <https://doi.org/10.1175/MWR -D-12-00254.1>
- Mitrani, I. (2017). *Meteorología Marina*. CITMA^{TEL} (Empresa de Tecnologías de la Información y Servicios Telemáticos Avanzados). <https://www.libreriavirtual.cu/libreria/meteorologia-marina>
- Mitrani, I., García, E., Hidalgo, A., Hernández, I., Salas, I., Pérez, R., Díaz, O., Vichot, A., Pérez, A., Cangas, R., Álvarez, L., Pérez, O., Rodríguez, C., Pérez, A., Morales, A., Viamontes, J., Pérez, J., & Rodríguez, J. (2017). *Inundaciones costeras en Cuba. Estructura termohalina y su influencia en las inundaciones*. CITMA^{TEL} (Empresa de Tecnologías de la Información y Servicios Telemáticos Avanzados). <https://www.libreriavirtual.cu/libreria/meteorologia-marina>
- Pérez, O., Casals, R., Pérez, R., Ortega, F., Pérez, P., Menéndez, L., Mosqueda, N., & Hernández, N. (2018). *Inundación costera producida por la surgencia y el oleaje generado por eventos hidrometeorológicos extremos para los años 2050 y 2100* (p. 68) [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. Informe Técnico de Resultado]. Instituto de Meteorología.
- Pérez, O., Casals, R., Pérez, R., Ortega, F., Pérez, P., Menéndez, L., Parra, L., Hernández, N., Rodríguez, N., Carracedo, D., Sánchez, B., Deus, C., Marrero, L., & Lam, C. (2021). *Modelación numérica de inundaciones costeras por cambio climático en asentamientos seleccionados* (p. 99) [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. Informe Técnico de Resultado]. Instituto de Meteorología.
- Pérez, O. E., Casals, R., Pérez, R., Pérez, P. J., González, J., Santiago, Y., Medina, F., Montero, D., & Calzada, A. (2015). *Inundación costera producida por la surgencia y oleaje generado por eventos meteorológicos extremos. Modelación numérica del alcance de la inundación teniendo en cuenta el uso y la rugosidad del terreno* (p. 104) [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. Informe Técnico de Resultado]. Instituto de Meteorología.
- Pérez, R. (2019). Ascenso del nivel del mar en Cuba por Cambio Climático. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(1), 76–83. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/455>
- Rubiera, J., & Ballester, M. (2005). *Resumen de temporada ciclónica de 2004 en el Atlántico Norte*. Instituto de Meteorología. <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=TEMPORADA&TB2=/Temporadas/temporada2004.htm>
- UNDP (United Nations Development Programme). (2021). *Resiliencia Costera al Cambio Climático en Cuba a través de la Adaptación basada en Ecosistema—“MI COSTA”* (p. 138) [Anexo VI (b) – Informe de evaluación social y ambiental. Propuesta de financiamiento del Fondo Verde para el Clima]. Cubaenergía. <http://financiamientoclimatico.cubaenergia.cu/index.php/descargas/19-und p-5994-cuba-annex-vi-b-esar-mi-costa-21102020-es/file>