

Evaluación de áreas susceptibles a la inundación por marea de tormenta generada por huracanes en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia

Assessment of areas susceptible to flooding by hurricane storm surges in the Archipelago of San Andrés, Providencia and Santa Catalina, Colombia

DOI: 10.26640/22159045.2019.465

Fecha de recepción: 2019/08/19 Fecha de aceptación: 2019/12/22

Wilmer Rey¹; Julio Monroy²; Julián Quintero-Ibáñez³; Germán Augusto Escobar Olaya⁴; Paulo Salles⁵; Pablo Ruiz-Salcines⁶; Christian M. Appendini⁷

CITAR COMO:

Rey, W.; Monroy, J.; Quintero-Ibáñez, J.; Escobar Olaya, G. A.; Ruiz-Salcines, P.; Salles, P.; Appendini, C. M. (2019). Evaluación de áreas susceptibles a la inundación por marea de tormenta generada por huracanes en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia. *Bol. Cient. CIOH*; 38(2):57-68. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.2019.465

RESUMEN

Debido a la posición geográfica del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (SPSC), esta es la parte del territorio colombiano más expuesto a ser inundado por marea de tormenta generada por ciclones tropicales (CT). Entre los peligros asociados a los CT, las inundaciones suelen ocasionar los mayores daños. En este estudio se evalúa un escenario extremo de inundación por marea de tormenta asociada a CT para establecer las áreas susceptibles a la inundación en este archipiélago. Dada la escasez de CT históricos en este archipiélago se generó una base de datos de CT hipotéticos, los cuales son un conjunto de eventos con una velocidad de viento constante (95.17 m/s), una velocidad de traslación constante de 5.87 m/s y un radio máximo de viento constante de 56.3 km, para trayectorias con cinco direcciones de aproximación al área de interés. Se evaluaron siete trayectorias paralelas para cada dirección, separadas por 6 km. La misma metodología fue utilizada para la isla de San Andrés, y separadamente para Providencia y Santa Catalina se usaron diferentes eventos debido a la distancia entre ellas (90 km). El modelo hidrodinámico se forzó con campos de viento y presión generados a partir de la base de datos de CT hipotéticos para determinar la marea de tormenta e inundación por CT en el

¹ Orcid: 0000-0002-2983-5103. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), Cartagena de Indias, Colombia. Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Sisal, Yucatán 97356, México. Correo electrónico: reysanchez@gmail.com

² Orcid: 0000-0002-3981-7486. Grupo de Investigación en Oceanología (GIO), Escuela Naval Almirante Padilla, Cartagena de Indias, Colombia. Correo electrónico: jdfof@enap.edu.co

³ Orcid: 0000-0003-3026-0391. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), Cartagena de Indias, Colombia. Correo electrónico: jqintero@dimar.mil.co

⁴ Orcid: 0000-0002-0605-2069. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), Cartagena de Indias, Colombia. Correo electrónico: jefcioh@dimar.mil.co

⁵ Orcid: 0000-0001-9072-8289. Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Sisal, Yucatán 97356, México. Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), Sisal, Yucatán 97356, México. Correo electrónico: psallesa@iingen.unam.mx

⁶ Orcid: 0000-0002-3075-9873. Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Sisal, Yucatán 97356, México. Correo electrónico: pruijs@iingen.unam.mx

⁷ Orcid: 0000-0002-6044-3351. Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC), Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Sisal, Yucatán 97356, México. Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), Sisal, Yucatán 97356, México. Correo electrónico: cappendinia@iingen.unam.mx

archipiélago de SPSC. Los resultados obtenidos incluyen la envolvente de las envolventes individuales de la distribución espacial del espejo de agua (nivel del agua referido al nivel del terreno) de cada evento, reportando el escenario de inundación más conservador generado por marea de tormenta de CT en el archipiélago de SPSC. Las áreas propensas a inundación en la isla de San Andrés están ubicadas al este de la misma, principalmente, donde se encuentran los puertos de abrigo, y en la parte norte, donde se encuentran los principales asentamientos humanos. Para la isla de Providencia estas áreas se encuentran al este en regiones circunvecinas al aeropuerto y al Norte, a lo largo del canal que la separa de la isla de Santa Catalina. Para esta última isla las áreas propensas a inundación se encuentran al sureste. Bajo este escenario de inundación el porcentaje de área afectada sería de 13.39 %, 4.24 % y 4.43 % para San Andrés, Providencia y Santa Catalina, respectivamente. Los resultados de este trabajo proveen herramientas a los tomadores de decisiones en el diseño e implementación de medidas de protección a inundaciones por CT, permitiendo la identificación de las áreas potencialmente inundables en todo el archipiélago con una resolución no mostrada anteriormente. Para evaluar el escenario de inundación más conservador de origen marino por CT en este archipiélago, futuros trabajos deberán complementar los resultados de esta investigación con la contribución por marea astronómica (marea alta) y el *wave runup*.

PALABRAS CLAVE: marea de tormenta, modelación de inundación, MOM, ciclones tropicales, San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

ABSTRACT

Due to the geographical location of the archipelago of San Andres, Providencia, and Santa Catalina (SPSC), it is the most exposed Colombian territory to be flooded by Tropical Cyclones (TC) storm surges. Among the hazards associated with TC, inundation is one that causes the most damage. This study assesses the hurricane storm flood surge worst-case scenario to establish the flood-prone areas in this archipelago. Given the scarcity of historical TC in this archipelago, we generated a hypothetical dataset of TC, which consists of a set of events with a constant wind speed intensity (95.17 m/s), a constant forward speed of 5.87 m/s, and a constant radius of maximum wind of 56.3 km, for tracks with five different approach directions to the area of interest. For each direction, seven parallel tracks, separated by 6 km, were assessed. The same methodology was used for San Andres, and separately for Providencia and Santa Catalina, using different events because of the distance between them (90 km). The model was forced with wind and pressure fields from the hypothetical hurricane dataset to determine the hurricane storm surge and flooding in the archipelago of SPSC. The results include the Maximum of the Maximum Envelopes of Water of the spatial distribution of the water depth (water level above the terrain) for each event, reporting the hurricane storm surge flood worst-case scenario for the archipelago of SPSC. The flood-prone area in San Andres Island is located on the east side, mainly in the sheltered port and on the north side where the main human settlements are located. For Providencia Island, the flood-prone areas are on the east side, surrounding the airport, and on the north side along the channel that separates Providencia from Santa Catalina. For the latter, the flood-prone area is the southeast sector of the island. Under this flood scenario the percentage of the affected area would be 13.39 %, 4.24 % and 4.43 % for San Andrés, Providencia and Santa Catalina, respectively. The results from this work provide tools for decision-makers to design and to implement civil protection measures to hurricane storm surge flooding, allowing the identification of flood-prone areas in the archipelago with a spatial resolution not shown before. In order to assess the hurricane flood worst-case scenario in this archipelago, future work should complement results from this research with the contribution from astronomic tide (high tide) and wave runup.

KEYWORDS: Storm surge, flood modeling, MOM, tropical cyclones, San Andrés, Providencia and Santa Catalina.

INTRODUCCIÓN

Debido a su posición geográfica, el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (SPSC) es el área del territorio colombiano más vulnerable al paso de ciclones tropicales (CT) (Ortiz Royero, 2012). A pesar de que la ocurrencia de los CT en el Caribe colombiano no es alta, excepto para el archipiélago de SPSC y la península de La Guajira (Ortiz Royero, 2012), donde los CT han causado severos daños en la infraestructura costera, así como pérdidas de vidas humanas Osorio, Montoya, Ortiz y Peláez (2016). Durante el paso de estos eventos se genera oleaje extremo, marea de tormenta y lluvias extremas que causan inundaciones costeras, erosión de playas y deslizamientos de tierra debido a las lluvias (Sealy y Strobl, 2017). Esto conlleva a severas afectaciones a la infraestructura costera, al medio ambiente y a la sociedad.

La marea de tormenta es la sobre-elevación del nivel del mar en la costa por arriba de la marea astronómica (NHC, 2014a) y es inducida por el esfuerzo del viento sobre la superficie del mar y una pequeña contribución por el campo de baja presión (Lin y Chavas, 2012). La marea de tormenta se amplifica en aguas someras (Flather, 2001) y dependiendo de la forma de la cuenca (cóncava o convexa), de la dirección de incidencia de los vientos y del fondo marino, se generará una mayor o menor sobre-elevación del mar en la costa Rey, Salles, Mendoza, Torres-Freyermuth y Appendini (2018).

En el Caribe colombiano entre 1900 y 2010 han pasado 60 tormentas, algunas cerca de la península de La Guajira y otras tocando tierra (Ortiz Royero, 2012). Es decir, una ocurrencia con media de 0.54 eventos por año. Sin embargo, son pocos los que han tocado tierra; el evento más reciente del que se tiene registro es el huracán Beta, que tocó tierra en las islas de Providencia y Santa Catalina los días 28 y 29 de octubre de 2005, del cual quedaron algunos registros de variables atmosféricas tomadas *in situ* (Collazos Guzmán, Ospina Vallejo y Vargas, 2007). Ante la carencia de bases de datos robustas de eventos históricos, estudios recientes enfocados en la evaluación del peligro a la inundación por CT han hecho uso de CT sintéticos (Emanuel, Ravela, Vivant y Risi, 2006; Emanuel, Sundararajan y Williams, 2008) e hipotéticos (Zachry, Booth,

Rhome y Sharon, 2015; Rey *et al.*, 2019), los cuales proveen bases de datos más robustas para caracterizar tendencias de clima presente y futuro, así como para crear alerta temprana y rutas de evacuación. De estas bases de datos se pueden extraer las características de los CT (velocidad máxima de viento, radio máximo de viento, presión central y ambiental o isobara de presión más externa al centro del huracán), las cuales son empleadas como entrada a los modelos paramétricos de viento de CT (Holland, 1980; Jelesnianski, Chen y Shaffer (1992); Emanuel 2004; Holland, Belanger y Fritz, 2010; Holland, Belanger y Fritz, 2010; Emanuel y Rotunno, 2011; Chavas, Lin y Emanuel, 2015). A partir de ellos es posible reproducir de forma aproximada el campo de vientos de los CT a altura gradiente (altura a la cual la velocidad del viento no es afectada por la fricción de la superficie del terreno). Los campos de viento resultantes de estos modelos paramétricos son simétricos. Sin embargo, por lo general los campos de viento de los CT son asimétricos. Para dotar de la asimetría al campo de viento, este se suele concebir como el resultado de la suma de dos componentes (Lin y Chavas, 2012): una axisimétrica asociada al vórtice de la tormenta, resultante del modelo paramétrico de viento utilizado (*axisymmetric component of the storm vortex*, SV), y la de un campo de vientos constante de fondo ambiental, axialmente asimétrica en superficie (*Surface Background Wind*, SBW). Dado que los modelos hidrodinámicos emplean campos de viento a nivel superficial (10 m sobre nivel del mar), se debe aplicar correcciones a cada una de estas dos componentes para pasar de altura gradiente a altura superficie (10 m). Estas correcciones son ampliamente explicadas en Lin y Chavas (2012) y Ruiz-Salcines *et al.*, (2019).

Los campos viento y presión en superficie son empleados para forzar los modelos hidrodinámicos, tales como el MIKE 21, para generar numéricamente marea de tormenta e inundación asociada. El modelo hidrodinámico HD MIKE 21 resuelve numéricamente las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) para un flujo bidimensional e incompresible de la forma de Reynolds; la fricción de fondo es calculada con la ecuación de Manning o de Chezy (Chow, 1959), y los coeficientes de viscosidad de remolino se usan para definir las condiciones de turbulencia. Las

ecuaciones base del modelo son las de continuidad y de momentum, e incluye las ecuaciones de temperatura, salinidad y densidad (DHI, 2014). La discretización de las ecuaciones primitivas se lleva a cabo por medio del método de volumen finito. En el dominio horizontal tanto las coordenadas cartesianas como esféricas pueden ser usadas y los elementos pueden ser triangulares o cuadriláteros (DHI, 2014). El mojado y secado de los elementos en el mallado de cálculo está incluido en el modelo hidrodinámico tomando en cuenta los trabajos de Zhao *et al.*, (1994) y Sleigh, Gaskell, Berzins y Wright (1998). Este modelo hidrodinámico ha sido utilizado en recientes estudios científicos, como ejemplo podemos mencionar a Meza-Padilla, Appendini y Pedrozo-Acuña (2015) y Rey *et al.*, (2018, 2019, 2020).

Para el archipiélago de SPSC no existen estudios de inundación por CT, contando con un estudio reportado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo (Ungrd, 2018), en el cual se modeló marea de tormenta por CT, sin precisar la resolución de la malla computacional empleada y no modelando inundación. Por ende, el objetivo de esta investigación es estimar las áreas susceptibles a la inundación por marea de tormenta por CT para el archipiélago de SPSC, con una resolución espacial de 30 m. El modelo hidrodinámico se forzó con los campos de viento y presión de CT hipotéticos para generar numéricamente la sobre elevación del nivel del mar e inundación asociada. Esta metodología es novedosa y ha sido ampliamente utilizada a nivel regional (Zachry *et al.*, 2015; Rey *et al.*, 2019).

El área de estudio comprende el archipiélago de SPSC. El área total es de 4 861.94 ha (2 678.19 ha pertenecientes a San Andrés, 2 065.10 ha a Providencia y 118.65 ha a Santa Catalina). Estas áreas fueron calculadas en este estudio con base al polígono (línea de costa) que cubre la parte continental en cada una de estas islas. Esta línea de costa se generó en el marco del proyecto 'Definición técnica de los bienes de uso público en el Caribe colombiano' del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). A partir de fotointerpretación de imágenes de alta resolución se digitalizó dicho contorno, tomando en cuenta el límite de la interface agua-tierra observado en estas imágenes. De acuerdo a un levantamiento topográfico LiDAR, con resolución

espacial de 5 m, realizado por el CIOH para el archipiélago de SPSC en el año de 2010, el cual está referido en la vertical al Mean Low Water Spring (MLWS), la altura topográfica máxima para San Andrés es de 91 m. Datos de batimetría de alta resolución colectados por el CIOH, referida al MLWS, muestran para esta isla una plataforma archipelágica hacia el norte y noreste que va más allá de la barrera arrecifal (Figura 1, panel izquierdo), protegiendo el área de los peligros de origen marino. A su vez existe una laguna arrecifal somera, con profundidades máximas de 7 m, encontrándose las aguas profundas a una distancia entre 10 km y 20 km (Devis-Morales, Montoya-Sánchez, Osorio y Otero-Díaz, 2014). La franja costera para esta zona es topográficamente baja, con alturas máximas de 3 m, siendo áreas susceptibles a inundación por lluvias o de origen marino. En esta franja costera se encuentran instalaciones portuarias y complejos turísticos, así como asentamientos humanos principalmente al norte de la misma. En las áreas oeste, sur y sureste de la isla, la topografía es baja (alturas menores a 3 m) y cuenta con una plataforma archipelágica situando grandes profundidades a corta distancia de la costa, haciendo al área menos vulnerable a la inundación.

Al noreste de la isla de Providencia (Figura 1, panel derecho), donde se encuentra el aeropuerto y noroeste, con asentamientos humanos, se sitúa una franja costera con alturas topográficas, inferiores a 5 m. Al sureste y suroeste de Providencia las alturas son mayores a los 7 m. La laguna arrecifal en Providencia tiene profundidades superiores a 10 m en el noreste y sureste, e inferiores a 8 m al este. La isla de Santa Catalina tiene una altura máxima de 150 m, se separa de Providencia por un canal de 150 m de ancho y profundidades mínimas menores a 3 m.

Dentro de las principales características hidrodinámicas que influyen el área de estudio se encuentra el flujo generalizado con sentido este-oeste, denominado corriente Caribe, que exhibe importante variabilidad temporal y espacial (Andrade y Barton, 2000), encontrándose a su paso con las islas que conforman el archipiélago de SPSC y exponiéndolas a los *eddies* ciclónicos y anticiclónicos que viajan sobre ella, que a su vez contribuyen a los eventos extremos de nivel del mar (Torres y Tsimplis, 2014).

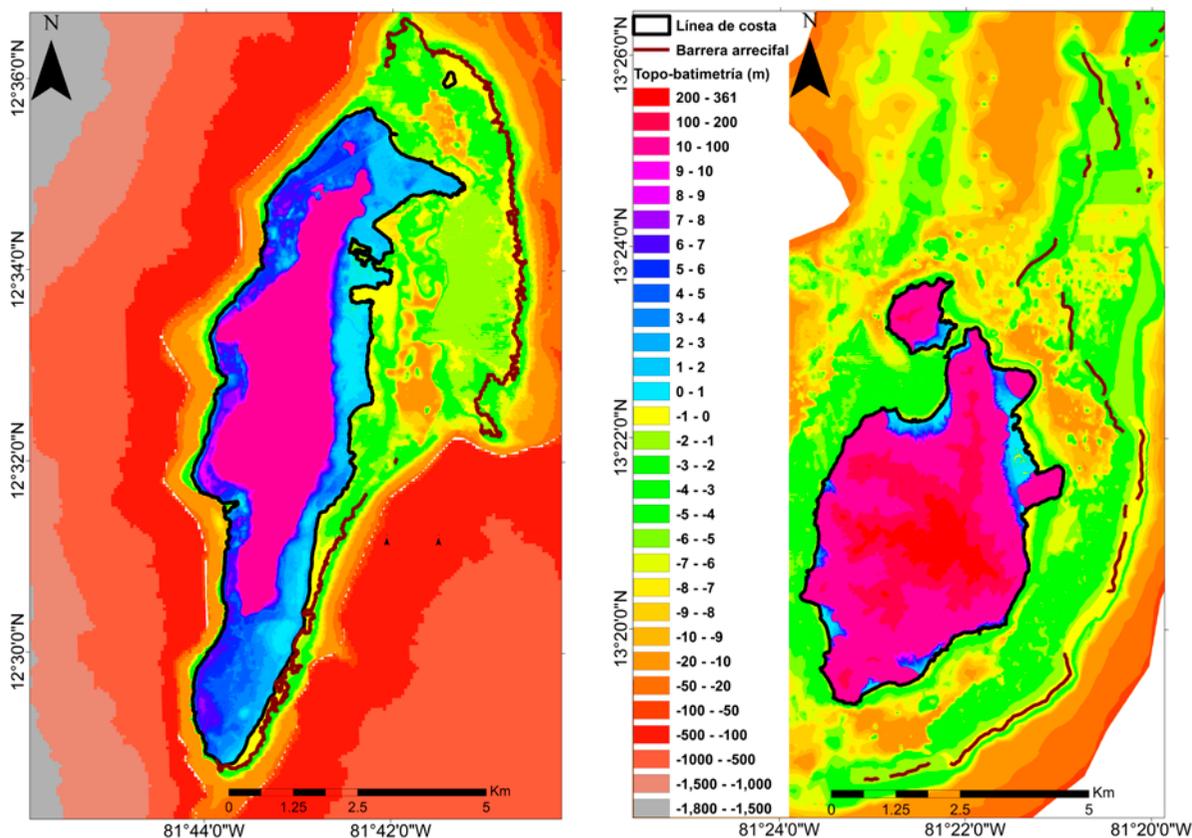


Figura 1. Levantamiento de topobatimetría (referido al MLWS) para las islas de San Andrés (panel izquierdo), Providencia y Santa Catalina (panel derecho).

METODOLOGÍA

Para la modelación de la inundación en el archipiélago de SPSC se implementó el modelo hidrodinámico MIKE 21 HD y se creó una base de datos de CT hipotéticos con los cuales se generaron campos de viento y presión para forzar el modelo en la superficie.

El mallado computacional es no estructurado (Figura 2), en el cual la resolución espacial varía desde baja resolución en áreas alejadas a las zonas de interés a una máxima resolución mínima de 30 m en las zonas propensas a inundación (área de mayor interés). La topo-batimetría está compuesta por datos procedentes de levantamientos de batimetría como de topografía (en el archipiélago de SPSC) de alta resolución en la zona de interés (Figura 2, polígonos de color negro) complementados con batimetría de resolución global (*General Bathymetric Chart of*

the Oceans, Gebco) en las áreas más alejadas. La costa de Nicaragua fue usada como frontera cerrada para el modelo. Las fronteras oceánicas fueron forzadas con un nivel del mar constante (cero). Es decir, la marea astronómica no fue considerada. Por ende, únicamente se modeló inundación por marea de tormenta.

Un factor importante para tomar en cuenta en la modelación de la inundación es la fricción de fondo, el cual se puede definir mediante el coeficiente de Chezy o de Manning (Chow, 1959) y puede ser derivado a partir de información de composición del fondo, tales como mapas de usos del suelo o composición del fondo marino. Infortunadamente, para este estudio no se contó con los datos necesarios para caracterizar la fricción espacialmente y, por ende, se asumió un coeficiente de fricción de fondo de Manning constante para todo el dominio de cómputo de valor 1/32.

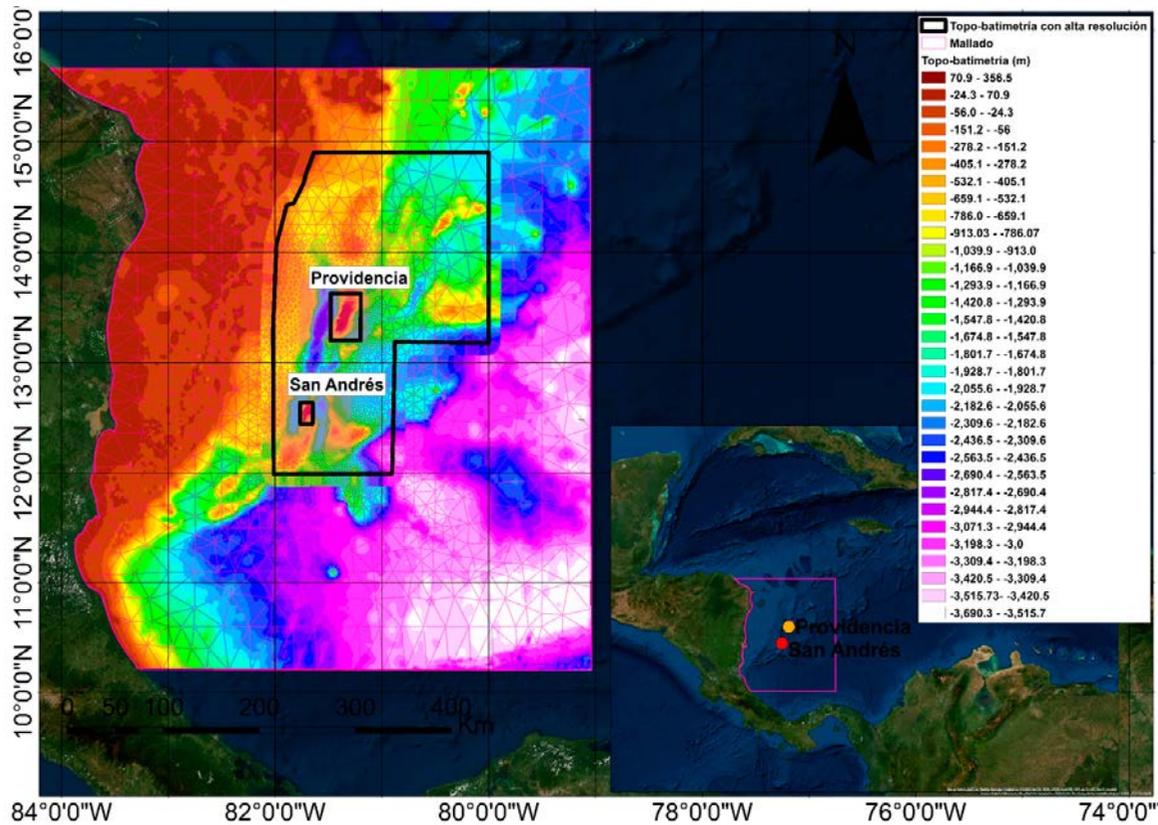


Figura 2. Dominio de cálculo.

Los eventos hipotéticos fueron creados con base a la metodología descrita en previos estudios (Zachry *et al.*, 2015; Rey *et al.*, 2019). La Figura 3 muestra cinco diferentes direcciones de aproximación tanto en la isla de San Andrés (puntos en color rojo) como en Providencia (puntos en color verde). Para cada una de estas direcciones se usaron siete trayectorias paralelas, separadas por 6 km. Por ende, para cada isla se usó un total de 35 eventos. Se usaron diferentes eventos para cada isla, debido a la distancia que hay entre las mismas (aproximadamente 90 km). Eventos que afectan a una de estas islas, no necesariamente afectan a la otra con la misma magnitud. Para cada una de estas trayectorias se usó un radio máximo de viento de 56.3 km (radio donde se sitúa la velocidad máxima del viento), una velocidad de traslación de 5.87 m/s y una velocidad máxima de viento de 95.17 m/s (categoría V en la escala de vientos de huracán Saffir-Simpson). Estas características fueron constantes a lo largo de toda la trayectoria para cada una de los 35 eventos usados en cada isla.

En esta misma figura se muestra el dominio sobre el cual se calcularon los campos de viento (polígono en color rojo), con un mallado regular con una resolución espacial de 0.09 grados. El polígono en color azul es el área en la cual se conocen las características de cada evento. En color café se tiene el mallado computacional del modelo hidrodinámico. El modelo se forzó en la superficie con campos de viento del modelo paramétrico de Jelesnianski *et al.* (1992) y campos de presión del modelo paramétrico de Holland (1980), tal como ya se ha hecho en otros estudios (Lin, Emanuel, Smith, Vanmarcke, 2010; Lin, Emanuel, Oppenheimer y Vanmarcke (2012); Lin, Lane, Emanuel, Sullivan y Donnelly, 2014; Lin y Chavas, 2012). Las entradas de estos modelos paramétricos de viento fueron las características de los CT hipotéticos. Por ende, la inundación reproducida numéricamente fue únicamente debido a los esfuerzos del viento sobre la superficie del mar y a la contribución por el campo de baja presión de los CT que pasaron dentro del dominio de cómputo.

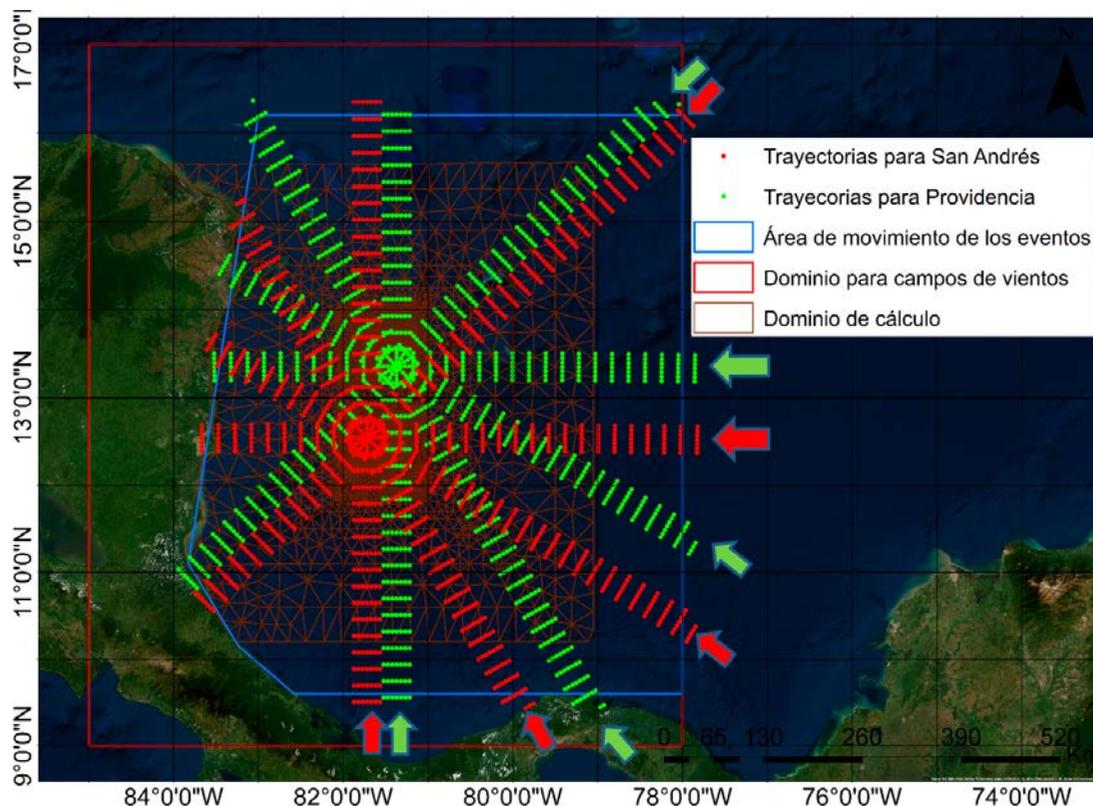


Figura 3. Eventos hipotéticos.

En el archipiélago no se dispone de mediciones de nivel del mar durante el paso de CT, y dado que este mismo modelo hidrodinámico fue usado para estudios similares en la península de Yucatán (Rey et al., 2019, 2020), se usaron los mismos parámetros de calibración del modelo hidrodinámico empleados en dichos estudios.

Una vez que se simuló la hidrodinámica generada por los huracanes seleccionados, se calculó la envolvente del espejo de agua (nivel del agua referida al nivel del terreno) asociado a cada evento, en cada elemento del mallado de cálculo. Posteriormente, se calculó la envolvente de las envolventes individuales del espejo de agua para todos los 35 eventos de huracán en estudio, los cuales se caracterizaron por tener la misma categoría. Es decir, se calculó el *Maximum of the Maximum Envelope of Water* (MOM), tanto para San Andrés como para Providencia y Santa Catalina, similar como en Rey et al., (2019). El MOM representa el escenario más conservador de inundación causada por una categoría de huracán bajo condiciones de tormenta (NHC, 2014b).

Sin embargo, dado que para este caso la marea astronómica no fue considerada, para este caso el MOM representa la máxima inundación por marea de tormenta.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados más relevantes del estudio. La Figura 4 muestra el MOM del espejo de agua por marea de tormenta en San Andrés (panel izquierdo) y Providencia y Santa Catalina (panel derecho) para la categoría de huracán V. La profundidad máxima alcanzada por la inundación fue 2.9 m en San Andrés situado en la zona del puerto de abrigo y noreste de la isla. Las áreas con mayor potencial de inundación en Providencia (hasta 2.1 m) se ubican al este, en las zonas circundantes al aeropuerto, en la zona norte a lo largo del canal que le separa de Santa Catalina y al noroeste, donde se encuentran asentamientos humanos. Para la isla de Santa Catalina únicamente la parte sureste es propensa a inundación.

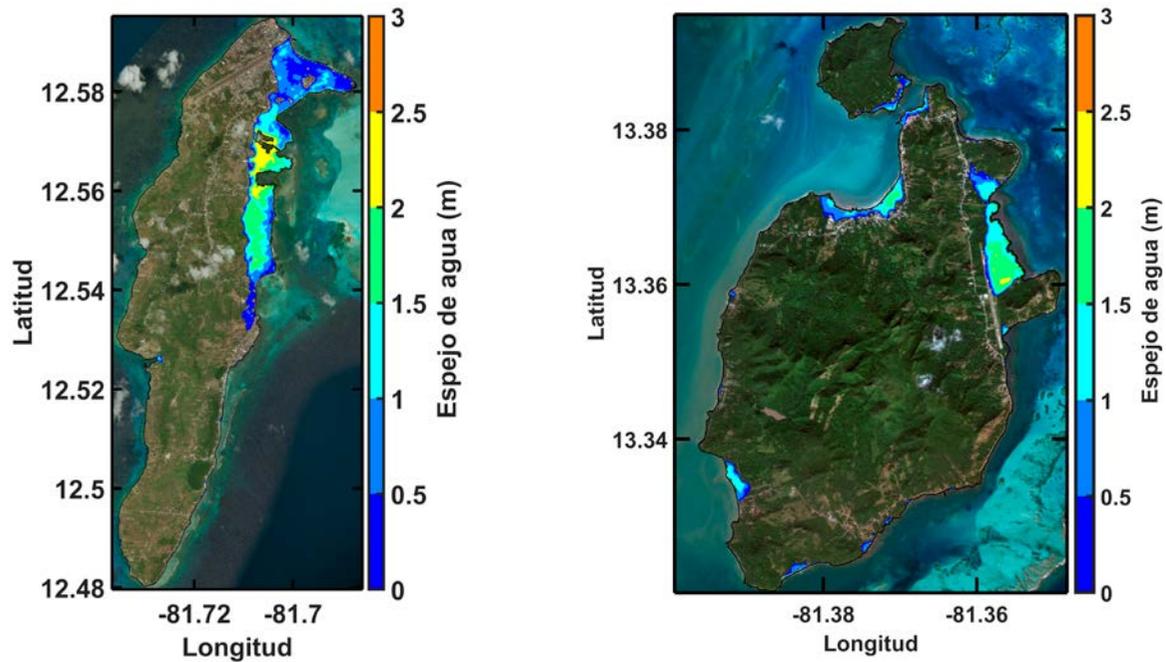


Figura 4. MOM del espejo de agua para el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

En la Tabla 1 se enseñan las áreas totales e inundadas en cada una de las tres islas, así como las áreas para diferentes profundidades de inundación y su respectivo porcentaje respecto al área total en cada isla.

Tabla 1. Áreas inundadas y su porcentaje asociado.

Isla	San Andrés	Providencia	Santa Catalina
Área total (ha)	2678.19	2065.1	118.65
Área total inundada (ha)	358.72 ha (13.39 %)	87.63 ha (4.24 %)	5.26 ha (4.43 %)
0-0.5 m	88.93 ha (3.32 %)	13.86 ha (0.67 %)	2.05 ha (1.73 %)
0.5-1 m	108.44 ha (4.05 %)	21.40 ha (1.04%)	2.02 ha (1.70 %)
1-1.5 m	65.93 ha (2.46 %)	29 ha (1.40 %)	1.14 ha (0.96%)
1.5-2 m	68.17 ha (2.55%)	22.27 (1.08 %)	0.05 ha (0.04 %)
2-2.5 m	26.55 ha (0.99 %)	1.10 (0.05 %)	0 ha (0.0 %)
2.5-3 m	0.68 ha (0.03 %)	0.0 ha (0.0 %)	0 ha (0.0 %)

DISCUSIONES

Los resultados de inundación para la isla de San Andrés muestran que la parte noreste de esta isla es el área más propensa a la inundación por marea de tormenta asociada a CT, especialmente en aquellas áreas que rodean los puertos de abrigo y en el norte de la misma, que es la más desarrollada, lo cual le convierte en el área con mayor riesgo a la inundación en toda la isla. La inundación de la parte noreste de

la isla se debe principalmente a lo somero de la plataforma archipelágica, sobre la cual subyace una laguna arrecifal donde la marea de tormenta se ve amplificada (Flather, 2001), junto a la baja topografía y a la forma de la línea de costa. Debido a las características geométricas de los puertos de abrigo, el nivel del agua generado durante el paso de los CT supera la altura de las orillas de estos canales, causando un desbordamiento sobre las áreas topográficamente bajas. A pesar de que la parte sur y oeste de esta isla son

también topográficamente bajas, cuenta con una plataforma archipelágica de pequeña extensión y una pronunciada pendiente del talud continental, por lo que allí no se genera una marea de tormenta importante.

De forma similar, en la isla de Providencia, la plataforma archipelágica al noreste de esta isla es muy somera y la topografía es baja. Por ende, esta es el área más propensa a inundación. Esta zona cuenta con pocos asentamientos humanos, sin embargo, una de las principales obras civiles, el aeropuerto, está situado en esta zona, haciéndolo susceptible a la inundación bajo el escenario de CT extremos. El noroeste de Providencia también está propenso a inundarse y allí sí hay asentamientos humanos, lo cual le hace una de las zonas que presentan mayor riesgo por inundación. De igual manera, en la parte suroccidental y suroriental de Providencia hay áreas con cierto grado de susceptibilidad a ser inundadas debido, principalmente, a la configuración de la costa. En la isla de Santa Catalina únicamente el sureste está expuesto a inundación, allí es donde se encuentran los principales asentamientos de la isla. A pesar de que en las zonas marinas donde se alcanzan grandes profundidades a distancias muy cercanas a la costa, no se generaron sobre elevaciones significativas del nivel del mar debido a la marea de tormenta, el oleaje extremo durante el paso de CT (no modelado en este estudio) podría afectar considerablemente la infraestructura costera en estas secciones de costa (Ortiz Royero, Plazas Moreno y Lizano, 2015; Bernal *et al.*, 2016).

Se debe considerar que este estudio es una primera aproximación al escenario más conservador de inundación por marea de tormenta, donde la distribución espacial de la fricción de fondo no fue tomada en cuenta debido a la falta de información, lo cual pudo causar una sobreestimación de la inundación en áreas con una fricción mayor a la usada en este estudio. Zhang *et al.* (2012) encontró que la no inclusión de la distribución espacial de la fricción de fondo podría sobreestimar la inundación significativamente, y que el mangle es de las especies vegetales que más atenúan la inundación. Por ejemplo, el mangle atenuó el nivel del agua en la llanura de inundación al sur de Florida a una tasa de 4.2 cm/km y 9.4 cm/km, durante el paso de los

huracanes Wilma en 2004 y Charley en 2005, respectivamente (Krauss *et al.*, 2009).

La probabilidad de que se generen las profundidades de inundación bajo este escenario conservador podría ser muy baja. Los CT de baja intensidad de viento tienen una frecuencia mayor que los de alta intensidad. Por ende es necesario ampliar el estudio para las todas las categorías de huracán Saffir-Simpson, tomando en cuenta los efectos sobre la inundación del estado de la marea astronómica (marea alta o baja) de forma similar a como se hizo en Rey *et al.*, (2019). Este caso se considera como nivel de marea baja (nivel cero). Este tipo de estudios es relevante para la caracterización de zonas propensas a inundación. Sin embargo, a la fecha se desconoce una metodología para la estimación de periodos de retorno asociados a las inundaciones por estos CT hipotéticos. Para ello se podría usar otro tipo de alternativas en zonas con baja frecuencia de CT, tal como es el caso del archipiélago de SPSC; se podría optar por el uso de CT sintéticos (Emanuel *et al.*, 2006, Emanuel *et al.*, 2008) para la estimación de periodos de retorno de inundación por CT, tanto para clima presente (Lin *et al.*, 2010) como para clima futuro bajo escenarios de cambio climático (Lin *et al.*, 2012). La información generada en esta investigación servirá para crear planes de ordenamiento territorial, regular y controlar usos de suelo, alerta temprana y rutas de evacuación durante el paso de CT. Para la obtención del peor escenario de inundación de origen marino por CT en el archipiélago de SPSC, futuros estudios deberán considerar la aportación por marea astronómica y el *wave runup*. Sin embargo, la marea de tormenta es la variable que más aporta a la inundación en este tipo de casos.

Este trabajo es la base para un futuro un estudio integral de riesgo a la inundación por CT en el archipiélago, en el cual se podrían tomar en cuenta diferentes dimensiones de vulnerabilidad, tales como aspectos sociales, económicos, institucionales, ecológicos y culturales. Cada una de estas dimensiones aporta a la vulnerabilidad integral de un sistema ante la amenaza del peligro inminente. De acuerdo con Wisner, Blaikie, Cannon y Davis (2004), este tipo de estudios se deben enfocar más en evaluar la respuesta de la costa al embate de los fenómenos naturales que en evaluar la intensidad y frecuencias de los mismos.

CONCLUSIONES

La presente investigación evaluó el potencial de inundación por ciclones tropicales en el archipiélago de SPSC mediante el uso de CT hipotéticos creados bajo la climatología de la zona de estudio. El análisis de los resultados muestra lo siguiente:

- El 13.39 %, 4.24 % y 4.43 % del área total de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, respectivamente, están expuestos a inundaciones por ciclones tropicales. Este estudio muestra los resultados del escenario de inundación más conservador por marea de tormenta, usando huracanes categoría V en la escala de vientos de huracán Saffir-Simpson.
- Se hace necesaria la caracterización espacial del uso de suelo en el archipiélago de SPSC para calcular la distribución de fricción de fondo, y así mejorar los resultados de modelación de inundación por CT de este estudio. Este estudio se debe considerar como una primera aproximación al potencial de inundación por CT en este archipiélago.
- Este trabajo sienta las bases para futuros proyectos en los cuales se plantee evaluar el riesgo a la inundación por ciclones tropicales para clima presente y bajo condiciones de cambio climático en las costas colombianas por medio del uso de CT sintéticos.
- Para futuros estudios de evaluación de riesgo a la inundación por CT se hace necesario la caracterización de la vulnerabilidad del archipiélago de SPSC. Con tales estudios se podrán plantear estrategias de manejo de riesgo a inundación por CT y así hacer este archipiélago más resiliente a las inundaciones de origen marino.

AGRADECIMIENTOS

Al programa de estancias postdoctorales de Colciencias, convocatoria 784 de 2017 y a la Dimar-CIOH por financiar la estancia postdoctoral para ejecutar esta investigación con los contratos 236-Subafin-2018, 110-Subafin-2019.

Al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por colaborar en este proyecto por proveer la licencia

comercial del modelo hidrodinámico MIKE 21, y al Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera proporcionando equipo de cómputo de alto rendimiento para la ejecución de las simulaciones de inundación por CT en el archipiélago de SPSC.

A Gonzalo Martín Ruiz, a Juan Alberto Gómez Liera y a José López González por apoyo en la instalación y puesta en operación del equipo de cómputo de alto rendimiento utilizado en este estudio y soporte técnico; así como a Emerson Herrera y Fernando Afanador por su colaboración en el procesamiento de datos topobatemétricos usados en este estudio.

De igual manera se agradece a la dirección de CIOH, al Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras y al Área de Hidrografía de CIOH por proveer la información y medios necesarios para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- Andrade, C. A.; Barton, E. D. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res. Ocean.* 105:26191-26201. <https://doi.org/10.1029/2000JC000300>
- Bernal, G.; Osorio, A. F.; Urrego, L.; Peláez, D.; Molina, E.; Zea, S.; Montoya, R. D.; Villegas, N. (2016). Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean coasts and some approaches to assess their impact on ecosystems. *Journal of Marine Systems*, 164:85-100. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.007>
- Chavas, D. R.; Lin N.; Emanuel, K. (2015). A Model for the Complete Radial Structure of the Tropical Cyclone Wind Field. Part I: Comparison with Observed Structure*. *J. Atmos. Sci.* 72:3647-3662. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0014.1>
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. New York
- Collazos Guzmán, G.; Ospina Vallejo, H. J.; Vargas, A. M. (2007). Estudio descriptivo de la influencia del huracán Beta en las islas de Providencia y Santa Catalina. *Bol. Cient. CIOH*; 70:61-70. <https://doi.org/10.26640/22159045.163>
- Devis-Morales, A.; Montoya-Sánchez, R. A.;

- Osorio, A. F.; Otero-Díaz, L. J. (2014). Ocean thermal energy resources in Colombia. *Renew Energy*; 66:759-769. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.010>
- DHI. (2014). *Mike 21 Flow model FM: Hydrodynamic module, user guide*. DHI Water y Environment. Hoersholm, Denmark, 134 pp.
- Emanuel, K. (2004). Tropical cyclone energetics and structure. *Atmos. Turbul. Mesoscale Meteorol.*; 165-191. <https://doi.org/10.1177/CBO9780511735035.010>
- Emanuel, K.; Ravela, S.; Vivant, E.; Risi, C. (2006). A statistical deterministic approach to hurricane risk assessment. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*; 87:299-314. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-3-299>
- Emanuel, K.; Rotunno, R. (2011). Self-Stratification of Tropical Cyclone Outflow. Part II: Implications for Storm Intensification. *J. Atmos. Sci.* 69:988-996. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0177.1>
- Emanuel, K.; Sundararajan, R; Williams, J. (2008). Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 89:347-367. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-347>
- Flather, R. A. (2001). Storm Surges. In: Steele JH, Thorpe SA, Turekian KK (eds) *Encyclopedia of Ocean Sciences. Academic*. San Diego, California, 2882-2892 pp. <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0124>
- Holland, G. J. (1980). An analytical model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Weather Rev.*; 108(8):1212-1218. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1212:AA MOTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1212:AA MOTW>2.0.CO;2)
- Holland, G. J.; Belanger, J. I.; Fritz, A. (2010). A Revised Model for Radial Profiles of Hurricane Winds. *Mon. Weather Rev.*; 138:4393-440. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3317.1>
- Jelesnianski, C.; Chen, J.; Shaffer. W. (1992). SLOSH: Sea, lake, and overland surges from hurricanes. *NOAA Tech Rep NWS 48*, United States Dep Commer NOAA/AOMLLibrary, Miami, Florida 71.
- Krauss, K. W.; Doyle, T. W.; Doyle, T. J.; Swarzenski, C. M.; From, A. S.; Day, R. H.; Conner, W. H. (2009). Water level observations in mangrove swamps during two hurricanes in Florida. *Wetlands*; 29(1),142. <https://doi.org/10.1672/07-232.1>
- Lin, N.; Emanuel, K.; Smith, J.; Vanmarcke, E. (2010). Risk assessment of hurricane storm surge for New York City. *J. Geophys. Res.* 115:1-11. <https://doi.org/10.1029/2009JD013630>
- Lin, N.; Chavas, D. (2012). On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling. *J. Geophys. Res. Atmos.* 117:1-19. <https://doi.org/10.1029/2011JD017126>
- Lin, N.; Emanuel, K.; Oppenheimer, M.; Vanmarcke, E. (2012). Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change. *Nat Clim Change* 2:462-467. <https://doi.org/10.1038/nclimate1389>
- Lin, N.; Lane, P.; Emanuel, K. A.; Sullivan, R. M.; Donnelly, J. P. (2014). Heightened hurricane surge risk in northwest Florida revealed from climatological-hydrodynamic modeling and paleorecord reconstruction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(14), 8606-8623. <https://doi.org/10.1002/2014JD021584>
- Meza-Padilla, R.; Appendini, C. M.; Pedrozo-Acuña, A. (2015). Hurricane-induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. *Ocean Dyn* 65:1199-1211. <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0861-7>
- NHC. (2014a). *Storm Surge Overview*. <http://www.nhc.noaa.gov/surge/>. Accessed 5 May 2017
- NHC. (2014b). *Storm Surge Maximum of the Maximum (MOM)*. <http://www.nhc.noaa.gov/surge/momOverview.php>. Accessed 5 May 2017.
- Ortiz Royero, J. C.; Plazas Moreno, J. M.; Lizano, O. (2015). Evaluation of Extreme Waves Associated with Cyclonic Activity on San Andrés Island in the Caribbean Sea since 1900. *J. Coast Res.* 31:557-568. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00072.1>

- Ortiz Royero, J. C. (2012). Exposure of the Colombian Caribbean coast, including San Andrés Island, to tropical storms and hurricanes, 1900-2010. *Nat. Hazards* 61:815-827. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0069-1>
- Osorio, A. F.; Montoya, R. D.; Ortiz, J. C.; Peláez, D. (2016). Construction of synthetic ocean wave series along the Colombian Caribbean Coast: A wave climate analysis. *Appl. Ocean Res.* 56:119-131. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.01.004>
- Rey, W.; Salles, P.; Mendoza, E. T.; Torres-Freyermuth, A.; Appendini, C. M. (2018). Assessment of coastal flooding and associated hydrodynamic processes on the south-eastern coast of Mexico, during Central American cold surge events. *Natural Hazards & Earth System Sciences*; 18(6). <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-64>
- Rey, W.; Mendoza, E. T.; Salles, P.; Zhang, K.; Teng, Y. C.; Trejo-Rangel, M. A.; Franklin, G. L. (2019). Hurricane flood risk assessment for the Yucatan and Campeche State coastal area. *Natural Hazards*; 96(3):1041-1065. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03587-3>
- Rey, W.; Salles, P.; Torres-Freyermuth, A.; Ruíz-Salcines, P.; Teng, Y. C.; Appendini, C. M.; Quintero-Ibáñez, J. (2020). Spatiotemporal storm impact on the northern Yucatan coast during hurricanes and central American cold surge events. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 2. <https://doi.org/10.3390/jmse8010002>
- Ruiz-Salcines, P.; Salles, P.; Robles-Díaz, L.; Díaz-Hernández, G.; Torres-Freyermuth, A.; Appendini, C. M. (2019). On the Use of Parametric Wind Models for Wind Wave Modeling under Tropical Cyclones. *Water*; 11(10), 2044. <https://doi.org/10.3390/w11102044>
- Sealy, K. S.; Strobl, E. (2017). A hurricane loss risk assessment of coastal properties in the caribbean: Evidence from the Bahamas. *Ocean Coast Manag.* 149:42-51. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.09.013>
- Sleigh, P. A.; Gaskell, P. H.; Berzins, M.; Wright, N. G. (1998). An Unstructured Finite Volume Algorithm for Predicting Flow in Rivers and Estuaries. *Comput. Fluids* 27:479-508. [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(97\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(97)00071-6)
- Torres, R. R.; Tsimplis, M. N. (2014). *Sea level extreme in the Caribbean Sea*. J. Geophys. <https://doi.org/10.1002/2014JC009929>
- Res. Ocean. 119:4714-4731. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20224>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (2018.) *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*. Ungrd. Gobierno de Colombia. Bogotá, D.C, Colombia. 269 pp.
- Wisner, B.; Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I. (2004). *At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters Second edition*. Routledge, London and New York.
- Zachry, B. C.; Booth, W.; Rhome, J. R.; Sharon, T. M. (2015). A National View of Storm Surge Risk and Inundation. *Weather Clim. Soc.* 7:109-117. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-14-00049.1>
- Zhang, K.; Liu, H.; Li, Y.; Xu, H.; Shen, J.; Rhome, J.; Smith III, T. J. (2012). The role of mangroves in attenuating storm surges. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 102, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.02.021>
- Zhao, D. H.; Shen, H. W.; Tabios III, G. Q.; Lai, J. S.; Tan, W. Y. (1994). Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(7):863-883. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1994\)120:12\(1497\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:12(1497))