



SECCIÓN CIENCIAS TÉCNICAS

Artículo de revisión

Modelado dinámico de inundaciones compuestas en áreas urbanas costeras

Daniela Córdova de Horta ^{1,2} <https://orcid.org/0000-0002-7284-9682>

Miguel Ángel Pardo Picazo ² <https://orcid.org/0000-0001-8779-3258>

Daniel Prats Rico ² <https://orcid.org/0000-0002-5727-7479>

Luis Fermín Córdova López ¹ <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

¹ Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba

² Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante. Alicante, España

* Autor para la correspondencia: danielitach096@gmail.com

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

RESUMEN

Las inundaciones compuestas, resultantes de la interacción entre fenómenos hidrológicos y oceánicos, constituyen una de las amenazas naturales más severas en áreas costeras urbanas, cuya magnitud se ve exacerbada por el cambio climático. Este estudio presenta una revisión exhaustiva de los desarrollos recientes en los sistemas de modelado numérico para el análisis de inundaciones compuestas. Se evaluaron los modelos hidrológicos, hidráulicos y oceánico-costeros más comúnmente aplicados, así como las técnicas de acoplamiento empleadas. Los resultados destacan que los enfoques hidrológico-hidráulicos predominan, aunque la inclusión del sistema de drenaje pluvial sigue siendo limitada. Las investigaciones futuras deben enfocarse en la integración total de modelos para mitigar la incertidumbre inherente a estos fenómenos.

Palabras clave: ciclones tropicales; inundaciones compuestas, modelado numérico, acoplamiento de modelos.

Dynamic modelling of compound flooding in a coastal urban area

ABSTRACT

Compound flooding, resulting from the interaction between hydrological and oceanic phenomena, represents one of the most severe natural threats to urban coastal areas, with its impact increasingly exacerbated by climate change. This study provides a comprehensive review of recent and emerging advancements in numerical modelling systems aimed at analysing compound flooding events. The review evaluates the most widely applied hydrological, hydraulic, and coastal-oceanic models, as well as the coupling techniques employed. The

findings indicate that hydrological-hydraulic approaches are predominant, though the integration of urban stormwater drainage systems remains limited. Future research should prioritize the full coupling of models to mitigate the inherent uncertainty in simulating these complex phenomena.

Keywords: tropical cyclones, compound flooding, numerical modelling, model coupling.

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras urbanas son fundamentales para el desarrollo económico y social, pero su vulnerabilidad ha aumentado debido a la creciente urbanización y la actividad antrópica. Estas áreas, por su ubicación geográfica, son especialmente susceptibles a eventos meteorológicos extremos (EME), como ciclones tropicales, los cuales generan oleaje extremo, marejadas ciclónicas y lluvias intensas, ocasionando graves inundaciones. Según estudios recientes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) se proyecta que el nivel medio del mar aumentará y los ciclones tropicales (CT) serán más intensos, lo que exacerbará sus efectos devastadores. ^(1,2)

Las inundaciones compuestas (IC), resultantes de la combinación de fenómenos hidrológicos y oceánicos, como lluvias locales, escurrimiento fluvial y marejadas ciclónicas, aumentarán debido al cambio climático. Estos eventos pueden ocurrir simultáneamente o con poca separación temporal, lo que incrementa su impacto en las zonas costeras. ^(1,3) Ejemplos recientes incluyen los huracanes Igor (2010) y Sandy (2012), ambos con un impacto significativo en Cuba. Igor afectó principalmente la costa norte oriental del país, mientras que Sandy impactó de manera severa la región oriental, provocando considerables pérdidas humanas y daños económicos. En Cuba, los huracanes Irma (2017) e Ian (2022) provocaron severas IC, afectando áreas como el Malecón de La Habana, donde la combinación de oleaje extremo y la insuficiencia de los sistemas de drenaje pluvial agravaron las inundaciones. ^(3,4,5,6)

La insuficiencia de los sistemas de drenaje en las zonas costeras urbanas es un factor clave que agrava los efectos de las IC, ya que impide la evacuación rápida de las aguas pluviales, aumentando la magnitud y duración de las inundaciones. ⁽⁷⁾ Ante este panorama el Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de La Habana, a través de su Grupo de Investigación de Ingeniería Costera y Marítima, ha liderado investigaciones para desarrollar un sistema computacional de nueva generación que simule de manera más precisa los fenómenos de inundación en zonas costeras, integrando las condiciones presentes y futuras del

clima. El objetivo de este trabajo es realizar una revisión de la literatura sobre las tendencias actuales en los sistemas computacionales o trenes de modelos numéricos para el estudio de IC en zonas urbanas costeras, identificando avances y desafíos en la mejora de la precisión de los modelos.

DESARROLLO

Métodos

La búsqueda bibliográfica se realizó en diversas bases de datos académicas incluyendo Scopus (25 fuentes consultadas), Web of Science (24 fuentes consultadas) y Google Scholar (8 fuentes consultadas), abarcando el periodo de 2010 a 2023. El objetivo fue recopilar estudios recientes y pertinentes sobre IC, seleccionando artículos revisados por pares, tesis de maestría y actas de conferencias.

Los criterios de inclusión fueron los estudios que evaluaran inundaciones costeras, fluviales y pluviales de manera compuesta. También se incluyeron investigaciones que describieran la aplicación de modelización numérica para la simulación de fenómenos combinados de IC así como los análisis sobre el impacto del drenaje dual en áreas urbanas. Por último, se tuvieron en cuenta las evaluaciones de riesgo ante eventos extremos relacionados con fenómenos meteorológicos compuestos.

Los criterios de exclusión fueron estudios que no abordaran la interacción de múltiples fenómenos en la generación de IC. Documentos que se centraran exclusivamente en un solo tipo de inundación (fluvial, costera o pluvial) sin análisis compuesto. Investigaciones que carecieran de datos suficientes para la replicabilidad.

La estrategia de búsqueda se adaptó a cada fuente de información, utilizando palabras clave tales como "inundación compuesta", "modelos numéricos de inundaciones", "marejada ciclónica", "escorrentía superficial", "drenaje dual urbano" y "modelación numérica". Se aplicaron filtros para restringir los resultados al periodo de 2010 a 2023.

Los estudios seleccionados se clasificaron en 3 categorías principales para la síntesis. Modelos numéricos de IC, estudios que emplean modelos numéricos para simular

inundaciones. Modelos combinados con métodos estadísticos, investigaciones que combinan modelos numéricos con enfoques estadísticos. Modelos combinados con formulaciones empíricas, estudios que integran modelos numéricos con métodos empíricos.

Se utilizó un enfoque sistemático para evaluar la pertinencia de cada artículo, que incluyó revisión inicial con evaluación rápida de los resúmenes para determinar la relevancia general. Se realizó la revisión detallada con análisis exhaustivo del contenido de los estudios para verificar el cumplimiento de los criterios de inclusión. La selección final se basó en la calidad metodológica y la aplicabilidad de los estudios al tema de investigación.

Los datos fueron extraídos de los estudios utilizando una plantilla de extracción estandarizada que incluyó información general, autor, año de publicación y tipo de estudio. También se incluyeron detalles del modelo utilizado, parámetros principales y configuraciones, así como resultados relevantes, datos sobre la precisión del modelo, resultados de simulación y conclusiones principales.

Las variables consideradas en la revisión se definieron de la siguiente manera:

- variables de entrada del modelo,
 - parámetros meteorológicos: precipitación (mm), velocidad del viento (m/s), presión atmosférica (hPa) y marejadas ciclónicas (m);
 - parámetros de drenaje: coeficiente de escorrentía, capacidad de infiltración del suelo (mm/h) y eficiencia de los sistemas de drenaje urbano (%);
- variables de salida del modelo,
 - nivel de inundación (m): altura del agua acumulada en zonas inundadas;
 - extensión de inundación (km²): superficie total afectada por el evento de inundación;
 - tiempos de inundación (h): duración del evento de inundación desde su inicio hasta su disipación;
- Variables de evaluación,
 - precisión del modelo: comparación entre resultados simulados y datos observacionales utilizando métodos estadísticos;
 - capacidad predictiva: habilidad del modelo para reproducir eventos históricos de inundación con un margen de error aceptable;
 - comparación con datos observacionales: evaluación de la diferencia entre los valores medidos en campo y las simulaciones numéricas.

Se realizó un análisis comparativo y crítico de los estudios seleccionados para identificar las principales tendencias en la modelización de IC, enfatizando las ventajas y limitacio-

nes de cada enfoque modelístico. Se incluyó una discusión sobre futuras líneas de investigación y la necesidad de mejorar la precisión en la modelización de drenajes duales. Este enfoque metodológico asegura que el análisis de la literatura sea exhaustivo, sistemático y relevante para los objetivos de la investigación.

RESULTADOS

Las inundaciones que pueden ocurrir en las zonas litorales se pueden clasificar como inundaciones costeras, fluviales y pluviales. La inundación costera es cuando el nivel medio del mar se incrementa lo que produce que el agua penetre tierra adentro en zonas costeras. Los vientos del CT sobre la superficie del mar y las bajas presiones son los causantes de las marejadas ciclónicas o su surgencia. Además, el empuje del viento sobre la superficie del mar genera el oleaje que se propaga hacia la costa y produce el sobrepaso de las olas. La superposición de la marea astronómica, la surgencia y la sobreelevación del mar por rotura del oleaje, este último fenómeno dependiente de las características batimétricas del fondo marino, generan la marea meteorológica que puede alcanzar grandes áreas de inundación. ⁽¹⁾

Inundación fluvial es cuando las lluvias intensas o prolongadas pueden inducir escorrentía superficial. La escorrentía ocurre desde áreas de mayor cota de terreno hacia un curso de agua natural (o artificial). El caudal transportado aumenta hasta superar la capacidad del río. El río se desborda y se sale de su sección transversal, quedando el agua sobre la superficie de terrenos cercanos.

La inundación pluvial es consecuencia de las precipitaciones, se presentan cuando el terreno se ha saturado o es impermeable (zonas urbanas), y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días. Estas inundaciones también se producen en zonas urbanas debido a la capacidad insuficiente de la red de drenaje pluvial existente. Las tuberías se presurizan y el agua fluye desde la tubería a través del pozo de registro. Aparece un caudal que se incorpora al drenaje superficial generando inundaciones en las zonas más bajas y llanas. ⁽¹⁾

Inundaciones compuestas. Definición y mecanismos

Una parte considerable de la población mundial vive en zonas costeras bajas que corren el riesgo de sufrir inundaciones debido al aumento del nivel medio del mar, el oleaje extremo, las marejadas ciclónicas, las precipitaciones y las crecidas de los ríos. La ocurrencia simultánea o la breve sucesión de estos peligros puede provocar inundaciones que generen impactos mayores que los causados por estos eventos individualmente. ^(1,8) Según el Panel Intergubernamental

sobre Cambio Climático y Gestión de los Riesgos de Eventos Extremos y Desastres para Promover la Adaptación al Cambio Climático, los eventos compuestos (EC) en climatología se definen como: ⁽⁹⁾

- Cuando 2 o más eventos extremos ocurren simultánea o sucesivamente;
- En combinaciones de eventos extremos con condiciones subyacentes que amplifican el impacto de los eventos;
- En combinación de eventos que no son extremos en sí mismos pero que conducen a un evento o impacto extremo.

Una definición general plantea que “Un EC es un impacto extremo que depende de múltiples variables o eventos estadísticamente dependientes”. ⁽¹⁰⁾ En términos de IC se establece por la interacción del océano abierto, la atmósfera y las cuencas hidrográficas. Las IC se definen como la combinación de marejadas ciclónicas, rebase del oleaje, desbordamiento de ríos y lluvias intensas. Estos eventos pueden ser de mayor duración y estar más extendidos de lo esperado.

Las IC en las zonas costeras se generan a través de una variedad de fuentes o mecanismos diferentes como marejada ciclónica generada o surgencia generada por un CT, combinada con la marea meteorológica, incremento del nivel del mar por rotura del oleaje y altura de olas (inundación costera); escorrentía por lluvias o aumento de caudal de ríos que supera su capacidad, ocurriendo el desbordamiento (inundación fluvial); y almacenamiento de las aguas en zonas bajas con suelos saturados o impermeables debido a las precipitaciones (inundaciones pluviales). Se han identificado 4 mecanismos que pueden conducir a la IC.

- Cuando 2 o más variables son extremas durante un CT, los vientos fuertes producen valores extremos de marejada ciclónica, oleaje y precipitación.
- Una variable extrema y las otras moderadas. Las IC no siempre tienen que combinar variables de forma simultánea, ni ser extremas, por ejemplo, en una zona plana una marejada ciclónica moderada puede no causar grandes inundaciones. Sin embargo, las marejada ciclónica o surgencia pueden provocar un retraso en el drenaje del río, lo que, sumado a las fuertes precipitaciones, genera inundaciones.
- Combinación de eventos no extremos pero que pueden conducir a un evento extremo cuando se combinan. Es el caso de la superación del oleaje moderado y elevación del mar por surgencia no extrema. ⁽¹¹⁾
- Eventos que ocurren en secuencias. Un ejemplo son las fuertes lluvias que generan escurrimientos, desbordando los ríos, y las precipitaciones posteriores que ocurren cuando el sistema aún no se ha recuperado. ⁽¹⁰⁾

Métodos para el estudio de inundaciones compuestas

Por la importancia que reviste en este trabajo se presentan los métodos más utilizados internacionalmente para el estudio de las IC. De forma general se pueden señalar que existen 2 vías los métodos estadísticos y los modelos numéricos. Los métodos estadísticos se enfocan en 2 líneas fundamentales definir el nivel de dependencia de los mecanismos que generan las inundaciones y sus distribuciones conjuntas de probabilidades, y determinar el tipo de probabilidad conjunta que relaciona los fenómenos que generan las IC.

En el caso de la aplicación del método de estudio basado en los modelos numéricos, que es la esencia de este trabajo, su objetivo es la representación dinámica de la evolución de la IC, es decir, la representación del complejo movimiento de las aguas en todo el dominio mediante el cálculo y la solución de modelos matemáticos que representan la física de los fenómenos y sus interacciones. ^(8,12) Debido a esta complejidad se hace necesaria la utilización de más de un modelo numérico, así como la forma de acoplamiento de los mismos. ⁽⁸⁾ En el caso de las IC las variables que se analizan son fundamentalmente la cota de inundación, la velocidad de las corrientes generadas por la escorrentía superficial y el tiempo de exposición a la inundación. ⁽¹³⁾

Modelación numérica de inundaciones compuestas, tendencias actuales

Los modelos computacionales juegan un papel fundamental en el estudio de las IC, ya que su principal ventaja es la capacidad de simular múltiples fenómenos simultáneamente. Sin embargo, no existe un sistema de modelización holístico que sea capaz de simular o pronosticar las IC a escala global, regional o local. Por esta razón, la tendencia actual es combinar diferentes modelos numéricos.

En cuanto a su clasificación, los modelos se agrupan en diversas categorías, tales como modelos hidrológicos, modelos hidráulicos, modelos hidrodinámicos, modelos de circulación oceánica, modelos de transporte de sedimentos, modelos morfológicos y modelos de evaluación de riesgo.

Los modelos computacionales más utilizados para el estudio de las IC; resultan del acoplamiento de diferentes modelos numéricos de tipo hidrológico, oceánico-costero, hidráulico e hidrológico-hidráulico. Uno de estos modelos puede definirse como el modelo base o vinculante, dependiendo de los mecanismos identificados como generadores de las IC. ^(9,14)

Modelos como HEC-RAS, ADCIRC, Delft3D y FLO-2D son ampliamente reconocidos y utilizados en sus respectivas áreas de especialización. Por ejemplo, HEC-RAS es conocido por su capacidad para simular el flujo de agua en ríos y

canales, mientras que ADCIRC se emplea para predecir mareas y corrientes oceánicas.

Modelo hidrológico

En este caso, el modelo base es un sistema hidrológico, también conocido como modelo lluvia-escurrimiento, que considera tanto la precipitación como el escurrimiento. Este enfoque ha sido utilizado en el 13 % de las publicaciones estudiadas por Santiago-Collazo *et al.* ⁽¹⁵⁾ El sistema opera ejecutando un modelo de circulación oceánica, que utiliza como forzadores los campos de viento y las presiones asociados al CT, y genera como resultado el aumento de los niveles del mar. Estos niveles actúan como condiciones de frontera aguas abajo para el modelo hidrológico. A su vez, los datos de precipitación sirven como condiciones de entrada para dicho modelo. Los resultados obtenidos reflejan la interacción entre los efectos combinados de la precipitación y la sobreelevación del mar en la zona de estudio.

La principal desventaja de este sistema radica en que se ignora cualquier interacción entre lluvia, escorrentía y marejadas ciclónicas en la llanura de inundación costera o en la zona de inundación de transición. Esto puede provocar una subestimación del nivel total del agua. Como ventaja, se destaca el bajo costo computacional, lo que permite simular múltiples escenarios de inundaciones en un período corto de tiempo. ⁽¹⁵⁾

Modelo de circulación oceánico-costero

Este sistema utiliza como modelo base el oceánico-costero. El 45 % de las publicaciones consultadas por Santiago-Collazo *et al.* utilizan este formato de sistema computacional. ⁽¹⁵⁾ Esta técnica de vinculación se basa en ejecutar primero el modelo hidrológico, que requiere como datos de entrada los datos hidrológicos. Los resultados serán los hidrogramas de caudales por los ríos, que sirven como condiciones de frontera del modelo oceánico-costero, el cual es forzado por los campos de vientos asociados al CT. Los resultados del modelo de circulación oceánico-costero reflejarán la IC. Este sistema tiene como desventaja fundamental que los hidrogramas de descarga son asignados de manera puntual. Además, no tiene en cuenta la lluvia que cae sobre el dominio de estudio, lo cual repercute en la cota resultante de inundación. ⁽¹⁵⁾

Modelo hidráulico

Este sistema tiene como modelo vinculante un modelo de tipo hidráulico. De acuerdo con Santiago-Collazo *et al.*, el 38 % de las publicaciones han utilizado un modelo hidráulico como base del sistema. ⁽¹⁵⁾ Esta técnica se basa en ejecutar primero el modelo hidrológico y el modelo de circulación oceánica con sus entradas de datos requeridas (en el caso del modelo hidrológico, la precipitación; en el caso del mo-

delo oceánico-costero, los campos de viento y presión asociados al CT). Los resultados del modelo hidrológico (hidrogramas de descarga) y del modelo de circulación oceánica (niveles del agua aguas abajo del dominio de trabajo) se utilizan como condiciones de contorno del modelo hidráulico. Los resultados del modelo hidráulico reflejarán los niveles del agua debido a la IC.

Este enfoque implica la aplicación de un modelo hidráulico para estimar inundaciones compuestas. La desventaja de este sistema radica en que el modelo hidráulico no simula la inundación que se genera por las lluvias locales (inundación pluvial) en el dominio donde es aplicado, ya que solo modela el movimiento del flujo, subestimando la inundación compuesta. Una ventaja de este sistema computacional es que, al ser implementado como modelo vinculante, con condiciones de contorno derivadas de modelos hidrológicos (escorrentía aguas arriba) y de modelos de circulación oceánica-costera (niveles del agua aguas abajo), se constituye un enfoque práctico que permite reducir las brechas existentes en la modelación matemática de las zonas costeras.

Análisis de formas de acoplamiento de los modelos numéricos para el desarrollo de modelos computacionales

Se presentan las tendencias en las técnicas de acoplamiento de los modelos numéricos que componen un sistema computacional, destacando los enfoques más empleados y novedosos. Además, como parte fundamental del trabajo, se lleva a cabo el análisis y discusión de la información para dar respuesta a las preguntas científicas antes formuladas. Las técnicas de acoplamiento de los modelos numéricos para el estudio de IC son.

- La transferencia unidireccional es la más sencilla, los resultados de un modelo son los datos de entrada, o condiciones de frontera de otro, se le llama también acoplado en una dirección. ^(8,16)
- En la ejecución separada los modelos se ejecutan por separado y el acoplamiento se produce de forma bidireccional e iterativa, también conocidos como modelo en 2 direcciones. ⁽¹⁷⁾
- Los modelos independientes estrechamente acoplados se integran en un único marco combinando sus códigos fuente. Por ejemplo, los modelos acoplados SWAN + ADCIRC (modelo de simulación de ondas cercanas a la costa + modelo de circulación avanzada), donde SWAN transfiere tensiones de radiación a ADCIRC y ADCIRC devuelve velocidades del viento, niveles de agua y corrientes a SWAN. ⁽¹⁷⁾
- El completamente acoplado consiste en resolver todas las ecuaciones que representan los fenómenos físicos (mare-

jada ciclónica, lluvia y escorrentía) simultáneamente dentro de un mismo código fuente. Ejemplos de estos son XBEACH NH; FLOW 3D; SFINC; SWASH; entre otros. ^(18,19,12,14)

Para la realización del análisis y discusión de la información recopilada, se analizaron 38 casos de estudio enfocados en la simulación de inundaciones compuestas provocadas por eventos climáticos extremos entre 2011 y 2023, incluyendo huracanes, tormentas tropicales y tifones. De estos, 30 corresponden a aplicaciones de modelos numéricos en un marco de modelos múltiples, donde se empleó el acoplamiento de distintos sistemas computacionales para evaluar la interacción de los factores que contribuyen a las inundaciones. Estos estudios permiten una comprensión más detallada de los procesos físicos involucrados y una mejor representación de la dinámica del flujo en escenarios complejos.

- Huracán Ike (2008). Inundación por marejada ciclónica, HEC-HMS, HEC-RAS; ⁽²⁰⁾
- Huracán Floyd (1999). Inundación por marejada ciclónica, HL-RDHM, ADCIRC; ⁽²¹⁾
- Huracán Irene (2011). Inundación por marejada ciclónica, HC-RDHM, ADCIRC; ⁽²²⁾
- Huracán Ike (2008). Inundación por marejada ciclónica, Vflo+ADCIRC, HEC-RAS; ⁽²³⁾
- Inundación por marejada ciclónica, SWMM, HEC-RAS; ⁽²⁴⁾
- Huracanes Ike (2008), Katrina (2005), Isaac (2012). Vflo+ADCIRC+SWAN, HEC-RAS; ⁽²⁵⁾
- Huracán George (1998). ADCIRC+SWAN, GSSHA; ⁽²⁶⁾
- Huracanes Irene (2011) y Sandy (2012). Inundación por marejada ciclónica, HEC-HMS+SECOM-NYHOPS, HEC-RAS (2D); ⁽²⁷⁾
- Huracán George (1998). Inundación por marejada ciclónica, ADCIRC+SWAN, GSSHA; ⁽²⁸⁾
- Marejada ciclónica + lluvia, ADCIRC+SWAN, ICPR; ⁽²⁹⁾
- Tifón Maemi. Inundación por marejada ciclónica, HEC-HMS, Delft 3D; ⁽³⁰⁾
- Inundación por marejada ciclónica, Delft 3D+SWAN, SWMM; ⁽³¹⁾
- Tormenta tropical Matthew (2016). Inundación por lluvia-escorrentía-marejada ciclónica, HYMOD, LISFLOOD-FP; ⁽³²⁾
- Inundación por lluvia-marejada ciclónica, ADCIRC+HEC-HMS, HEC-RAS; ⁽³³⁾
- Inundación por lluvia-escorrentía-marejada ciclónica, ADCIRC, HEC-RAS; ⁽³⁴⁾
- Hermani, Filipinas. Inundación por oleaje extremo, Delft 3D, XBEACH-NH; ⁽¹²⁾
- Tifones Hato (2017) y Mangkhut (2018). Inundación por marejada ciclónica, Formulación empírica para determinar rebase+SWMM, FLO-2D; ⁽³⁵⁾

- Impactos de marea y oleaje en el noroeste de EE. UU., ADCIRC+SWAN+Fórmula de Goda (1975, 2009), Modelo Hidráulico; ⁽³⁶⁾
- Marine City, República de Corea del Sur. Inundaciones compuestas en zonas costeras, ADCIRC+SWAN+FLOW 3D, XP-SWMM; ⁽³⁷⁾
- Lishui, China. Simulación de inundaciones compuestas, SWMM, LISFLOOD-FD; ⁽³⁸⁾
- Bangladesh. Inundaciones causadas por los ciclones Mora y 1991, Delft 3D+Wavewatch III (WW3)+Métodos estadísticos, SWMM; ⁽³¹⁾
- Huracanes Isabel (2003), Irene (2011) y Sandy (2012). Inundaciones por marejadas ciclónicas, NWM+ADCIRC+WW3, HEC-RAS (1D), DELFT 3D FM (2D); ⁽³⁹⁾
- Desembocadura del río Mandeo, España. Efecto combinado de descarga del río, precipitación y surgencia, Análisis estadístico+MISDc, Iber+; ⁽⁴⁰⁾
- Tifones Haikui (2012) y Fitow (2013). Inundación por marejada ciclónica, ADCIRC (2D), SWMM (1D); ⁽⁷⁾
- Huracán Idai (2019). Inundaciones costeras, pluviales y fluviales, CaMa-Flood+PCR-GLOBWB+GlobWave+XBeach, GLOFRIS; ⁽⁴¹⁾
- Huracanes Rita (2005), Ike (2008) y Harvey (2017). Inundaciones costeras, pluviales y fluviales, WW3+Delft 3D-FLOW+VIC+HEC-RAS+SWMM, CFAF; ⁽⁴²⁾
- Norte de Yakarta, Indonesia. Punto crítico global de inundaciones, HEC-RAS, Delft 3D; ⁽⁴³⁾
- Inundaciones pluviales en áreas urbanas, Iber, SWMM; ⁽⁴⁴⁾
- Ciclones tropicales Idai y Eloise, Mozambique. Inundaciones, Modelo Global de enrutamiento de ríos hidrodinámicos+Modelo Global de mareas y oleaje, SFINCS; ⁽⁴¹⁾
- Cuenca de Arch Creek, norte de Miami. Inundación pluvial, fluvial y costera, Análisis estadístico multivariante+FLO 2D+MODFLOW-2005, Delft3D Flexible Mesh (DFM); ⁽⁴⁵⁾

En otros 8 casos se ha utilizado un modelado de marco único (tabla 1), principalmente porque se han aplicado como condiciones de frontera resultados estadísticos de las variables hidráulicas o resultados de modelos numéricos utilizados en otros estudios, pero no de forma acoplada. En cada uno de los casos exponemos el escenario simulado, el tren de modelos usado y de ellos cual es el modelo base.

Los modelos base más utilizados en los estudios son HEC-RAS y SWMM. HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, tiene sus raíces en el modelo HEC-2, que se formalizó en 1968. HEC-RAS en su forma actual se lanzó en 1995 y es un modelo hidráulico que simula el flujo de agua en ríos, canales y estructuras hidráulicas. Por otro lado, SWMM (Storm Water Management Model), desarrollado por

Tabla 1. Ejemplos de aplicaciones de modelos numéricos para el estudio de inundaciones compuestas en un marco de modelos únicos

Área de estudio	Escenario simulado	Modelo numérico
Río Shoalhaven en Australia ⁽⁴⁶⁾	Inundación por marejada ciclónica	Delft 3D
Bahía de Delaware ⁽⁴⁷⁾	Huracán Irene. Inundación por marejadas ciclónicas	SCHISM
Fuzhou city, China ⁽⁴⁸⁾	Inundación por marejadas ciclónicas	HEC-RAS
Sureste de Luisiana ⁽¹³⁾	Inundación por lluvia, escorrentía y marejada ciclónica	ADCIRC
Florida y Filipinas ⁽¹²⁾	Huracán Irma y tifón Haiyan. Inundación por marejadas ciclónicas	SFINCS
Bahía de Galveston durante el huracán Harvey ⁽⁴⁹⁾	Huracán Harvey. Inundación por marejadas ciclónicas	SCHISM
Cuenca del Barataria y cuenca del lago Maurepas ⁽¹⁾	Inundación por marejadas ciclónicas	ADCIRC
Haikou City, China ⁽⁵⁰⁾	Inundación por marejadas ciclónicas	Delft3D

la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), se creó entre 1969 y 1971 y es un modelo hidrológico-hidráulico que simula el flujo en lámina libre en redes de tuberías y sistemas de saneamiento.

Otros modelos destacados incluyen ADCIRC (ADvanced CIRCulation), un modelo oceánico-costero desarrollado originalmente en 1992 por Drs. Rick Luettich y Joannes Westerink, que combina pronósticos de lluvia, presión atmosférica y viento para predecir inundaciones costeras. También se utiliza Delft 3D, que comenzó su desarrollo en 1988 y es un conjunto de modelos ampliamente utilizado para estudios costeros, incluyendo módulos de flujo y oleaje. Además, se aplican modelos como GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis), de tipo hidrológico; ICPR (Interconnected Pond Routing); LISFLOOD-FP, que es hidrológico-hidráulico; y XBEACH-NH, siendo estos últimos hidráulicos.

En general, se puede señalar que se han aplicado 3 tipos de modelos base o vinculantes (hidrológicos, hidrológico-hidráulicos y los modelos oceánicos-costeros). Cuando el modelo hidrológico-hidráulico es el vinculante, se debe a que se quiere simular los procesos hidrológicos con el objetivo de representar mejor los procesos de lluvia-escorrimento, en este tipo de sistemas los modelos oceánico-costeros son usados para brindar la variable hidrodinámica (niveles de agua debido a la surgencia), aguas abajo del dominio de cómputo, es importante destacar que, del total de casos estudiados, el 40 % utiliza esta técnica. Es válido señalar que cuando se aplican modelos hidrológicos-hidráulicos, como el SWMM, como modelo base está dirigido a representar los

procesos de lluvia-escorrimento, haciendo énfasis en los efectos de los sistemas de drenaje pluvial sobre la IC, fundamentalmente en zonas urbanas.

La aplicación de los modelos oceánicos-costeros como vinculantes se realiza cuando se desea centrar los estudios en las zonas costeras, haciendo énfasis en los procesos oceánicos, en estos sistemas, las condiciones de entrada del modelo son los resultados de los modelos hidrológicos, que entregan información de descargas de los ríos, en zonas puntuales a modelos oceánico-costero aguas arriba, esto se combina con los forzadores meteorológicos (campos de vientos y presiones asociados a los CT). En estos sistemas la lluvia que precipita sobre el dominio no se tiene en cuenta lo que constituye una desventaja. Del total de los casos estudiados, se destaca que una parte significativa utiliza este tipo de modelo como base, siendo notables las aplicaciones de los modelos ADCIRC y DELFT 3D.

Los modelos hidráulicos también se han aplicado en los casos de estudio investigados en este trabajo, representan 36,66 % del total; siendo el más utilizado el modelo HEC-RAS en 1D/2D. En estos casos, es necesario integrar 2 modelos complementarios que suministran información al modelo hidráulico base, un modelo oceánico-costero, que proporciona las condiciones de frontera aguas abajo, y un modelo hidrológico, que define las condiciones de escorrentía aguas arriba. Sin embargo, al igual que los modelos oceánicos-costeros, estos sistemas no consideran las precipitaciones dentro del dominio de cómputo. A pesar de esta limitación, los modelos hidráulicos pueden ofrecer una alta precisión en la zona de estudio.

Por último, están los sistemas que utilizan modelos hidrológicos. Estos modelos se aplican de forma similar a los hidrológicos-hidráulicos, la desventaja es que no son muy precisos en la simulación del movimiento del flujo, dígame en representar la hidrodinámica en la zona de estudio (niveles y velocidades del agua), de los casos estudiados, en solo 6,66 % se aplicaron como modelo base. El modelo matemático más utilizado es el GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis), así como el LISFLOOD. También se estudiaron 2 sistemas en los que se aplicaron modelos para el estudio de riesgo. Estos se caracterizan por utilizar como información para su ejecución los resultados de modelos hidrodinámicos, representando también 6,66 % de los casos investigados.

Los modelos denominados de marco único se caracterizan por realizar estudios de IC utilizando un solo modelo. ⁽²⁾ Los modeladores han podido llevar a cabo estos estudios aplicando un único modelo debido a que han contado con datos estadísticos de muy alta calidad, lo que les ha permitido establecer condiciones de entrada y frontera que aseguran un resultado confiable. ⁽¹⁵⁾ La ventaja de contar con datos de alta calidad tanto aguas arriba como aguas abajo simplifica la operación del sistema; sin embargo, es fundamental disponer de datos de muy alta precisión para obtener resultados de calidad.

Un aspecto relevante es la distribución geográfica de los estudios sobre las IC, los cuales abarcan diversas áreas globales, desde Australia hasta China y Estados Unidos. Sin embargo, existe una tendencia en cuanto a la frecuencia de estudio de estas regiones. Algunas áreas, como la Bahía de Delaware, el sureste de Luisiana y las costas de Filipinas, han sido objeto de múltiples investigaciones, lo que indica un enfoque intensivo de los estudios en zonas con alta recurrencia de eventos cíclicos o huracanes importantes. En contraste, otras regiones, como Haikou en China y la Cuenca del Barataria en los EE. UU., han sido menos exploradas, con una cantidad menor de estudios dedicados a estas localidades. Esta variabilidad refleja no solo la disponibilidad de datos y la intensidad de los fenómenos en cada región, sino también las preferencias y prioridades de los investigadores al seleccionar áreas de alto riesgo para el análisis.

Para la simulación hidrológica, hidráulica y oceánica, se emplearon diversos modelos numéricos, cada uno con características específicas según su enfoque y aplicación. Los modelos hidrodinámicos incluyen CHISM, diseñado para simular flujos de agua en superficies; ADCIRC, utilizado en la predicción de mareas y corrientes oceánicas y costeras; SFINCS, especializado en la simulación de flujos poco profundos; SCHISM, que permite modelar flujos de agua a diferentes

escalas; Delft3D, ampliamente usado para el análisis de flujos de agua, transporte de sedimentos y morfología costera; y Delft3D Flexible Mesh (DFM), una variante de Delft3D que permite el uso de mallas flexibles. FLOW-3D se emplea en la simulación tridimensional de flujos hidráulicos, mientras que El Modelo Global de Enrutamiento de Ríos Hidrodinámicos facilita la simulación de la dinámica fluvial a nivel global.

En el ámbito hidrológico, HEC-HMS, HL-RDHM y HC-RD-HM se utilizan para el análisis hidrológico distribuido, mientras que HYMOD, Vflo, El Modelo Nacional de Agua (NWM), MISDc y CaMa-Flood modelan procesos hidrológicos en cuencas a diferentes escalas. PCR-GLOBWB GlobWave es un modelo especializado en el balance global de agua. MODFLOW-2005 se usa para simular el flujo de agua subterránea.

Para la evaluación del riesgo de inundación, se emplean CFRAF, GLOFRIS y LISFLOOD-FD, que permiten evaluar y mitigar eventos extremos. En el campo hidrológico-hidráulico, HEC-RAS modela el flujo en ríos y canales, mientras que FLO-2D, SWMM, XP-SWMM, Iber+ y GSSHA se utilizan en la gestión de aguas pluviales y la dinámica de ríos y estuarios. ICPR facilita la simulación de rutas de canales y estanques interconectados.

Los modelos de oleaje incluyen SWAN y Wavewatch III (WW3), diseñados para simular la propagación de olas cerca de la costa y en alta mar. XBeach y su versión no hidrostática XBEACH-NH permiten modelar la evolución de playas ante eventos extremos. El Modelo Global de Mareas y Oleaje se usa para predecir estos fenómenos a nivel global.

Asimismo, SECOM-NYHOPS proporciona herramientas para la observación y predicción de condiciones hidrodinámicas en el puerto de Nueva York. LISFLOOD-FP se centra en la prognosis de inundaciones con un enfoque hidráulico. Por último, ViC y El Modelo Hidrológico SemiDistribuido en Continuo (MISDc) representan enfoques hidrológicos distribuidos para el análisis de grandes cuencas. En conjunto, estos modelos constituyen un marco integral para la simulación de procesos hidrológicos, hidráulicos y oceánicos, proporcionando herramientas fundamentales para la evaluación y mitigación de eventos extremos en entornos costeros y fluviales.

Es crucial señalar que la elección del modelo a emplear depende en gran medida del fenómeno específico que se desea simular o predecir, así como de las particularidades del área de estudio. Por lo tanto, no se puede decir con certeza cuál de estos modelos es más adecuado sin considerar el contexto particular. La figura 1 ilustra la distribución de los modelos base utilizados en las diversas investigaciones analizadas. Se observa que HEC-RAS es el modelo más empleado, 8 veces, 21,05 %, seguido por SWMM, ADCIRC y DELFT3D, con 4 veces, 10,5 % cada uno de ellos.

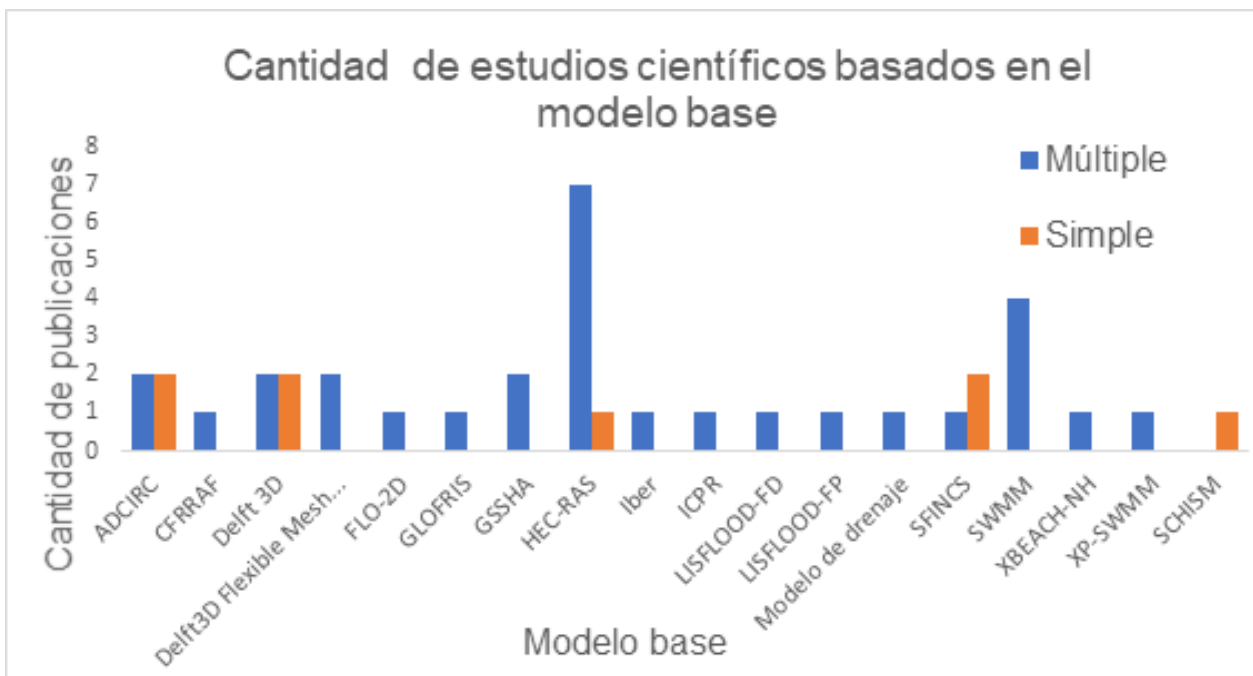


Fig. 1. Modelos bases empleados en la revisión bibliográfica

Desarrollos y líneas futuras

La simulación de la dinámica de IC ha evolucionado en la última década, reflejando el creciente interés y la necesidad de comprender y predecir las inundaciones causadas

por EME en el contexto del cambio climático. La figura 2 muestra una tendencia creciente en la aplicación de sistemas computacionales a partir de 2020. También se observa un interés creciente en sistemas que utilizan un menor

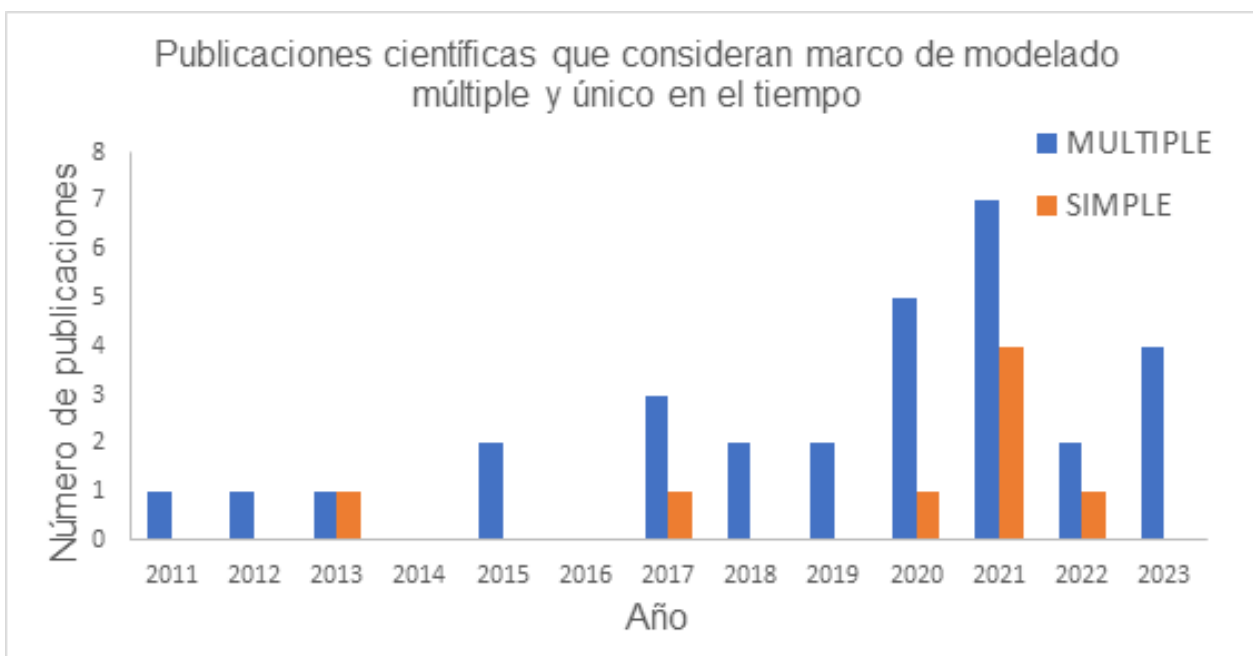


Fig. 2. Evolución temporal de las publicaciones relacionadas con inundación compuesta

número de modelos, como los modelos de física reducida, por ejemplo, el SFINCS, que se ha aplicado en varios estudios destacados. ⁽¹²⁾

La constante evolución y mejora de los modelos numéricos y las técnicas de acoplamiento han permitido una simulación más precisa de los fenómenos climáticos extremos, junto con un aumento en la capacidad de cómputo de los equipos. Esto ha sido crucial para mejorar la comprensión de estos eventos y para mitigar sus impactos. La decisión sobre qué marco de modelado utilizar depende del caso de estudio presentado. La adopción de un marco de modelado múltiple ha demostrado ser esencial para capturar la complejidad y la interacción de diferentes procesos en un evento de inundación.

Esto se debe a que diversos modelos pueden especializarse en simular distintos aspectos de las inundaciones, como el flujo de agua, la erosión del suelo, y los efectos de la vegetación y la infraestructura. Al combinar diferentes modelos, un marco de modelado múltiple puede mejorar la precisión de las simulaciones. Cada modelo puede compensar las limitaciones de los otros, resultando en una simulación más precisa y detallada. Además, el modelado múltiple es flexible y puede adaptarse a diversas situaciones y necesidades. Por ejemplo, se pueden añadir o quitar modelos según sea necesario para simular diferentes tipos de inundaciones o para considerar diversos factores. Trabajar con un marco de modelado múltiple puede fomentar la innovación al permitir a los investigadores experimentar con distintas combinaciones de modelos y técnicas de acoplamiento, lo que puede conducir al desarrollo de nuevos enfoques y soluciones para la simulación de inundaciones.

Debido al análisis realizado en el trabajo se evidencia que en los últimos años existe una tendencia a trabajar o buscar soluciones a través de un marco de modelado único, aunque un solo modelo puede no ser capaz de capturar todos estos procesos de manera efectiva, trabajar con un marco de modelado único tiene varias ventajas, incluyendo la comparación más directa y coherente entre diferentes estudios y escenarios, la eficiencia en términos de tiempo y recursos computacionales, y la facilitación de la comunicación y la colaboración entre diferentes equipos de investigación.

Entre los trabajos analizados son pocos los que incluyen en su sistema de modelado la presencia del drenaje dual, que refleja la interacción entre la red de saneamiento (drenaje menor) y la escorrentía superficial (drenaje mayor). Este bajo número de investigaciones indica la necesidad de incorporar la simulación de sistemas de drenaje dual urbano en los nuevos modelos computacionales, como el modelo Iber + SWMM, en zonas costeras para obtener resultados más precisos en el comportamiento de las IC. ⁽⁴⁴⁾

Proyectos colaborativos como Digital RAIN (UPC-UDC) y Giswater-CIMNE están desarrollando plataformas integradas que combinan modelos 1D-2D (SWMM + Iber) para análisis hidráulicos avanzados, incluyendo evaluación de contaminación difusa y SUDS. En paralelo, líneas emergentes exploran modelos sustitutos basados en inteligencia artificial, que reducen tiempos de cálculo mediante redes neuronales acopladas a modelos físicos, como los implementados en Gante (Bélgica) y Latinoamérica para predecir inundaciones en tiempo real. Estas innovaciones contrastan con enfoques tradicionales y refuerzan la necesidad de adoptar sistemas duales en modelos computacionales costeros, integrando además sensores y gemelos digitales para optimizar la gestión de infraestructuras críticas ante fenómenos extremos.

Conclusiones

Los modelos más utilizados en los estudios de inundaciones y marejadas ciclónicas son HEC-RAS, SWMM, ADCIRC y DELFT3D. Estos modelos son ampliamente reconocidos en la comunidad científica y han demostrado ser efectivos en la simulación de estos eventos extremos.

La versatilidad y aplicabilidad de los modelos numéricos en el estudio de IC es grande. Cada caso se puede resolver empleando uno u otro tren de modelos. No existe un modelo holístico capaz de resolver todos los casos de estudio de inundación compuesta. Tampoco existen reglas preestablecidas, aunque siempre se conoce heurísticamente que, según el fenómeno que se desee analizar se emplea un modelo u otro.

Algunos estudios consideran no sólo las marejadas ciclónicas, sino también otros factores como la lluvia y la escorrentía. Esto subraya la complejidad de estos fenómenos y la necesidad de enfoques de modelado integrales que tengan en cuenta todas las fuentes de inundación.

Los casos de estudio analizados de sistemas computacionales para el estudio de IC el 48,72 % se corresponden a modelos hidrológicos-hidráulicos como modelo base, el 25,64 % a modelos oceánicos-costeros, el 12,82 % a modelos hidráulicos, el 5,13 % a modelos de evaluación de riesgo, y el 7,69 % a modelos hidrológicos.

Solamente un trabajo ha presentado la influencia del drenaje dual en la inundación compuesta. Lo que equivale al 2,6 % de los trabajos analizados. Esto subraya la necesidad de incorporar estas infraestructuras (drenaje dual) en nuevos sistemas computacionales.

El investigador o profesional que realice estos cálculos en un futuro, debe tomar la decisión que considere adecuada, considerando la precisión de sus datos de entrada y el tiempo en el que quiere obtener los resultados. El modelado múltiple presenta altos costos computacionales, por otro lado, el tener

acoplado varios modelos permite reducir los niveles de incertidumbre que conlleva la aplicación de uno solo modelo. Existe una tendencia a la aplicación de modelos de física reducida para disminuir los costos de cómputo, y obtener resultados fiables, es el caso de la aplicación del modelo SFINC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bilskie MV, Zhao H, Resio DT, Atkinson JH, Cobell Z, Hagen SC, editors. Enhancing Flood Hazard Assessments in Coastal Louisiana Through Coupled Hydrologic and Surge Processes. *Frontiers in Water*; 2021.
2. Xu K, Wang C, Bin L. Compound flood models in coastal areas: a review of methods and uncertainty analysis. *Natural Hazards*. 2022;116:469-96.
3. Córdova de Horta D, Córdova L. Simulación de la inundación costera en la zona del Malecón Tradicional, huracán Wilma 2005. 2021;XLII:54-67.
4. Córdova de Horta D. Simulación dinámica de inundaciones compuestas. Caso de estudio Malecón Tradicional de La Habana [Tesis de máster]: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría; 2023.
5. Córdova L. Malecón Tradicional de La Habana. Parte I: Análisis de las causas de la inundación costera. 2021;XLI:25-39.
6. Alvarez Capote N, Gómez Zamora Y. Resumen del paso del huracán Ian por la provincia de artemisa. *Revista Cubana de Meteorología*. 2023;29.
7. Shi S, Yang B, Jiang W. Numerical simulations of compound flooding caused by storm surge and heavy rain with the presence of urban drainage system, coastal dam and tide gates: A case study of Xiangshan, China. *Coastal Engineering*. 2022;172:104064.
8. Ikeuchi H, Hirabayashi Y, Yamazaki D, Muis S, Ward PJ, Winsemius HC, *et al.* Compound simulation of fluvial floods and storm surges in a global coupled river-coast flood model: Model development and its application to 2007 Cyclone Sidr in Bangladesh. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2017;9:1847-62.
9. Leonard M, Westra S, Phatak A, Lambert M, van den Hurk B, McInnes K, *et al.* A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Climate Change*. 2014;5(1):113-28.
10. Hendry A. Compound Flooding in the UK: Past, Present and Future Co-occurring Extreme Flooding Hazard Sources 2021.
11. Bevacqua E, Maraun D, Hobæk Haff I, Widmann M, Vrac M. Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: analysis of floods in Ravenna (Italy). *Hydrol Earth Syst Sci*. 2017;21(6):2701-23.
12. Leijnse T, van Ormondt M, Nederhoff K, van Dongeren A. Modeling compound flooding in coastal systems using a computationally efficient reduced-physics solver: Including fluvial, pluvial, tidal, wind- and wave-driven processes. *Coastal Engineering*. 2021;163:103796.
13. Santiago-Collazo FL, Bilskie MV, Bacopoulos P, Hagen SC, editors. An Examination of Compound Flood Hazard Zones for Past, Present, and Future Low-Gradient Coastal Land-Margins. *Frontiers in Climate*; 2021.
14. Zijlema M, Stelling G, Smit P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*. 2011;58(10):992-1012.
15. Santiago-Collazo FL, Bilskie MV, Hagen SC. A comprehensive review of compound inundation models in low-gradient coastal watersheds. *Environmental Modelling & Software*. 2019;119:166-81.
16. Blanton B, Dresback K, Colle B, Kolar R, Vergara H, Hong Y, *et al.* An Integrated Scenario Ensemble-Based Framework for Hurricane Evacuation Modeling: Part 2-Hazard Modeling. Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis. 2020;40(1):117-33.
17. Dietrich JC, Zijlema M, Westerink JJ, Holthuijsen LH, Dawson C, Luettich RA, *et al.* Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*. 2011;58(1):45-65.
18. Roelvink D, Reniers A, van Dongeren A, van Thiel de Vries J, McCall R, Lescinski J. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*. 2009;56(11):1133-52.
19. Dentale F, Donnarumma G, Pugliese Carratelli E. Wave Run Up and Reflection on Tridimensional Virtual Breakwater. *Journal of Hydrogeology and Hydrologic Engineering*. 2012;01.
20. Ray TR, Stepinski E, Sebastian A, Bedient PB. Dynamic Modeling of Storm Surge and Inland Flooding in a Texas Coastal Floodplain. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2011;137:1103-10.
21. Tromble EM, Kolar R, Dresback K, Luettich RA, editors. River Flux Boundary Considerations in a Coupled Hydrologic-Hydrodynamic Modeling System 2012.
22. Dresback KM, Fleming JG, Blanton BO, Kaiser C, Gourley JJ, Tromble EM, *et al.* Skill assessment of a real-time forecast system utilizing a coupled hydrologic and coastal hydrodynamic model during Hurricane Irene (2011). *Continental Shelf Research*. 2013;71:78-94.
23. Christian J, Fang ZN, Torres JM, Deitz R, Bedient PB. Modeling the Hydraulic Effectiveness of a Proposed Storm Surge Barrier System for the Houston Ship Channel during Hurricane Events. *Natural Hazards Review*. 2015;16:04014015.
24. Karamouz M, Ahmadvand F, Zahmatkesh Z. Distributed hydrologic modeling of coastal flood inundation and damage: nonstationary approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*. 2017;143:04017019.
25. Torres JM, Bass B, Irza N, Fang Z, Proft J, Dawson C, *et al.* Characterizing the hydraulic interactions of hurricane storm surge and rainfall-runoff for the Houston-Galveston region. *Coastal Engineering*. 2015;106:7-19.
26. Santiago-Collazo F, Silva Araya W, Gonzalez-Lopez J, Maldonado J. Efectos de inundación por la combinación de escorrentía superficial y marejada ciclónica durante el huracán georges en la costa este de Puerto Rico. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil [Internet]*. 2017; [citado 27 oct 2023]. Disponible en: https://www.scipedia.com/public/draft_SilvaAraya_402876172
27. Saleh F, Ramaswamy V, Wang Y, Georgas N, Blumberg A, Pullen J. A multi-scale ensemble-based framework for forecasting compound coastal-riverine flooding: The Hackensack-Passaic watershed and Newark Bay. *Advances in Water Resources*. 2017;110:371-86.
28. Silva-Araya WF, Santiago-Collazo FL, Gonzalez-Lopez J, Maldonado-Maldonado J. Dynamic Modeling of Surface Runoff and Storm Surge during Hurricane and Tropical Storm Events. *Hydrology*. 2018;5(1):13.

29. Joyce J, Chang NB, Harji R, Ruppert T, Singhofen PJ. Cascade impact of hurricane movement, storm tidal surge, sea level rise and precipitation variability on flood assessment in a coastal urban watershed. *Climate Dynamics*. 2018;51:383-409.
30. Lee C, Hwang S, Do K, Son S. Increasing flood risk due to river runoff in the estuarine area during a storm landfall. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2019;221:104-18.
31. Hasan Tanim A, Goharian E. Developing a hybrid modeling and multivariate analysis framework for storm surge and runoff interactions in urban coastal flooding. *Journal of Hydrology*. 2021;595:125670.
32. Najafi MR, Zhang Y, Martyn N. A flood risk assessment framework for interdependent infrastructure systems in coastal environments. *Sustainable Cities and Society*. 2021;64:102516.
33. Gori A, Lin N, Smith J. Assessing Compound Flooding From Landfalling Tropical Cyclones on the North Carolina Coast. *Water Resources Research*. 2020;56(4):e2019WR026788.
34. Pandey S, Rao AD, Haldar R. Modeling of Coastal Inundation in Response to a Tropical Cyclone Using a Coupled Hydraulic HEC-RAS and ADCIRC Model. *Journal of Geophysical Research*. 2021;126.
35. Qiang Y, He J, Xiao T, Lu W, Li J, Zhang L. Coastal town flooding upon compound rainfall-wave overtopping-storm surge during extreme tropical cyclones in Hong Kong. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021;37:100890.
36. Xie D, Zou Q-P, Mignone A, MacRae JD. Coastal flooding from wave overtopping and sea level rise adaptation in the northeastern USA. *Coastal Engineering*. 2019;150:39-58.
37. Lee S, Kang T, Sun D, Park J-J. Enhancing an Analysis Method of Compound Flooding in Coastal Areas by Linking Flow Simulation Models of Coasts and Watershed. *Sustainability*. 2020;12(16):6572.
38. Yang Q, Zhang S, Dai Q, Yao R. Improved Framework for Assessing Vulnerability to Different Types of Urban Floods. *Sustainability*. 2020;12(18):7668.
39. Bakhtyar R, Maitaria K, Velissariou P, Trimble B, Flowers T, Moghimi S, et al. Characterizing Compound Coastal-Riverine Behavior along the US East Coast using a Coupled Hydrologic-Hydrodynamic Model. 2020.
40. Bermúdez M, Farfán JF, Willems P, Cea L. Assessing the Effects of Climate Change on Compound Flooding in Coastal River Areas. *Water Resources Research*. 2021;57(10):e2020WR029321.
41. Eilander D, Couasnon A, Leijnse T, Ikeuchi H, Yamazaki D, Muis S, et al. A globally applicable framework for compound flood hazard modeling. *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 2023;23(2):823-46.
42. Maymandi N, Hummel MA, Zhang Y. Compound Coastal, Fluvial, and Pluvial Flooding During Historical Hurricane Events in the Sabine–Neches Estuary, Texas. *Water Resources Research*. 2022;58(12):e2022WR033144.
43. Bennett W, Karunarathna H, Xuan Y, Kusuma MSB, Farid M, Adi Kuntoro A, et al. Modelling compound flooding: a case study from Jakarta, Indonesia. *Natural Hazards*. 2023;118:1-29.
44. Sañudo E, Cea L, Puertas J. Modelling Pluvial Flooding in Urban Areas Coupling the Models Iber and SWMM. *Water*. 2020;12(9):2647.
45. Peña F, Obeysekera J, Jane R, Nardi F, Maran C, Cadogan A, et al. Investigating compound flooding in a low elevation coastal karst environment using multivariate statistical and 2D hydrodynamic modeling. *Weather and Climate Extremes*. 2023;39:100534.
46. Kumbier K, Carvalho RC, Vafeidis AT, Woodroffe CD. Investigating compound flooding in an estuary using hydrodynamic modelling: a case study from the Shoalhaven River, Australia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2017;18:463-77.
47. Zhang YJ, Ye F, Yu H, Sun W-S, Moghimi S, Myers EP, et al. Simulating compound flooding events in a hurricane. *Ocean Dynamics*. 2020;70:621-40.
48. Lian JJ, Xu K, Ma C. Joint impact of rainfall and tidal level on flood risk in a coastal city with a complex river network: a case study of Fuzhou City, China. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2013;17(2):679-89.
49. Huang W, Ye F, Zhang YJ, Park K, Du J, Moghimi S, et al. Compounding factors for extreme flooding around Galveston Bay during Hurricane Harvey. *Ocean Modelling*. 2021;158:101735.
50. Liu Q, Xu H, Wang J. Assessing tropical cyclone compound flood risk using hydrodynamic modelling: a case study in Haikou City, China. *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 2022;22(2):665-75.

Recibido: 14/10/2024

Aprobado: 11/03/2025

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses entre ellos, ni con la investigación presentada, ni con la institución que representa.

Financiamientos

No se utilizó financiamiento específico para realizar la investigación presentada.

Cómo citar este artículo

Córdova de Horta D, Pardo Picazo MA, Prats Rico D, Córdova López LF. Revisión de la literatura: Modelado dinámico de inundaciones compuestas en áreas urbanas costeras. *An Acad Cienc Cuba [Internet]* 2025 [citado en día, mes y año];15(1):e1889. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1889>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).

© Los autores, 2025.

