

Building of a hydrological and hydraulic model (1D/2D) for urban flood analysis in Cucuta, Colombia

Construcción de un modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) para el análisis de inundaciones urbanas en Cúcuta, Colombia

Diego Ivan Sánchez-Tapiero^{1*}, Carlos Alexis Bonilla-Granados², Jarol Derley Ramón-Valencia³

¹MSc en Ingeniería Ambiental, diego.sanchez@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-7270-1813>, Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

²MSc en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos, carlos.bonilla@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-4558-4615>, Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Cúcuta, Colombia.

³PhD. en Ingeniería Ambiental, jarol.ramon@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-2030-4904>, Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

How to cite: D. I. Sanchez-Tapiero, C. A. Bonilla-Granados, y J. D. Ramón-Valencia, "Construcción de un modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) para el análisis de inundaciones urbanas en Cúcuta, Colombia", *Respuestas*, vol. 29, n.º 3, pp. 15-30, sep. 2024. <https://doi.org/10.22463/0122820X.4710>.

Received on April 27, 2024 - Approved on August 05, 2024.

ABSTRACT

Keywords:

Hydrological and Hydraulic Model, Urban Floods, Dual Urban Drainage.

Understanding the behavior of cities in the face of flood events has become a significant challenge for decision-makers and urban planners worldwide. Nowadays, accurate prediction of surface runoff produced by heavy rainfall allows us to understand the vulnerability of urban environments to future changes in climate and to simulate the effectiveness of different sustainable solutions to reduce urban flood hazards and risk. This research work presents the construction of a hydrological and hydraulic model (1D/2D) for urban flood analysis of a study area in the city of Cucuta, implementing the advanced computational model of rainwater management (PCSWMM) for the dual modeling of the existing urban drainage system. The conceptualization of the model took into account the interaction between the system's collector or channel networks (1D) and the conduction of surface runoff flow (2D), improving the hydraulic representation of flooding. Finally, the proposed model made it possible to know the areas prone to flooding when precipitation occurs, analyzing the velocities and depths of water in the roads for different return periods (10 and 50 years). It also represented the interaction between permeable and impervious areas with the existing urban drainage system to model urban flooding more realistically.

RESUMEN

Palabras clave:

Modelo Hidrológico e Hidráulico, Inundaciones Urbanas, Drenaje Urbano dual.

Comprender el comportamiento de las ciudades ante eventos de inundaciones se ha convertido en uno de los principales desafíos para los responsables de la toma de decisiones y planificadores urbanos en todo el mundo. Actualmente, la predicción con exactitud de la escorrentía superficial producida por fuertes precipitaciones permite conocer la vulnerabilidad de los ambientes urbanos ante futuros cambios en el clima y simular la eficacia de distintas soluciones sostenibles para reducir el peligro y el riesgo ante inundaciones urbanas. En este trabajo de investigación se presenta la construcción de un modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) para el análisis de inundaciones urbanas de un área de estudio en la ciudad de Cúcuta, implementando el modelo avanzado de gestión de aguas pluviales por computadora (PCSWMM) para la modelación dual del sistema de drenaje urbano existente. En la conceptualización del modelo se tuvo en cuenta la interacción entre las redes de colectores o canales del sistema (1D) y la conducción del flujo de escorrentía en la superficie (2D), mejorando la representación hidráulica de las inundaciones. Finalmente, el modelo propuesto permitió conocer las zonas propensas a inundaciones cuando se presentan precipitaciones, analizando las velocidades y profundidades del agua en las vías para diferentes periodos de retorno (10 y 50 años). Así mismo, representar la interacción entre las áreas permeables e impermeables con el sistema de drenaje urbano existente para modelar inundaciones urbanas de una forma más realista.

*Corresponding author.

E-mail Address: diego.sanchez@unipamplona.edu.co (Diego Ivan Sánchez-Tapiero)

Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0



Introducción

Los ambientes urbanos a nivel mundial presentan una dinámica de crecimiento acelerada, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) se espera que para el año 2050 la población urbana llegue a 6.700 millones, lo que generaría ciudades densamente edificadas [1]. El aumento de superficies impermeables contribuye directamente a tener volúmenes de escorrentía mayores, debido a la pérdida de vegetación, así mismo, favorece a que los contaminantes generados por las grandes urbes sean arrastrados a las corrientes de agua [2], causando en muchas ocasiones problemas en los sistemas de drenaje, ya que en la mayoría de zonas urbanas el agua de la precipitación se capta y transporta mediante redes de tuberías que recogen el flujo de escorrentía hasta el punto final de disposición [3]. Esta situación, sumada a las precipitaciones intensas asociadas al cambio climático causan inundaciones urbanas. En países como China y algunas ciudades del sudeste asiático, desde el año 2006 más de 100 ciudades sufrieron eventos de inundación asociadas a este fenómeno, afectando a más de 100 millones de habitantes [4].

Los sistemas de drenaje urbano en la mayoría de ciudades fueron diseñados y construidos bajo el supuesto de que los factores que influyen en el sistema no cambian con el tiempo [5], generando graves problemas de inundaciones cuando los patrones de precipitación debido a los cambios en el clima o el aumento de zonas duras por la urbanización, no cumplen esta suposición. Así mismo, la deficiente planificación y urbanización hacen que las redes de colectores pluviales existentes y futuras no tengan la capacidad de transportar los caudales máximos que se presentarán [6], afectando la calidad de vida de las personas, ya que los sistemas de drenaje juegan un papel importante en el desarrollo de las ciudades [7].

Hoy en día, las inundaciones causadas por las precipitaciones en las ciudades son menos aceptadas [8], ya que el aumento de zonas duras hace que el transporte del flujo en la superficie tome un menor tiempo y los sistemas de drenajes colapsen [9], presentando fenómenos de inundación que afectan directamente a las personas con consecuencias ambientales y económicas. Por ejemplo, el Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y minero de España, estimó que en promedio se generó un total de 800 millones de euros anuales por daños de inundaciones en las ciudades, entre el periodo de 1971 y 2016 [10]. Así mismo, la organización Meteorológica Mundial (OMM) publicó que el 55% de víctimas humanas y el 86% de las pérdidas económicas más importantes a nivel mundial durante los años 1970 y 2019 se debieron a las inundaciones [11]. Por lo anterior, la reducción de este fenómeno es uno de los problemas más importantes para la administración del agua como para los tomadores de decisiones [12], y la predicción de las probables zonas de inundación producidas por fuertes precipitaciones, es una herramienta fundamental para abordar esta problemática [13].

En los países en vía de desarrollo el modelamiento de las inundaciones en ambientes urbanos causadas por eventos de precipitación no ha tenido suficiente atención, ya que padecen de limitaciones y brechas de conocimiento hacia sus análisis [14]. Por ejemplo, la geomorfología urbana se cruza con la hidrodinámica necesaria para el modelamiento, se requieren datos topográficos detallados mediante modelos digitales de elevación o imágenes LIDAR (Light Detection And Ranging) para representar de una manera realista dentro del modelo las situaciones de inundaciones presentadas, y esta información no está al alcance de todas las ciudades de los países en vías de desarrollo [15]. Por lo tanto, la modelación en este campo presenta retos importantes debido a la complejidad del entorno y la influencia que genera la variabilidad espacial de los eventos de lluvia en el modelo como parte de la representación de la hidrología urbana [16], donde se

incorpora como entrada la unidad física del área de la cuenca y la precipitación y se obtiene la escorrentía superficial como salida [17].

Otro reto importante para la modelación de inundaciones urbanas, es poder reflejar la interacción entre el flujo en la superficie y las tuberías subterráneas, ya que muchos desastres por inundaciones pueden ser causados por una capacidad limitada del drenaje [18]. Para lograr estos tipos de simulaciones se han creado modelos numéricos basados en el concepto de drenaje dual, que permiten considerar el flujo de escorrentía generado por la precipitación moviéndose en dos planos paralelos, uno superficial formado por las vías y otro subterráneo conformado por la red de colectores convencionales [19]. Estas interacciones entre los flujos son complejas de observar y modelar, para lo cual se han estudiado la implementación de diferentes metodologías [20]. La funcionalidad del drenaje depende de la unión de enlaces topológicos y del intercambio entre los elementos de este sistema y otros servicios públicos [21], que requieren de información de muchas autoridades de infraestructura de las ciudades y de procedimientos sofisticados para lograr la implementación de escenarios de modelación en el sistema de drenaje [22].

Por lo anterior, el objetivo principal de este artículo es construir un modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) del sistema de drenaje urbano existente de un área de estudio de la ciudad de Cúcuta, implementando el uso del modelo avanzado de gestión de aguas pluviales por computadora (PCSWMM), permitiendo realizar una modelación dual del sistema para analizar las inundaciones urbanas que se presentan en el sector, dando a conocer las zonas propensas a inundarse con sus velocidades y profundidades de flujo para distintos periodos de retorno. Esto se realiza con el fin de contribuir en el desarrollo y adaptación de herramientas de apoyo para el mejoramiento de la gestión y la planificación urbana, permitiendo que la ciudad de Cúcuta sea más resiliente ante impactos futuros.

Materiales y Métodos

Zona de estudio

La investigación se centró en un área urbana de la ciudad de Cúcuta (Colombia) donde frecuentemente padecen inundaciones urbanas de origen pluvial. Convencionalmente, los entes gubernamentales y la comunidad han tratado de buscar una solución mediante el incremento de la capacidad de los pocos colectores existentes, alternativa que genera altos costos en su implementación. Actualmente, la cuenca en estudio ha alcanzado un nivel de urbanización del 83.5%, ocupada principalmente por usos de suelos residenciales, comerciales e industriales, cuenta con una extensión superficial de 130.52 hectáreas y está conformada por los barrios Ciudad Jardín, Gratamira, Guaimaral, Zulima, Santa Helena, Prados del Norte, Tasajero y Niza. Está delimitada al noroeste por la avenida 4 entre la calle 16 Norte a la calle 23 Norte y al sureste por la calle 9A Norte entre la Av. Guaimaral y la Av. Libertadores (Figura 1). El alto crecimiento urbano ha permitido el aumento del flujo de escorrentía en las vías principales de la cuenca, y el sistema de drenaje existente no cubre la mayor parte de las calles y carreras, lo cual permite que se presenten inundaciones en diferentes zonas del área en estudio.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

La zona de estudio presenta periodos bimodales de precipitación, experimentando lluvias altas en algunas temporadas, debido a que Colombia es un país altamente afectado por los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña, especialmente en el de La Niña por la temporada de eventos de precipitaciones intensas [23]. Cuenta con la disponibilidad de una estación meteorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), estación Aeropuerto Camilo Daza, que permite registrar los regímenes de lluvia del sector. Cuenta con datos históricos superiores a 70 años y presenta consistencia en el análisis de la información obtenida. Está ubicada a una distancia inferior de los 10 km, lo cual cumple con lo establecido por la guía de instrumentos y métodos de observación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para la frecuencia y espaciamiento de las observaciones de datos meteorológicos [24].

Modelo digital de elevación

El modelo digital de elevación (MDE) se obtuvo mediante la implementación de técnicas UAV-DAP (Fotogrametría aérea digital derivada de un vehículo aéreo no tripulado), utilizando un Dron. Estas técnicas de la geomática se han convertido en la última década en las más utilizadas para obtener nubes de puntos de alta densidad, debido a su bajo costo y gran precisión [25], implementando los drones como nuevas tecnologías de gran utilidad, que permiten la recolección de información topográfica [26]. En esta investigación, las imágenes fueron tomadas con un dron modelo Phantom 3 Advance y la altura de vuelo se realizó a una altura de 100 metros sobre el nivel de terreno (msnm) y se obtuvo imágenes fotogramétricas

con una resolución de 4.3 centímetros (cm) por pixel. El equipo cuenta con un sistema de posicionamiento Global GPS utilizando el satélite GLONASS, una cámara de 12.4 Megapíxeles y una batería o fuente de alimentación, la cual establece un tiempo máximo de vuelo de aproximadamente 1380 segundos, valor que se tuvo en cuenta para sobrevolar toda el área de estudio en 7 vuelos con un traslape entre imagen del 85%. Los vuelos fueron planificados con la aplicación DroneDeploy para computadora.

La medición de los puntos de control o también llamados puntos de evaluación en tierra [25], fue realizada mediante un GPS/RTK GNSS (Cinemática en tiempo real/Sistema Global de Navegación por satélite) de la marca Stonex. La información de la posición de cada punto (X, Y, Z) fue georreferenciada en el sistema de coordenadas Magna Colombia Este (EPSG 3117), orientados a la red geodésica de Colombia. Los puntos fueron marcados antes de realizar los vuelos y su distribución se hizo teniendo en cuenta que estos fueran ubicados sobre una superficie firme, como vías o andenes, y que no existiera ningún elemento cerca que generará pérdida de la señal del satélite. El equipo tiene una precisión al milímetro y la información obtenida del levantamiento fue utilizada para el proceso de georreferenciación de las imágenes captadas.

Para el procesamiento y análisis de las imágenes aéreas obtenidas en los vuelos con dron, se utilizó el software de fotogrametría Agisoft Metashape en su versión 1.6.5 siguiendo la metodología propuesta por [27], estructurándose para la investigación en 8 fases importantes: 1) Planificación e identificación de zonas de vuelo. 2) Selección de parámetros de vuelo (Altura de vuelo, porcentaje de traslape de imágenes y tiempo máximo de vuelo por zona). 3) Ubicación y georreferenciación de puntos de control. 4) Toma de imágenes con el dron 5) Procesamiento y obtención de nube de puntos. 6) Ajuste de la nube de puntos mediante los puntos de control. 7) Clasificación y limpieza de la nube de puntos. 8) Generación del MDE y ortofoto.

Recolección de información del sistema de drenaje

Se consultaron las entidades de la ciudad encargadas del sistema de drenaje urbano, con el fin de conocer la información de catastro de redes existentes (en físico o digital) y documentos técnicos del sistema de drenaje de aguas lluvias en del área de estudio. No se encontró información técnica de soporte de la infraestructura pluvial existente. Por tal razón, fue necesario realizar la recolección de información de las redes pluviales existentes, inspeccionando cada uno de los pozos y sumideros identificados en terreno. Se obtuvieron los datos de la profundidad, las cotas de la tubería de entrada y salida, el material, la sección y el tamaño del conducto. Así mismo, para la georreferenciación de estos elementos se implementó el GPS/RTK GNSS, permitiendo obtener las coordenadas exactas de cada uno.

En la recolección de información también se consultó a la comunidad el comportamiento del flujo de escorrentía cuando se presentan eventos de precipitación, la interacción de las redes de drenaje con el canal Bogotá y eventos presentados de desbordamiento e inundaciones. Se identificaron las principales vías de la zona de estudio que transportan la mayor cantidad de escorrentía superficial y se determinaron las zonas permeables, tipo de cobertura, el material de las cubiertas de las casas y edificios presentes en el área de interés, permitiendo establecer coeficientes de rugosidad, información importante para la construcción del modelo computacional.

Conceptualización del modelo hidrológico e hidráulico en PCSWMM

Para la investigación se implementó el motor de cálculo hidrológico e hidráulico del modelo de gestión de aguas pluviales (SWMM) en su versión 5.1.015 como parte del software PCSWMM. Este programa realiza análisis de sistemas sanitarios y pluviales, redes de agua potable y el estudio de cuencas hidrográficas, permitiendo la incorporación de entidades y atributos de capas creadas en un SIG (Sistemas de Información Geográfica) [28]. El cálculo numérico es basado en la solución de las ecuaciones unidimensionales de Saint – Venant (Ecuación 1 y 2), resueltas mediante el método de diferencias finitas con aproximaciones sucesivas [29].

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x = 0 \quad (1)$$

$$\partial Q / \partial t + \partial / \partial x (Q^2 / A) + gA \partial H / \partial X + gAS_f + gAh_l = 0 \quad (2)$$

Donde, Q, H y A representan el caudal, la carga hidráulica y el área de la sección transversal respectivamente. La aceleración gravitacional es la g; S_f es la pendiente de fricción del conducto; h_l la pérdida de carga local por unidad de longitud. Los datos de entrada para representar el modelo unidimensional (1D), se ingresaron mediante cuatro capas: conexiones, conductos, desagües y subcuencas. Las tres primeras permiten la modelación hidráulica y la cuarta la modelación hidrológica, éstas fueron creadas en un SIG y exportadas a PCSWMM con los parámetros correspondientes. Para las subcuencas se implementó el método de infiltración del número de curva (NC), permitiendo calcular la escorrentía directa provocada por un evento de lluvia en función de la lámina de agua y el potencial máximo de retención del suelo [30]. El porcentaje de zonas permeables e impermeables se obtuvo para cada subcuenca, utilizando un análisis supervisado en el SIG de la imagen satelital derivada del vuelo [31]. El coeficiente de rugosidad de Manning de los conductos se asignó según la información publicada en el manual de de SWMM [32], dependiendo del material de cada uno. El tipo de sección y dimensiones se basaron en los datos recolectados en campo de la información del sistema de drenaje existente.

El modelo bidimensional (2D) se creó mediante tres mallas que representaron la superficie de las zonas impermeables (vías y andenes), permeables (zonas sin construcción) y el tramo del canal Bogotá, el cual se incluyó para modelar el transporte del agua de escorrentía entregada por el sistema de drenaje. Para las áreas impermeables y permeables se estableció una malla hexagonal de 2 y 5 metros (m) de resolución respectivamente, y en el tramo del canal se asignó una malla direccional a una resolución de 3 m. El tipo y tamaño de las mallas fue obtenido verificando inestabilidades numéricas y errores de continuidad en el modelo, mediante la implementación de la condición del número de Courant [33]. Para la conceptualización del drenaje dual del sistema existente, se estableció un enfoque de conexión directa [34], permitiendo que el flujo de escorrentía en las vías (2D) ingrese a la red de colectores (1D) o viceversa.

La representación de la lluvia para la modelación se efectuó con la incorporación de las curvas IDF (Intensidad Duración Frecuencia) de la estación seleccionada a PCSWMM. En el programa se crearon para cada periodo de retorno (5, 10, 50 y 100 años) los hietogramas de diseño mediante el método de distribución de tormentas de Chicago con una duración de la tormenta de 3 horas y un coeficiente (r) igual a 0.35. La calibración del modelo se realizó mediante la herramienta de Calibración de Sintonización de Radio

Basada en Sensibilidad (SRTC) de PCSWMM, corrigiendo los valores de salida del modelo computacional en comparación con la información real tomada de la cuenca. Para este proceso solo se asignaron los porcentajes de incertidumbre a los parámetros de las subcuencas, ya que estos intervienen en el cálculo hidrológico del caudal de escorrentía en el modelo. Los porcentajes de incertidumbre establecidos en cada parámetro se tomaron de acuerdo a [35], el cual brinda información sobre que porcentajes son adecuados para la calibración mediante la herramienta. En la ventana de sensibilidad se variaron los porcentajes de incertidumbre, verificando que el hidrograma de salida se ajuste en gran parte con el hidrograma observado, teniendo en cuenta que los criterios de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R2) alcancen un valor aceptable para la calibración. Finalmente, el modelo hidrológico e hidráulico se corre con los parámetros corregidos para obtener resultados más ajustados a la información real de la zona de estudio.

Resultados y Discusión

Modelo digital de elevación

El MDE obtenido de la zona de estudio fue generado mediante una nube de puntos densa con más de 81 millones de puntos, derivada del procesamiento de la secuencia de 1178 imágenes aéreas captadas por dron. Los puntos fueron limpiados y clasificados según los usos de suelos existentes en el área, seleccionando para la creación del MDE únicamente los que corresponden a la superficie terrestre. La Figura 2, permite visualizar el modelo digital de elevación con una extensión de 130.52 hectáreas y un tamaño por pixel de 17 cm, presentando una condición de elevación de 275 msnm en las zonas más bajas y una máxima de 285 msnm en las partes altas del área de estudio. Los lugares más bajos mostrados en el MDE corresponden a los barrios Tasajero, Niza y a la base del canal Bogotá, sin embargo, en la Figura 2 se visualiza la existencia de dos puntos bajos (Círculos en rojo), estos corresponden a la entrada y salida de un parqueadero subterráneo. El MDE muestra el comportamiento de la superficie del área de estudio, permitiendo verificar de manera espacial la forma en que el flujo de escorrentía se desplaza al interior de la cuenca cuando se presentan eventos de lluvia, observándose que las avenidas Guaimaral y libertadores funcionan como canales artificiales que transportan el agua de lluvia proveniente de los barrios Ciudad Jardín, Zulima, Gratamira y Guaimaral, entregándola al canal Bogotá en la intersección con la calle 20 Norte, punto en el que se han presentado históricamente inundaciones con profundidades altas. Así mismo, se puede observar que el agua de escorrentía del barrio Prados del Norte que se desplaza superficialmente en las calles, por la pendiente del terreno es descargado al barrio Tasajero provocando inundaciones en algunos sectores del barrio, como lo manifestó la comunidad en las salidas de campo realizadas.

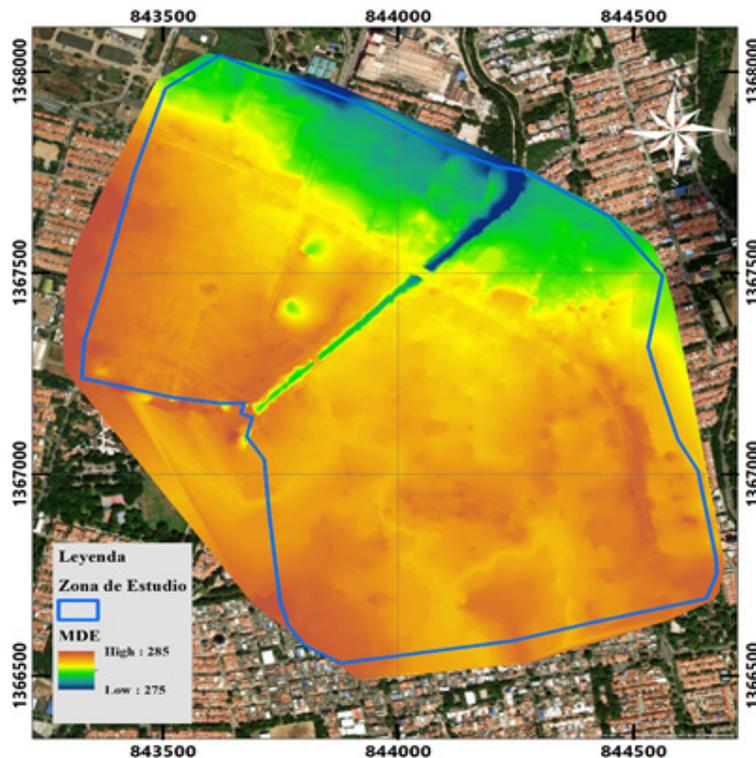


Figura 2. Modelo digital de elevación de la zona de estudio.

Recolección de información del sistema de drenaje

La información recolectada del sistema de drenaje existente permitió conocer el comportamiento del agua de lluvia y la forma en que es conducida y descargada en el canal Bogotá y en el río Pamplonita, como se muestra en la Figura 3. El flujo de escorrentía proveniente de algunas vías desde la parte alta del barrio Prados del Norte y Unicentro es recolectada mediante tuberías de 0.61 y 0.84 m de diámetro en concreto. En la Avenida 2 Norte frente al centro comercial se encontró un canal cerrado de sección rectangular en concreto de 1.85 m de ancho por 1 m de alto que descarga en la tubería de 0.84 m, transportando el agua hasta el canal. El flujo de escorrentía de algunos sectores de los barrios Gratamira y Zulima, así como el que circula superficialmente por la avenida Libertadores, es captado por sumideros longitudinales y transportado por tuberías de 0.91 m y 1.27 m de diámetro en concreto, hasta llegar a descargar una altura de 0.75 m con respecto al fondo del canal Bogotá. Por otra parte, el agua de lluvia proveniente del barrio Zulima por la calle 12 y 14 Norte, la urbanización La Mar y el parque Gratamira, es recolectada y transportada mediante un canal cerrado rectangular en concreto de 1.4 m de ancho y 0.6 m de alto, entregándola a dos tuberías de 0.56 m de diámetro en policloruro de vinilo (PVC) en la intercesión de la avenida 15A Este y la calle 14 Norte. Estas tuberías conducen el agua hasta la avenida Libertadores para descargarla a una tubería de 1.27 m de diámetro en PVC, la cual se encarga de conducir el fluido hasta el río Pamplonita. La escorrentía proveniente de los barrios San Eduardo, Los Acacios y un sector del barrio Guaimaral, es captada por un canal trapezoidal en concreto y piedra, ubicado en la calle 9A Norte de Ciudad Jardín, el cual en algunas ocasiones ha ocasionado inundaciones debido a que su sección hidráulica fue disminuida por la comunidad en un tramo del canal donde se construyeron viviendas encima del mismo.



Figura 3. Sistema de drenaje existente en la zona de estudio.

La información recolectada en campo permitió conocer que aproximadamente el 35% del área en estudio cuenta con tuberías o canales para la evacuación de las aguas lluvias, ocasionando que en varios sectores ocurran estancamientos y colapse la infraestructura cuando se presentan precipitaciones., provocando inundaciones urbanas que generan peligro a los peatones y vehículos que transitan por este sector. Los sectores que cuentan con colectores para la evacuación del flujo generalmente se ven afectados debido a que las rejillas de los sumideros se encuentran en mal estado, obstruyendo el paso del flujo al momento de ingresar.

Conceptualización del modelo hidrológico e hidráulico en PCSWMM

Con el MDE y la información recolectada del sistema de drenaje existente, se construyó el modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) del área de estudio, conformado por 44 conexiones, 39 conductos, 2 emisarios y 474 subcuencas para el modelo unidimensional (1D representando el flujo en el sistema subterráneo existente). El modelo bidimensional (2D) fue creado mediante 97705 conexiones, 13443976 conductos, 16720 emisarios y 97705 celdas, modelando el comportamiento del flujo en las vías y zonas permeables. La calibración y validación del modelo dio como resultado un proceso excelente, según lo definido por la literatura [37], ya que el valor promedio de la función de Nash-Sutcliffe (NSE) es de 0.981. El coeficiente de determinación (R^2) es de 0.998 muy cercano a 1, indicando que el ajuste de los resultados de la calibración y la validación son buenos cuando se comparan con los datos reales observados. Sin embargo, es recomendable para futuros trabajos contar con mediciones de la profundidad del flujo de escorrentía en diferentes puntos al interior del área de estudio que permitan ajustar mejor los parámetros que intervienen en el proceso. La Figura 4(a) muestra el modelo (1D/2D) construido para modelar el comportamiento espacio

temporal del flujo de escorrentía y analizar las inundaciones que se presentan en el área de estudio ante un evento de precipitación. Los emisarios en 2D o puntos de descarga (línea en color marrón) permitieron la salida del agua en el modelo para que no se generen inundaciones por acumulación de flujo, estos están ubicados en la zona oriental y nororiental debido a que es la zona más baja de la cuenca como se evidenciaba en el MDE. En la Figura 4(b) se observa las diferentes mallas creadas en el modelo, mostrando que la interacción entre las mismas es muy fina, representando los cambios topológicos del terreno repentinos sin generar errores en las soluciones numéricas. La Figura 4(c) presenta el enfoque de conexión directa implementado en el software para modelar como el flujo en la superficie (2D) entrega a un colector (1D) o viceversa. También permite visualizar que para modelar el flujo que pasa por debajo de los puentes existentes de la avenida Libertadores y la avenida Guaimaral con el canal, se creó una conexión directa entre el modelo 2D y un conducto 1D tipo Box Culvert con las dimensiones reales, representando computacionalmente la interacción del flujo entre los dos tramos.

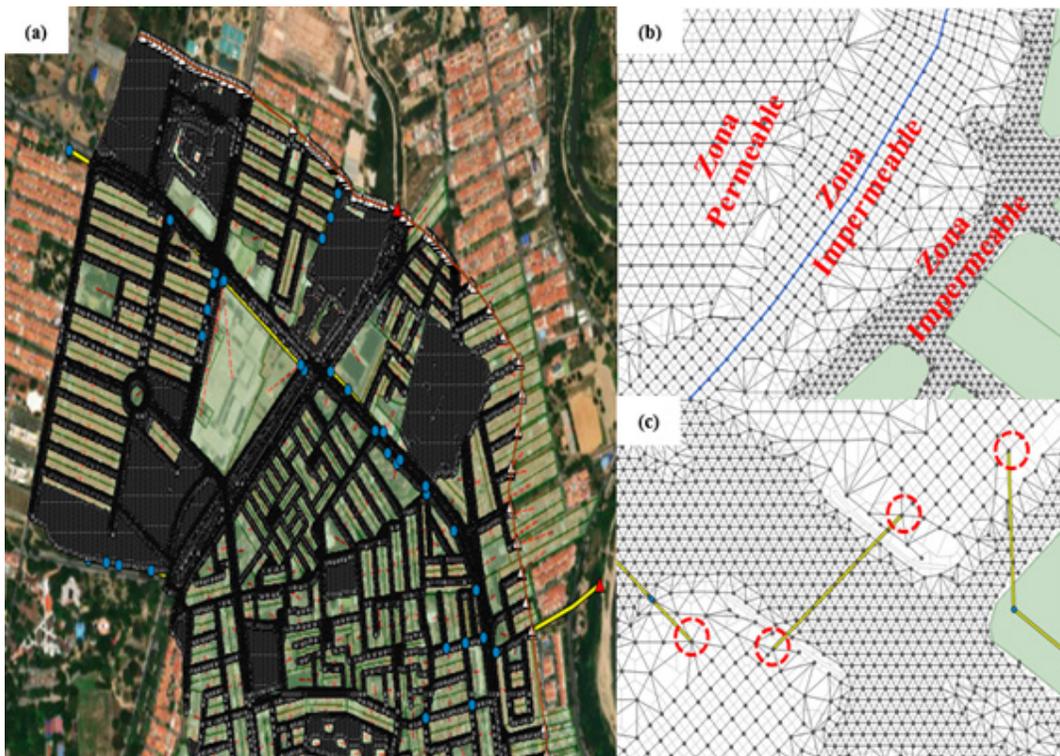


Figura 4. Modelo Hidrológico e Hidráulico (1D-2D). (a) vista general del modelo, (b) tipos de mallas creadas, (c) conexión directa 1D-2D en PCSWMM.

El modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) construido presentó un excelente desempeño para la representación espacio temporal del flujo de escorrentía en el área de estudio, tanto en el sistema de tuberías o canales existentes (subterráneo) como en las vías y calles (superficial), contribuyendo al análisis de inundaciones para determinar zonas propensas a estas debido a la acumulación de flujo. Estas zonas son el resultado de realizar una buena modelación hidrológica e hidráulica de los parámetros que intervienen en el proceso, permitiendo conocer numéricamente variables hidráulicas como la velocidad y la profundidad de flujo para diferentes eventos históricos de lluvia. En las Figuras 5 y 6 se muestran los mapas de inundación de la zona de estudio para los eventos de lluvia históricos de 10 y 50 años, observándose que para los distintos mapas se rige el mismo patrón, presentando inundaciones con menores velocidades y mayores profundidades en la parte central y oriental de la cuenca en estudio, ya que la pendiente del terreno favorece

el desplazamiento del flujo a medida que transcurre el tiempo del evento hasta acumularse todo en las zonas más bajas, produciendo inundaciones con mayores profundidades. Se puede observar que la zona central de la cuenca conduce su flujo de escorrentía hacia el canal mediante las avenidas Libertadores y Guaimaral, generando que gran cantidad del agua de lluvia se concentre en la vía y presente velocidades y profundidades con valores superiores que afectan directamente a las personas que transitan por el sector. Los mapas de inundación permiten ver la interacción de las áreas permeables con el flujo de escorrentía, mostrando pequeños encharcamientos con profundidades menores a 0.10 m para todos los eventos de lluvia, representando la interacción hidrológica del modelo y el tipo de suelo de la zona de estudio.

La *Figura 5* muestra que para el periodo de retorno de 10 años las profundidades del flujo en la mayoría del área no superan los 0.10 y 0.15 m, indicando que no se generan afectaciones a las viviendas aledañas ya que el flujo en la vía no sobre pasa la altura del sardinal, sin embargo, la mancha de inundación en la mayoría de las calles ocupa todo el ancho de esta, superando el ancho de inundación admisible para Colombia establecido en la resolución 0330 del reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico (RAS) [38]. Lo anterior, sucede debido a que no se cuenta con un sistema de drenaje subterráneo (tuberías) en algunos sectores, permitiendo que el flujo sea conducido de forma superficial. En la avenida 12 Este, avenida Guaimaral y en algunas vías de los barrios Zulima y Ciudad Jardín las profundidades obtenidas superan los 0.25 m hasta presentar valores superiores a los 0.5 m, lo que representaría una alta probabilidad de que una persona pueda ser arrastrada por la fuerza del agua cuando este cruzando la calle. Estas profundidades del flujo son ocasionadas en gran parte por la topografía del lugar.



Figura 5. Mapa de Inundación para el evento de lluvia de Tr 10 años.

En la *Figura 6* se presenta el mapa para el Tr de 50 años, observándose el aumento de sectores inundados con profundidades mayores que alcanzan valores máximos de 0.85 m, como es el caso de la avenida 12 Este y 14 Este entre calle 10A Norte y 11A Norte del barrio Ciudad Jardín, lo cual genera una alta probabilidad de que una persona pueda sufrir arrastre por la fuerza del agua. En la avenida Guaimaral y en las calles del barrio Tasajero, Zulima y Prados del Norte, el modelo permite conocer que las profundidades son superiores a 0.25 m e inferiores a 0.5 m, pero en ciertos trayectos de las vías por sus pendientes bajas toman valores muy cercanos al límite (0.5 m). Por otra parte, las demás vías del área de estudio presentan profundidades inferiores a 0.25 m, lo cual indica que son zonas con una baja probabilidad de que un peatón sufra arrastre por la fuerza del fluido al cruzar la calle.

Los mapas de inundación permiten conocer que para los eventos de 10 y 50 años las zonas que no presentaron profundidades mayores 0.25 m corresponden al 68.5% y 60.3% respectivamente, el 25.1% y 31.3% entre 0.25 y 0.5 m, y el 6.4% y 8.4% superior a 0.5 m, evidenciando el aumento de zonas propensas a inundaciones con mayores profundidades a medida que se presentan eventos de precipitaciones más intensos, información relevante para las entidades tomadoras de decisiones de la ciudad sobre el comportamiento de estas en el área de estudio.

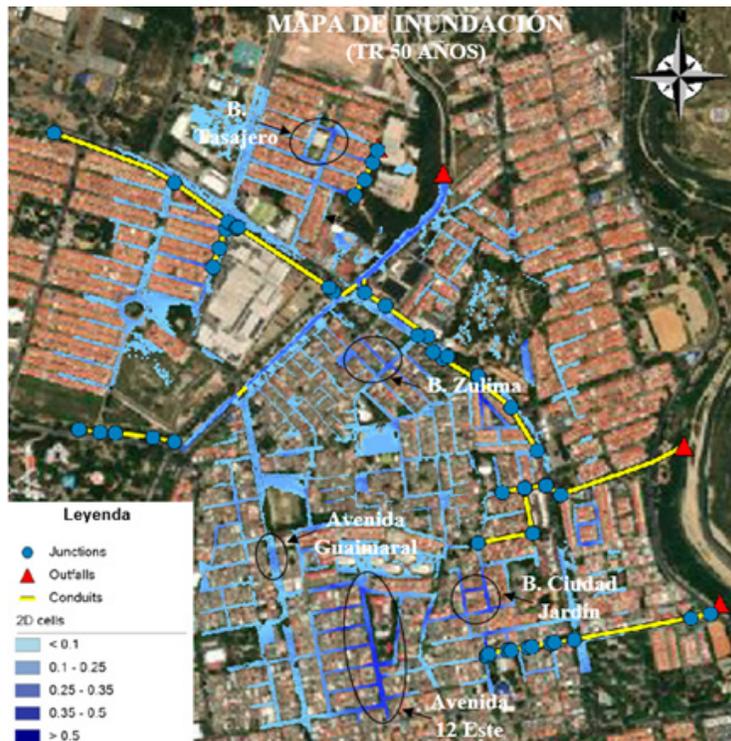


Figura 6. Mapa de Inundación para el evento de lluvia de Tr 50 años.

Conclusiones

El proceso de calibración y validación fue excelente según los resultados obtenidos de 0.981 y 0.998 para el criterio de NSE y R2 respectivamente, describiendo un buen ajuste de los cálculos numéricos obtenidos al compararlos con el estudio puntual de inundaciones urbanas en el área de estudio, lo que implica que el modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) construido es potencialmente útil en el análisis de

zonas propensas a inundaciones para diferentes eventos de lluvia históricos. Sin embargo, existen algunas limitaciones para el modelo en predecir las inundaciones en los escenarios de planificación de mediano o largo plazo, dado que los procesos hidrológicos pueden cambiar con la rápida urbanización que se presenta en la ciudad de Cúcuta.

El modelo propuesto permitió generar mapas de inundación para distintos periodos de retorno con rangos de profundidades de flujo de escorrentía en un caso real en la ciudad de Cúcuta (Colombia), evidenciando que para un periodo de retorno de 10 y 50 años se presentan zonas de inundación en las avenidas libertadores y Guaimaral cerca a la intersección con el canal Bogotá y en la calle 14 Norte, en la avenida 13 Este y su interacción con la calle 15 Norte del barrio Zulima. Así mismo, el modelo da a conocer que en el área de estudio se experimentan inundaciones con menores velocidades y mayores profundidades en la parte central y oriental, ya que la superficie del terreno favorece el desplazamiento del flujo a medida que transcurre el tiempo, conduciéndose mediante la Av. Libertadores y Guaimaral hasta el canal Bogotá, afectando directamente a las personas que transitan por estas vías.

El modelo hidrológico e hidráulico (1D/2D) construido en esta investigación contribuye en gran parte a disminuir la brecha que presentan las ciudades de países en vía de desarrollo como Cúcuta, ya que no cuentan con herramientas computacionales que permiten la modelación dual de los sistemas de drenaje existentes para conocer la respuesta de estos ante diferentes eventos de precipitación. Ayudando a los tomadores de decisiones a comprender la vulnerabilidad de la ciudad a cambios en el clima, con el fin de buscar alternativas de prevención y mitigación, permitiendo que Cúcuta sea más resiliente ante impactos futuros.

Referencias

- [1] [1] R. Berndtsson, P. Becker, A. Persson, et al., "Drivers of changing urban flood risk: A framework for action", *J. Environmental Manage.*, vol. 240, no. 2019, pp. 47–56, 2019. Doi: //doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.094
- [2] C. Bonilla-Granados, A. Sánchez-Delgado y D. Sanchez-Tapiero "Diseño de techos verdes y jardines verticales como sistemas urbanos de drenaje sostenible en edificaciones", *Respuestas*, vol. 26, no. 3, pp.6-19, 2021.
- [3] Y. Bai, N. Zhao, R. Zhang y X. Zeng, "Storm Water Management of Low Impact Development in Urban Areas Based on SWMM", *Water*, vol. 11, no. 33, pp. 1–16, 2019. Doi: 10.3390/w11010033.
- [4] J. Liu, W. Shao, C. Xiang, C. Mei y Z. Li, "Uncertainties of urban flood modeling: Influence of parameters for different underlying surfaces", *Environmental Research*, vol. 182, no. 108929, 2019. Doi: //doi.org/10.1016/j.envres.2019.108929.
- [5] C. L. Panos, J. M. Wolfand y T. S. Hogue, "Assessing resilience of a dual drainage urban system to redevelopment and climate change", *Journal of Hydrology*, vol. 596, pp. 1–11, 2021. Doi: //doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126101.
- [6] J. Liang, "Multivariate linear regression method based on SPSS analysis of influencing factors of

- CPI during epidemic situation,” in *2020 2nd International Conference on Economic Management and Model Engineering (ICEMME)*, 2020, pp. 294–297. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9434715>.
- [7] C. Bonilla-Granados, J. Barrera-Triviño and G. Cifuentes-Ospina, “A systematic review of wastewater monitoring and its applications in urban drainage systems”. *Respuestas*, vol. 24, no. 3, pp. 53-62, 2019.
- [8] J. Sørensen y S. Mobini, "Pluvial, urban flood mechanisms and characteristics – Assessment based on insurance claims", *Journal of Hydrology*, vol. 555, no. 207, pp. 51–67, 2017. Doi: [//doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.039](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.039).
- [9] E. D. Cubides y G. E Santos, “Control de escorrentías urbanas mediante sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración”. *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. 24, pp. 32-42. Doi: [//doi.org/10.31908/19098367.3813](https://doi.org/10.31908/19098367.3813).
- [10] Ministerio Para la Transición Ecológica, “Guías de adaptación al riesgo de inundación: explotaciones agrícolas y ganaderas”. Madrid, 2019. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/guia-adaptacion-al-riesgo-inundacion-explotaciones-agricolas-ganaderas_tcm30-503727.pdf
- [11] Organización Meteorológica Mundial, “Mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos (1970–2019)”. Ginebra, Suiza, 2021. Disponible en: https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=22011#.Y3YVmnBMLIU
- [12] G. Musolino, R. Ahmadian y R. A. Falconer, "Comparison of flood hazard assessment criteria for pedestrians with a refined mechanics-based method", *Journal of Hydrology*, vol. 9, no. 100067, pp. 1-13, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100067>
- [13] X. Wang, G. Kinsland, D. Poudel y A. Fenech, "Urban flood prediction under heavy precipitation", *Journal of Hydrology*, vol. 577, 2019. Doi: [//doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123984](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123984)
- [14] U. C. Nkwunonwo, M. Whitworth, B. Baily, “A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries”. *Scientific African*, Vol 7, no e00269, 2020. Doi: [10.1016/j.sciaf.2020.e00269](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269)
- [15] V. Meesuk, Z. Vojinovic, A.E. Mynett, A.F. Abdullah, "Urban flood modelling combining top-view LiDAR data with ground-view SfM observations", *Adv. Water Resour.* Vol. 75(2015), pp. 105–117, 2015. Doi: [//doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.008](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.008)
- [16] V. Bellos, I. M. Kourtis, A. Moreno-Rodenas y V. A. Tsihrintzis, "Quantifying Roughness Coefficient Uncertainty in Urban Flooding Simulations through a Simplified Methodology", *Water*, vol. 9, no. 944, pp. 1–12, 2017. Doi: [10.3390/w9120944](https://doi.org/10.3390/w9120944)
- [17] [17] L. Vargas-Garay, O. Torres-Goyeneche y G. Carrillo-Soto, “Evaluation of SCS - unit hydrograph model to estimate peak flows in watersheds of Norte de Santander”, *Respuestas*, vol. 24, no.

1, pp. 6-16, 2019.

- [18] B. Dong, J. Xia, M. Zhou, Q. Li, R. Ahmadian y R. A. Falconer, "Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles", *Sci. Total Environ.*, vol. 827, pp. 1-13, 2022. Doi: [//doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154098](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154098)
- [19] E. Martínez Gomariz, "Inundaciones urbanas: Criterios de peligrosidad y evaluación del riesgo para peatones y vehículos", Disertación Ph.D, Dept. Ing. Civil y Ambiental, *Univ. Politécnica de Catalunya*, Barcelona, 2016. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/106280>
- [20] L. Salvan, M. Abily, P. Gourbesville y J. Schoorens, "Drainage System and Detailed Urban Topography: Towards Operational 1D-2D Modelling for Stormwater Management", *Procedia Eng.*, vol. 154, pp. 890–897, 2016. Doi: [//doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.469](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.469).
- [21] White y K. Stewart, "Barrier dynamics for GIS: a design pattern for geospatial barriers", *Int. J. Geographical Inf. Sci.*, vol. 29, pp. 1007–1022, 2015. Doi: [//doi.org/10.1080/13658816.2014.995103](https://doi.org/10.1080/13658816.2014.995103).
- [22] C. Mikovits, W. Rauch y M. Kleidorfer, "Importance of scenario analysis in urban development for urban water infrastructure planning and management", *Computers, Environ. Urban Syst.*, vol. 68, pp. 9–16, 2018. Doi: [//doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.006](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.006)
- [23] R. Fragozo, V. H. Bedoya y J. M. López-Lezama, "Modelo para el control de inundaciones utilizando dos embalses en paralelo", *Uis ingenierías*, vol. 17, no. 2, pp. 87–94, 2018. Doi: [//doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018008](https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018008)
- [24] L. Lanza, M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi y W. Wauben, "Instruments and observing methods", WMO, TD-No. 1304, 2006. Disponible en: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=9264#.Y3YYVXbMLIU
- [25] A. N. Arévalo-Verjel, J. L. Ierma, J. F. Prieto, J. P. Carbonell-Rivera, et al., "Estimation of the Block Adjustment Error in UAV Photogrammetric Flights in Flat Areas", *Remote Sens*, vol. 14, no. 12, 2022. Doi: [//doi.org/10.3390/rs14122877](https://doi.org/10.3390/rs14122877)
- [26] J. O. Escalante, J. J. Cáceres y H. Porras, "Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV", *Tecnura*, vol. 20, no. 50, pp. 119–140, 2016. Doi: [//doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09](https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09)
- [27] A. Nájera-Ramos, "Propuesta Metodológica Para La Generación De Ortofotos Y Modelos Digitales De Elevación De Alta Resolución A Través De Vuelos Con Drones No-Fotogramétricos", Tesis M.S, Fac. Ingeniería, *Univ. Autónoma de Guerrero*, 2021. Disponible en: http://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/2498/TE_851102_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [28] V. Hamouz, P. Møller-Pedersen y T. Merete Muthanna, "Modelling runoff reduction through implementation of green and grey roofs in urban catchments using PCSWMM", *Urban Water Journal*, vol. 17, pp. 813–826, 2020. Doi: [//doi.org/10.1080/1573062X.2020.1828500](https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1828500).

- [29] L. Mohd Sidek, L. H. C. Chua, A. S. M. Azizi, H. Basri, A. S. Jaafar y W. C. Moon, "Application of PCSWMM for the 1-D and 1-D–2-D modeling of urban flooding in damansara catchment, malaysia", *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9300, 2021. Doi: [//doi.org/10.3390/app11199300](https://doi.org/10.3390/app11199300)
- [30] Á. Diaz Carvajal y T. Teobaldis Mercado Fernández, "Determinación del número de curva en la subcuenca de betancí (córdoba, colombia) mediante teledetección y sig", *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 35, no. 2, pp. 452–470, 2017.
- [31] Z. Abbas, H. S. Jaber, "Accuracy assessment of supervised classification methods for extraction land use maps using remote sensing and GIS techniques", en *Conf. Ser Mater Sci Eng, Baghdad*, pp. 1-13, 2020. Doi: [//10.1088/1757899X/745/1/012166](https://doi.org/10.1088/1757899X/745/1/012166).
- [32] L.A. Rossman, "Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1". Cincinnati, Estados Unidos, EPA, 2015. Disponible en: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm-version-51-users-manual>
- [33] W. James, L. E. Rossman y W. R. James, "User's Guide to SWMM5", 13nd ed. Ontario: *Computational Hydraulics Int (CHI)*, 2010. Disponible en: <https://www.chiwater.com/Files/UsersGuideToSWMM5Edn13.pdf>
- [34] Computational Hydraulics International (CHI). "PCSWMM Manual". Guelph, Canadá: CHI, 2018.
- [35] W. James, "Rules for responsible modeling". (4nd ed.). Ontario: *Computational Hydraulics Int (CHI)*, 2005. Disponible: https://www.chiwater.com/Files/R184_CHI_Rules.pdf
- [36] J. A. Rojas, "Análisis de incertidumbre y esquemas de calibración de un modelo conceptual de drenaje urbano en un ambiente de escasez de recursos", Tesis M.S, Dep. Ing. Civil y Ambiental, Fac. Ingeniería, *Univ. de los Andes*, Bogotá, 2011. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/11559>.
- [37] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, "Resolución 0330 del 2017", Bogotá, Colombia, 2017. Disponible en: <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>