

Modelos Digitales para el Modelado Numérico de Inundaciones en Zonas Urbanas Obtenidos con Técnicas de Fotogrametría y GIS

Digital Models for Numerical Modelling of Floods in Urban Areas Obtained with Photogrammetry and GIS Techniques

Carlos Ignacio Vizcaíno-López
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México
vizlopcar@gmail.com

Recibido: 10 julio 2024
Aceptado: 10 marzo 2025

Miguel Ángel Soto-Zamora
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México

Martín Hernández-Marín
Universidad Autónoma de Aguascalientes, México

Resumen:

Actualmente, el modelado numérico es el enfoque predominante para investigar el fenómeno de inundaciones en zonas urbanas. No obstante, la falta de datos es una de las principales limitaciones al utilizar modelos de inundaciones, especialmente cuando se realizan estudios a pequeña escala. Hasta la fecha, no existen datos de topografía y uso de suelo que sean consistentes, precisos y de alta resolución, ni hay procedimientos viables para obtenerlos. La disponibilidad de drones de bajo costo ha vuelto más factible y menos costoso la utilización de técnicas de fotogrametría para obtener estos datos. En este estudio, se presenta un método actualizado para la obtención de modelos digitales de topografía y uso de suelo de alta resolución. Por primera vez, se presenta un método para obtener información de uso de suelo de alta resolución mediante la utilización de detección remota, fotogrametría y sistemas de información geográfica. Además, se elaboró un modelo de inundaciones en dos dimensiones en un arroyo de una zona urbana de Aguascalientes, con la finalidad de evaluar el desempeño de los datos topográficos obtenidos con el método propuesto. Los resultados muestran que dicho método tiene el potencial de contribuir a la obtención de mejores datos topográficos para el modelado de inundaciones.

Palabras clave: modelado de inundaciones urbanas, modelos digitales, detección remota, fotogrametría, sistemas de información geográfica (GIS).

Abstract:

Currently, numerical modelling is the predominant approach to investigate flooding in urban areas. However, lack of data is one of the main limitations when using flood models, especially when conducting small-scale studies. To date, consistent, accurate, and high-resolution topography and land-use data do not exist, nor are there viable procedures to obtain them. The availability of low-cost drones has made the use of photogrammetry techniques to obtain these data more feasible and less expensive. In this study, an updated method for obtaining high-resolution digital topography and land-use models is presented. For the first time, a method for obtaining high-resolution land-use information using remote sensing, photogrammetry, and geographic information systems is presented. In addition, a two-dimensional flood model was developed in a stream in an urban area of Aguascalientes, to evaluate the performance of the topographic data obtained with the proposed method. The results show that this method has the potential to contribute to obtaining better topographic data for flood modelling.

Keywords: urban flood modelling, digital models, remote sensing, photogrammetry, geographic information systems (GIS).

Introducción

Las zonas urbanas son cada vez más propensas a sufrir inundaciones debido al cambio climático, la creciente urbanización y el manejo inadecuado de las aguas pluviales [1,2]. Los pronósticos y sistemas de alerta temprana son decisivos para prevenir los daños causados por las inundaciones, ya que informan a la población y a las autoridades interesadas sobre riesgos inminentes con antelación y credibilidad [3]. Actualmente, la modelación numérica es el enfoque predominante para investigar el fenómeno de inundaciones en zonas

urbanas, ya que sus resultados permiten generar pronósticos y cartografía de inundaciones con bases científicas [4,5].

Los modelos numéricos de inundaciones son representaciones matemáticas que permiten a los usuarios predecir con cierto grado de exactitud hasta dónde podría fluir el agua de una inundación durante una tormenta [4]. No obstante, estos modelos requieren de una gran cantidad de datos de entrada como son la topografía del terreno, la cantidad máxima, el uso de suelo, la capacidad de infiltración del suelo, las redes de drenaje existentes, entre otros [6,7]. Además, algunos de los datos utilizados para la modelización se deben manipular y representar de manera virtual en forma de modelos digitales para garantizar la compatibilidad con los programas que trabajan con modelos numéricos. La falta de datos es una de las principales limitaciones actuales de la modelación de inundaciones en zonas urbanas a pequeña escala, por lo que es importante disponer de otros métodos alternativos para superar estas limitaciones [8].

Los datos topográficos y de uso de suelo son indispensables para el modelado numérico de inundaciones, ya que influyen directamente en los procesos hidrológicos e hidráulicos de escorrentía superficial e infiltración del agua [6]. En el caso de los datos topográficos, incluso cuando están disponibles en las zonas urbanas, existe la preocupación de que la precisión horizontal y vertical no sea lo suficientemente buena y existen pocos estudios que analicen la consistencia de dichos datos [8]. Por otra parte, los datos de uso de suelo no tienen una resolución espacial adecuada o la información que contienen está desactualizada, por lo cual no son adecuados para realizar estudios a pequeña escala en cuencas urbanas [9].

La calidad de los datos utilizados para la modelización de inundaciones debe actualizarse y mejorarse para superar estas limitaciones, y los esfuerzos deben enfocarse en la mejora de las técnicas de recopilación, procesamiento e integración de los conjuntos de datos, así como en aprovechar los avances tecnológicos recientes en detección remota y sistemas de información geográfica [6,10]. De esta manera, se podrá determinar el movimiento y alcance del agua en una inundación de manera más precisa, lo que aumentará la credibilidad de los pronósticos.

Algunos estudios han utilizado detección remota y técnicas de fotogrametría para obtener datos topográficos aplicados a modelación de inundaciones a pequeña escala. Por ejemplo, Zazo et al [11] evaluaron las incertidumbres verticales de los datos topográficos obtenidos con fotogrametría en un segmento de un río, y encontraron que pequeñas diferencias de 0.12 m en la exactitud de los puntos afectan de manera significativa los resultados de extensión de una inundación. En otro estudio, Langhammer et al. [12] encontraron que una limitación importante de la fotogrametría es que no permite la reconstrucción de las zonas sumergidas de un cauce, por lo que en estos casos es necesario utilizar otros dispositivos para completar la reconstrucción topográfica, como los receptores GNSS (acrónimo en inglés de Global Navigation Satellite System, que significa sistema global de navegación por satélite). En otro análisis, Jiang et al. [13] utilizaron los datos topográficos obtenidos en el desarrollo y validación de un modelo de inundaciones en la ciudad de Chenxi, China.

Aunque ya se han aplicado técnicas de fotogrametría para la obtención de modelos digitales, se requieren más investigaciones que ayuden a mejorar las técnicas de recopilación e integración de los datos en otras localidades. Ionescu et al [14] realizaron una investigación sobre productos fotogramétricos digitales obtenidos a partir de imágenes aéreas, pero los métodos utilizados y los resultados que se presentan son superficiales y limitados, ya que no se muestra de manera clara qué datos se obtuvieron y cómo se aplicaron a la identificación y delimitación de zonas de inundación. Por esta razón, la metodología que se propone en esta investigación busca procedimientos más factibles, de menor costo y que estén al alcance de cualquier usuario que trabaje con modelación de inundaciones, puesto que esto representa una aportación con respecto a los estudios previos. La disponibilidad de drones de bajo costo ha aumentado en los últimos años y se ha vuelto más viable y menos costoso utilizar técnicas de fotogrametría, por lo que es importante evaluar la capacidad de estos nuevos dispositivos. Además, algunos programas de procesamiento fotogramétrico ya

cuentan con capacidades para clasificar los puntos de las imágenes digitales de manera automática, lo cual puede aprovecharse para obtener datos de alta resolución sobre la cobertura del suelo.

El objetivo de este trabajo es contribuir al avance de los modelos numéricos de inundaciones en zonas urbanas mediante la mejora y actualización de las técnicas de recopilación y procesamiento de los datos topográficos y de uso de suelo. Como parte de la metodología, se llevó a cabo un levantamiento fotogramétrico de una zona urbana de la ciudad de Aguascalientes, utilizando un dron DJI Air 3. Posteriormente, se realizó el procesamiento de los datos con programas de fotogrametría y GIS (acrónimo en inglés de Geographic Information System, que significa sistema de información geográfica). Luego, se construyó un modelo numérico de inundaciones 2D de un tramo del arroyo de la zona urbana y se realizaron simulaciones para evaluar el desempeño de los datos topográficos obtenidos.

Fundamentos teóricos

Modelado numérico de inundaciones. Método que utiliza herramientas matemáticas computarizadas para predecir el comportamiento de un río o arroyo durante una tormenta e identificar áreas propensas a inundarse [4].

Simulaciones numéricas. El usuario debe distinguir la diferencia entre los conceptos de modelado y simulación numérica. El modelado numérico es el proceso de representación matemática de cómo fluye el agua en el arroyo, mientras que las simulaciones numéricas se refieren a la acción de calcular y resolver el modelo para obtener las soluciones en diferentes escenarios [15].

Modelo digital. Representación virtual de los datos o características de un objeto físico o terreno. Se utiliza para visualizar y manipular dichos datos en un ambiente digital [16].

Modelo digital de elevaciones (MDE). Se refiere a cualquier imagen digital en la cual los píxeles representan la topografía de un terreno, es decir, los datos geoespaciales están organizados en cuadrículas y su localización está dada en forma de coordenadas geodésicas o planas. [17,18].

Detección remota. Es el arte de obtener información sobre un objeto, área o terreno mediante el análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto bajo investigación. Un ejemplo de un dispositivo de detección remota son los sensores fotográficos [17].

Fotogrametría. Técnica utilizada para la construcción de modelos digitales de objetos físicos a partir de un conjunto de imágenes superpuestas tomadas desde diferentes posiciones utilizando una o más cámaras digitales en movimiento [19,20]. La superposición de las imágenes se caracteriza por un alto grado de empalme que normalmente es de 60 a 80% [19,20].

Sistema GNSS. La ubicación de los datos geoespaciales adquiridos con un dispositivo de detección remota se determina utilizando un GNSS [17]. Algunos de los sistemas GNSS más relevantes que existen en la actualidad y el país al que pertenecen se mencionan a continuación: GPS (acrónimo en inglés de Global Positioning System, que significa sistema de posicionamiento global) de Estados Unidos, GLONASS (acrónimo en inglés de Global Navigation Satellite System, que significa sistema global de navegación por satélite) de Rusia, Galileo de Europa, y BeiDou de China. Algunos drones, como el utilizado en este estudio, tienen integrados sistemas GNSS para el posicionamiento de los datos.

Sistemas GIS. Son sistemas informáticos que pueden manejar cualquier tipo de información sobre objetos o áreas que puedan referenciarse por ubicación geográfica [17]. Normalmente a los datos geoespaciales se les asigna un CRS (acrónimo en inglés de Coordinate Reference System, que significa sistema de coordenadas de referencia) para que puedan ser localizados espacialmente. Los sistemas GIS son capaces de manejar tanto datos de ubicación como datos de atributos sobre dichos objetos. Por ejemplo, en un terreno estos atributos pueden incluir información como el tipo de suelo, la textura, color, permeabilidad, cobertura de suelo, entre otros [17].

Adquisición de datos. Un dispositivo de detección remota (P. Ej. un sensor fotográfico) con GNSS integrado producirá imágenes con datos geospaciales asociados a cada píxel. Estos datos contienen información de ubicación (coordenadas de planimetría y altitud), información de atributos (valor de brillo, color) e información temporal (el tiempo en el que existen la ubicación y los atributos en el espacio real estudiado) [21].

Datos de referencia. Estos datos se utilizan para comparar y verificar la información extraída de los dispositivos de detección remota, ya que estos suelen contener errores dependiendo de la precisión del sensor [17]. La recopilación adecuada de datos de referencia puede resultar costosa y consumir tiempo y recursos, y en el caso de las imágenes aéreas los datos de referencia generalmente se obtienen instalando puntos de control del terreno [17].

Formatos de datos geospaciales. El procesamiento de datos mediante técnicas de fotogrametría y sistemas GIS implica el manejo de múltiples formatos para el almacenamiento de datos, tales como las nubes de puntos, el formato ráster, el formato shape, entre otros. El usuario debe estar familiarizado con el manejo adecuado de estos formatos para aplicar las técnicas de procesamiento.

Mapas de cobertura de suelo. El término cobertura de suelo se relaciona con el tipo de característica presente en la superficie de la Tierra. En zonas urbanas las edificaciones, las calles y avenidas, la vegetación, las áreas con suelo desnudo y el suelo agrícola son ejemplos de tipos de cobertura terrestre [17].

Detección remota. Es el arte de obtener información sobre un objeto, área o terreno mediante el análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto bajo investigación. Un ejemplo de un dispositivo de detección remota son los sensores fotográficos [17].

Materiales y métodos

Localización del área de estudio.

El área de estudio se localiza al norte de la ciudad de Aguascalientes, dentro de la cuenca Hacienda de San Nicolás, la cual tiene como punto de salida aguas abajo el río San Pedro. El área de estudio abarca una sección del arroyo La Hacienda, como se muestra en la Figura 1. El arroyo La Hacienda es un afluente temporal que transporta caudales mínimos o nulos la mayor parte del año, pero que presenta aumentos repentinos de flujo en respuesta a eventos máximos de precipitación. De manera recurrente, las fuertes lluvias han causado desbordamientos del flujo en algunas zonas del arroyo, provocando inundaciones repentinas y afectaciones en la infraestructura urbana de dicha cuenca [22].



FIGURA 1
Localización del área de estudio. La alineación con vegetación muestra la ubicación del tramo del arroyo La Hacienda

Fuente: Autoría propia.

Datos topográficos.

En algunas zonas prioritarias de México, tales como zonas urbanas y costeras, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ha generado modelos digitales de datos de topografía de libre acceso para la modelación numérica de inundaciones. La resolución espacial de los datos varía según la zona, pero actualmente el rango típico es de 50 a 1.0 metros de resolución. En el área de estudio, el MDE con mayor resolución que se encuentra disponible para realizar análisis a pequeña escala es el de 1.5 metros del año 2021. Este MDE se deriva de aplicar la tecnología LiDAR (acrónimo en inglés de Light Detection and Ranging, que significa detección y localización de puntos mediante luz láser), la cual es un método que obtiene mediciones directas del terreno mediante un dispositivo láser transportado desde un avión [23].

Características del dron y su cámara digital.

La captura de imágenes se realizó utilizando un dron DJI Air 3, mismo que cuenta con una cámara gran angular de 24 mm adecuada para capturar escenarios grandes, ya que cuenta con un campo de visión amplio y mantiene a su vez una distorsión mínima de los objetos. La cámara tiene un sensor CMOS (acrónimo en inglés de Complementary Metal Oxide Semiconductor, que significa semiconductor de óxido metálico complementario) de 1/1.3 pulgadas y toma fotos con una resolución de hasta 48 megapíxeles cuando se utiliza una relación de aspecto de 4:3 (8,064 x 6,048 píxeles). Los parámetros de dicha cámara son los siguientes: apertura fija de F1.7, sensibilidad a la luz ISO de 100 hasta 3200 y velocidad de obturación de 1/8000 seg hasta 2 seg [24]. Asimismo, el dron cuenta con un sistema GNSS para la ubicación de las imágenes, cuya



FIGURA 3

El recuadro rojo indica el grado de superposición frontal y lateral entre imágenes en el conjunto 1. Las figuras 3a y 3c muestran la superposición frontal (66 %), mientras que las figuras 3b y 3d muestran la superposición lateral (83 %).

Fuente: Autoría propia.

Procesamiento de datos geospaciales.

El procesamiento de los datos geospaciales procedentes de las imágenes se realizó utilizando el programa de fotogrametría Agisoft Metashape v.1.8.4 y los programas SAGA GIS v.7.8.2 y QGIS v.3.28.9. SAGA es el acrónimo en inglés de System for Automated Geoscientific Analyses que significa sistema para análisis geocientíficos automatizados, mientras que QGIS es el acrónimo en inglés de Quantum GIS que significa sistema de información geográfica Quantum. Asimismo, se utilizó el siguiente hardware: CPU Intel Core i7-8750H, RAM de 16 Gb con velocidad de 2667 MHz y GPU NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti de 4 Gb. Como se muestra en la Figura 4, el procesamiento de datos geospaciales se dividió en 3 etapas: alineación, modelo digital de elevaciones y modelo digital de cobertura del suelo (MCS).

Etapa 1: Alineación.

La alineación es la primera etapa del procesamiento fotogramétrico, y aquí el programa crea puntos de enlace con base en los puntos en común identificados entre todas las imágenes [25,26]. En este caso, se eligió el sistema de coordenadas de referencia México ITRF 2008 UTM Zona 13 EPSG 6368. Las siglas ITRF son el acrónimo en inglés de International Terrestrial Reference Frame, que significa Marco de Referencia Terrestre Internacional, mientras que UTM es el acrónimo en inglés de Universal Transverse Mercator, que significa sistema de coordenadas universal transversal de Mercator. El valor de altitud de todas las imágenes se cambió

por un valor de referencia, ya que el GNSS del dron tiene una mala precisión vertical. Para realizar el ajuste, se consideró como dato de referencia la altitud del punto de despegue indicado en la Figura 2 que tiene un valor de 1865.25 msnm. La fuente elegida para obtener el dato de referencia fue el MDE LiDAR de INEGI con resolución espacial de 1.5 m del año 2021. Es importante señalar que si no se realiza esta corrección se producirán errores de decenas de metros en los valores de altitud.

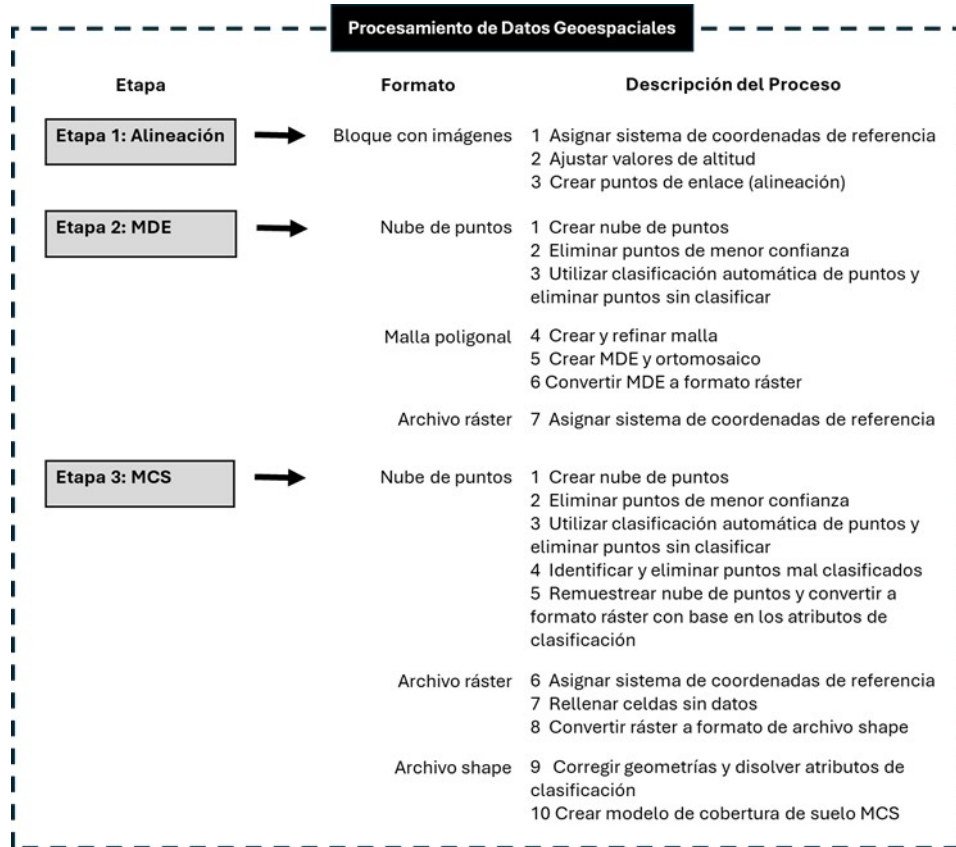


FIGURA 4
Resumen gráfico de la metodología implementada para crear los modelos digitales a partir del procesamiento de datos geoespaciales.
Fuente: Autoría propia.

Etapa 2: Modelo Digital de Elevaciones.

En la etapa 2 se creó un MDE. Primero se generó la nube densa de puntos. Luego, utilizando las opciones de filtrado, se eliminaron los puntos con menor confianza, particularmente los puntos con un nivel de confianza de 0 a 4, los cuales representaban el 67% de la nube densa. Este paso es importante, ya que los puntos de menor confianza contienen demasiado error y no representan las formas reales de los objetos. También se pueden eliminar los puntos perimetrales para hacer que la nube de puntos tenga una forma rectangular.

Para eliminar los puntos que corresponden a la vegetación (árboles y arbustos) se utilizaron las opciones de clasificación automática de puntos de Metashape. Un nivel de confianza de 0.20 resultó adecuado para realizar la clasificación, tal y como se muestra en la Figura 5b. De manera inevitable algunos puntos que en la realidad corresponden a la categoría de vegetación quedaron sin clasificar, pero se eliminaron de manera manual utilizando las herramientas de navegación y selección del programa, como puede verse en la Figura 5c.

Después de eliminar correctamente los puntos que corresponden a la vegetación, se generó la malla poligonal mostrada en la Figura 5d y se utilizó la opción de refinar malla para suavizar las superficies en

las que se eliminaron los puntos. Posteriormente se generaron los modelos digitales, es decir, el MDE y el ortomosaico, y se exportaron a formato ráster (GeoTIFF).

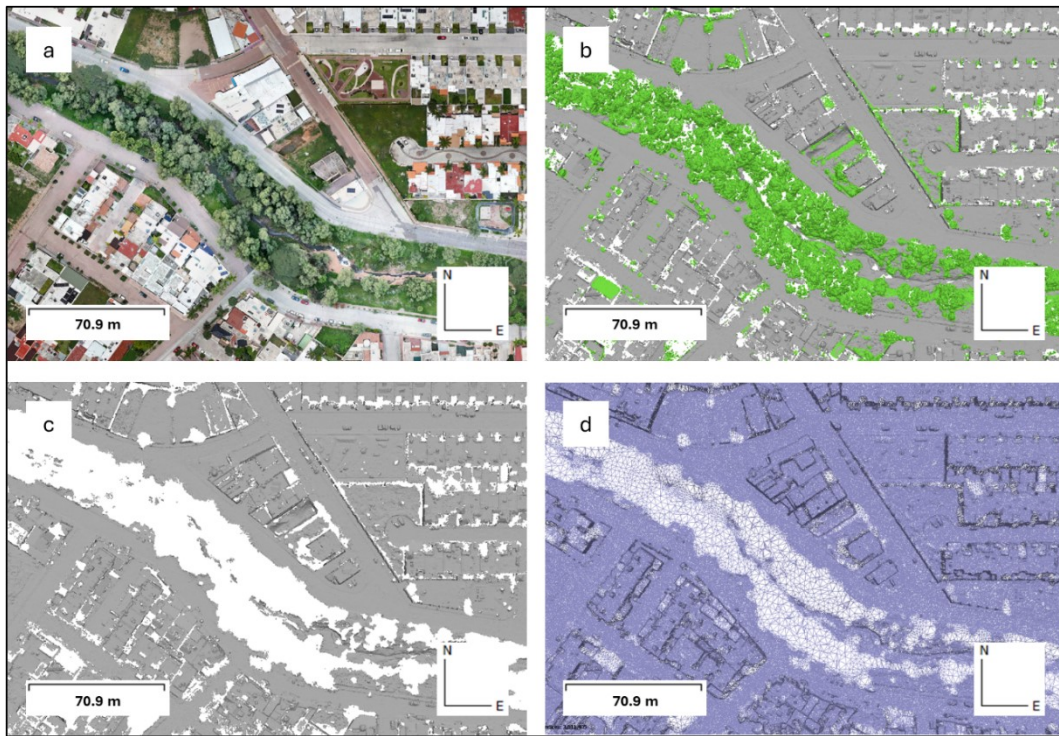


FIGURA 5

(a) Imagen de referencia de una sección del arroyo. (b) Nube de puntos. El color verde indica la clasificación de vegetación alta (c) Nube de puntos después de eliminar la vegetación alta. (d) Malla poligonal.

Fuente: Autoría propia.

Etapa 3: Modelo Digital de cobertura del suelo.

En la etapa 3 se creó un MCS. Primero, se creó una nube de puntos y se eliminaron los puntos de menor confianza y perimetrales, tal y como se menciona en la etapa 2. Luego, se realizó una clasificación automática de los puntos seleccionando las 6 clases disponibles y un nivel de confianza de 0.20. Los puntos que no pudieron ser reconocidos de manera automática por el algoritmo se eliminaron. Es importante mencionar que al utilizar la clasificación automática, algunos puntos de cada una de las clases quedan mal clasificados y tienen que ser eliminados de forma manual utilizando las opciones de filtrado y navegación. Por ejemplo, el cauce del arroyo debe contener únicamente puntos clasificados que correspondan únicamente a suelo y vegetación, y los demás deben eliminarse. Lo mismo debe hacerse en las otras zonas de la nube de puntos, como en las calles y en las edificaciones.

Para finalizar con el procesamiento fotogramétrico, se utilizó la opción de remuestrear para cambiar la resolución de la nube a 0.30 m y así reducir el número de puntos, ya que al procesar nubes muy densas en los sistemas GIS se requieren mayores capacidades computacionales. La nube de puntos se exportó en un formato ASPRS LAS, adecuado para el intercambio de datos de nubes de puntos 3D, y que tiene la ventaja de que se pueden exportar también los atributos de clasificación de los puntos.

Para continuar con el proceso se requiere que el usuario esté familiarizado con la utilización de sistemas GIS. Utilizando SAGA GIS se convirtió la nube de puntos a un archivo en formato ráster con extensión GeoTIFF y resolución de 0.30 m, con base en los atributos de clasificación. Después, el ráster se importó a QGIS y se asignó el sistema de coordenadas de referencia del proyecto. Como la malla ráster contiene celdas

sin datos tal y como se visualiza en la Figura 6b, estas se rellenaron utilizando las herramientas de geoprocreso y después se reclasificaron los puntos, lo cual resultó en la malla ráster de la Figura 6c. Posteriormente, el ráster se convirtió a un formato shape para lograr la compatibilidad con los programas que utilizan modelos numéricos de inundaciones, tal y como se muestra en la Figura 6d. Por último, se aplicaron los geoprocresos de “corregir geometrías” y “disolver atributos” para evitar errores en el modelo.

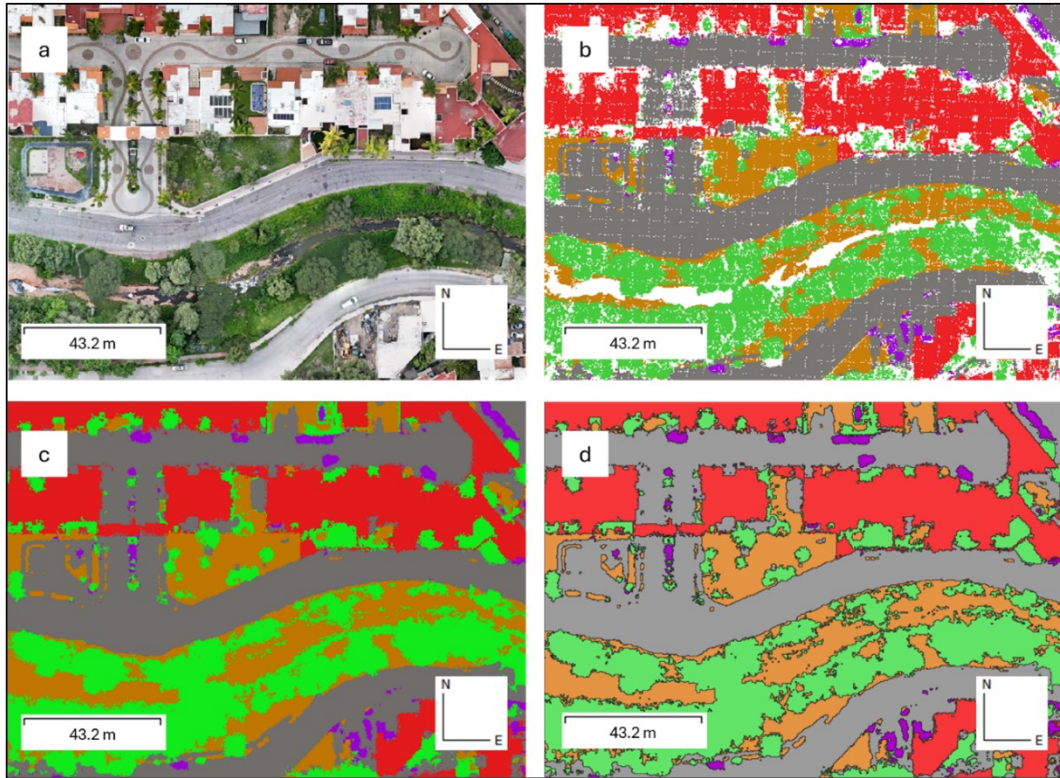


FIGURA 6

(a) Imagen de referencia de una sección del arroyo. (b) Archivo ráster con resolución de 0.30m. Los colores corresponden a las siguientes clasificaciones: blanco = celdas sin datos, café = suelo, verde = vegetación alta, rojo = edificios, gris = pavimentos, morado = objetos artificiales. (c) Archivo ráster con celdas sin datos rellenadas. (d) Archivo shape con resolución de 0.30 m.

Fuente: Autoría propia.

Modelo Numérico de Inundaciones.

Se construyó un modelo numérico en dos dimensiones (2D) de una zona específica del arroyo para observar las diferencias en los resultados de simulación al utilizar la topografía LiDAR de INEGI y la topografía obtenida con fotogrametría, utilizando el programa HEC-RAS v.6.5. HEC-RAS es el acrónimo en inglés de Hydrologic Engineering Center - River Analysis System, que significa Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Análisis de Ríos. Este programa es uno de los más utilizados para la modelación hidráulica de inundaciones y tiene la importante característica que es de código abierto, es decir, de acceso público sin licencia comercial [11].

El dominio del modelo es la geometría de la malla poligonal de la Figura 7, la cual tiene las siguientes características: resolución espacial de 1.0 m en el cauce del arroyo y 2.0 m en el resto del área, número de polígonos: 27,000. El dominio se refiere al área de cálculo que se necesita especificar para resolver el sistema físico de inundación. La resolución de la malla debe ser más fina en el cauce del arroyo, ya que esto puede

permitir determinar con mayor precisión los posibles desbordamientos de agua, lo cual es fundamental en este tipo de modelos.

El modelo requiere indicar condiciones de frontera de entrada y salida, es decir, se debe especificar dónde y qué cantidad de agua entrará al modelo, por cuánto tiempo y por donde podrá salir el agua [27]. Como se eligió un modelo de flujo transitorio (unsteady flow), la condición de frontera aguas arriba es el hidrograma de caudal que se muestra en la Figura 7. Un hidrograma es un gráfico que indica la variación del flujo de agua de un río o arroyo a lo largo del tiempo [28]. Por su parte, para la condición de frontera aguas abajo se utilizó la opción de profundidad normal, la cual es utilizada para representar condiciones reales en arroyos y requiere pocos datos de entrada [29].

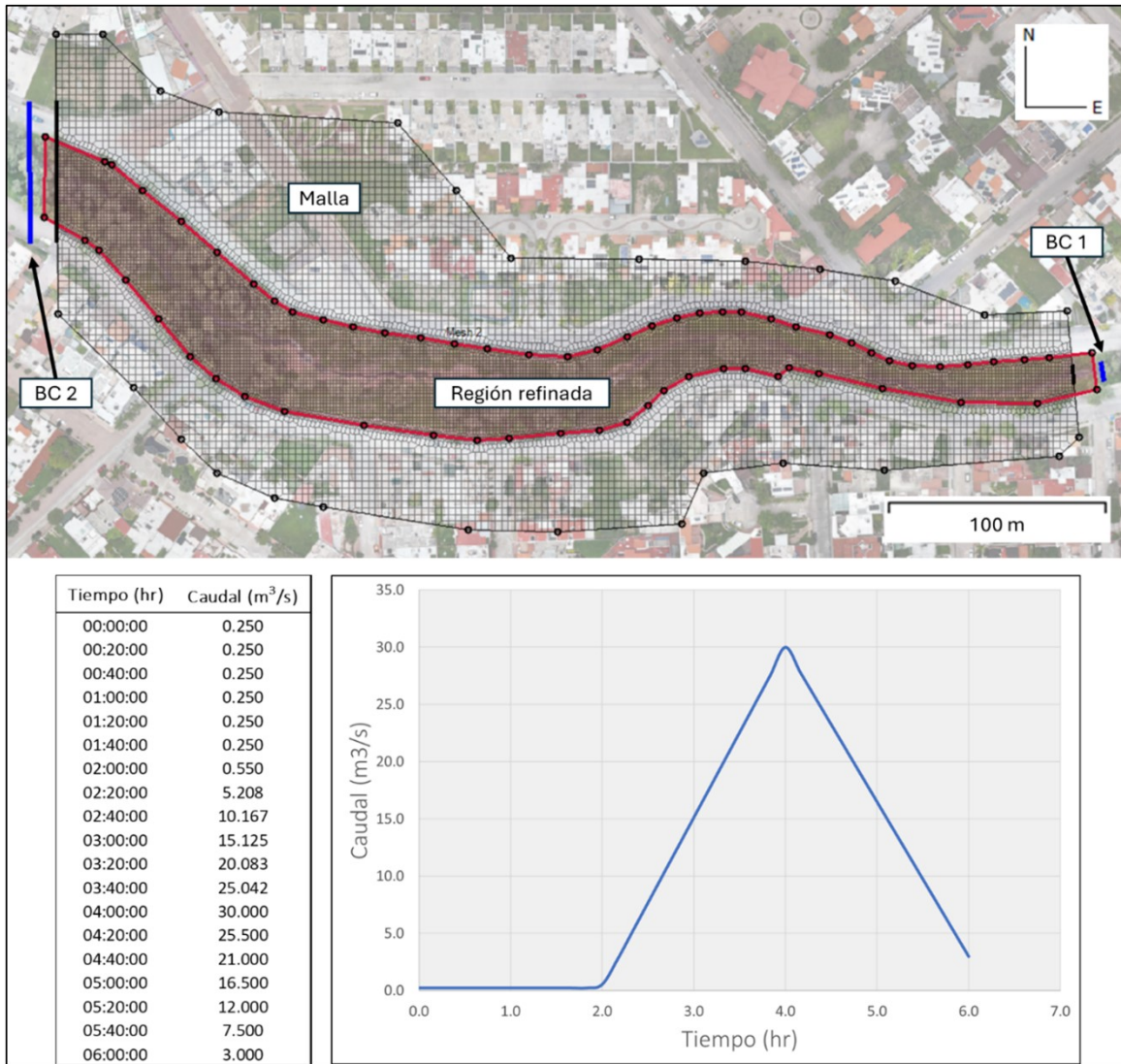


FIGURA 7

Geometría y condiciones de frontera del modelo de simulación numérica. BC 1 y BC 2 son las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, respectivamente.

Fuente: Autoría propia.

Resultados y discusión

Levantamiento fotogramétrico.

Durante el levantamiento fotogramétrico, la calidad de las imágenes fue mayor al realizar su captura con el dron en posición estática. Esto implica poder capturar un menor número de imágenes considerando la duración de cada batería. También se observó que aumentar el ISO en las imágenes permitió mejorar la nitidez del cauce en el arroyo, pero en zonas con muchos árboles se obtuvieron muy pocos puntos del suelo aunque se voló el dron a una altura baja de 80 metros. Langhammer et al. [12] también señalaron esta limitación, junto con la incapacidad de reconstruir las zonas sumergidas de los cuerpos de agua como las principales desventajas de los levantamientos con fotogrametría. En este caso, las zonas sumergidas no juegan un papel tan importante, ya que el arroyo de la zona estudiada se caracteriza por ser temporal, y la cantidad de agua que transporta es mínima la mayor parte del año. Además, realizar la captura de imágenes en condiciones de cielo nublado, o durante la salida o puesta del sol también mejoró la nitidez.

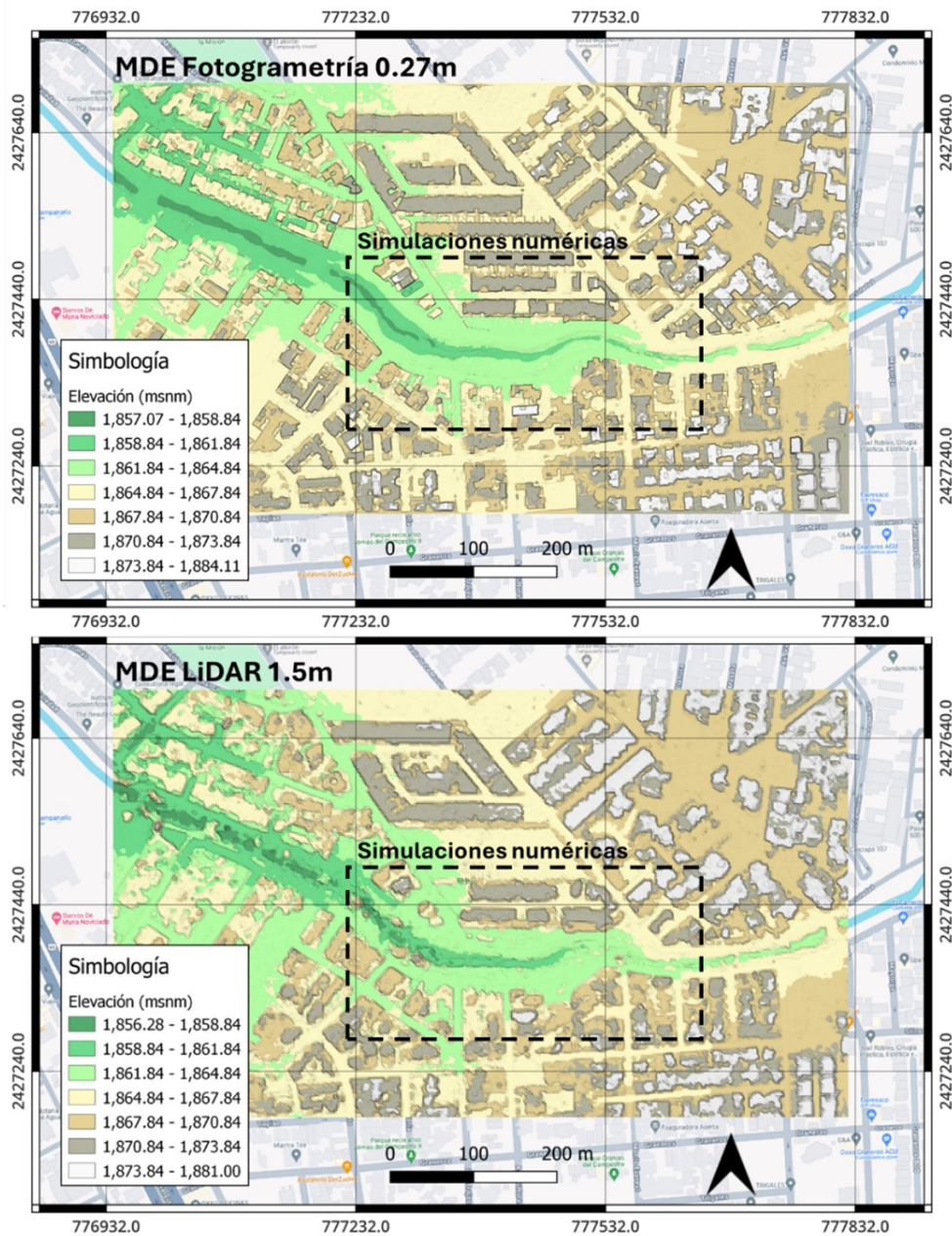


FIGURA 8

Arriba: MDE Fotogrametría 0.27 m. Abajo: MDE LiDAR INEGI 1.5 m. El área delimitada con líneas punteadas indica la ubicación del tramo donde se realizaron las simulaciones numéricas.

Fuente: Autoría propia.

Procesamiento de datos geoespaciales.

El programa Agisoft Metashape tiene una interfaz de usuario intuitiva, lo que permitió procesar los datos de una manera eficiente, además de que cuenta con información detallada de las funciones del programa. La desventaja de este programa es que es de uso comercial y requiere licencia, por lo que se tiene que considerar este costo adicional al aplicar esta metodología de obtención de datos.

Los componentes de hardware descritos en la sección metodológica de procesamiento de datos permitieron procesar aproximadamente 200 imágenes de 12 megapíxeles de resolución en un mismo bloque y generar

la nube de puntos con la opción más alta de densidad de puntos. Para trabajar con un número o resolución mayor de imágenes se requerirá contar con mayores capacidades informáticas.

Los modelos digitales obtenidos con el procesamiento de datos cubren un área aproximada de 45.27 ha y sus dimensiones son 882.41 m de largo por 513.02 m de ancho. En la Figura 8 se muestra el MDE generado con fotogrametría y el MDE LiDAR de INEGI. Con la captura de imágenes de 12 megapíxeles a una altura de 180 metros, se logró obtener una resolución de 0.27 metros aun cuando no se generó la nube de puntos con la opción más alta de densidad de puntos. La paleta de colores contiene rangos similares en ambos modelos, lo cual permite comparar y observar las diferencias en las elevaciones de ambos modelos. Existen diferencias de 0.79 m y 3.11 m en los valores máximos y mínimos, respectivamente, lo cual puede deberse a que sólo se utilizó un dato de referencia para la alineación de las imágenes y no se realizó la calibración con puntos de control del terreno.



FIGURA 9

Modelos digitales derivados del procesamiento de datos. Arriba: Ortomosaico con resolución de 0.05 m. Abajo: Modelo de cobertura de suelo con resolución de 0.30 m.

Fuente: Autoría propia.

Con el filtro automático de nube de puntos de Metashape se logró eliminar la vegetación, lo cual es un paso clave para la representación adecuada de la topografía real del sitio. No obstante, las limitaciones de la fotogrametría para capturar los puntos del terreno fueron evidentes en zonas con vegetación densa, tal y como se muestra en la Figura 5c. Tal y como señalan Langhammer et al. [12] la topografía del cauce se tendrá que obtener con otras técnicas adicionales a la fotogrametría, como son los receptores GNSS de alta precisión. La fusión de las técnicas de fotogrametría y los receptores GNSS puede permitir obtener una reconstrucción detallada del cauce, lo cual será muy importante a la hora de representar condiciones más reales de inundación.

Al comparar ambos MDEs, se pueden observar nuevas edificaciones en el levantamiento fotogramétrico, ya que el MDE LiDAR de INEGI es del año 2021 y no ha sido actualizado. Por esta razón, la resolución temporal es mejor al realizar levantamientos fotogramétricos, ya que las zonas urbanas son entornos que sufren constantes modificaciones.

La Figura 9 muestra el modelo digital de cobertura de suelo que se pudo obtener con el procesamiento. Dicho modelo tiene una resolución de 0.30 metros y como puede verse se logra capturar con un alto grado de

detalle las características del terreno. Se obtuvo una clasificación con 5 tipos de cobertura, tal y como se indica en la simbología. Hasta la fecha no existen otras técnicas para generar la cobertura de suelo con alta resolución. Las imágenes satelitales de libre acceso proporcionan mapas de cobertura de suelo con una resolución máxima de 10 metros, como en el caso de la misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea, pero esta resolución no es adecuada para estudios a pequeña escala, tal y como señalan Hill et al. [9] en su investigación.

Es importante subrayar que el desarrollo del método para obtener la cobertura de suelo requirió un conocimiento amplio de los sistemas GIS de código abierto. La ventaja de estos programas es que no tienen un costo de licencia por su uso, pero aprender a utilizarlos puede llevar bastante tiempo.

Simulaciones numéricas.

El usuario debe distinguir la diferencia entre los conceptos de modelado y simulación numérica. El modelado numérico es el proceso de representación matemática de cómo fluye el agua en el arroyo, mientras que las simulaciones numéricas se refieren a la acción de calcular y resolver el modelo para obtener las soluciones en diferentes escenarios [15].

Las simulaciones numéricas de la Figura 10 muestran una comparativa del desempeño de la topografía del MDE de fotogrametría y el MDE LiDAR de INEGI para representar las condiciones reales del arroyo. Para realizar la comparativa entre ambas topografías se consideraron escenarios idénticos, es decir, la misma geometría y condiciones de frontera que se indican en la Figura 7. En cada simulación, se muestra el alcance y la profundidad de inundación, así como el tiempo de simulación y el caudal de agua que entra. Los tonos de azul claro corresponden a profundidades o niveles de agua moderados de entre 0 a 0.50 m, mientras que los tonos de azul oscuro indican valores de inundación extremos mayores a 0.50 m.

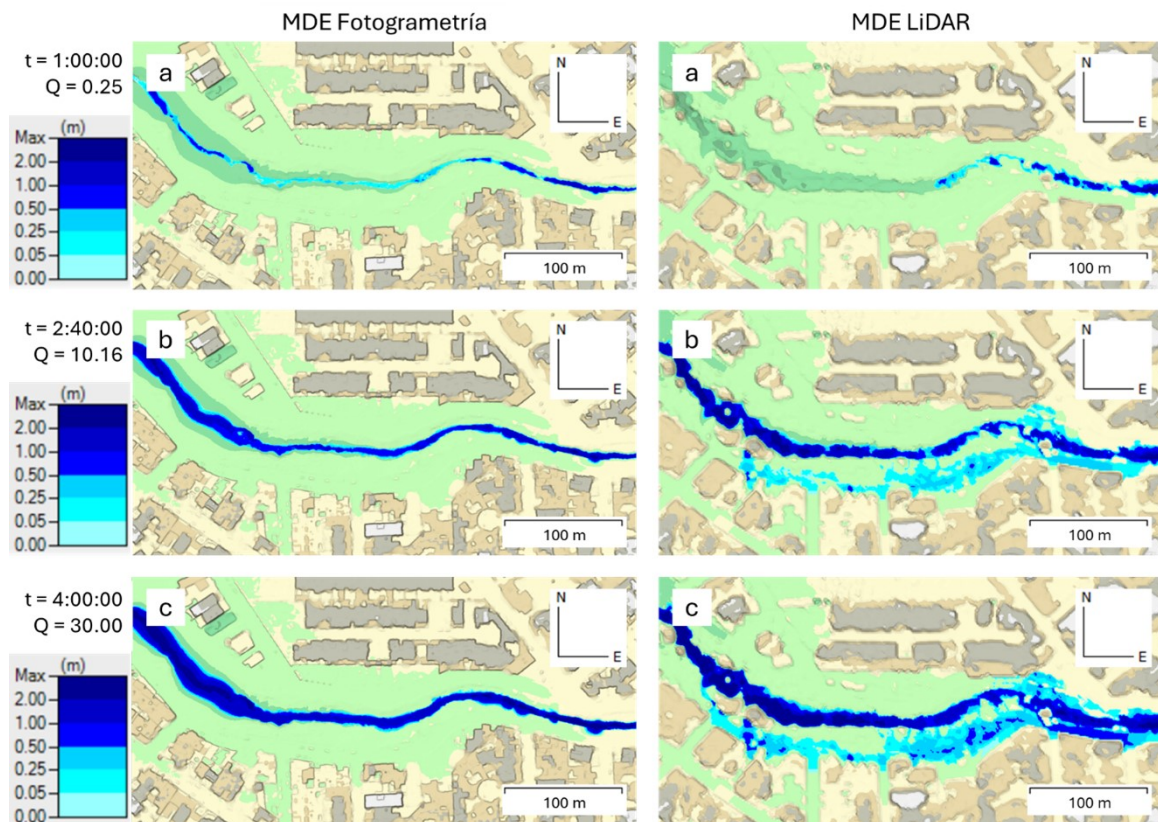


FIGURA 10

Profundidades de inundación determinadas mediante simulaciones numéricas en HEC-RAS para los MDEs obtenidos de fotogrametría y LiDAR. En cada fila, t indica el tiempo de simulación en horas, minutos, segundos, y Q es el caudal en m^3/s .

Fuente: Autoría propia.

Las simulaciones comienzan en un tiempo cero ($t = 00:00:00$), considerando un escenario en el que el arroyo se encuentra totalmente seco. En la Figura 13a puede verse que el alcance del agua es distinto en ambos modelos después de que transcurrió 1 hora y se mantuvo un caudal constante de $0.25 m^3/s$, ya que en MDE Fotogrametría el agua ya ha recorrido todo el cauce y ha llegado hasta la salida, mientras que en MDE LiDAR el agua apenas ha recorrido un tramo del cauce. Esto se debe a las diferencias topográficas que existen en ambos modelos y a que en MDE LiDAR existen depresiones u hoyos de mayor profundidad que tardan más tiempo en llenarse, lo cual retarda el avance del agua.

Los resultados muestran que en el MDE Fotogrametría tiene un mejor desempeño, ya que al simular caudales de alrededor de $10 m^3/s$ no deberían de existir desbordamientos en el arroyo, como ocurre en el caso de MDE LiDAR en la Figura 10b. Los desbordamientos prematuros son consecuencia de irregularidades o imprecisiones en la topografía del cauce en el MDE LiDAR, las cuales provocan cambios bruscos de dirección en el flujo de agua que no existen en condiciones reales. Asimismo, la Figura 10c muestra el tiempo donde se alcanza el pico del hidrograma. El MDE Fotogrametría sigue indicando que no habrá desbordamientos, mientras que en MDE LiDAR se pueden observar áreas inundadas con profundidades mayores a $0.5 m$. Al observar el MDE LiDAR también se pueden observar algunos puntos aislados con profundidades mayores a $0.5 m$ en zonas que corresponden a calles pavimentadas, lo cual sugiere que se crearon irregularidades e imprecisiones a pesar de que dicho modelo fue creado utilizando una técnica de escaneo láser. Estas depresiones en el terreno pueden afectar los resultados al determinar el alcance de una inundación, por lo que se deben analizar a detalle.

Conclusiones

Las técnicas de obtención de datos para la modelación de inundaciones aprovechando los nuevos dispositivos de detección remota y los sistemas GIS no están bien documentadas, por lo que este estudio presenta un procedimiento actualizado para obtener datos de topografía y uso de suelo, utilizando drones y técnicas de fotogrametría y modelado más accesibles y de relativo bajo costo.

Los datos de uso de suelo de alta resolución que se pueden obtener mediante las técnicas de este estudio pueden ayudar a superar la escasez de datos en zonas urbanas. Estos datos son importantes para el desarrollo y calibración de los modelos de inundaciones.

La presencia de vegetación alta (árboles y arbustos) dificulta la obtención de los puntos del terreno que definen la forma de los cauces fluviales, ya que los sensores de las cámaras digitales no tienen la capacidad de atravesar el follaje. Esta sigue siendo una de las limitaciones más importantes del uso de técnicas de fotogrametría para la obtención de datos topográficos.

Las simulaciones numéricas muestran que la topografía LiDAR de INEGI presenta limitaciones importantes al representar la forma del arroyo, por lo que para realizar estudios a escala pequeña se requieren otras técnicas alternativas que permitan obtener con mayor consistencia y grado de detalle la topografía de elementos clave de las zonas urbanas, como son los cauces principales, los puentes y otras estructuras.

La investigación futura debe enfocarse en aplicar la técnica propuesta en este estudio instalando puntos de control del terreno que proporcionen datos de referencia para comparar y verificar la exactitud de los datos topográficos extraídos. Además, se deben explorar otras técnicas adicionales para superar las limitaciones de la fotogrametría, como el uso de receptores GNSS de alta precisión para capturar la topografía del arroyo en zonas con vegetación densa. La fusión de estas técnicas permitirá obtener una topografía mucho más consistente y precisa para los modelos numéricos de inundaciones.

Referencias Bibliográficas

- [1] World Bank “Decoding urban flood risk and democratizing risk assessment”, <https://blogs.worldbank.org/en/sustainablecities>, visitado el 20 de octubre de 2024.
- [2] Le, H. N., Vo, D. P., Nguyen, Q. D., Nguyen, B. Q., y Nguyen, C. C., (2024), Assessing the impacts of urbanization and climate change on urban drainage system, *River*, volume 3, issue 2, p. 181-190.
- [3] World Meteorological Organization “Flood Forecasting Initiative”, <https://community.wmo.int/en>, visitado el 20 de octubre de 2024.
- [4] Luo, P., Luo, M., Li, F., Qi, X., Huo, A., Wang, Z., He, B., Takara, K., Nover D. y Wang, Y., (2022), Urban flood numerical simulation: Research, methods and future perspectives, *Environmental Modelling & Software*, volume 156, 105478.
- [5] Jodhani, K. H., Patel, D., y Madhavan, N., (2023), A review on analysis of flood modelling using different numerical models, *Materials Today: Proceedings*, volume 80, p. 3867-3876.
- [6] Kumar, V., Sharma, K. V., Caloiero, T., Mehta, D. J., y Singh, K., (2023), Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances, *Hydrology*, volume 10, issue 7, 141.
- [7] Ren, M., Zhang, Z., Zhang, J., y Mora, L., (2022), Understanding the Use of Heterogenous Data in Tackling Urban Flooding: An Integrative Literature Review, *Water*, volume 14, 2160.
- [8] Nkwunonwo, U. C., Whitworth, M., y Baily, B., (2020), A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries, *Scientific African*, volume 7, e00269.
- [9] Hill, B., Liang, Q., Boshier, L., Chen, H., y Nicholson, A., (2023), A systematic review of natural flood management modelling: Approaches, limitations, and potential solutions, *Journal of Flood Risk Management*, volume 16, issue 3, e12899.

- [10] Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., y Han, H., (2021), A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies, *Natural Hazards*, volume 108, issue 1, p. 31–62.
- [11] Zazo, S., Rodríguez-González, P., Molina, J.-L., González-Aguilera, D., Agudelo-Ruiz, C. A., y Hernández-López, D., (2018), Flood Hazard Assessment Supported by Reduced Cost Aerial Precision Photogrammetry, *Remote Sensing*, volume 10, issue 10, 1566.
- [12] Langhammer, J., Bernsteinová, J., y Miřijovský, J., (2017), Building a High-Precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring, *Water*, volume 9, issue 11, 861.
- [13] Jiang, C., Kang, Y., Qu, K., Long, Y., Ma, Y., y Yan, S., (2023), Towards a high-resolution modelling scheme for local-scale urban flood risk assessment based on digital aerial photogrammetry, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, volume 17, issue 1.
- [14] Ionescu, I., Badea, D., y Dogaru, M., (2008), Digital photogrammetric products from aerial images, used for identifying and delimiting flood risk areas, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume 37, Part B7.
- [15] Allaire, G., (2007), Numerical analysis and optimization: An introduction to mathematical modelling and numerical simulation, *Oxford Academic*, p. 1-29.
- [16] Oxford Insights “Exploring the concepts of digital twin, digital shadow, and digital model”, <https://oxfordinsights.com/insights>, visitado el 13 de octubre de 2024.
- [17] Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., y Chipman, J. W. (2015) *Remote Sensing and Image Interpretation, seventh edition*, John Wiley & Sons (USA).
- [18] Zhou, Q., (2017), Digital elevation model and digital surface model in *The International Encyclopedia of Geography*, John Wiley & Sons (USA).
- [19] Iheaturu, C., Okolie, C., Ayodele, E., Egogo-Stanley, A., Musa, S., y Speranza, C.I., (2022), A simplified structure-from-motion photogrammetry approach for urban development analysis, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, volume 28, 100850.
- [20] Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., y Reynolds J.M., (2012), Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, volume 179, p. 300-314.
- [21] IBM “What is geospatial data?”, <https://www.ibm.com/topics/geospatial-data>, visitado el 26 de octubre de 2024.
- [22] El Sol del Centro “Proyectan sistema urbano de drenaje sustentable”, <https://oem.com.mx/elsoldelcentro>, visitado el 13 de octubre de 2024.
- [23] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) “Modelos Digitales de Elevación - Descripción”, <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/relieve/continental>, visitado el 26 de agosto del 2024.
- [24] DJI (2022) *DJI Mini 3 User Manual v1.0.*, DJI Sciences and Technologies Ltd (China).
- [25] Agisoft (2022) *Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.8.*, Agisoft LLC (USA).
- [26] Polat, N., Memduhoglu, A. y Kaya, Y., (2023), Evaluating the ground point classification performance of Agisoft Metashape Software, *Intercontinental Geoinformation Days*, volume 7, p. 187-190.
- [27] United States Geological Survey (USGS) “Boundary conditions”, <https://water.usgs.gov/nrp>, visitado el 6 de octubre de 2024
- [28] Wohl, E., (2013), Streams in *Encyclopedia of Inland Waters*, p. 756-765.
- [29] HEC-RAS Hydraulic Reference Manual “Downstream Boundary Condition Considerations”, <https://www.hec.usace.army.mil>, visitado el 6 de octubre de 2024.



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94482151004>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Carlos Ignacio Vizcaíno-López, Miguel Ángel Soto-Zamora,
Martín Hernández-Marín

**Modelos Digitales para el Modelado Numérico de
Inundaciones en Zonas Urbanas Obtenidos con Técnicas
de Fotogrametría y GIS**

**Digital Models for Numerical Modelling of Floods in Urban
Areas Obtained with Photogrammetry and GIS
Techniques**

Conciencia Tecnológica

núm. 68, p. 33 - 50, 2024

Instituto Tecnológico de Aguascalientes,

ISSN: 1405-5597