The background of the entire page is a topographic map with white contour lines on a dark blue background. The lines represent elevation and are more densely packed in some areas, indicating steeper terrain.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS DE CAPTURA DE DATOS TOPOGRÁFICOS, APLICADOS EN MODELACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL DE FLUJO EN SUPERFICIE, ESTUDIO DE CASO BARRIO GAITÁN, TUNJA (BOYACÁ)

Comparative analysis of topographic data capture methodologies, applied in two-dimensional hydrodynamic modeling of surface flow, case study Gaitán neighborhood, city of Tunja (Boyacá).

Sotelo M., Jhonssua Alejandro

Universidad Santo Tomás,

jhonssua.sotelo@usantoto.edu.co

Ingeniero Civil

Resumen

La urbanización ha sufrido un crecimiento de manera exponencial en los últimos años, esto ha permitido que se formen cada vez cuencas más impermeabilizadas debido al avance social y de infraestructura del hombre y para esto, lo primordial es la construcción de vías y calles urbanas. Es importante tener en cuenta que las vías urbanas no se diseñan normalmente para conducir el agua superficial en grandes cantidades, es por esto que, factores como: la topografía, la transformación lluvia – escorrentía, y su relación con las inundaciones, patologías en los pavimentos y la seguridad del peatón son criterios fuertemente evidenciados para usar las herramientas tecnológicas y modelos hidrodinámicos como *IBER*. Gracias al avance tecnológico y el uso de herramientas computacionales, podemos tomar decisiones que contribuyan a la adecuada planificación de los centros urbanos, inversiones en pavimentación de vías, el modelamiento hidrodinámico de flujo en superficie juega un papel vital para determinar las problemáticas asociadas a las velocidades y láminas del flujo, producto de la impermeabilización de cuencas naturales, produciendo problemas de contaminación y respuesta hidrológica rápida.

Palabras clave: Hidrodinámica, IBER 3.2, Inundación, Drenaje, Vía.

Abstract

Urbanization has experienced exponential growth in recent years, this has allowed the formation of increasingly impermeable basins due to man's social progress and infrastructure, and for this, the main thing is the construction of urban roads and streets. It is important to take into account that urban roads are not normally designed to carry surface water in large quantities, which is why factors such as: topography, rain-runoff transformation, and its relationship with flooding, pavement pathologies and pedestrian safety are strongly evidenced criteria for using technological tools and hydrodynamic models such as *IBER*. Thanks to technological advances and the use of computer tools, we can make decisions that contribute to the proper planning of urban centers, investments in road paving, hydrodynamic modeling of surface flow plays a vital role in determining the problems associated with speeds. and flow sheets, product of the waterproofing of natural basins, causing pollution problems and rapid hydrological response.

Keywords: Hydrodynamics, IBER 3.2, Flooding, Drainage, Way.

Para citar este artículo: SOTELO M. Jhonssua Alejandro. "Análisis comparativo de metodologías de captura de datos topográficos, aplicados en modelación hidrodinámica bidimensional de flujo en superficie, estudio de caso Barrio Gaitán, ciudad de Tunja – Boyacá." In *L'Esprit Ingenieux*. Vol. 16-1, p.p X-X.

1. Introducción

En la actualidad, existen diversas tecnologías y grandes avances de la ciencia que han permitido ser cada vez más robustas y rápidas, esto ha permitido en la ingeniería dar solución a problemas cada vez más complejos y con una eficiencia cada vez mayor.

La ingeniería en cierta manera, es conocer e interpretar el comportamiento de la naturaleza para así poder beneficiar al ser humano al servicio de este. Pero en el transcurso del tiempo, nos hemos dado cuenta que, para poder usar todo lo que la naturaleza nos brinda, debemos mantener el equilibrio propio de la misma. Así como la tecnología ayuda a tener herramientas más robustas, es necesario que, como seres humanos, le dediquemos mayor raciocinio al comportamiento de estos fenómenos para dar soluciones más sostenibles con el tiempo. Tener equipos cada vez más avanzados para la disminución de incertidumbre en la información, ha sido prioridad dar mejora continua a la toma de datos (Cevilla, 1993).

Especialmente en los datos información topográfica, la cual busca cada vez representar mejor el entorno en la que estamos y la que es base para muchos de los proyectos en ingeniería, ya que el suelo, es el lugar donde asentamos muchos de nuestros proyectos para el desarrollo de la sociedad. Además, de la elección de la precisión necesaria para cada uno de los proyectos de construcción, no todos tienen la misma prioridad de precisión y este es un indicador de costos, por lo tanto, es necesario tener claro cuales la importancia en los procesos y que incidencia tendrá el mismo (Wolf & Ghilani, 2016).

Herramientas como *IBER*, para el área de aguas nos permiten mostrar con mayor facilidad el comportamiento del agua en las diversas estructuras que el ser humano ha construido, pero debemos ser conscientes de los datos que ingresamos y la calidad de los mismos. Uno de los mayores parámetros de mayor influencia dentro de los modelos *IBER*, es justamente la calidad información topográfica (Caro-Camargo & Bayona-Romero, 2018), en donde es de vital importancia contar con una información detallada del terreno del que se llevará a cabo el análisis, ya que determina por donde se dirige el flujo de agua y nos permite tomar decisiones importantes en futuros proyectos de infraestructura humana.

2. Levantamiento topográfico

En la actualidad, existen diferentes y muy novedosas herramientas que permite que la toma de datos topográficos se dé cada vez con mayor precisión, permitiendo que los estudios hidrodinámicos presenten mayor calidad en sus resultados y mucho más acercados a la realidad.

La ingeniería en cierta manera cada vez busca analizar el comportamiento de los fenómenos naturales para así mismo proyectar de manera positiva a la infraestructura que se pretende instaurar. Todo esto con el fin de que los proyectos de construcción tengan mayor relevancia en el tiempo y así, dar mayor garantía a las obras y optimizar los recursos, dando una mejor calidad de vida de los habitantes en un entorno tanto rural como urbano.

Para la recopilación de la información se es necesario 3 métodos de toma de datos topográficos, que, según su necesidad, fin e importancia del estudio, es la precisión de la misma. Estos 3 métodos principales se determinan como:

2.1. Recopilación y procesamiento por medio de sistemas RTK

En la actualidad se han presentado varios avances tecnológicos en los procesos de medición, uno de ellos es la técnica “*Real Time Kinematic*” – de ahora en adelante *RTK*- o en español, Cinemático en Tiempo Real, el cual es un avance sobre los equipos *GPS*. La técnica *RTK* permite dar posicionamiento preciso en tiempo real, es decir, obtención de coordenadas en el instante de la medición, dando la posibilidad de enlace entre los receptores *GPS* y el procesamiento de datos en un mismo equipo (Nicolás, 2006).

En este trabajo investigativo, se establecieron 3 puntos de control con el sistema *RTK*, estos fueron trasladados del mojón IGAC PLA15001009 con coordenadas en Sistema de Referencia MAGNA SIRGAS Origen Bogotá (cf. Tabla 1) ubicado en la glorieta norte sobre la avenida oriental junto al llamado Monumento Club Leones.

Tabla 1. Coordenadas de amarre mojón tipo IGAC.

COORDENADAS MOJÓN TIPO IGAC			
NOMBRE	NORTE (m)	ESTE (m)	ELEVACION (m)
PLA15001009	1104854,972	1079812,268	2696,437

Estos puntos se trasladaron teniendo en cuenta el mojón de amarre como base y los detalles se tomaron con el Rover del equipo dando así el resultado de los puntos de control necesarios para el siguiente paso de la toma de datos topográficos. Obteniendo así las siguientes coordenadas:

Tabla 2. Coordenadas puntos de control obtenidas con *RTK*.

COORDENADAS OBTENIDAS CON RTK			
NOMBRE	NORTE (m)	ESTE (m)	ELEVACIÓN (m)
PTO1	1105047,437	1079504,572	2695,496
PTO2	1105060,223	1079382,939	2707,589
PTO3	1105061,467	1079215,278	2731,251

Con el fin de materializar los puntos se fijaron puntillas en el concreto con el fin de ser usados en los dos métodos de toma de datos topográficos, además estos son esenciales ya que es la base para realizar la comparación entre un escenario de datos con topografía tradicional por medio de estación total y escenario por fotogrametría por medio de drones.

2.1. Escenario con topografía tradicional

En la actual investigación se dio uso de las coordenadas establecidas como coordenadas de puntos de control tomados con sistema *RTK* (cf. Tabla 2) y se hizo un levantamiento topográfico por medio de una poligonal abierta con control. La vía por la cual se realizó el levantamiento tiene altos niveles de pendiente y es por esto que el punto de inicio es diferente al punto de salida, método por el cual, se vio necesario para este caso de estudio.

En la Ilustración 1, se muestra la posición de los 3 puntos de control y se realiza un detalle de abscisado por lo menos cada 5 metros de distancia, en donde se tomaron como detalle: bordes de las viviendas, borde superior e inferior de los dos andenes laterales, cunetas (en caso que esta se presentara), el eje de la vía, tapas de pozos de inspección en el centro del elemento, esquinas de sumideros tanto laterales como transversales existentes, reductores de velocidad parabólicos presentes en la vía y zonas verdes.



Ilustración 1. Puntos de control distribuidos en la vía a analizar.

El levantamiento topográfico de la zona de estudio se realizó con una estación total *SOUTH NTS 362 R10*, obteniendo una nube de puntos con 556 puntos cada uno con coordenadas finales en este, norte, elevación y descripción en el sistema de referencia Nacional *MAGNA SIRGAS – Origen Bogotá* (cf. Ilustración 1).

Ajuste realizado al levantamiento topográfico: se realizó por el método de Crandall, para esto se calcularon los 3 parámetros iniciales para saber las condiciones finales y la calidad del levantamiento topográfico, estos son el error de la poligonal, el perímetro lineal y el grado de precisión. Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. Errores presentados en la poligonal abierta (Método topografía tradicional).

	ERROR NORTE	ERROR ESTE	ERROR
D3 - D2	0,073	0,083	-0,146
D2 - D1	0,027	-0,025	0,067

Tabla 4. Errores presentados en las proyecciones meridiana y paralelas en la toma de datos topográficos.

δ_{PP}	δ_{PM}
0,1	0,058

Tabla 5. Parámetros para establecer el grado de precisión de la poligonal abierta.

ERROR POLIGONAL	0,0368
PERÍMETRO LINEAL	289,875
GRADO DE PRECISIÓN	7877

Tabla 6. Proyecciones meridianas y paralelas puntos de control poligonal abierta.

PUNTO	PROYECCIÓN PARALELA	PROYECCIÓN MERIDIANA	DH
D2	167,734	-1,161	167,738
D1	121,533	-12,844	122,210

Tabla 7. Coeficientes para la compensación de errores poligonales por el método de Crandall.

	COEFICIENTE L^2	COEFICIENTE D^2	COEFICIENTE LD	COMPENSACIÓN MERIDIANA	COMPENSACIÓN PARALELA
D2	0,000080	1,677300	-0,012	0,001	-0,077
D1	0,013499	1,208599	-0,128	-0,007	0,066
SUMA	0,013579	2,885899	-0,13933		

Tabla 8. Parámetros de corrección por el método de ajuste de poligonales de Crandall.

COEFICIENTE A	-1,015625488
COEFICIENTE B	-0,052874756

Software para la digitalización de la información: existen diferentes tipos de *software* para la generación y digitalización de *Modelos Digitales de Terreno*, el detalle y la precisión, dependen en gran medida de la capacidad tecnológica y el procesamiento que tenga el ordenador en el cual se va a procesar la información.

Para el caso de la investigación actual, se procesó la información en el *Software CIVIL CAD 3D* y se hizo identificación de características de la vía como lo son: el eje de vía, bordillos, paramento de la calle, cruces de calles, sumideros, puntos eléctricos materializados con postes de luz y cunetas de la vía. Como resultado se obtuvo una nube de puntos con la cual se realizó el detalle en planos con escala en planta 1:125 y perfil 1:25. (Cf. Anexo 2. Plano topográfico de la zona de estudio con el método tradicional).

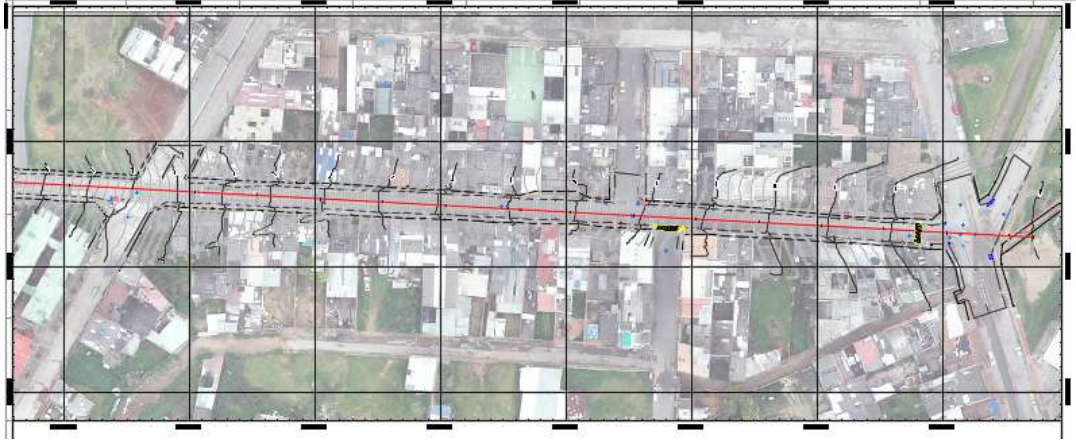


Ilustración 2. Plano topográfico de la zona.

2.2. Escenario de fotogrametría con drones

La fotogrametría es uno de los métodos que ha venido avanzando con más fuerza en la obtención de datos para la representación del terreno, esta técnica cuyo objetivo es el de determinar las dimensiones y posición de objetos a través de imágenes fotográficas obtenidas por *Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT)*. Esto se consigue a partir de la intersección de dos o más fotografías (Zona de solape), por medio de las cuales, se pueden obtener modelos digitales de terreno que pueden ser usados para diseños de vías (cf. Imagen 8), análisis hidrológicos, elaboración de mapas cartográficos, etc.

Pese a que es una técnica que no es considerada nueva, ya que se estiman sus inicios a mediados del siglo XIX, sus aplicaciones en topografía son relativamente recientes. Ya que si se trabaja con una sola fotografía se puede obtener información en primera instancia de la geometría del objeto (Dimensiones, rotación y forma). Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas que utiliza instrumentos de percepción remota y fotografías junto con puntos de referencia en el terreno.

Existen diferentes tipos de softwares para el procesamiento de la información fotogramétrica, de la cual se obtiene una orto fotografía de alta resolución referenciada en un sistema de referencia internacional o nacional, la cual permite hacer mediciones y cálculos de volumen. Además, permite exportar esta información a programas asistidos a computador y de procesamiento geográfico, mallas 3D, líneas y curvas, y nubes georreferenciadas como lo es *AutoCAD*, *Civil3D*, *ArcGIS*, etc. (Calero *et al.*, 2019).

Para la investigación actual se recopiló la información por medio de fotogrametría aérea con drones, los cuales fueron amarrados al sistema de puntos tomados con sistema RTK como principal eje de referencia (cf. Ilustración 1), estos además de la materialización con la que se contaba en campo, también se señalaron por medio de pintura blanca y roja para tener mejor visibilidad a la hora de realizar el procesamiento de datos en oficina.

2.3. Toma de datos con dron.

Para la toma de datos por medio de dron, se realizaron 3 vuelos aéreos con el *Dron DJI PHANTOM 4 PRO V2* sobre el área de interés con los siguientes parámetros: programa de captura *PIX4D*, altura del vuelo 50 m, *GSD 5 CM/PX*, Velocidad Rápida, Angulo cámara 90° y 70° vertical, Sobre posición 80%, se tomaron 680 fotografías Aéreas de alta resolución de las cuales se pudieron obtener los puntos necesarios para desarrollar modelos como:

Modelo Digital de Superficie (MDS).

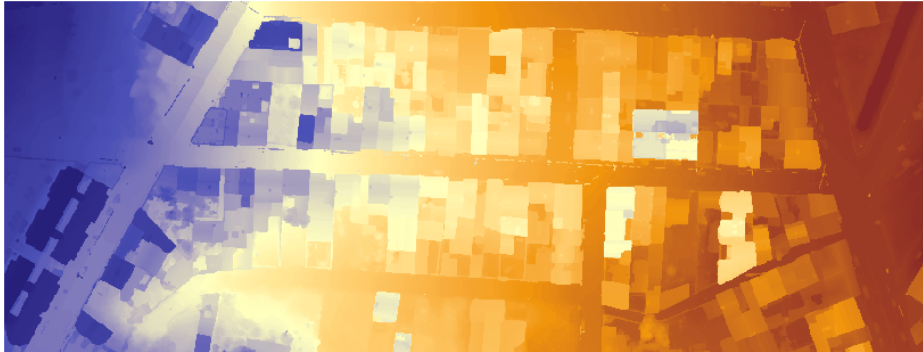


Ilustración 3. *MDS* obtenido con fotogrametría por dron.

Modelo Digital de Terreno (MDT).

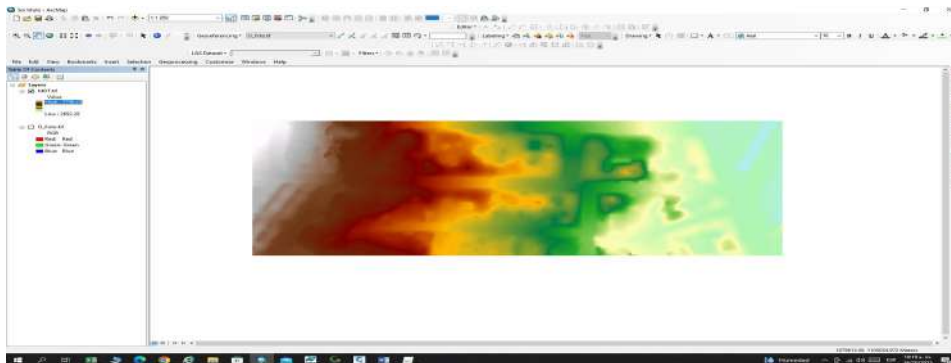


Ilustración 4. *MDT* obtenido con fotogrametría por dron.

Triangulated Irregular Network (TIN) Fotogrametría

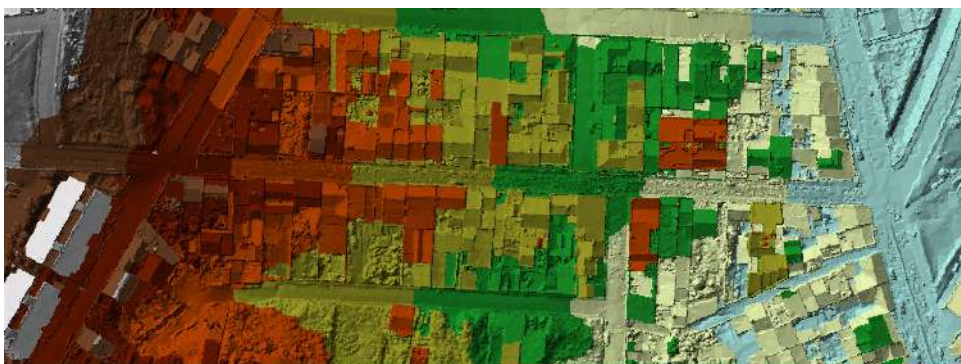


Ilustración 5. *TIN* obtenido con fotogrametría por dron.

Además, se estipularon los siguientes criterios de calidad y lidar pasivo en los resultados fotogramétricos:

Tabla 9 Criterios de calidad y LIDAR pasivo en datos fotogramétricos.

Imágenes procesadas	56404
GSD (Distancia de muestreo del suelo)	2,52 cm/px
Área de cobertura	0,131 km ²

3. Caracterización física e hidrología base de cuenca urbana

Para la entrada de valores necesarios para la simulación hidrodinámica, es necesario tener diversos parámetros que permiten obtener valores aterrizados a la realidad:

3.1. Características de las redes viales

Estas son definidas como un grupo de vías con longitudes variables, dentro de estas, desde el punto hidráulico se tiene en cuenta dos tipos de elementos: las calles y los cruces. Por ser elementos lineales, se pueden caracterizar a través de un eje y una sección transversal característica de toda la calle o un tramo en específico (Gómez, 2007).

Para el caso de estudio, se obtuvieron las características de la vía a analizar por medio de los datos topográficos tanto para el escenario de topografía tradicional, como para el escenario de fotogrametría por drones.

Tabla 10. Características de la vía en caso de estudio.

CARACTERÍSTICA VIAL	
COTA MÍNIMA	2694.943 m
COTA MÁXIMA	2737.007 m
DESNIVEL	42,07 m
LONTIGUD	327.650 m
PENDIENTE PROM.	12,84%

3.1. Coeficiente de escorrentía asociado al uso de suelo

El coeficiente de escorrentía se define como la relación entre el volumen de lluvia neta (o de escorrentía) y el de la lluvia total, este valor, varía entre 0 y 1. En el caso de zonas urbanas por su alto grado de impermeabilización de zonas, este valor suele tender a 1 y se suele mover en intervalos relativamente pequeños facilitando la elección de estos coeficientes (Gómez, 2007).

Existen diversos comportamientos que caracterizan este coeficiente de escorrentía estas son las pérdidas que actúan en diferentes vías (intersecciones, almacenamiento en patologías, infiltración, evapotranspiración, etc.) y estas dependiendo de las características de uso, tipo de suelo, topografía y hasta la propia tormenta. El uso del coeficiente de escorrentía para el método racional supone considerar un promedio de pérdidas totales durante un tiempo equivalente al de concentración (Gómez, 2007).

Tabla 11. Coeficientes de *Rugosidad en el Software IBER (Datos extraídos del Software IBER).*

COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN IBER	
USO DEL SUELO	N de MANNING
PRADERA	0.05
BOSQUE	0.12
ARBUSTOS	0.05
ÁRBOLES	0.12
VEGETACIÓN URBANA	0.032
VEGETACIÓN DISPERSA	0.08
VEGETACIÓN DENSA	0.18
CONCRETO	0.018
SIN CLASIFICAR	0.032
INFRAESTRUCTURA	0.020
EDIFICIOS AISLADOS	0.0
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	0.09
INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE Y USO INDUSTRIAL	0.1
CANTERAS	0.04
ÁREAS EN CONSTRUCCIÓN	0.04
ZONAS VERDES URBANAS	0.09

Gracias a la ortofoto en la Ilustración 6, podemos establecer estos valores en el caso de estudio con los valores que se establecen en el software IBER (cf. Tabla 11: Coeficientes de Rugosidad en el *Software IBER*), ya que estos se encuentran previstos como compilado de varios referentes bibliográficos, esto nos permite empezar asignar valores hidrodinámicos al modelo con el fin de definir uno de los parámetros en la caracterización física e hidrológica de la zona de estudio.



Ilustración 6. Asignación de coeficientes de rugosidad en *IBER*.

3.2. Hidrograma Unitario

Uno de los procesos vitales en la hidrología y uno de los métodos más comunes para la transformación de la lluvia – caudal es el Hidrograma Unitario, este método

como sistema lineal e invariable en el tiempo. Este tiene algunas propiedades de las cuales podemos destacar lo siguiente:

Linealidad en la respuesta. Si un hidrograma H es la respuesta en caudales a una lluvia I_1 , para una lluvia doble, igual a $2I_1$, la respuesta en caudal de la cuenca es $2H$.

Aditividad de la respuesta, donde se asume además la invariancia temporal de la respuesta en caudal, que quiere decir que la respuesta de un suceso de lluvia I_1 más I_2 , es igual a calcular primero la respuesta en caudal ante una lluvia I_1 , después la respuesta en caudal ante una lluvia I_2 , y sumar finalmente los dos hidrogramas de respuesta.

Este permite básicamente, permite determinar la escorrentía directa que se producirá en la salida de la cuenca si sobre ella se produjera una precipitación neta unidad de una duración determinada, un ejemplo 1 mm durante 1 hora (Sánchez, 2016).

Durante la ejecución de la investigación, se ejecuta un escenario teórico de respuesta hidrológica, este parámetro se dio bajo un diagrama unitario con 1 metro cúbico sobre segundo como caudal y para 4000 segundos de duración en ambos escenarios de simulación. Esto con el fin de evaluar como la resolución del mallado, detalle de superficie influye en los resultados de modelamiento en parámetros como la velocidad y lámina de agua para la zona objeto de estudio, no se evalúa la magnitud del hidrograma, ni tampoco su representatividad.

Estimar caudales de aproximación hidrológica real de la cuenca, puede ser una etapa posterior al alcance del presente estudio, ya que se cuenta con el monitoreo de lluvias que se han precipitado en la zona, y generaron inundación y rebose del alcantarillado existente.

Asimismo, dentro del modelo se establecen parámetros de entrada y salida como condiciones de contorno necesarias para asignar el hidrograma unitario de entrada a la modelación. La condición de entrada se asignó en la cota más alta del caso de estudio, y como condiciones de salida, se establecieron los cruces de calle (cf. ilustración 7).



Ilustración 7. Asignación de parámetros de contorno de entrada y salida.

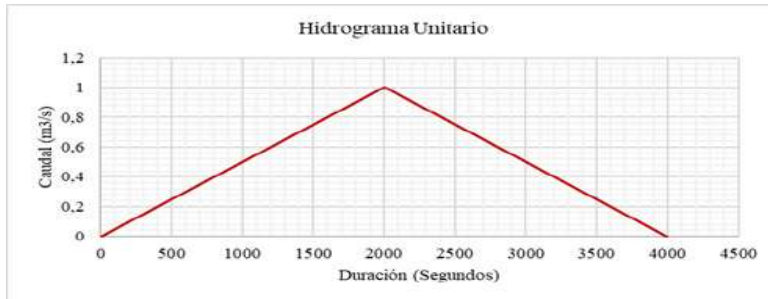


Ilustración 8. Hidrograma Unitario para modelación hidrodinámica en *IBER* para ambos escenarios.

4. Modelación Bidimensional Mediante *IBER* 3.2

4.1. Software *IBER*.

El *software IBER* es un modelo matemático bidimensional, que incluye un módulo hidrodinámico para la simulación de flujos de ríos, canales y cauces naturales, permitiendo así el cálculo de avenidas e inundaciones y la delimitación de zonas inundables (Bladé *et al.*, 2014).

Este *software* cuenta con varios módulos de cálculo: hidráulico, turbulencia, transporte de sedimentos, calidad de las aguas, rotura de balsa y un módulo de hábitat y procesos hidrológicos (Lantero Bringas, 2019).

Calado. El software al ser combinado con resultados SIG, permite mostrar una perspectiva espacial más cómoda en su interfaz de resultados, estos son algunos resultados gráficos obtenidos en un caso de estudio en la ciudad de Medellín para diferentes tamaños de malla (Cárdenas-Quintero *et al.*, 2019).

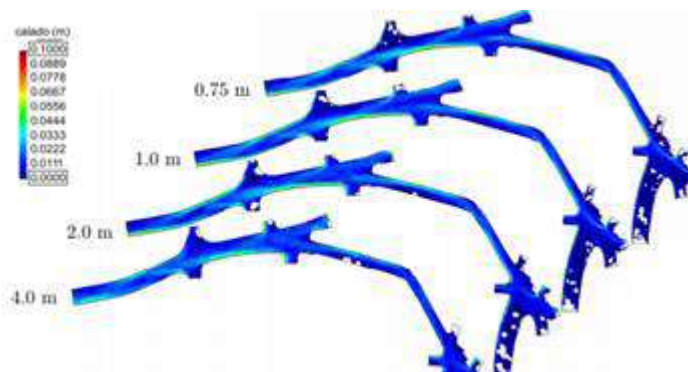


Ilustración 9: Resultados de calado por medio de *software IBER*.

Velocidad. Al igual que con los resultados de velocidades, podemos observar algunos resultados para los cálculos de velocidad (Cárdenas-Quintero *et al.*, 2019).

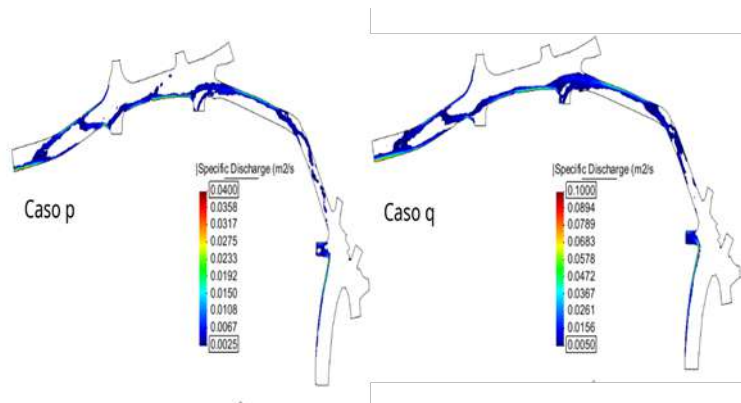


Ilustración 10 Resultados de velocidad por medio de *software IBER*.

4.2. Caso de estudio en el modelo IBER

Malla de cálculo en IBER. Uno de los procesos que conlleva más tiempo y esfuerzo en el desarrollo del modelo bidimensional en *IBER* es la estructuración de malla de cálculo (Bladé *et al.*, 2014). Existen dos tipos de mallas en los modelos *IBER*, el modelo de malla estructurada y malla no estructurada, por lo cual ya que, se tiene información topográfica, se estableció un modelo de malla no estructurada sacando en gran medida provecho a la *Red de Triángulos Regulares (TIN)* que se obtiene en la información topográfica.



Ilustración 11. Tamaño de malla para las superficies establecidas en el modelo *IBER*.

5. Resultados de la investigación

Una vez compilada toda la información en los dos modelos bidimensionales en *IBER*, se ingresaron los datos de elevación a cada modelo y teniendo que la planimetría, tamaño de malla, rugosidades y condiciones de entrada y salida son iguales en ambos escenarios, se pudieron obtener resultados tanto de calado como de velocidad en cada uno de los modelos con el fin de ser comparados y analizar la influencia en la toma de datos topográficos, en el comportamiento del flujo de vectores resultante.

Tiempo de procesamiento: Para el procesamiento de los modelos se tardó 16 horas en promedio para ambos escenarios.

5.1. Modelo Digital de Terreno con Fotogrametría con Dron.

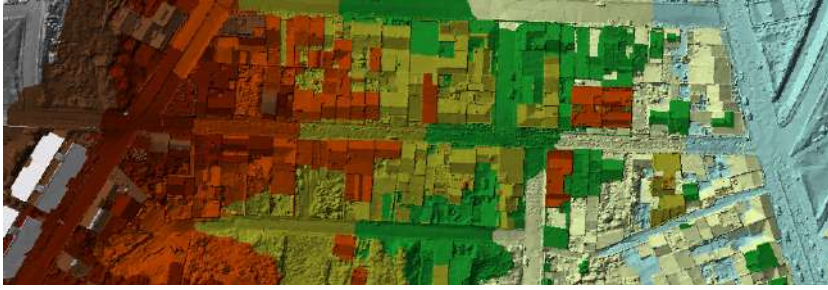


Ilustración 12. *Modelo Digital de Terreno (MDT)* obtenido con fotogrametría con dron.

5.2. Modelo Digital de Terreno con Topografía convencional.

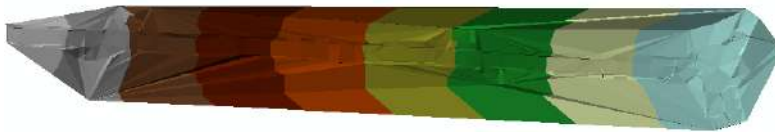


Ilustración 13. Modelo digital de terreno (*MDT*) obtenido con topografía tradicional.

En la Ilustración 12 se observa con gran detalle el resultado del escenario de fotogrametría con dron, en comparación con la Ilustración 13 que pertenece al *MDT* establecido con topografía tradicional se observa menor detalle y menor área de cubrimiento.

En los cruces de calles del modelo de topografía convencional, podemos encontrar una irregularidad en la triangulación del modelo, debido a que el software une los puntos cercanos y no cuenta con mayor densidad de puntos para mostrar detalle, fallos que pueden alterar significativamente los resultados en velocidad y lámina de agua en la modelación. En comparación del *TIN (Triangulated Irregular Network)* presentado con el escenario con fotogrametría con drones que la densidad de puntos es muchísimo mayor y que permite evitar estas irregularidades en el modelo.

5.3. Modelación del escenario con topografía tradicional



Ilustración 14. Lámina de agua en el escenario de topografía tradicional en el intervalo de 2000 segundos.



Ilustración 15. Lámina de agua en el escenario de topografía tradicional en el intervalo de 4000 segundos.

5.4. Modelación del escenario con fotogrametría con drones.



Ilustración 16. Lámina de agua en el escenario de topografía con dron en el intervalo de 2000 segundos.



Ilustración 17. Lámina de agua en el escenario de topografía con dron en el intervalo de 4000 segundos.

5.5. Resultado en velocidades en el intervalo de 2000 segundos de modelación para ambos escenarios.



Ilustración 18. Resultado de Velocidad con Fotogrametría con Dron.



Ilustración 19. Resultado de Velocidad con topografía convencional.

6. Análisis de resultados

A partir de los resultados obtenidos en los dos modelos hidrodinámicos en IBER correspondientes a valores en lámina de agua y velocidad de flujo con un hidrograma unitario de entrada que cuenta con 4.000 segundos de duración. El modelo simula que ocurriría en la duración de la lluvia y el comportamiento que tiene el mismo.

Con el comportamiento de la modelación se pueden deducir los siguientes puntos:

Para los tiempos de 1000 segundos, 2000 segundos y 3000 segundos, en el escenario de topografía tradicional se siguen pronunciando las zonas de puntos críticos, dando especialmente en el cruce de calle en la parte inferior de la vía, el segundo cruce de calle donde se encuentra el reductor parabólico y unos niveles altos en la lámina de agua donde conecta con la zona de vegetación en la parte baja de la vía.

Teniendo en cuenta las zonas en las que presentaron problemas a la hora de generar la red de triángulos regulares, del escenario de topografía tradicional, se puede deducir que se pueden presentar valores con poca coherencia, debido a que todos los vectores están conectados y afectar los resultados de todo el modelo, tanto los resultados de lámina de agua, como la velocidad.

Para evitar problemas en la interpolación, es necesario tomar información mucho más detallada, de la zona, además de lograr mayor abertura en el área de detalle, de la que habitualmente se toma.

En el tiempo de modelación de 200 segundos, se encuentra que los vectores tienen diferente comportamiento y ha llegado a una abscisa diferente, en el caso del escenario con topografía tradicional, los vectores ya se encontraban a los 100 metros del punto inicial pero el fluido se encontraba en una sola dirección. Mientras que, con el escenario de fotogrametría con dron, el fluido se bifurca presentando dirección hacia las dos cunetas de la vía, además que, el fluido se encontraba en diferente magnitud y en una distancia de 20 metros aproximadamente más avanzado que con el método anteriormente mencionado.

Para el tiempo de modelación de 500 segundos, en el escenario de fotogrametría con dron, ya el fluido se encuentra al final del tramo vial al analizar iniciando a manifestarse puntos críticos en zonas donde actualmente se encuentran sumideros, mientras que, en el escenario de topografía tradicional, el fluido continuo en un solo lado de la vía y presenta un punto crítico en una de las intersecciones de la vía

7. Conclusiones y recomendaciones

Se establece como mejor escenario para realizar una simulación hidrodinámica el escenario de fotogrametría con dron, ya que permite dar una mayor densidad de puntos en los datos recolectados, permitiendo así, que el comportamiento hidrodinámico se asemeje al presentado en la realidad, teniendo un mayor nivel mayor confianza en los resultados obtenidos. Además, que, al ser un análisis de flujo en superficie, las vías por lo general presentan un alto deterioro en sus elementos, por lo que es necesario determinar un alto nivel de densidad en los puntos, densidad que con la topografía tradicional se tomaría como un trabajo con bastante dificultad en la toma de información.

Se generó el modelo digital de terreno (*MDT*) en ambos escenarios, pero el escenario que mayor dificultad de procesamiento en los datos es el escenario por fotogrametría por drones, debido a la cantidad de datos que este suministro. Es por esto, que es necesario tener en cuenta el equipo de cómputo con el cual se va a realizar el procesamiento de datos para una modelación de este tipo.

Para dar mayor detalle y dar la magnitud de los datos, es necesario tener en cuenta el caudal de entrada, tiempo de concentración y área de la cuenca. Aunque, como lo denotado en este trabajo, es importante dar claridad la una buena información topográfica, ya que esta permite dar las bases de la modelación y claramente tener en cuenta el presupuesto con el que se cuenta.

El escenario que mayor detalle genera en los datos arrojados es el escenario por fotogrametría con dron, pero este presenta inconvenientes en zonas con alto tráfico vehicular, por lo cual genera algunas incertidumbres, inconvenientes que no

genera la topografía tradicional ya que la misma toma los datos directamente en el punto de análisis.

Para este tipo de modelos, es importante tener en cuenta el área que abarca la toma de datos, ya que al limitarlo únicamente al de estudio, puede presentar algunos errores principalmente de interpolación en los extremos del *MDT*, por lo consecuente, genera problemas en los resultados que arroja el modelo.

El tamaño de malla permite al igual que la información del *MDT* dar detalle a la superficie del modelo, es importante saber determinar este criterio, ya que en casos en el que se excede el detalle puede generar gasto inapropiado de equipo de cómputo y en casos en el que el tamaño de malla sea muy grande, puede generar bajo detalle en el modelo y por lo tanto resultados con vacíos e incertidumbre, comparado con el de la realidad.

Agradecimiento

En primera medida a mi familia, quienes han sido apoyo en todo este proceso arduo de trabajo, en especial a mi madre Yaneth Lorena Moreno, a mis hermanas Laura y Catalina, a mi padre Fernando, a mis abuelas Margarita e Inés, especialmente a mi primo Daniel quien fue un apoyo en la toma del registro multimedia para este trabajo.

En segunda instancia, a mi director de tesis al Ingeniero Wilson Enrique Amaya, quien me sirvió de guía en todo este proceso investigativo, además de los aprendizajes que he tenido con él, no solo de temas técnicos, sino de vida.

A la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja y a todos los docentes que fueron parte de mi proceso de formación como profesional y a quienes recordaré con mucho cariño y aprecio.

Referencias

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

Calero, J., Margarita Magaña Monge, N., & Oswaldo Soriano Melgar, A. (2019). Análisis comparativo entre levantamientos topográficos con estación total como método directo y el uso de drones y GPS como métodos indirectos.

Cárdenas-Quintero, M., Carvajal-Serna, L. F., & Marbello-Pérez, R. (2019). Two-dimensional hydrodynamic analysis of surface drainage on an urban road. *DYNA (Colombia)*, 86(211), 102–111. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.79524>

Caro-Camargo, C. A., & Bayona-Romero, J. A. (2018). Hydro-dynamic modeling for identification of flooding zones in the city of Tunja. *Revista Facultad de Ingeniería*, 2018(88), 40–54. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n88a05>

Sevilla, Miguel. (1993). Teoría de errores de observación. *Física de la Tierra*, ISSN 0214-4557. 5. 133-166. Gómez, M. (2007). *Hidrología urbana*. Colección CBI, 235.

Lantero Bringas, B. (2019, mayo 31). ¿Qué es IBER y para qué sirve? <https://www.cursosgis.com/que-aprenderas-en-nuestro-curso-de-modelizacion-hidraulica-bidimensional-con-iber-y-arccgis/>

Nicolás, Ferreccio. (2006). Análisis de la técnica RTK. Universidad Nacional de La Plata.

Sanches, J. (2016). *Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación - Escorrentía*. lli, 1–23.

Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2016). *Topografía (14a edición)*. Alfaomega Grupo Editor