



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Influencia de la resolución topográfica en los resultados de un modelo hidrodinámico unidimensional y su efecto en la construcción de mapas de inundación en ríos de montaña – sector Coliseo Jefferson Pérez

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autores:

Edison Gonzalo Caisán Velásquez

Jose Fernando Campoverde Ureña

Director:

Esteban Remigio Sánchez Cordero

ORCID: 0000-0002-8206-386X

Co-Director:

Juan Sebastián Cedillo Galarza

ORCID: 0000-0001-6866-8937

Cuenca, Ecuador

2024-09-18

Resumen

Los mapas de inundación son vitales para la seguridad de las comunidades. Al mejorar los modelos hidrodinámicos con datos topográficos de alta resolución, se puede prever desastres con mayor exactitud. El presente trabajo tiene como objetivo investigar la influencia de la resolución topográfica en la precisión de los modelos hidrodinámicos unidimensionales y su impacto en la creación de mapas de inundación en ríos de montaña. Mediante una metodología cuantitativa se evaluaron tres tipos de levantamientos topográficos; Estación Total, Drone, y SIGTIERRAS en un tramo específico del río Tomebamba (sector coliseo Jefferson Pérez). Se generaron tres superficies utilizando la misma configuración planimétrica, donde varió únicamente la componente de elevación. Tomando como verdaderos los datos del levantamiento de Estación Total, se evaluó la precisión vertical de cada una de estas superficies. La principal métrica utilizada para evaluar esta precisión es el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Por una parte, los resultados indican que el modelo Drone, con una resolución de 2.23 cm/pixel, ofrece una mayor precisión y correlación, principalmente en representación de las elevaciones topográficas y áreas de inundación, tanto para tramos simples (rectos), inclusive en alineamientos curvos. Por otra parte, el modelo SIGTIERRAS, con una resolución de 3m/pixel, presentó mayores errores y una menor correlación, subrayando las limitaciones de los datos de baja resolución. Estos resultados destacan la importancia de utilizar datos topográficos de alta resolución para mejorar la precisión de las simulaciones hidráulicas.

Palabras clave del autor: modelo topográfico, precisión topográfica, hidrodinámica unidimensional, mancha de inundación



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Flood maps are vital for community safety. By enhancing hydrodynamic models with high-resolution topographic data, disasters can be predicted more accurately. This study aims to investigate the influence of topographic resolution on the accuracy of one-dimensional hydrodynamic models and its impact on the creation of flood maps in mountain rivers. A quantitative methodology was employed to evaluate three types of topographic surveys: Total Station, Drone, and SIGTIERRAS in a specific section of the Tomebamba River (Jefferson Pérez Coliseum area). Three surfaces were generated using the same planimetric configuration, varying only the elevation component. Using the Total Station survey data as the benchmark, the vertical accuracy of each surface was assessed. The main metric used to evaluate this accuracy is the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient. The results indicate that the Drone model, with a resolution of 2.23 cm/pixel, offers higher accuracy and correlation, especially in representing topographic elevations and flood areas, both in straight sections and curved alignments. In contrast, the SIGTIERRAS model, with a resolution of 3m/pixel, exhibited larger errors and lower correlation, highlighting the limitations of low-resolution data. These findings underscore the importance of using high-resolution topographic data to improve the accuracy of hydraulic simulations.

Author Keywords: topographic model, topographic accuracy, one-dimensional hydrodynamics, flood zone



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1.	Introducción	10
1.1	Antecedentes y Justificación	10
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo General	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Alcance y limitaciones	12
1.4	Estado del Arte	12
2.	Descripción de la Zona de Estudio	15
3.	Materiales y Metodología	17
3.1	Generación de Modelos Topográficos con diferentes metodologías.	17
3.1.1	Modelo Topográfico Estación Total	17
3.1.2	Modelo Topográfico Drone	18
3.1.3	Modelo Topográfico SIGTIERRAS	21
3.2	Modelación Hidráulica	22
3.2.1	HEC-RAS y condiciones de contorno.	22
3.2.2	Pendiente	24
3.2.3	Caudal	25
3.2.4	Rugosidad	25
3.2.5	Proceso de simulación en HEC-RAS.	27
3.3	Métricas utilizadas para medir eficiencia de modelos	28
3.4	Índice de Curvatura	29
4.	Resultados	30
4.1	Evaluación de la resolución topográfica entre modelos Drone y SIGTIERRAS	30
4.1.1	Análisis Global (Métricas para el tramo completo)	30
4.1.2	Análisis Local (Métricas en cada sección transversal)	32
4.2	Correlación en elevación de superficie del agua y calados	33
4.3	Variabilidad en anchos de inundación	35
4.4	Variabilidad en áreas de inundación, zonas de desbordamiento	37
5.	Discusión	40
5.1	Calidad de los modelos topográficos Drone y SIGTIERRAS	40
5.2	Impacto en los resultados del modelo hidrodinámico 1D	42
5.3	Métricas de evaluación de respuestas del modelo hidrodinámico	45
5.4	Mancha de inundación	46
6.	Conclusiones y recomendaciones	47

Índice de Figuras

Figura 1. Zona de estudio, puente en calle los Cedros – puente en Av. Unidad Nacional..	15
Figura 2. Sección transversal típica – tramo de estudio Río Tomebamba, Cuenca.....	16
Figura 3. Alineamiento central del tramo en estudio, margen izquierda y derecha y líneas de muestreo cada 10 m.	17
Figura 4. Superficie modelada para levantamiento topográfico en base a datos de Estación Total.	18
Figura 5. Puntos de control colocados en campo para calibración de modelo fotogramétrico Drone.	19
Figura 6. Planificación de mapeo	20
Figura 7. a) Modelo digital del terreno de resolución 2.23 cm/pixel – Zona de estudio en río Tomebamba Cuenca, Ecuador. b) Ortofotografía generada de la zona de estudio.....	21
Figura 8. Superficie modelada en base a datos de Fotogrametría Drone	21
Figura 9. Superficie modelada en base a datos satelitales SIGTIERRAS.....	22
Figura 10. Perfil longitudinal del terreno en su cota más baja. a) Estación Total ET b) Modelo Drone c) Modelo SIGTIERRAS.....	24
Figura 11. Referencia fotográfica para rugosidad. Tomado de (Yochum et al., 2014).	26
Figura 12. Cálculo de áreas en QGIS para coeficiente de rugosidad ponderado.....	27
Figura 13. Aproximación al alineamiento mediante curvas horizontales. Negro; tramo 1, Azul; tramo 2, Morado; tramo 3.	29
Figura 14. a) Cotas Topográficas para el Modelo SIGTIERRAS vs ET b) Cotas Topográficas para el modelo Drone vs Estación Total	31
Figura 15. Resultados de Coeficiente Nash-Sutcliffe para cada sección transversal evaluada.	32
Figura 16. Elevación de superficie del agua (m.s.n.m) para cada modelo Topográfico.....	34
Figura 17. Distribución del Coeficiente Nash-Sutcliffe para calados de agua en el tramo completo.	35
Figura 18. Correlación entre anchos de superficie libre para cada sección transversal entre (a)Estación Total y SIGTIERRAS b)Estación Total y Drone.	36
Figura 19. Resultados gráficos de anchos de inundación por tramos.	37
Figura 20. Áreas de inundación traslapadas. (a)Estación Total vs DRONE (b) Estación Total vs SIGTIERRAS; Estación Total 7.91ha, Drone 8.87ha, SIGTIERRAS 7.07ha.....	39
Figura 21. Perfil Longitudinal del terreno para el tramo completo de estudio.....	42
Figura 22. Secciones transversales en 0+0139.6 m. a) Estación Total b) Drone c) SIGTIERRAS	44
Figura 23. a) Diferencias en calado para sección en tramo recto (0+282.20m) b) Diferencias en calado para sección en tramo curvo (0+987.96m).	45

Índice de tablas

Tabla 1. Puntos colocados en campo con GPS de precisión para georreferenciación.	18
Tabla 2. Puntos de Control Georreferenciados	19
Tabla 3. Pendiente promedio para cada modelo topográfico.	24
Tabla 4. Rango de valores de NSE. Tomado de (Perreault et al., 2022)	29
Tabla 5. Índice de Curvatura para cada tramo de estudio.	30
Tabla 6. Resultados de estadística descriptiva para las secciones topográficas.	30
Tabla 7. Métricas respecto a modelo de Estación Total para cotas de superficie de agua. .	34
Tabla 8. Correlación en ancho de inundación respecto a modelo de estación total.....	38
Tabla 9. Comparación de Eficiencia Nash-Sutcliffe para parámetros de salida.	45

Agradecimientos institucionales

La presente investigación ha sido desarrollada dentro el marco del proyecto de investigación “Predicción de niveles de agua en canales abiertos: Modelación numérica innovadora utilizando redes neuronales” financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Cuenca (VIUC) bajo el XIX concurso de proyectos de investigación.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la fuerza y el valor para salir adelante en los momentos más difíciles de mi vida.

Agradezco a mi mamá y a mis hermanos, por ser mi apoyo incondicional y por motivarme todos los días a ser una mejor persona.

Agradezco a mi familia y amigos por su apoyo, y a todos quienes fueron parte de esta bonita etapa.

Agradezco al Ing. Esteban Sánchez por darme su apoyo y su confianza, y por proporcionarnos las facilidades necesarias para llevar a cabo este trabajo de investigación.

Agradezco al Ing. Sebastián Cedillo, por su paciencia para guiarnos durante la investigación y por su asesoría personal en este trabajo de titulación.

Jose F. Campoverde Ureña.

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme cumplir este objetivo de vida y a mi ángel allá en cielo, mi tía Carmelina Velásquez.

Agradezco a mis queridos padres Paulino y Zoila, a mi hermano Leonardo, a mi tío Ramiro, por apoyarme y acompañarme siempre en este camino universitario.

Agradezco a mis profesores y a mis compañeros; por todos estos años de aprendizaje.

Agradezco a mis tutores de tesis Ing. Esteban Sánchez e Ing. Sebastián Cedillo por su asesoría y el tiempo que han dedicado a este trabajo.

Edison G. Caisán Velásquez.

Dedicatorias

“A mi papá allá en el cielo, que por situaciones de la vida hoy no puede estar conmigo, pero sus valores y enseñanzas, así como su amor y su cariño quedarán marcados para siempre en mi corazón.”

Jose F. Campoverde Ureña.

“A mi madre; Zoila Velásquez, por ser ejemplo de amor, perseverancia y superación. Gracias por todo tu sacrificio, gracias por siempre motivarme a seguir adelante, gracias por siempre confiar en mí. Te amo mamá.”

Edison G. Caisán Velásquez.

1. Introducción

1.1 Antecedentes y Justificación

Los mapas de inundaciones son esenciales para reducir riesgos y gestionar desastres, proporcionando información detallada sobre las áreas propensas a desbordamientos e inundaciones. Estos mapas permiten una planificación urbana más inteligente y la implementación de medidas preventivas. La precisión de estos mapas es crucial para evaluar la vulnerabilidad de las infraestructuras y la seguridad de las poblaciones locales.

Los modelos hidrodinámicos son una herramienta útil para estimar los mapas de inundación. Sin embargo, dichos modelos son sensibles a la topografía ingresada. Cook, A. & Merwade, V. (2009) demostraron la existencia de una relación directa entre el tipo de topografía fuente, para un modelo hidráulico, y los resultados de los mapas de inundaciones, especialmente en la variabilidad de los indicadores; ancho y área de inundación. Vozinaki et al. (2017) determinaron que los parámetros principales para la simulación hidráulica son la geometría del canal del río y la llanura aluvial. Además, concluyeron que la precisión de la sección transversal y la información de la llanura aluvial proporcionada por el DEM con la resolución más alta proporciona mejores resultados hidráulicos. Chimborazo (2019) realizó una evaluación hidrológica e hidráulica del Río Tomebamba en un tramo aproximado de 7 km, que va desde Balzay hasta la intersección con el río Yanuncay. Para lo cual se usó un levantamiento topográfico de Drone. De este estudio el autor dispuso que las zonas con alto riesgo de inundación son: Puertas del Sol, Federación Deportiva del Azuay, Campus Balzay Universidad de Cuenca, Campus Principal Universidad de Cuenca, Hospital Vicente Corral Moscoso y Parque el Paraíso. Además, indica que la modelación en HEC-RAS, para esta topografía produce ciertos errores si es que se toman espaciamientos entre secciones mayores a 30 metros, por lo que recomienda secciones cada 10 m.

El problema radica en evaluar la influencia de las diferentes fuentes topográficas en la construcción de mapas de inundación para condiciones locales, donde las tipologías de levantamiento de terreno son: topografía de secciones transversales de río mediante uso de estación total, secciones basadas en modelos digitales de terreno (MDT) construidos en base a fotogrametría de Drone, y topografía basada en información proporcionada por SIGTIERRAS (ente gubernamental que maneja información topográfica y bases de datos de suelo en Ecuador). En este contexto, la presente investigación se centra en evaluar las diferencias topográficas de las tres fuentes de datos y analizar cómo estas diferencias afectan los resultados de una modelación hidráulica cuando se cambia la geometría (en función de la fuente) y se mantiene constante los demás parámetros (rugosidad, caudal, condiciones de

contorno). En la misma línea, como pregunta de investigación se plantea lo siguiente; ¿Cuál es la influencia de la resolución topográfica en los resultados de un modelo hidrodinámico unidimensional y su consecuente efecto en la elaboración de mapas de inundación? Para evaluar el problema expuesto se pretende tomar como muestra un tramo de un río de montaña (Tomebamba), comprendido entre el puente de la Av. Unidad Nacional (altura del coliseo Jefferson Pérez Quezada) y el puente en la calle Los Cedros (altura parque Puertas del Sol). Como primera parte del estudio, se complementará un levantamiento del lecho del río utilizando una estación total RUIDE RTS 822R proporcionada por la Universidad de Cuenca, y además para la comparación de dicha información, se pretende mejorar la resolución de un Modelo Digital de Terreno (MDT) del tramo de estudio, realizando un vuelo de baja altura con un Drone DJI MAVIC MINI 2, así como la elaboración de un tercer modelo topográfico mediante la solicitud de fotografías satelitales por parte de SIGTIERRAS. Los principales parámetros a comparar son el área, el calado y el ancho de inundación, tomando como modelo más aproximado a la realidad el mapa obtenido en base a topografía con estación total. La justificación de este estudio recae sobre la importancia de construir mapas de inundación lo más posiblemente reales, precisos y de alta resolución, que otorguen predicciones fiables para la planificación de riesgos en la ciudad ante futuros y posibles desastres por inundaciones. Por otra parte, resulta relevante ya que es de interés para la sociedad civil en particular y para la comunidad relacionada en temática de modelamiento tanto topográfico como hidráulico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de la resolución topográfica en la construcción de mapas de inundación en ríos de montaña usando modelos hidráulicos unidimensionales.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Análisis estadístico de los datos topográficos a través de diversas metodologías de adquisición.
- Evaluar los resultados de las variables hidráulicas derivadas mediante un modelo unidimensional.
- Cuantificar las diferencias presentes en los mapas de inundación generados mediante el uso de modelos hidráulicos 1D.

1.3 Alcance y limitaciones

El presente trabajo se basa en las diferencias topográficas, específicamente en cotas, de tres fuentes de datos con distinta resolución; Estación Total, fotogrametría con Drone y SIGTIERRAS. Evaluado en un tramo del río Tomebamba, desde el puente en la calle Los Cedros hasta el puente en la Av. Unidad Nacional. Posteriormente, se analiza cómo estas diferencias afectan los resultados de una modelación hidráulica realizada mediante el programa HECRAS 6.4.1, con énfasis en calados, áreas y anchos de inundación.

Para esto, se usa un caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, obtenido de la bibliografía. El coeficiente de rugosidad para el canal principal es calculado con el modelo de roca de Abril & Knight (2010), calibrado con datos de los ríos Tomebamba y Cuenca. Mientras que para la rugosidad de las llanuras de inundación se usa un coeficiente ponderado, basado en valores de la bibliografía y en la observación de la cobertura vegetal existente en el área de estudio.

La simulación hidráulica obedece a un modelo no calibrado con flujo mixto, unidimensional, uniforme y permanente. Los mapas de inundación son fabricados en función de los anchos superficiales para cada sección, obtenidos como resultados de cada modelación. Tanto las diferencias en secciones transversales como en anchos de inundación de las 3 fuentes topográficas y simulaciones son cuantificadas principalmente con el parámetro de correlación de Nash & Sutcliffe.

1.4 Estado del Arte

Aronica et al. (1998) determina que pequeños errores en la topografía pueden conducir a inestabilidades numéricas, como profundidades de agua negativas o distorsión de las líneas de flujo. Para mitigar estos efectos, es prudente dividir el área total de modelación en varios tramos conectados por discontinuidades verticales o diferencias abruptas en elevación entre los tramos. Wolock & McCabe (2000) realizaron múltiples modelaciones con el objetivo de cuantificar las diferencias en las características topográficas calculadas a partir de DEM's de 100 y 1000 metros de resolución. Este estudio se realizó en 50 ubicaciones seleccionadas subjetivamente dentro de los Estados Unidos, que representan una variedad de terrenos.

Los resultados obtenidos muestran que la resolución del DEM afecta significativamente los valores calculados de las características topográficas, particularmente, las pendientes computadas con DEM's de 1000 m son menores que las obtenidas con DEM's de 100 m.

Además, los autores determinan que los efectos de la resolución del DEM en las características topográficas están influenciados por el tipo de terreno.

Horritt & Bates (2001) evalúan cómo diferentes resoluciones espaciales de los Modelos Digitales de Elevación (DEM) afectan la precisión de los modelos de flujo de inundación. Se utilizaron simulaciones de flujo bidimensionales para evaluar el desempeño del modelo con diferentes resoluciones de DEM's (1000m a 10m). Los resultados muestran que las resoluciones más finas proporcionan predicciones de inundación más precisas en comparación con las resoluciones más gruesas. Incluso pequeños errores en elevación pueden causar grandes diferencias en las predicciones de profundidad de agua y extensión de la inundación.

Werner (2004) establece que los DEM's de baja resolución tienden a suavizar características del terreno como pendientes y valles, lo que puede llevar a una sobreestimación de las áreas de inundación y una menor precisión en las predicciones. De forma similar, Cook & Merwade (2009) destacan que la creación de mapas de inundaciones es un proceso que depende de varios factores, como los datos topográficos y de flujo, el tipo de modelo utilizado (1D o 2D) y cómo se describe la geometría del río en dicho modelo. Los autores estudiaron el efecto de la información topográfica y configuración geométrica para las áreas de Strouds Creek en Carolina del Norte y Brazos River en Texas. En donde determinaron que, para un flujo y una configuración geométrica determinada, el área de predicción de inundación disminuye con una mayor resolución espacial y precisión vertical de los datos topográficos.

Vaze et al. (2010) realizaron varias comparaciones entre diferentes resoluciones de DEM's (1m, 2m, 5m, 10m y 25m) con la finalidad de investigar el impacto de la resolución del DEM en índices espaciales hidrológicamente importantes. La investigación se realizó en el Koondrook-Perricoota Forest (KPF) y los resultados obtenidos muestran que la resolución más alta proporciona una representación más precisa de la superficie del suelo. Además, se determina que los DEM's de baja resolución tienden a suavizar las características topográficas, lo que puede resultar en una subestimación de las pendientes y, consecuentemente, en errores en la acumulación y dispersión de agua.

Hsu et al. (2016) examinan cómo la resolución de los Modelos Digitales de Elevación (DEM) afecta las simulaciones de inundación. Este estudio se lleva a cabo en Sanyei, Tainan City, utilizando un DEM de 1x1 m basado en datos LiDAR como base. A partir de este DEM, se agregaron otros con resoluciones de 5x5, 10x10, 20x20 y 40x40 m para posteriormente comparar los resultados entre simulaciones de inundaciones.

Los resultados muestran que las áreas de inundación aumentan con la disminución de la resolución del DEM. Concretamente, el área de inundación predicha por el DEM de 40x40 m es 1.5 veces mayor que la estimada por el DEM de 1x1m. Esto indica que los DEM's de baja resolución tienden a sobrestimar las áreas inundadas. Los autores destacan que la generalización de las características topográficas en DEM's de baja resolución puede llevar a una simplificación excesiva del terreno, afectando negativamente la precisión de las simulaciones de inundación.

Ogania et al. (2019) investigan la influencia de la resolución de los modelos digitales de elevaciones en los mapas de inundación, tomando como caso de estudio el área de drenaje de Sanyei de 43.7 Km² en la ciudad de Tainan (República de China) con un cauce principal de 6.7km y desniveles de entre 2m a 30m. En esta investigación se construyeron 3 modelos basados en DEM's de distintas resoluciones (1x1, 5x5, y 10x10 m). En donde, se determinó que la implementación de DEM's más gruesos (de menor resolución) pueden simplificar características topográficas afectando las propiedades hidrodinámicas de la zona simulada, pudiendo aumentar la extensión del área inundada.

Rodas Bustamante et al. (2023) realizaron un análisis de sensibilidad del coeficiente de Manning en la estimación de los niveles de crecida para el mapeo de inundaciones en un tramo de cinco kilómetros del río Santa Bárbara en el sur del Ecuador, provincia del Azuay. Con este propósito se usaron simulaciones de Monte Carlo mediante un modelo unidimensional [1-d] MIKE 11. Para ello se utilizó un DEM de tres metros de resolución para el mapeo de la inundación, obtenido del portal SIGTIERRAS. Se generaron seiscientos archivos de secciones transversales por evento de inundación, variando los valores de Manning dentro de los rangos establecidos en la literatura.

Respecto a la rugosidad, se identificaron seis tipos de cobertura de terreno dominantes (bosque, cultivos, matorrales, pastos, suelo desnudo y suelo impermeable), y se calcularon valores ponderados de Manning para cada planicie fluvial. Los resultados mostraron que los niveles de agua son sensibles a los cambios en el coeficiente de Manning. Pese a esto, los resultados respecto mapas de inundación revelaron diferencias casi imperceptibles en la extensión del área inundada. Además, según los mismos autores, los valores promedio de Manning recomendados en la literatura aparentan ser confiables para la delimitación de áreas inundadas en ríos de montaña, por lo que es posible realizar estimaciones precisas de inundación utilizando estos valores promedio.

2. Descripción de la Zona de Estudio

La Modelación Topográfica e Hidráulica se realizó sobre un tramo perteneciente a la subcuenca del río Tomebamba, la cual pertenece a la provincia del Azuay ubicada en la cordillera Occidental de los Andes, esta subcuenca incluye las microcuencas de los ríos Matadero Alto, Llaviuco, Matadero Bajo, Culebrillas, Mazán, Pinchishana y Tomebamba. En particular, la microcuenca del río Tomebamba posee un área aproximada de 338.32 km² y elevaciones que varían entre los 4400 m.s.n.m hasta los 2480 m.s.n.m. con el río extendiéndose a lo largo de aproximadamente 38 km. El río tiene una pendiente promedio de 3.88%, un caudal medio de 8 m³/s y una velocidad de flujo de 0.96 m/s. El clima en esta región se caracteriza por bajas presiones, alta pluviosidad, una temperatura media elevada de 25°C y un patrón de lluvias que incluye tanto una estación seca como una lluviosa. La vegetación de la cuenca está compuesta por páramo, que incluye un amplio sistema de lagos en la parte alta, dentro del Parque Nacional El Cajas, y por importantes áreas de bosque nativo en las zonas de Llaviuco, Mazán y Culebrillas (Peñañiel, 2014).

El estudio se ejecutó sobre un tramo del río Tomebamba localizado en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. El tramo tiene una longitud de 1.35km y se ubica en el sector Coliseo Jefferson Pérez perteneciente a la parroquia Sucre, específicamente entre el cruce de puente en la calle Los Cedros (aguas arriba) y el puente en la Av. Unidad Nacional (aguas abajo). En la Figura 1 se puede observar un esquema del tramo en estudio.



Figura 1. Zona de estudio, puente en calle los Cedros – puente en Av. Unidad Nacional

Además, para los datos de caudal se utilizó los resultados en Chimborazo (2019). Este estudio se basa en series históricas de precipitación para el río Tomebamba obtenidas de las estaciones Marianza, Psicola Chirimachay y Matadero en Sayausí, donde aplicando algunos modelos de ajuste y probabilidad se construyeron hietogramas los cuales sirvieron para calcular la esorrentía mediante el software HEC-HMS, obteniéndose finalmente caudales para períodos de retorno de 5,10,25,50 y 100 años. Luego, para las simulaciones de este trabajo de investigación se adoptó el valor correspondiente a 25 años de periodo de retorno. El cauce principal del río Tomebamba, está compuesto predominantemente por una mezcla de gravas y arenas, con depósitos de limos y arcillas en zonas de menor energía fluvial. Estas características sedimentológicas reflejan la dinámica del transporte de sedimentos desde su origen en el Parque Nacional Cajas, una zona de alta biodiversidad y precipitaciones constantes. Las llanuras de inundación del río están formadas por depósitos aluviales recientes, que incluyen materiales finos y fértiles como limos y arenas, favoreciendo la presencia de suelos ricos en nutrientes que soportan una variada vegetación primaria. La geomorfología del río muestra un perfil longitudinal con pendientes pronunciadas en su tramo superior y meandros en las áreas cercanas a Cuenca, indicando procesos continuos de erosión y sedimentación (Veléz, 2018).

La geometría del río en el tramo de estudio está constituida por un cauce principal con un ancho promedio de 30m. Los desniveles longitudinales varían entre 2551 m.s.n.m y 2578 m.s.n.m con una pendiente promedio de 1.6%. Las llanuras se caracterizan por tener una pendiente mucho mayor cercana al cauce y disminuyen a medida que se alejan del alineamiento central. Una sección transversal típica del río en el tramo de estudio se puede observar en la Figura 2.

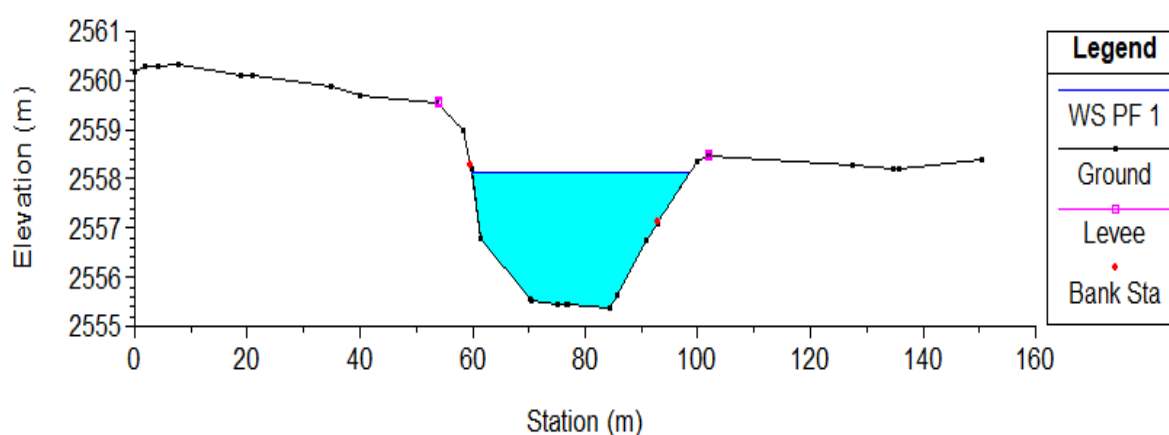


Figura 2. Sección transversal típica – tramo de estudio Río Tomebamba, Cuenca.

3. Materiales y Metodología

3.1 Generación de Modelos Topográficos con diferentes metodologías.

Se generó 3 conjuntos de 132 secciones transversales utilizando el software CIVIL 3D (uno para cada tipo de modelo topográfico), los cuales constituyeron la geometría base para las simulaciones unidimensionales en HEC-RAS. Estas secciones fueron derivadas de una superficie modelada para cada tipo de levantamiento topográfico. Para ello, previamente se dibujó el alineamiento central del río, basado en las cotas más bajas del modelo de Estación Total. Además, se construyeron líneas de muestreo aproximadamente cada 10 metros según la recomendación de Chimborazo (2019). En la Figura 3 se puede observar los elementos en el software Civil 3D antes descritos.

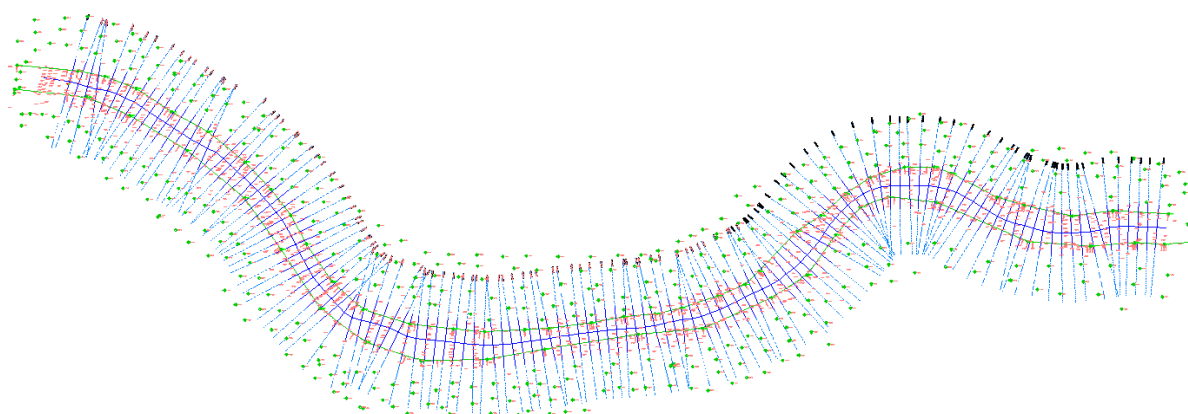


Figura 3. Alineamiento central del tramo en estudio, margen izquierda, derecha y líneas de muestreo cada 10 m.

3.1.1 Modelo Topográfico Estación Total

Para el modelo de Estación Total se utilizó un conjunto de puntos de un levantamiento previo sobre la zona proporcionados por el director y codirector de este trabajo de investigación, dicho conjunto se ubicó principalmente sobre el cauce principal del río. Además, se tuvo baja densidad de información sobre las márgenes y llanuras. Para obtener un modelo más detallado y que sirva de referencia para los demás se complementó dicha información con más puntos levantados en campo, puntos que se ubicaron principalmente sobre la margen izquierda-derecha, puentes, así como las planicies de inundación. Se utilizó para el levantamiento una Estación Total RUIDE RTS-822R de 2" de precisión con prisma, levantándose 488 nuevos puntos dando como resultado un modelo topográfico de 1090 datos. Además, para georreferenciar el conjunto de puntos se utilizó coordenadas (WGS84 Z17S) conocidas sobre el campo las cuales se detallan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Puntos colocados en campo con GPS de precisión para georreferenciación.

Punto	Norte	Este	Elevación	Descripción
1089	9679954.22	719702.373	2563.376	P3
1090	9680190.57	719057.64	2577.799	ESA

Como parte del post-procesamiento de la información, para la superficie Estación Total, así como para las demás, se modificó la red de triángulos irregulares con el objetivo de corregir errores topográficos y generar una superficie más pulida de acorde a lo observado en campo. En la Figura 4 se puede observar la superficie Estación Total final con su cauce principal y planicies de inundación utilizadas para generar las secciones transversales de referencia.

**Figura 4.** Superficie modelada para levantamiento topográfico en base a datos de Estación Total.

3.1.2 Modelo Topográfico Drone

Para generar el modelo Drone, se colocaron en campo 14 puntos de control distribuidos a lo largo de 1.35 km de tramo, las coordenadas georreferenciadas se detallan a en la Tabla 2, mientras que en la Figura 5 se presenta un esquema de ubicación de los 14 puntos de control colocados en campo. La ubicación de estos puntos se ha realizado de tal manera que se coloquen a un mismo intervalo de distancia, alternando las orillas de los ríos y en zonas de fácil visibilidad. Este grupo de puntos son cruciales y de gran importancia para la calibración del traslape, orientación de las fotografías y reducir el error general producido en la nube de puntos densa. Previo a realizar el vuelo, se llevó a cabo una planificación en donde se establecieron algunos parámetros para la captura de la información. Debido a la duración de la batería del Drone, se dividió a la zona de estudio en 3 sectores, de tal forma que se realizaron 3 vuelos para mapear toda el área. Se estableció una altura de vuelo de 70m, traslape del 70%, y velocidad horizontal de 3 m/s. En la Figura 6 se puede observar la malla generada para el mapeo que corresponde a la ruta del dron para la captura de la información.

Tabla 2. Puntos de Control Georreferenciados

Punto	Norte	Este	Elevación	Descripción
586	9680209.74	719129.25	2576.36	PC
587	9680142.74	719181.30	2573.01	PC
589	9680064.27	719321.82	2571.46	PC
590	9679976.67	719309.09	2571.84	PC
591	9679973.79	719416.72	2568.91	PC
592	9679896.84	719482.53	2568.10	PC
594	9679945.71	719610.53	2565.73	PC
595	9679921.98	719730.51	2564.73	PC
596	9680015.38	719798.89	2562.55	PC
597	9679998.06	719872.21	2560.57	PC
598	9680103.71	719923.95	2559.94	PC
599	9680020.94	719971.17	2558.34	PC
600	9680036.25	720027.17	2559.40	PC
601	9679910.54	720114.28	2557.49	PC

De los 3 vuelos se obtuvieron 540 fotografías, las cuales fueron procesadas utilizando el software Agisoft Metashape. Este software se ejecutó en una computadora Dell Alienware X17 R2, cuyas principales características son: procesador Intel Core i9 11^a generación y memoria RAM de 64 GB. Estas especificaciones permitieron un proceso rápido y la obtención de un DEM de alta calidad. Las 540 fotografías se orientaron y alinearon para crear una nube densa de puntos. Posteriormente, se realizó un filtrado automático, en donde se clasificó a los puntos en: Terreno natural, vegetación, carreteras y edificaciones.

**Figura 5.** Puntos de control colocados en campo para calibración de modelo fotogramétrico Drone.

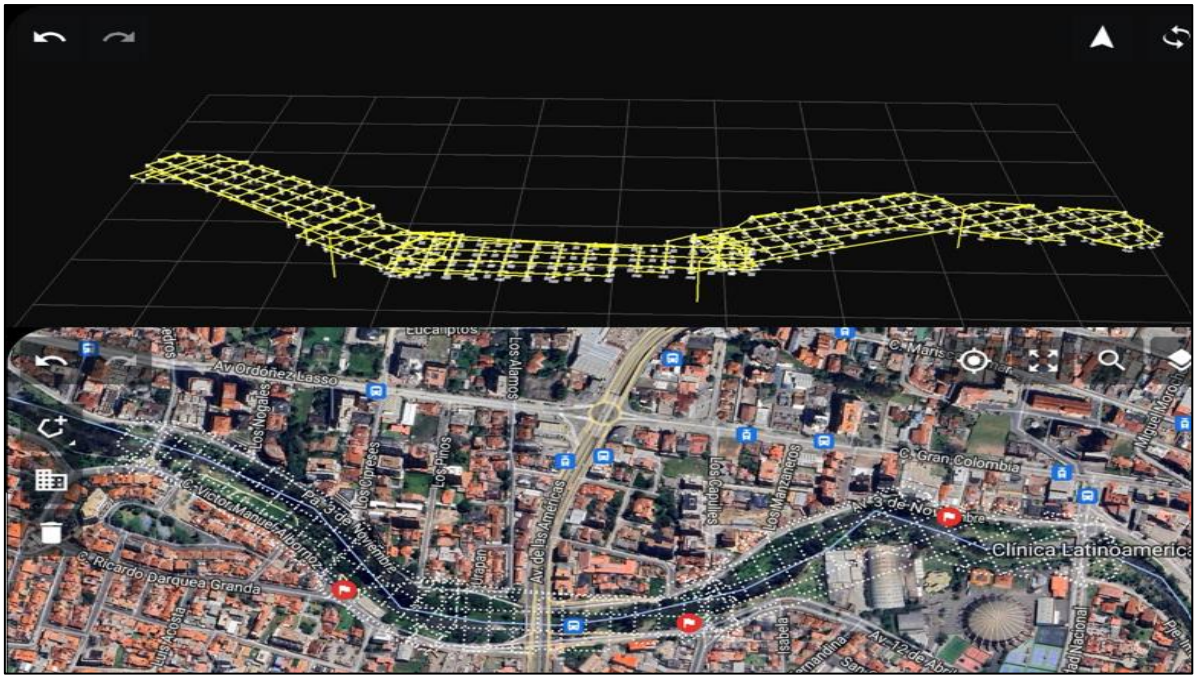
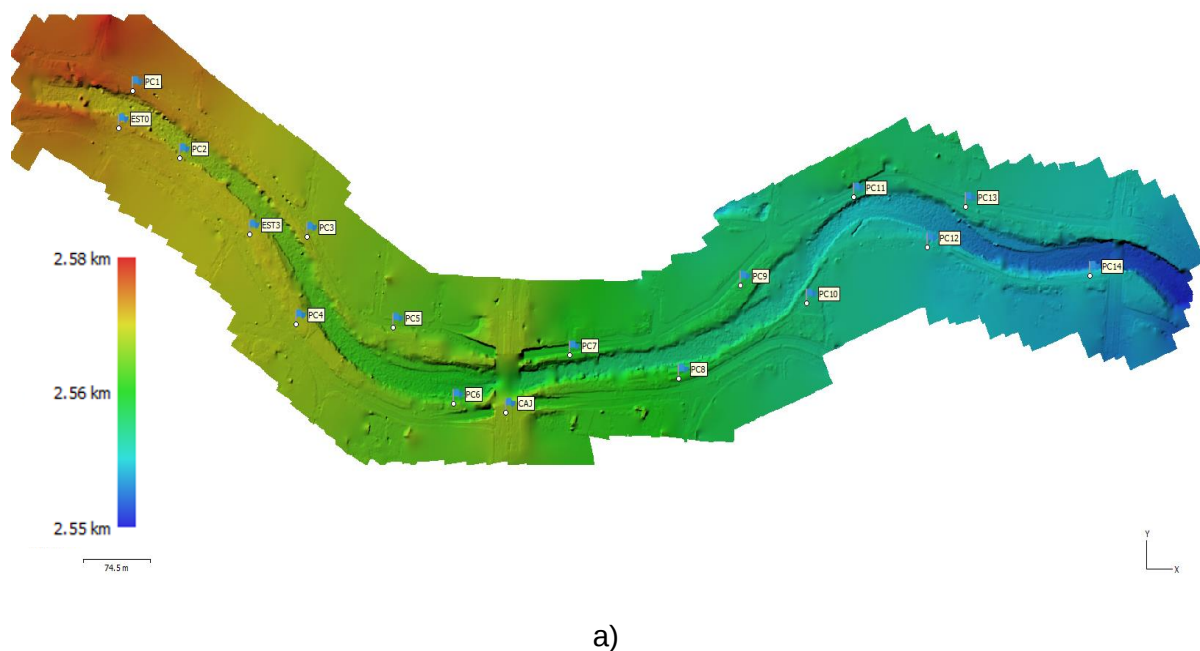


Figura 6. Planificación de mapeo

Luego, se procedió a realizar un filtrado manual de los puntos que no se clasificaron correctamente. Concluido el proceso de filtración, se inició con la generación del DEM para la capa de puntos únicamente de terreno natural y carreteras (sin puentes). En la Figura 7a) se puede observar el Modelo de elevaciones para terreno obtenido con una resolución de 2.23 cm/pixel. Finalmente, con esta información se generó la ortofotografía Figura 7b).





b)

Figura 7. a) Modelo digital del terreno de resolución 2.23 cm/píxel – Zona de estudio en río Tomebamba Cuenca, Ecuador. b) Ortofotografía generada de la zona de estudio.

Para la obtención de los puntos del modelo Drone, se utilizó el DEM generado en QGIS y mediante una herramienta de extracción de elevación de capa ráster se obtuvo la cota de terreno en cada uno de los puntos con coordenada Norte-Este fijados previamente por la Estación Total, con estos puntos se modeló la Superficie para Drone, la cual se puede ver en la Figura 8, con esta información, el alineamiento antes generado, y las líneas de muestreo, se generó el grupo de vistas de sección utilizadas en HEC-RAS para el modelo topográfico Drone.

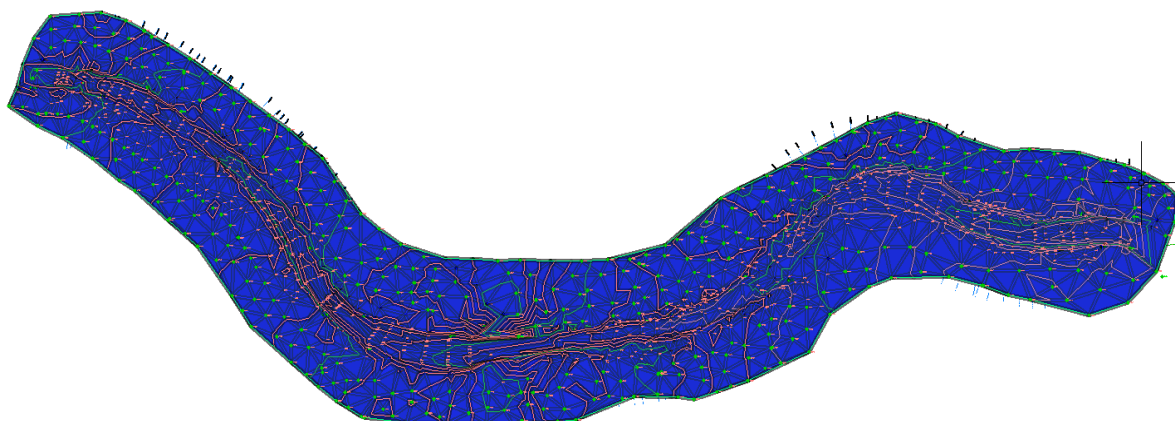


Figura 8. Superficie modelada en base a datos de Fotogrametría Drone

3.1.3 Modelo Topográfico SIGTIERRAS

Para este modelo se solicitó la información de MDT's y ortofotografías de la zona al SIGTIERRAS (Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica), para ello se pidió llenar una solicitud y acuerdo de

confidencialidad de la información proporcionada. Se utilizaron los DEM's denominados NV-F4b-F1 y NV-F4b-F2, con resolución de 3m/pixel.

De la misma forma que el modelo Drone, se utilizó la herramienta de extracción de cotas de capa ráster utilizando las coordenadas Norte-Este predefinidas anteriormente por el modelo Estación Total. Con esta información se generó la superficie para el modelo SIGTIERRAS, la cual se puede apreciar en la Figura 9. Luego, con la alineación creada previamente y las líneas de muestreo se generó el grupo de vistas de sección utilizadas en HEC-RAS para el modelo topográfico SIGTIERRAS.

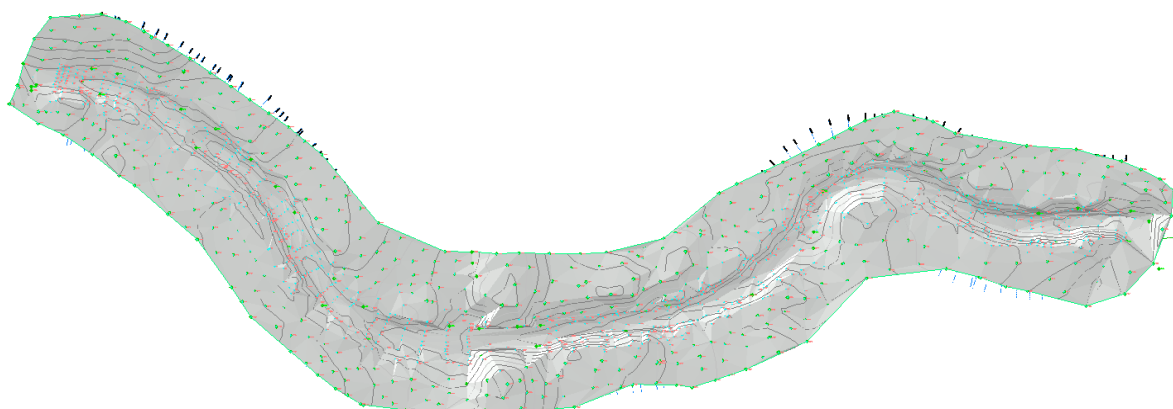


Figura 9. Superficie modelada en base a datos satelitales SIGTIERRAS

Como observación, hay que destacar que las 3 superficies fueron generadas con la misma cantidad de puntos y para las mismas coordenadas de planimetría Norte-Este, es decir la única variante fue la elevación o cota de terreno vertical. De tal forma que las 3 superficies sean comparables entre sí.

3.2 Modelación Hidráulica

3.2.1 HEC-RAS y condiciones de contorno.

Para la modelación hidráulica se ha usado el programa HEC-RAS en la versión 6.4.1. Se asumió flujo unidimensional, uniforme y estacionario. En flujo uniforme, la profundidad del agua y la velocidad del flujo permanecen constantes a lo largo del canal, no hay variación en la dirección del flujo. En flujo estacionario, las características no cambian con el tiempo, la profundidad y velocidad del agua en cualquier punto del canal permanecen constantes. Para la simulación de flujo uniforme y estacionario,

HEC-RAS utiliza las ecuaciones de flujo uniforme de Manning y las ecuaciones de energía (U.S. Army Corps of Engineers, 2010).

Ecuación de Manning:

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

Donde:

- u = Velocidad del flujo (m/s)
- n = Coeficiente de rugosidad de Manning
- R = Radio hidráulico (m)
- S = Pendiente del canal

Ecuación de Continuidad:

$$Q = A \cdot u \quad (2)$$

- Q = Caudal (m³/s)
- A = Área de la sección transversal (m²)
- u = Velocidad del flujo (m/s)

Ecuación de Energía:

Para el flujo uniforme y estacionario, se utiliza la ecuación de energía simplificada:

$$Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + hf \quad (3)$$

- Z_1 y Z_2 = Elevaciones del fondo del canal aguas arriba y aguas abajo, respectivamente
- u_1 y u_2 = Velocidades del flujo aguas arriba y aguas abajo, respectivamente
- g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)
- hf = Pérdida de energía por fricción (m)

Pérdidas por Fricción:

Las pérdidas por fricción en flujo uniforme se calculan utilizando la fórmula de Manning. Estas pérdidas son proporcionales a la longitud del tramo y la pendiente del canal.

3.2.2 Pendiente

Debido a que las representaciones topográficas son distintas para cada modelación, los perfiles longitudinales difirieren entre sí, como se puede observar en la Figura 10. En consecuencia, las pendientes para cada perfil también son distintas. Para el desnivel que se ingresa como condición de contorno en el programa HEC-RAS se determinó un valor promedio de las 132 secciones para cada perfil longitudinal. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Pendiente promedio para cada modelo topográfico.

	Secciones	Pendiente promedio, S (%)
Estación Total	132	1.40%
Drone	132	1.46%
SIGTIERRAS	132	1.31%

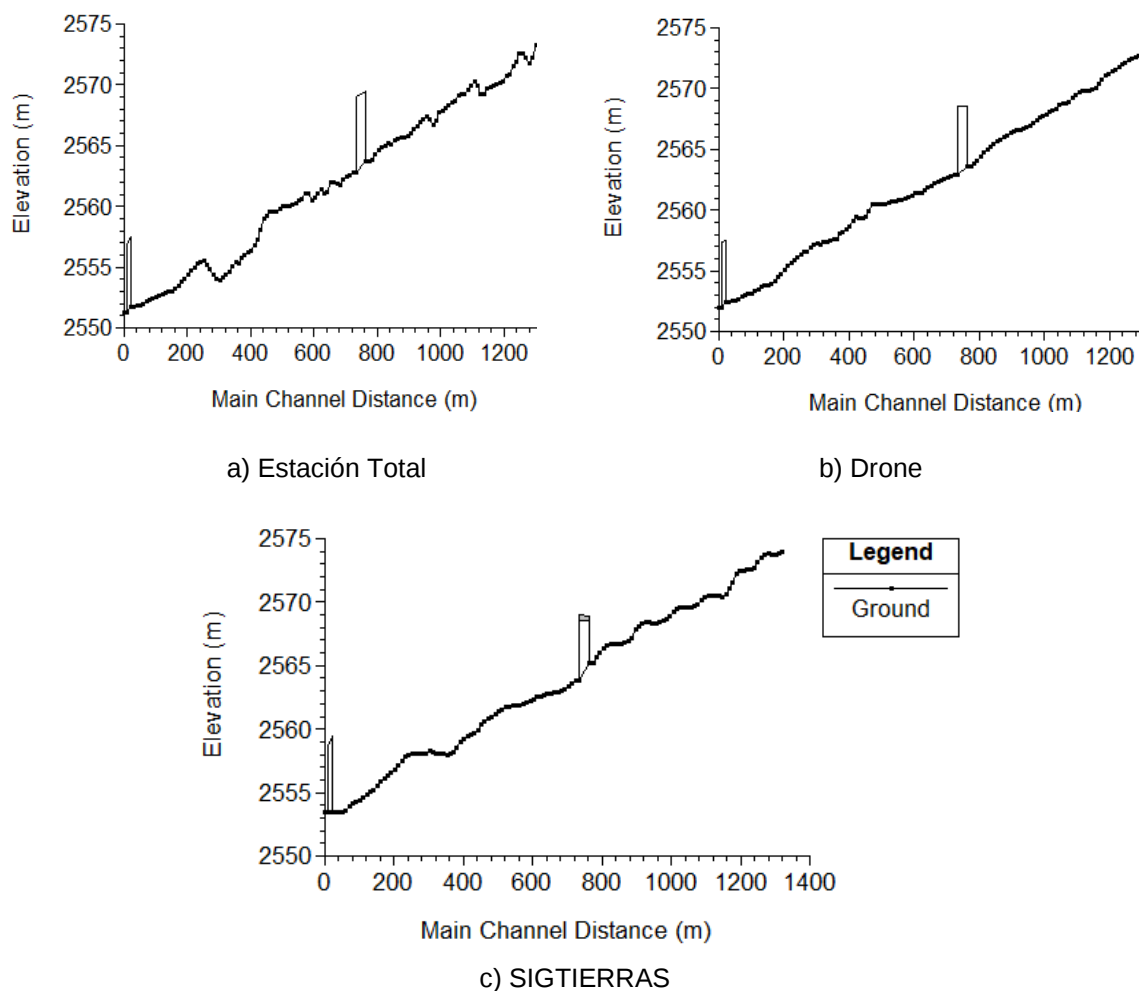


Figura 10. Perfil longitudinal del terreno en su cota más baja. a) Estación Total ET b) Modelo Drone c) Modelo SIGTIERRAS.

3.2.3 Caudal

Chimborazo (2019) obtiene caudales para varios períodos de retorno. Para lo cual se recopilaron series históricas de estaciones meteorológicas en la subcuenca del río Tomebamba, específicamente las precipitaciones máximas. Se aplicaron métodos de ajuste de distribuciones estadísticas, como la función de Gumbel, para determinar las precipitaciones máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno, incluyendo 25 años. Se generaron hietogramas de diseño a partir de las precipitaciones máximas, representando la distribución temporal de la lluvia durante un evento. Se utilizó el modelo HEC-HMS para transformar las precipitaciones en escorrentía, implementando el método del Número de Curva del SCS para calcular las pérdidas por infiltración. Esto permitió simular hidrogramas de escorrentía para cada período de retorno mediante el modelo HEC-HMS, obteniéndose un caudal pico de 193.6 m³/s para un TR de 25 años. Este último es el caudal que se ha usado para la modelación hidráulica de este trabajo.

3.2.4 Rugosidad

Coeficiente de rugosidad de Manning para lecho del río.

Para la rugosidad del canal se consideró una particularidad de los ríos de montaña, los cuales se caracterizan por tener altas pendientes y grandes cantos rodados presentes en el lecho del río, por tanto, el coeficiente de Darcy-Weisbach del canal principal varía significativamente con el calado. Esta variación se puede describir usando una ley logarítmica expresada por la ecuación 4 (Abril & Knight, 2010).

$$f_{mc} = 8 \left[5.75 \times \log \left(\frac{4H_{mc}}{d} \right) \right]^{-2} \quad (4)$$

Donde f_{mc} es una función del tamaño d de la partícula representativa del lecho y de la profundidad media lateral en el canal principal H_{mc} . Para el diámetro representativo del lecho se tomó D_{84} con un valor de 1300 mm. El coeficiente de Darcy-Weisbach puede ser transformado a su equivalente coeficiente de Manning mediante la siguiente expresión:

$$n = R^{1/6} \sqrt{\frac{f_{mc}}{8g}} \quad (5)$$

Donde R es el radio hidráulico de la sección y g es la gravedad (9.81 m/s²). Tanto el H_{mc} como R se obtienen como resultados de la modelación hidráulica unidimensional, por lo que es

factible en estos casos un proceso iterativo, que consiste en introducir un valor de n , obtenido de la bibliografía, para todas las secciones. Luego de definir los demás parámetros del modelo, se ejecuta y se obtienen valores de H_{mc} y R para cada una de las secciones del río. Con estos valores se calcula el correspondiente n , que obedece a las ecuaciones 4 y 5. Estos nuevos valores se vuelven a introducir al programa en las secciones correspondientes. De este modo se realizaron las iteraciones necesarias hasta que el valor de n ingresado sea próximo al de salida.

Para la primera iteración se ha tomado un valor de rugosidad de Manning igual a 0.19 como se muestra en la Figura 11. El error se ha calculado entre dos iteraciones; anterior y actual. Los valores de n , en los tres modelos, convergieron a partir de la iteración 5 para un rango entre 0.053 - 0.078, para lo cual se obtuvieron errores del 0% para el 99% de las secciones, y para otras, errores entre 0.1 y 2%.



Figura 11. Referencia fotográfica para rugosidad. Tomado de (Yochum et al., 2014).

Coeficiente de rugosidad de Manning para llanuras de inundación.

Tanto para la llanura de inundación izquierda como para la derecha se usó un solo coeficiente de Manning igual a 0.1. Este valor corresponde a un coeficiente de rugosidad ponderado, el cual fue calculado tomando en cuenta la información del tipo de material presente para las planicies de inundación, valores obtenidos de (Te Chow & Saldarriaga, 1994) que fueron:

- Matorrales medios a densos con un coeficiente de rugosidad n de 0.16
- Pastizal sin matorral con un coeficiente de rugosidad n de 0.05

Además, para calcular las áreas de dichas llanuras se utilizó el software QGIS y la ortofotografía obtenida mediante levantamiento de Drone; sobre esta capa ráster se generó polígonos correspondientes a cada tipo de planicie (ver Figura 12), posterior se realizó la sumatoria de las áreas obtenidas para la ponderación, siendo estas de 2.68 ha para matorrales y 3.81 ha para pastizal, en base a estos valores y el coeficiente respectivo se obtuvo un coeficiente n de 0.1 que fue utilizado para las llanuras a lo largo de todo el tramo completo de estudio.

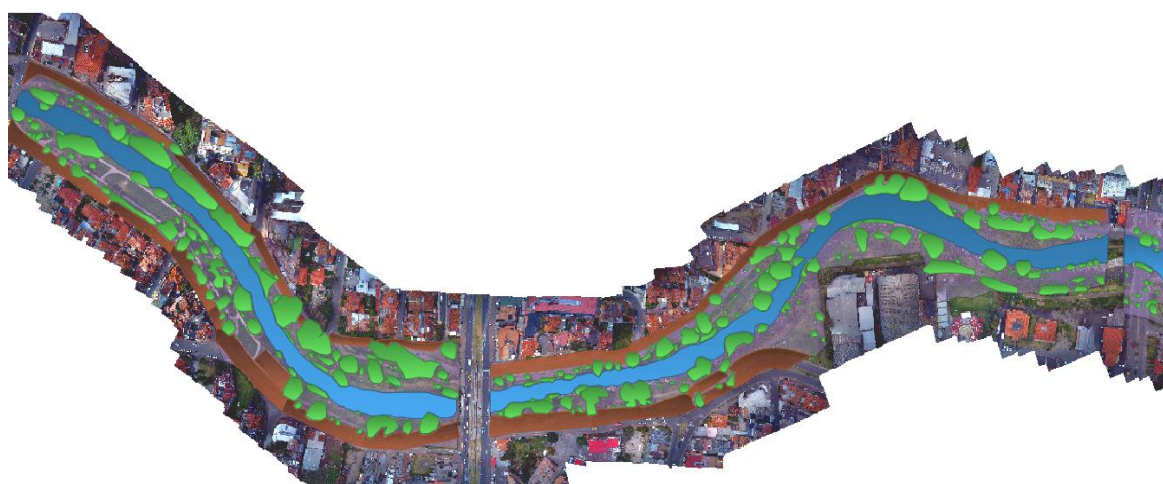


Figura 12. Cálculo de áreas en QGIS para coeficiente de rugosidad ponderado.

3.2.5 Proceso de simulación en HEC-RAS.

Una breve descripción del proceso para la simulación unidimensional en HEC-RAS es:

- **Definición de la Geometría:** Se exportó la geometría desde Civil 3D en formato “.geo” a través de la herramienta “*Import geometry data > Gis Data*”. Luego de verificar que los datos se exportaron correctamente se asigna el coeficiente de Manning para el lecho de río y las llanuras de inundación.

- **Asignación de Condiciones de Contorno:** Se estableció las condiciones de contorno, como el caudal y la pendiente. Esta última se definió en “*Upstream*” y “*Downstream*” para la opción de “*Normal Depth*”.
- **Cálculo del Flujo:** Se estableció flujo mixto para la modelación. HEC-RAS resuelve las ecuaciones de flujo usando un enfoque iterativo para calcular la profundidad y la velocidad del flujo en cada sección transversal.
- **Visualización de Resultados:** Los resultados se visualizaron en forma de perfiles de elevación del agua y tablas con diferentes parámetros de la simulación, tales como: velocidades, calados, ancho en la superficie para cada sección, área mojada, entre otros.

3.3 Métricas utilizadas para medir eficiencia de modelos

Tanto para la variabilidad en las secciones topográficas como para la variabilidad en los resultados de anchos de inundación se usaron los parámetros de Error Absoluto, Error Absoluto Medio y Error Absoluto Máximo que se describen en las siguientes expresiones (Li et al., 2022) (Madrigal, 2022):

$$Error\ Absoluto\ (AE) = \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (6)$$

$$Error\ Absoluto\ Medio\ (MAE) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (7)$$

$$Maximo\ Error\ Absoluto\ (AEMAX) = \max(|S_i - O_i|) \quad (8)$$

En donde S_i corresponde al valor simulado en el punto i , y O_i es el valor observado para ese mismo punto. Además, se ha usado el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés) el cual es una métrica utilizada para evaluar la precisión de modelos predictivos, particularmente en hidrología. Este coeficiente mide la relación entre los valores observados y los valores predichos por un modelo (Nash & Sutcliffe, 1970).

$$Nash - Sutcliffe\ (NSE) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

El rango cualitativo de evaluación usado para los valores de este parámetro es el expuesto en la Tabla 4.

Tabla 4. Rango de valores de NSE. Tomado de (Perreault et al., 2022)

NSE	Calificación
$NSE \leq 0$	Inaceptable
$0 < NSE < 0.4$	Débil
$0.4 < NSE < 0.6$	Moderado
$0.6 < NSE < 0.8$	Bueno
$NSE \geq 0.8$	Óptimo

3.4 Índice de Curvatura

Para el análisis se ha dividido a la zona de estudio en tres tramos; dos tramos iniciales aproximadamente rectos y un tramo final con mayor curvatura. Para evaluar la curvatura de cada tramo se ha trazado una aproximación del alineamiento central mediante curvas horizontales, dando como resultado las curvas mostradas en la Figura 13.

$$k = \frac{1}{R} \quad (10)$$

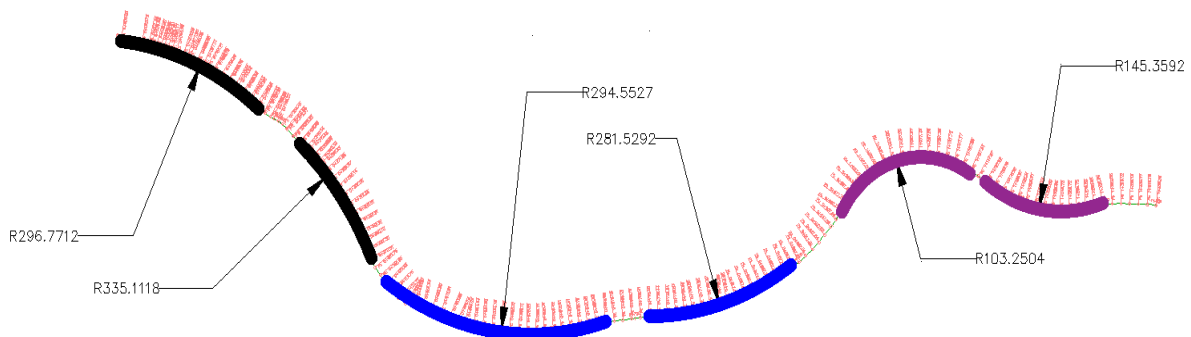


Figura 13. Aproximación al alineamiento mediante curvas horizontales. Negro; tramo 1, Azul; tramo 2, Morado; tramo 3.

La curvatura se ha calculado usando la ecuación 10. A cada tramo le corresponden 2 curvas de radio conocido cuyos valores se muestran en la Tabla 5. En la misma, se muestra el resultado de índice de curvatura total, así como de curvatura ponderada. Aquí se puede observar que para los tramos 1 y 2 se tiene un índice de curvatura bajo, alrededor de 0.65%, mientras que, para el tramo final al estar constituido por 2 curvas de un radio mucho menor, la curvatura de este tramo es casi el triple con respecto a los 2 primeros. Por ello, para fines

de análisis llamaremos a los tramos 1 y 2, como tramos rectos, y al tramo final como tramo curvo.

Tabla 5. Índice de Curvatura para cada tramo de estudio.

	R1 (m)	R2 (m)	Curvatura k1	Curvatura k2	Long. Arco 1 (m)	Long. Arco 2 (m)	I.C. Total	Curvatura Ponderada
T1	296	335	0.34%	0.30%	373	140	0.64%	0.33%
T2	294	281	0.34%	0.36%	172	171	0.70%	0.35%
T3	103	145	0.97%	0.69%	169	141	1.66%	0.84%

4. Resultados

4.1 Evaluación de la resolución topográfica entre modelos Drone y SIGTIERRAS

4.1.1 Análisis Global (Métricas para el tramo completo)

Los datos de Estación Total tienen una precisión de 2". Mientras que los DEM's, de SIGTIERRAS y Drone, tienen una resolución de 3 m/pixel y 2.23cm/pixel, respectivamente. En la Tabla 6 se muestran algunos resultados estadísticos para las secciones topográficas de los tres modelos. Las cotas mínimas y máximas del modelo Drone son más cercanas a las del modelo Estación Total, mientras que el modelo SIGTIERRAS presenta una cota mínima más alta y un desnivel menor, esto sugiere que el modelo SIGTIERRAS podría estar subestimando los puntos más bajos del terreno o capturando menos detalle en esas áreas.

Tabla 6. Resultados de estadística descriptiva para las secciones topográficas.

PARÁMETRO	Estación Total	SIGTIERRAS	Drone
Secciones Transversales analizadas	132	132	132
Puntos analizados por sección (promedio)	23.32	23.32	23.32
Puntos analizados total n	3078	3078	3078
Cota Mínima Terreno (m.s.n.m.)	2551.36	2553.37	2551.96
Cota Máxima Terreno (m.s.n.m.)	2577.85	2578.00	2578.15
Desnivel (m)	26.49	24.63	26.19
Media	2563.91	2564.99	2564.13
Mediana	2563.99	2564.46	2563.96
Varianza	44.20	36.89	40.79
Desviación estándar	6.65	6.07	6.39

Se ha tomado como verdadera la geometría obtenida mediante Estación Total. Y de esta forma, se computó el coeficiente Nash-Sutcliffe global para todas las secciones de los

modelos topográficos, obteniéndose un solo coeficiente para la comparación de la topografía Estación Total vs Drone y otro coeficiente para los modelos Estación Total vs SIGTIERRAS. El primer contraste obtuvo un Nash-Sutcliffe de 0.99, mientras que el segundo obtuvo un valor de 0.94. Estos resultados globales sugieren, prematuramente, que en general ambos modelos tienen un buen desempeño. Sin embargo, los análisis de cada sección por separado muestran diferencias significativas en tramos específicos del río. En la Figura 14 se muestra una gráfica de dispersión de las cotas topográficas de cada una de las secciones transversales generadas, en donde podemos evidenciar un mejor ajuste de los datos del modelo Dron (Figura 14a) que de los datos del modelo SIGTIERRAS (Figura 14b); con respecto a la línea de referencia.

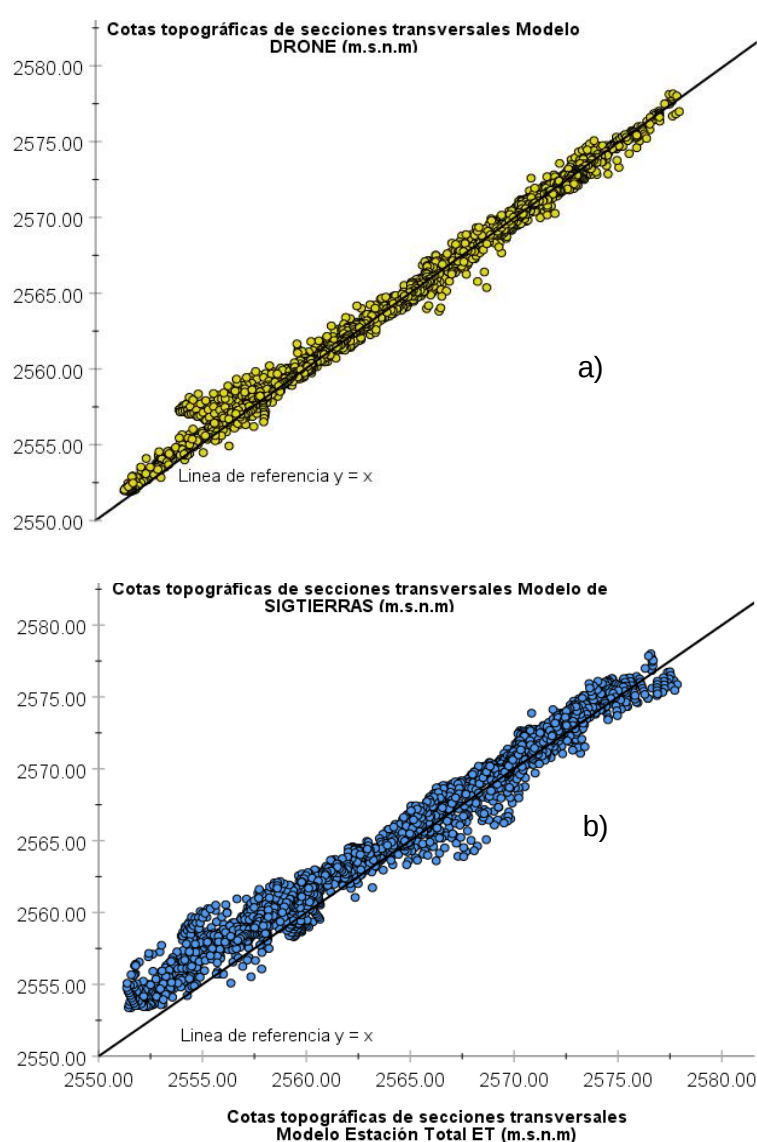


Figura 14. a) Cotas Topográficas para el Modelo DRONE vs ET b) Cotas Topográficas para el modelo SIGTIERRAS vs Estación Total

4.1.2 Análisis Local (Métricas en cada sección transversal)

En la Figura 15 se presenta los valores de eficiencia NSE computados a lo largo de cada una de las estaciones, dicha gráfica revela diferencias significativas en el desempeño de los modelos topográficos obtenidos mediante Drone y SIGTIERRAS.

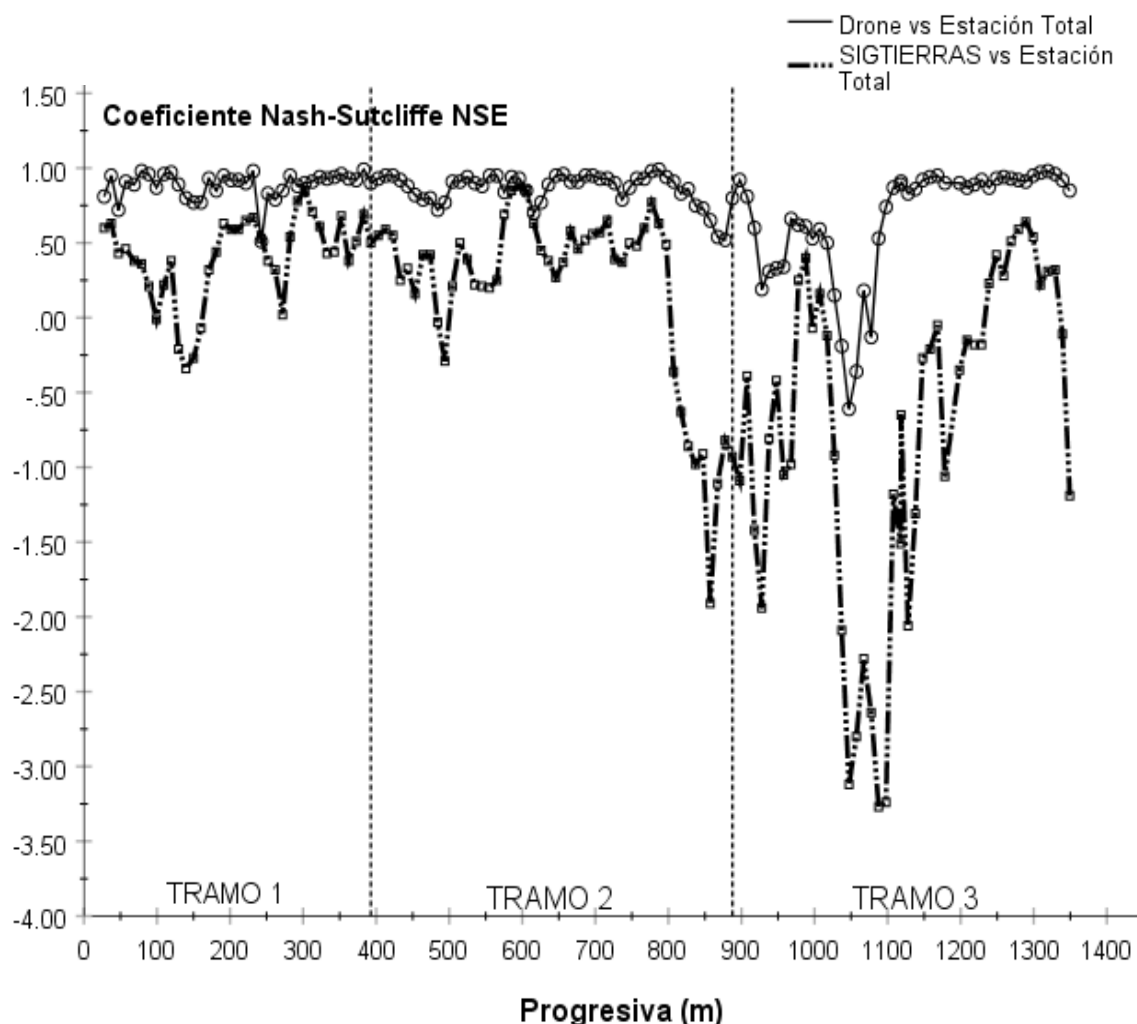


Figura 15. Resultados de Coeficiente Nash-Sutcliffe para cada sección transversal evaluada.

Correlación Modelo Drone

Es importante destacar que los valores obtenidos respecto a la curvatura ponderada de los tramos 1, 2, y 3 son 0.33%, 0.35%, y 0.84%, respectivamente. Por lo cual se considera a los tramos 1 y 2, como tramos relativamente rectos y al tramo 3; como curvo. A lo largo de las dos primeras partes (desde el inicio hasta progresiva 887.58m) los valores de correlación (NSE) para el modelo Drone se mantuvieron consistentemente altos; con la mayoría de los puntos cercanos a 1 (correlación fuerte) y algunas caídas menores. Esto refleja una alta precisión y una buena correspondencia con el modelo de Estación Total, para tramos

geométricamente simples, como lo son el primero y segundo. En el tramo 3 la correlación disminuye notablemente; aún más, para la parte inicial de este tramo, se obtienen valores NSE negativos (correlación Inaceptable). Note que el tramo para el que se obtienen correlaciones inaceptables, es justamente la parte con una curvatura de 0.97%, que corresponde a la mayor curvatura de todos los tramos (curvatura k_1 para T3 de la Tabla 5). Esto sugiere que incluso los datos topográficos de alta resolución capturados en el modelo Drone no son adecuados para representar las complejidades en áreas curvas.

Correlación Modelo SIGTIERRAS

Los valores del NSE para el modelo SIGTIERRAS mostraron una mayor variabilidad, con varios puntos cayendo por debajo de 0 (correlación inaceptable especialmente en el tramo curvo del río) lo que indica una menor precisión respecto del modelo Estación Total. De la misma forma que la correlación anterior, el modelo SIGTIERRAS tuvo mejor desempeño en los tramos rectos que en el tramo curvo, en donde los valores de NSE fueron generalmente más bajos y menos consistentes que los del modelo Drone.

La alta variabilidad y la cantidad significativa de puntos con NSE negativo indican una eficiencia menor, demostrando que el modelo SIGTIERRAS predice peor que el promedio de las observaciones, esto revela que las complejidades geométricas de las curvas del río no están bien representadas por los datos satelitales.

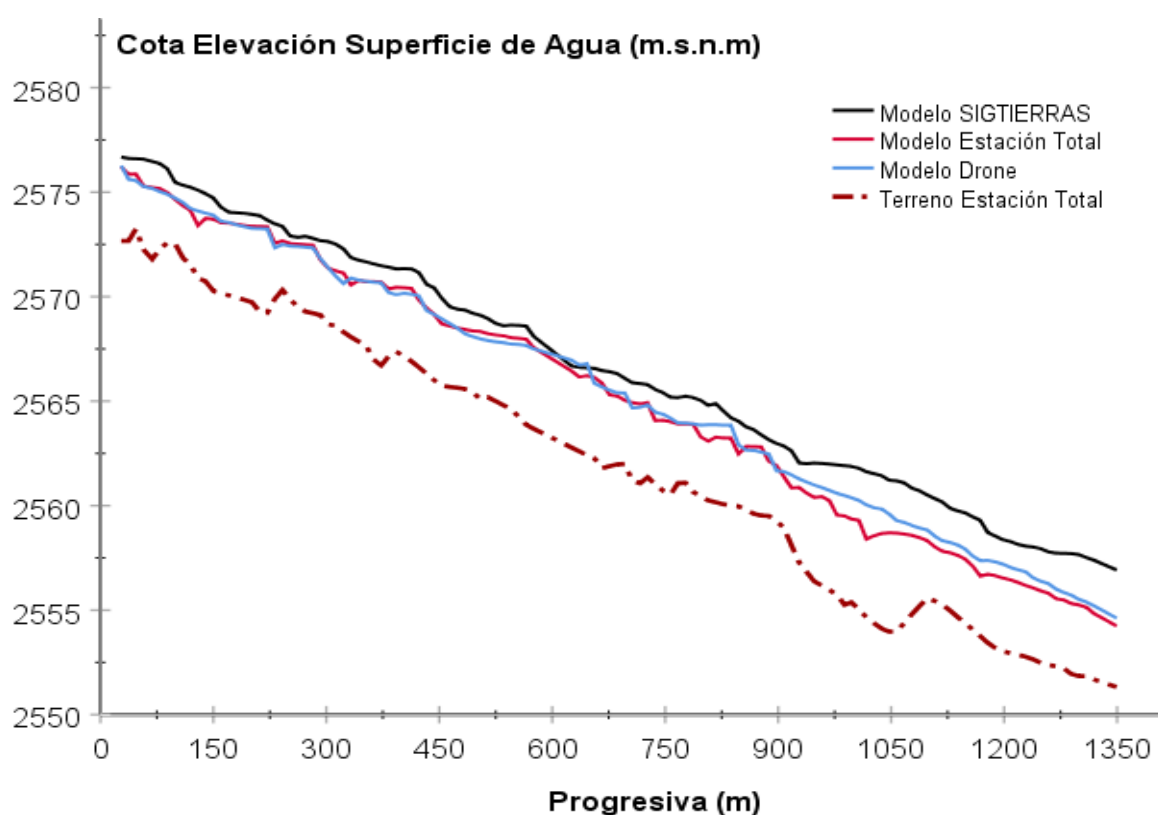
4.2 Correlación en elevación de superficie del agua y calados

La comparación entre las cotas de superficie de agua obtenidas con los modelos Drone y SIGTIERRAS, utilizando el modelo Estación Total como referencia, revela diferencias significativas en términos de precisión y correlación. Por una parte, el modelo Drone muestra una mayor precisión y correlación con el modelo de referencia en tramos rectos. Luego, en el tramo curvo, pese a que NSE disminuye, la correlación sigue siendo buena. Por otra parte, el modelo SIGTIERRAS presenta limitaciones significativas en todos los tramos, y aún más, en el tramo curvo. Las correlaciones y errores respecto a superficie del agua se pueden observar en la Tabla 7. En esta parte es prudente destacar que en una sección del río existen varios calados, pero una sola cota de superficie de agua. Por lo que las métricas calculadas en esta tabla no corresponden a cada sección del río, si no al tramo respectivo. Entonces, si se involucra calados en el análisis es posible obtener un NSE para cada sección (ver Figura 15). Pero si se habla de la cota de la superficie del agua no se puede obtener un NSE por sección, sí para un tramo; en el que se incluyen varias secciones en las que varía esta superficie.

Tabla 7. Métricas respecto a modelo de Estación Total para cotas de superficie de agua.

TRAMO	NASH-SUTCLIFFE (NSE)		ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE)		ERROR ABSOLUTO (AE)		ERROR ABSOLUTO MAXIMO (AE MAX)	
	SIGTIERRAS	Drone	SIGTIERRAS	Drone	SIGTIERRAS	Drone	SIGTIERRAS	Drone
1	0.70	0.98	0.86	0.17	42.88	9.37	1.69	0.70
2	0.82	0.98	0.89	0.26	46.13	14.08	1.75	0.78
3	-0.28	0.88	2.12	0.60	259.8	70.12	3.22	1.64

Por una parte, en la Figura 16 se pudo observar que el modelo Drone (azul) se asemeja con el modelo Estación Total (rojo) prácticamente en todos los tramos, con leves excepciones que se dan al inicio del tramo 3, estos resultados gráficos se refuerzan con los resultados analíticos de la Tabla 7, de donde se tiene un NSE mayor a 0.80 en los tres tramos (correlación óptima). Respecto a SIGTIERRAS en la misma figura se puede apreciar que la superficie obtenida por esta metodología (negro) se aleja notablemente con la obtenida por Estación Total, y este efecto empeora en el último tramo. Igual que en el caso anterior, estos resultados gráficos se apoyan en el coeficiente NSE calculado. Aunque gráficamente existen diferencias notables en el tramo 1 y 2, las correlaciones siguen siendo buena ($NSE > 0.6$), no así para el último tramo en el que se obtiene una correlación inaceptable ($NSE < 0.20$).

**Figura 16.** Elevación de superficie del agua (m.s.n.m) para cada modelo Topográfico.

Por otra parte, al analizar la variabilidad en calados en la Figura 17 se puede ver que la distribución de los valores de NSE para el modelo Drone (negro) se mantienen consistentemente altos, cercanos a 1, a lo largo de la mayoría de las estaciones. Esto indica una alta precisión y una fuerte correlación del modelo Drone con el modelo Estación Total. Mientras que, los valores de NSE para el modelo SIGTIERRAS (azul) muestran una mayor variabilidad y caídas significativas, especialmente en el tramo curvo. Asimismo, los valores de NSE negativos en algunas estaciones indican una correlación insuficiente y una baja precisión del modelo SIGTIERRAS en comparación con el modelo Estación Total, lo que sugiere que los datos topográficos satelitales no capturan con precisión las características del terreno, especialmente en áreas geométricamente complejas.

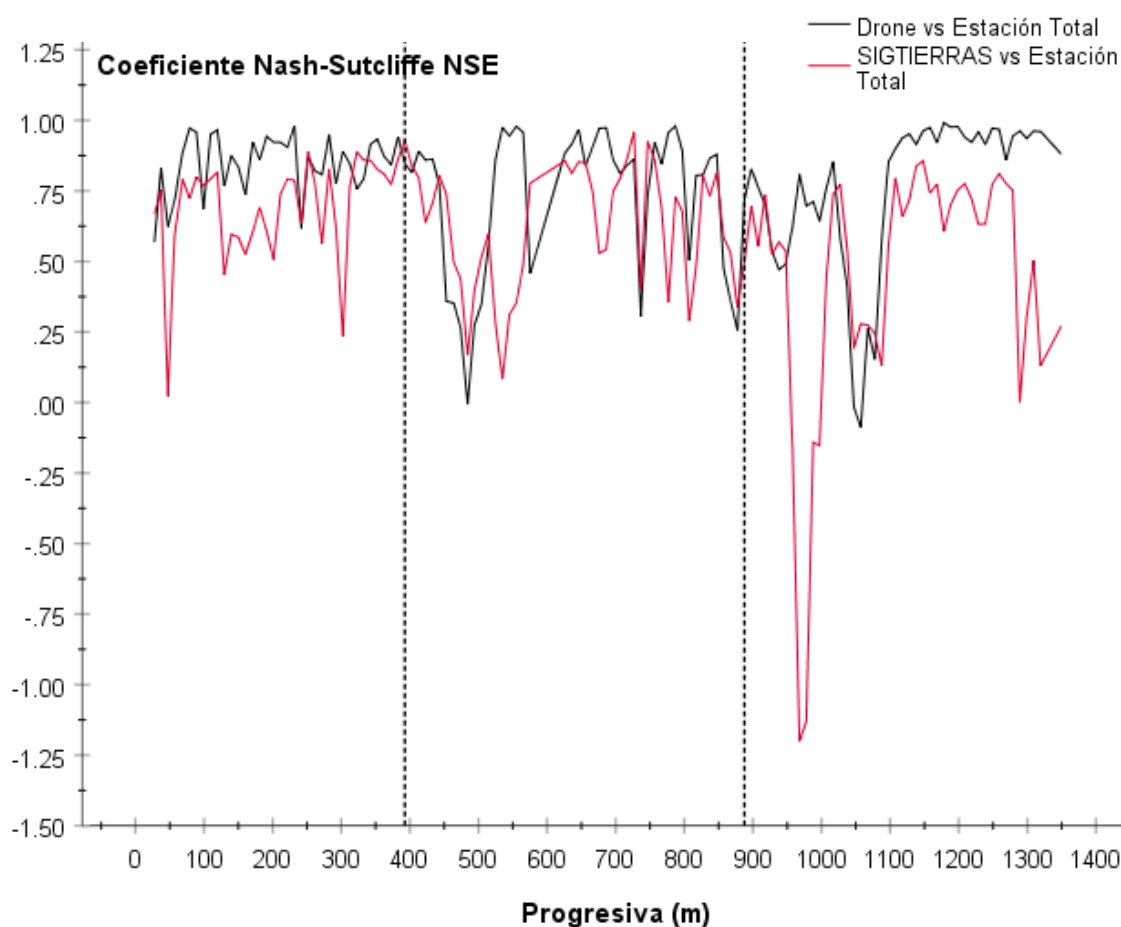


Figura 17. Distribución del Coeficiente Nash-Sutcliffe para calados de agua en el tramo completo.

4.3 Variabilidad en anchos de inundación.

El ancho de inundación corresponde al ancho superficial del agua en la sección inundada. En la Figura 18 se grafica el valor del ancho simulado para cada sección transversal de los modelos Drone y SIGTIERRAS con respecto al de Estación Total. La Figura 18 a) muestra que el modelo Drone tiene una correlación moderada con el modelo Estación Total en la

predicción de anchos de inundación, con un R^2 de 0.411, lo que indica una capacidad razonable para predecir de manera similar al modelo de referencia (Estación Total). La ecuación de la línea de tendencia con pendiente 0.6798 refuerza esta relación positiva, aunque no perfecta. En contraste, en la Figura 18 b) el modelo SIGTIERRAS presenta una correlación casi nula con el modelo ET, con un R^2 de 0.003, y una ecuación de tendencia con pendiente 0.0836 que sugiere una falta de relación significativa. La dispersión de los datos es mucho mayor en SIGTIERRAS, indicando inconsistencias y baja precisión en sus predicciones de anchos de inundación comparado con el modelo Drone.

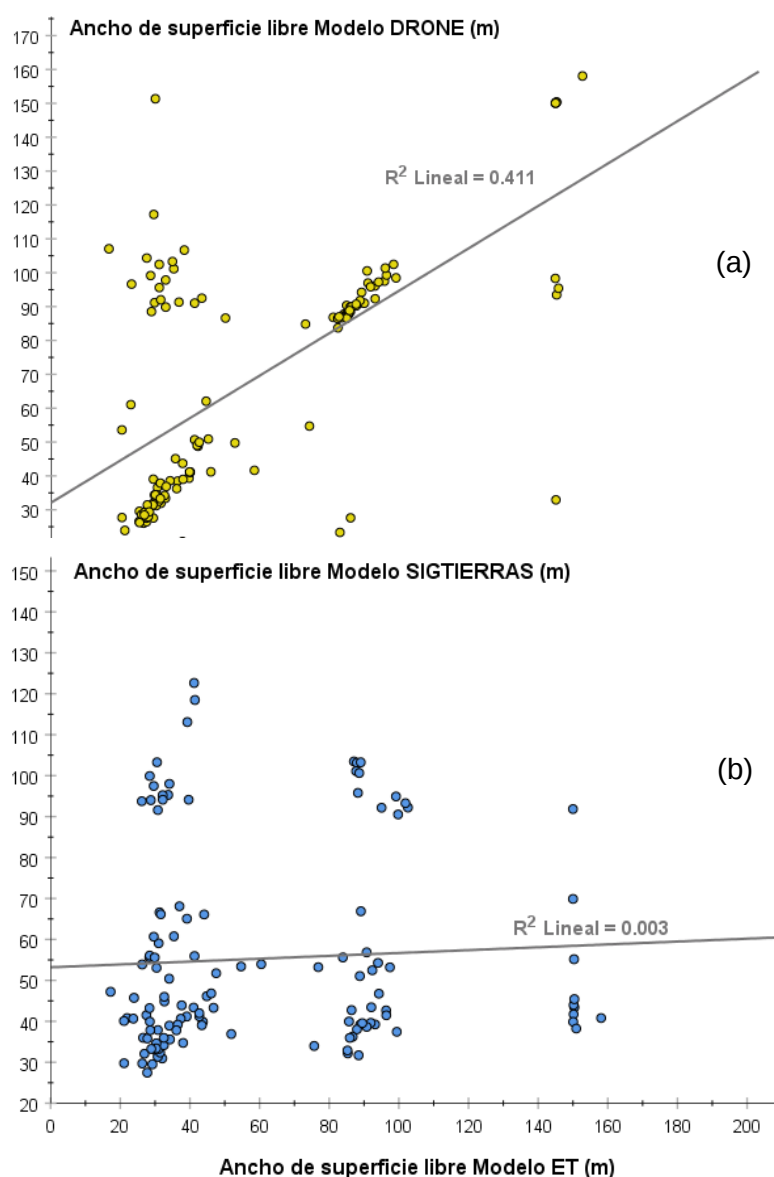


Figura 18. Correlación entre anchos de superficie libre para cada sección transversal entre (a) Estación Total y SIGTIERRAS (b) Estación Total y Drone.

4.4 Variabilidad en áreas de inundación, zonas de desbordamiento.

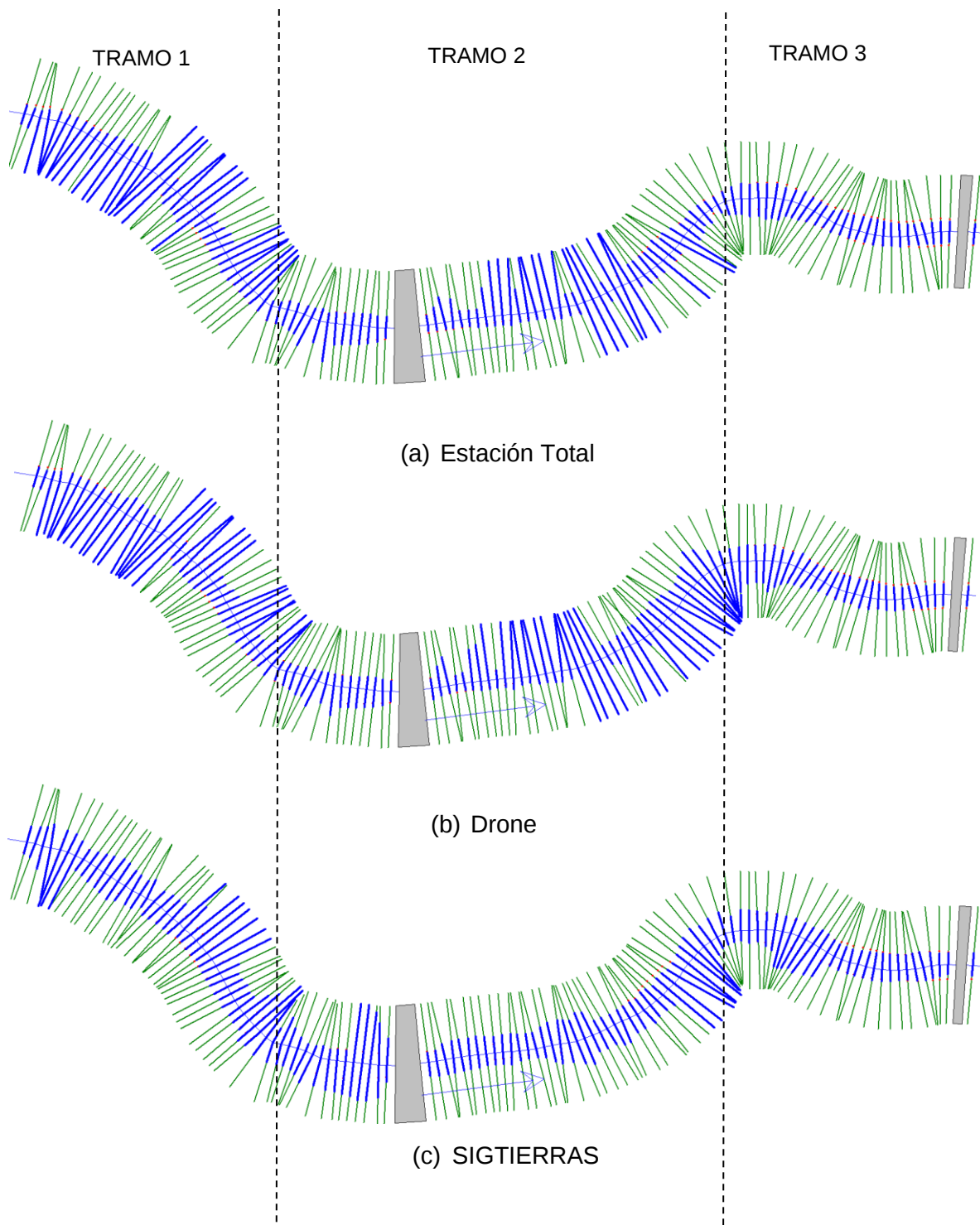


Figura 19. Resultados gráficos de anchos de inundación por tramos.
(a) Estación Total (b) Drone (c) SIGTIERRAS

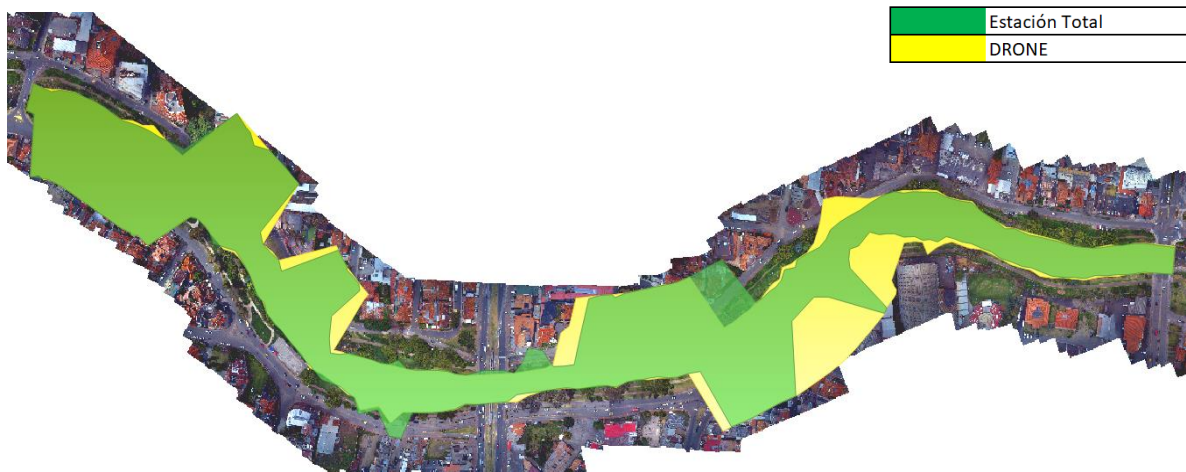
Tabla 8. Correlación en ancho de inundación respecto a modelo de estación total.

	NASH-SUTCLIFFE (NSE)		ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE)		ERROR ABSOLUTO (AE)		ERROR ABSOLUTO MAXIMO (AEMAX)	
	SIGTIERRAS	DRONE	SIGTIERRAS	DRONE	SIGTIERRAS	DRONE	SIGTIERRAS	DRONE
TRAMO 1	-0.84	0.75	40.14	7.12	1485.08	263.48	117.27	61.46
TRAMO 2	-0.55	0.27	38.34	18.06	1725.22	812.83	112.70	120.35
TRAMO 3	-1.73	-3.61	17.86	23.36	798.75	987.54	72.72	89.85
TRAMO TOTAL	-0.37	0.27	31.82	16.38	4009.05	2063.85	117.27	120.35

De la Figura 19 se puede observar que las secciones con desbordamiento predominan en el tramo 1 tanto para el modelo de Estación Total como para Drone. En cambio, el modelo SIGTIERRAS, en comparación con los anteriores, presenta pocas zonas de desbordamiento en este tramo. Respecto al tramo 2, las secciones con desbordamiento son notables en la parte media y final; para Estación Total y Drone. Luego (similar al tramo 1), para el modelo SIGTIERRAS, existen pocos desbordamientos presentándose la mayoría al inicio del mismo. Al inicio del tramo 3, para el modelo de Drone y SIGTIERRAS se tiene gran número de secciones con desbordamiento, mientras que para Estación Total disminuye.

El área de inundación resultante para el modelo producido por Estación Total es de 7.91 ha, con la mayor concentración en los tramos 1 y 2, donde se observan las principales zonas de desbordamiento. De manera similar, el área de 8.87 ha correspondiente al modelo Drone muestra sus mayores concentraciones casi en las mismas zonas que Estación Total, con algunas diferencias notables. La principal diferencia entre estos dos modelos se observa en la zona antes del Coliseo Jefferson Pérez, donde el área de inundación inicia aproximadamente en los mismos puntos para Estación Total y Drone, pero el desbordamiento para Drone se prolonga mucho más. Por otro lado, el modelo SIGTIERRAS, con un área de inundación de 7.01 ha, menor que las dos anteriores, presenta los mayores desbordamientos al final de los tramos 1 y 2.

La Figura 20 a) muestra que el área inundada por el modelo Drone es mayor y más dispersa, especialmente en zonas donde la topografía captura más detalles de los bordes y pequeños relieves. Se puede apreciar que las mayores diferencias existen al término del tramo 2 e inicio del tramo 3 (Zona curva justo antes del Coliseo Jefferson Pérez). Por otro lado, se observa que las gráficas se superponen entre sí casi en su totalidad al final del tramo 3. En la Figura 20 b), para SIGTIERRAS, se puede observar un área inundada menor y más concentrada.



(a) Estación Total vs Drone



(b) Estación Total vs SIGTIERRAS

Figura 20. Áreas de inundación traslapadas. (a) Estación Total vs DRONE (b) Estación Total vs SIGTIERRAS; Estación Total 7.91 ha, Drone 8.87 ha, SIGTIERRAS 7.07 ha.

Esto sugiere que este modelo, con su menor precisión, no captura adecuadamente algunas características topográficas críticas, resultando en una subestimación del área de inundación. Las diferencias principalmente son notorias en las zonas curvas de los tres tramos e incluso en la zona recta del río justo antes del puente de la Avenida de las Américas. Las mínimas diferencias en la gráfica de traslape, al igual que en los modelos Estación Total vs SIGTIERRAS, se dan al final del tramo 3 (zona justo antes del puente de la Avenida Unidad Nacional).

5. Discusión

5.1 Calidad de los modelos topográficos Drone y SIGTIERRAS

Respecto a los resultados de estadística descriptiva, note de la Tabla 6 que la varianza y la desviación estándar son mayores en los modelos Estación Total y Drone, lo que indica una mayor dispersión y variabilidad en las elevaciones del terreno capturadas. En contraste, el modelo SIGTIERRAS muestra una menor dispersión. Estas diferencias sugieren que los datos de los modelos Estación Total y Drone capturan de manera más precisa las crestas y depresiones del terreno, mientras que el modelo SIGTIERRAS es menos preciso en la captura de las características topográficas, ya que tiende a suavizar exageradamente la topografía, omitiendo desniveles y particularidades existentes. Asimismo, si analizamos el coeficiente NSE global de secciones topográficas (0.99 y 0.94) vemos que es óptimo, tanto para Drone como para SIGTIERRAS.

Sin embargo, un análisis detallado para cada una de las 132 secciones (Ver Figura 15) muestra que existe mayor correlación entre datos de Estación Total y Drone. Mientras que para SIGTIERRAS, esta misma métrica, indica grandes diferencias. Por una parte, McCabe (2000) y Vaze et al. (2010) establecieron que la resolución de un DEM afecta significativamente los valores calculados de las características topográficas, donde la resolución más alta proporciona una representación más precisa de la superficie del suelo. Tome en cuenta los tramos considerados rectos (1&2) y observe que las diferencias obtenidas para correlación de Drone y SIGTIERRAS recaen directamente en las diferencias de sus resoluciones. Dado que Drone tiene una resolución (2.23 cm/pixel) mucho mayor que la de SIGTIERRAS (3m/pixel), es lógico que la geometría obtenida por Drone proporcione representaciones más cercanas a las de Estación Total, lo que se ve reflejado claramente en una correlación óptima ($NSE > 0.8$) para la mayoría de tramos. Asimismo, la mayor variabilidad y los valores negativos de NSE para SIGTIERRAS sugieren que la resolución de estos datos no es suficiente para capturar con precisión las variaciones topográficas críticas.

También, Wolock & McCabe (2000) determinaron que, para ríos de montaña o terrenos empinados, los DEM's de baja resolución tienden a suavizar el terreno involucrando pendientes menores a las que se obtendrían con DEM's de mayor resolución. Ahora bien, si nos referimos al parámetro analizado por la referencia anterior, note de la Tabla 3 que la pendiente promedio obtenida para SIGTIERRAS (1.31%) es menor a las obtenidas tanto para Estación Total como para Drone (1.46%). Tomando en cuenta nuevamente las resoluciones para cada modelo, estos resultados son razonables y coherentes con lo obtenido por Wolock & McCabe.

En referencia al tramo considerado Curvo (tramo 3), el análisis del párrafo anterior es válido. Pero, además, este tramo tiene una peculiaridad si se analiza la correlación al inicio del mismo. Si observamos más detenidamente este tramo (ver Figura 21), podemos fijarnos que para el modelo topográfico de referencia (Estación Total) existe una depresión significativa en el perfil longitudinal desde la progresiva 0+900m hasta la progresiva 1+0100 m. Ahora bien, si nos fijamos en la referencia en planta en el mismo gráfico, dicha concavidad del terreno coincide precisamente con la zona más curva de todo el alineamiento. Por otra parte, si se analiza el perfil longitudinal para los modelos Drone (azul) y SIGTIERRAS (negro), esta singularidad topográfica no es capturada. Luego, estos cambios topográficos dinámicos son difíciles de capturar con precisión usando solo imágenes superficiales obtenidas por drones o satélites. De esta forma se justifica el decremento en la correlación existente tanto para el modelo Drone como para SIGTIERRAS respecto al de Estación Total.

Además, Shaheed et al. (2021) determinaron que la curvatura de los ríos genera fuerzas centrífugas que desplazan el flujo hacia las orillas externas, aumentando la erosión y creando bancos de sedimentos en las orillas internas. Entonces esta particularidad en la dinámica fluvial puede ser una posible explicación de la singularidad topográfica encontrada en esta zona curva. Esto resalta la necesidad de realizar análisis locales detallados además de los análisis globales para obtener una comprensión completa del desempeño del modelo.

Por otro lado, el levantamiento topográfico y el vuelo de Drone fue realizado por los autores a inicios del año 2024, mientras que el DEM fue fabricado a finales del año 2016 (ver Anexo A). A pesar de que Alcántara & Castro (2021) comprobaron que para secciones de ríos no existe un cambio importante en la topografía a lo largo del tiempo, es prudente inferir que las condiciones del río en distintos tiempos no son las mismas; aspectos como la vegetación o erosión podrían haber influenciado en las diferencias observadas. Sin embargo, este enfoque requiere un análisis más detallado que esta fuera del alcance de esta investigación.

En consecuencia, la elección entre modelos topográficos de drones y datos satelitales para proyectos relacionados con el agua, como estudios hidrológicos, inundaciones y gestión de recursos hídricos, depende de los requisitos específicos del proyecto. Los drones ofrecen alta resolución y precisión local, siendo ideales para estudios detallados de microcuencas, modelado de inundaciones, monitoreo de ríos y canales, y análisis de zonas críticas donde la topografía cambia rápidamente. Su capacidad de captura detallada permite identificar pequeños desniveles y estructuras que afectan el flujo de agua.

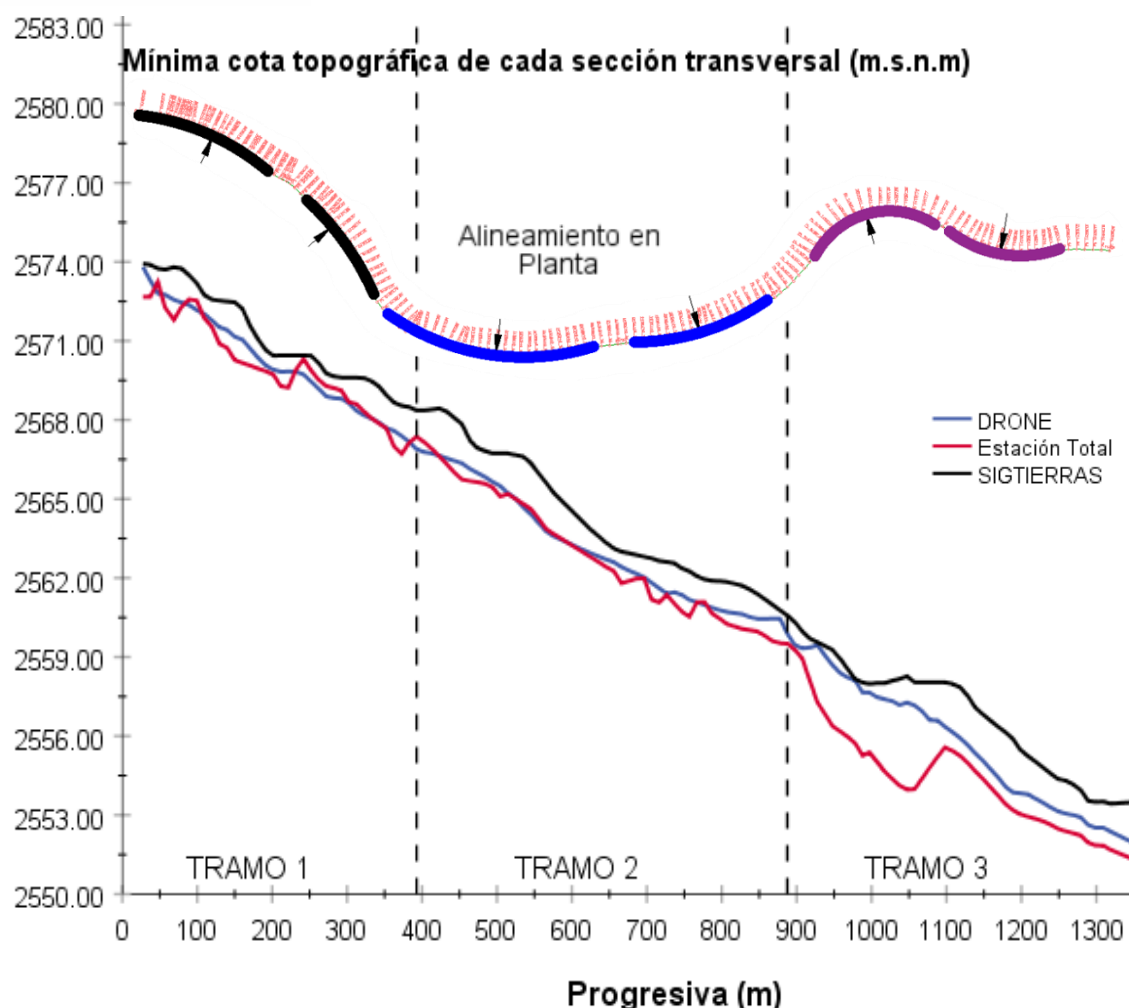


Figura 21. Perfil Longitudinal del terreno para el tramo completo de estudio.

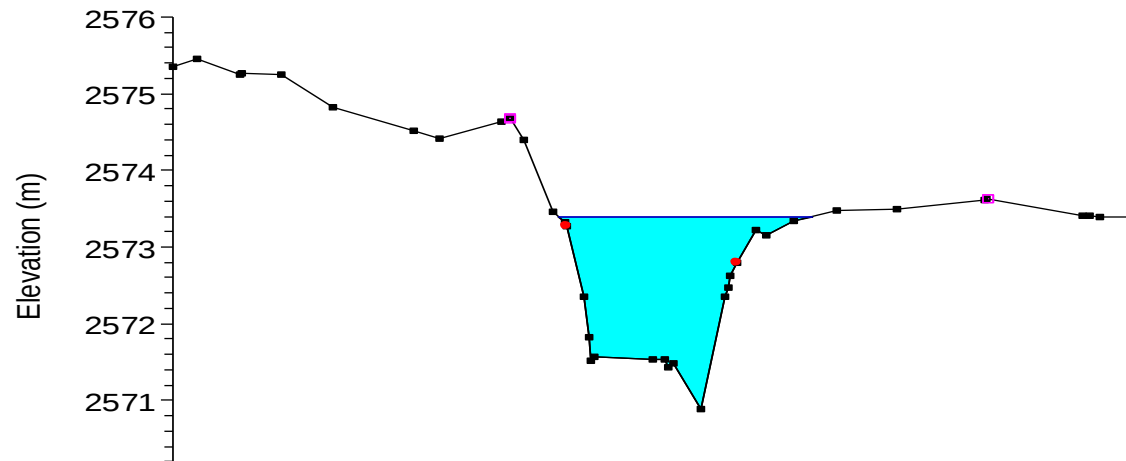
En contraste, los datos satelitales proporcionan una cobertura amplia y son más accesibles económicamente, lo que los hace adecuados para estudios regionales de grandes cuencas hidrográficas, monitoreo de cambios en masas de agua a gran escala, y evaluación de recursos hídricos a nivel regional o global. Los satélites también permiten realizar análisis temporales y proporcionan datos históricos, valiosos para entender tendencias a largo plazo y el impacto del cambio climático en recursos hídricos. La decisión entre drones y satélites debe basarse en la escala del área, la resolución necesaria, el presupuesto disponible y la frecuencia de actualización requerida para obtener los datos más útiles y precisos.

5.2 Impacto en los resultados del modelo hidrodinámico 1D.

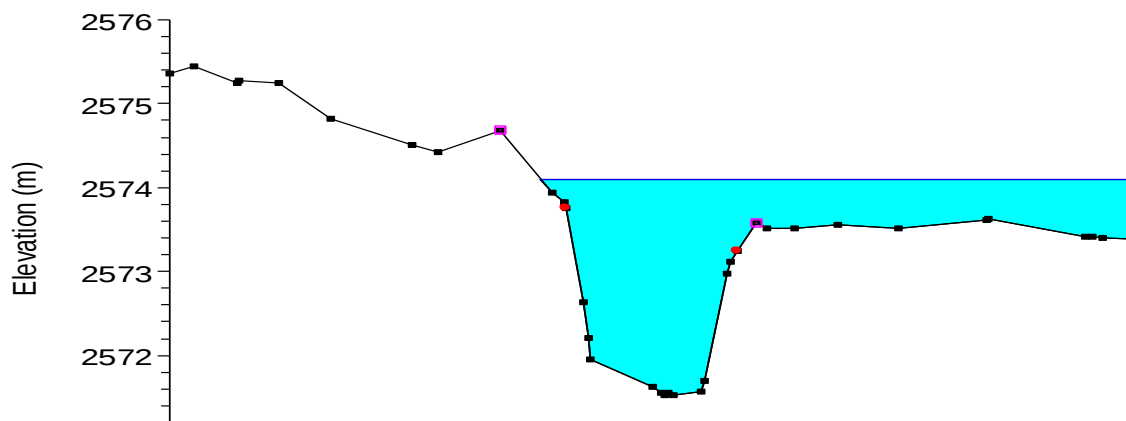
Mientras mayores sean los anchos de inundación mayores serán las áreas inundadas, esta relación directa hace conveniente un solo análisis para el ancho de inundación, el cual es válido también para áreas de inundación. Elevación, calado y ancho superficial de agua resultan afectadas por las diferencias observadas en las geometrías. Pero, ¿Cuál de estos

parámetros es el más afectado?. Para responder esta pregunta refiérase a la Figura 15 y note que, entre los dos modelos, SIGTIERRAS presenta una menor correlación en todos los tramos. Resultados similares se obtienen para elevación, calado y ancho superficial del agua, es decir, SIGTIERRAS presenta la menor correlación tanto en la geometría como en los resultados del modelo, con una leve excepción en el tramo 3 que se trata más adelante (correlación de -3.61 para el ancho). Analizando solo resultados de SIGTIERRAS, note de la Tabla 7, Tabla 9 y Figura 17 que la correlación más baja afín al calado, elevación, y ancho es de -1.25, -0.28, y -1.73, respectivamente. Aunque todos estos valores mínimos representan una correlación inaceptable, la diferencia numérica muestra que con el modelo SIGTIERRAS, el parámetro más afectado por las diferencias en la geometría es el ancho de inundación. Un análisis similar, para Drone, pero con correlaciones mínimas de 0, 0.88, y -3.61, reafirma lo observado con SIGTIERRAS; el parámetro más afectado es el ancho. La explicación de esta determinación radica principalmente en la forma que tiene la sección transversal del río y el desborde para cada sección. De la Figura 22 se puede rescatar que la sección típica se aproxima a una forma trapezoidal, por lo que leves cambios en la cota superficial del agua representarían considerables diferencias en el ancho. Estas diferencias son aún más fuertes si existen desbordes en una sección. Por ejemplo, si se analiza la sección de la progresiva 0+0139.6 m para Drone y Estación Total, resulta que la cota del agua para estas dos secciones (Figura 22 a y b) está alrededor de 2573.5 msnm y el calado promedio en el orden de 1.8 m; no existen grandes diferencias en estos parámetros. Pero al observar la diferencia en el ancho de inundación se tiene 92 m para Drone y 45 m para Estación Total, esto lógicamente se da por que en la sección transversal de Drone existe desbordamiento, mientras que en la correspondiente a Estación total no.

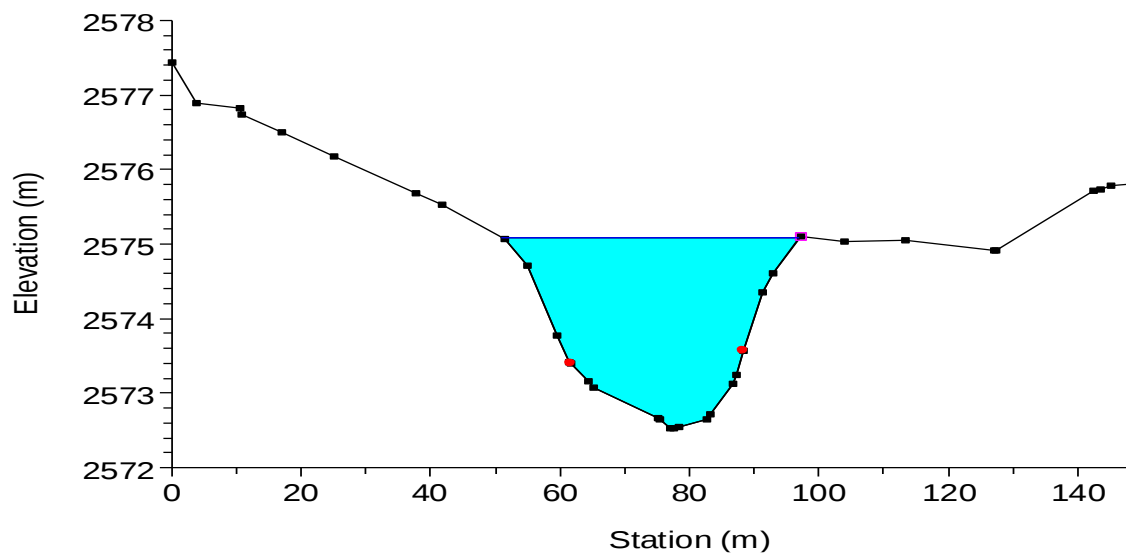
Los resultados obtenidos en esta investigación al igual que los obtenidos por Oganía et al. (2019) y Horritt & Bates (2001) ratifican que los errores en la geometría, principalmente, afectan al ancho superficial de la sección modelada y por consiguiente el área de inundación. Finalmente, en la misma figura se puede corroborar que la capacidad de registrar la microtopografía del modelo por parte del Drone permite capturar detalles finos del terreno, como pequeñas ondulaciones y características que afectan el flujo del agua. La menor resolución del modelo SIGTIERRAS puede resultar en una suavización excesiva del terreno, omitiendo detalles críticos y aumentando los errores en la modelación hidráulica.



(a) Estación Total



(b) Drone



(c) SIGTIERRAS

Figura 22. Secciones transversales en 0+0139.6 m. a) Estación Total b) Drone c) SIGTIERRAS

Tabla 9. Comparación de Eficiencia Nash-Sutcliffe para parámetros de salida.

	ELEVACIÓN DEL AGUA		ANCHO/ÁREA	
	DRONE	SIGTIERRAS	DRONE	SIGTIERRAS
T1	0.98	0.70	0.75	-0.84
T2	0.98	0.82	0.27	-0.55
T3	0.88	-0.28	-3.61	-1.73

5.3 Métricas de evaluación de respuestas del modelo hidrodinámico.

El análisis del Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) para los calados de agua a lo largo del tramo de estudio revela diferencias significativas en la precisión del modelo en diversas zonas. En los tramos considerados rectos (Tramos 1 y 2), se obtiene una correlación óptima tanto para el modelo Drone como para el modelo SIGTIERRAS, con valores de NSE cercanos a 1. Esto se debe a la eficiente en la captura de los datos topográficos en estos sectores. La Figura 23 a) muestra el calado de referencia y_3 (Estación Total) con respecto a la elevación promedio del agua. Aquí se observa que las diferencias entre los calados y_1 (SIGTIERRAS) y y_2 (Drone) respecto al calado de referencia son mínimas. Esto explica por qué la correlación, medida mediante el coeficiente Nash-Sutcliffe, que considera los valores residuales cuadráticos, es alta en estas zonas. Por otro lado, existen puntos específicos donde el NSE disminuye significativamente, como en la singularidad topográfica encontrada al inicio del Tramo 3, en la zona de mayor curvatura del alineamiento. En esta área, las diferencias entre el calado de referencia y_3' (Estación Total) y los calados y_1' (SIGTIERRAS) y y_2' (Drone) son mucho mayores que en las secciones de los tramos rectos previamente discutidos (Figura 23 b). Esto pone de manifiesto cómo la resolución topográfica influye en los resultados del modelo de calados de agua, siendo la influencia notablemente mayor en tramos con geometrías más complejas.

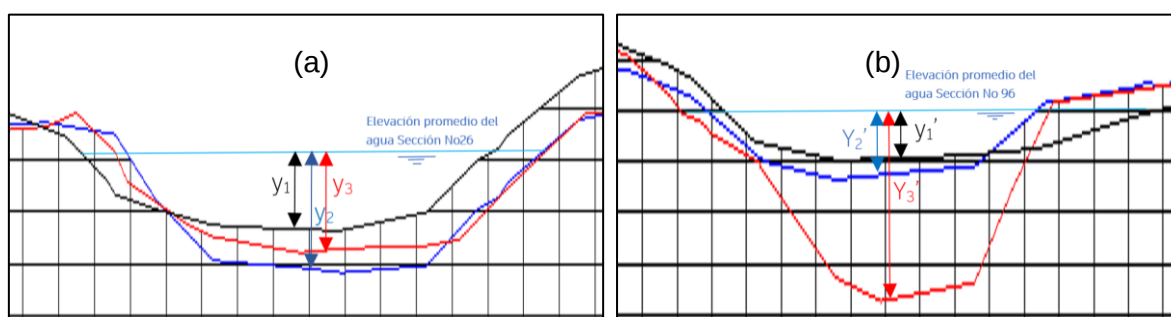


Figura 23. a) Diferencias en calado para sección en tramo recto (0+282.20m) b) Diferencias en calado para sección en tramo curvo (0+987.96m).

En referencia a las métricas para anchos de inundación, para analizar la correlación existente en anchos entre Estación Total y SIGTIERRAS, observe en la Figura 19 (a) y (b) que los anchos de inundación obtenidos para estos modelos presentan leves diferencias en el tramo 1, estas diferencias aumentan de manera significativa al final del tramo 2 e inicio del tramo 3, y que corresponde justamente a la zona en donde empieza y termina el tramo curvo de la sección del río analizada. Las leves diferencias del tramo 1 se traducen en un NSE de 0.75, lo cual significa una correlación muy buena entre Estación Total y Drone. En el tramo 2, pese a que las secciones en las que se presentan diferencias notables son pocas, la magnitud de las mismas es suficientemente grande como para disminuir la correlación notablemente. Esto se relaciona directamente con el AEMAX obtenido para este tramo, pues es el doble (120.25) que el obtenido para el tramo 1 (61.46); algo similar sucede con MAE y AE. En el tramo 3 se presenta la peor correlación de todos los datos (-3.61), incluso inferior a la obtenida para el análisis de la sección completa del río (0.27). Si comparamos los AEMAX y AE obtenidos en los tramos 2 y 3 para Drone, en el tramo 3; AEMAX es inferior, pero AE es superior; esto de cierta manera sugiere que las diferencias entre anchos de inundación del tramo 3 son inferiores, pero más numerosas que las que se presentan en el tramo 2.

Al comparar los anchos obtenidos por el modelo hidráulico de Estación Total y SIGTIERRAS se pueden notar grandes diferencias en casi la totalidad del tramo 1 y 2 y al inicio del tramo 3. En todos los tramos se presenta un NSE de valor negativo lo cual indica una correlación inaceptable. Para el tramo 3 note, de la tabla 7, que el NSE para SIGTIERRAS es inferior al obtenido en el tramo 2, pese a que en este último se han obtenido errores superiores (MAE, AE, y AEMAX). Para entender esta baja correlación, es prudente analizar la Figura 19 a), correspondientes a Estación Total, en donde se puede observar, para el tramo 3, que los anchos de inundación tienden a ser homogéneos (similares) con muy pocas excepciones. Esto afecta directamente al cociente del cálculo del NSE, resultando valores pequeños para la diferencia $(Q_{i3} - \bar{Q}_3)^2$ y por ende valores altos para la expresión $-\frac{\sum(Eq_{i3} - Q_{i3})^2}{(Q_{i3} - \bar{Q}_3)^2}$, entonces desde este punto de vista es lógico obtener valores negativos para este tramo en correlación tanto para SIGTIERRAS como para Drone. Note que el coeficiente 3 de las expresiones mencionadas hace referencia al número de tramo, el detalle de cada elemento de esta expresión se ha tratado en el aparato 3.4.

5.4 Mancha de inundación.

Respecto al modelo Drone y Estación Total existe una sobreestimación del área de inundación, la explicación recae en que el Drone tiende a suavizar las características topográficas y genera una leve simplificación del terreno como se muestra en la Figura 22 a)

y Figura 22 b); en donde los bancos de la orilla derecha no son captados con gran exactitud y son justamente en estos puntos en donde se produce el desbordamiento. Haciendo lógica la obtención de mayor área de inundación para Drone. Cook & Merwade (2009); Hsu et al. (2016); Oganian et al. (2019); Werner (2004) determinaron que a mayor resolución de los DEM's menor es el área de inundación predicha, tomando en cuenta que se considera al modelo Estación Total como verdadero, es coherente obtener áreas de inundación mayores para modelos aproximados como lo es el modelo Drone.

Por otra parte, el modelo SIGTIERRAS genera un área de inundación mucho menor a las obtenidas con Estación Total y Drone lo cual difiere con lo expuesto en el párrafo anterior. Pero Jafarzadegan et al. (2021) y Pappenberger et al. (2005) determinaron que modelos hidrodinámicos realizados con DEM's de baja resolución puede llevar a una subestimación del área de inundación, debido a que estos tipos de modelos no pueden representar perfectamente la topografía y batimetría de la cuenca, Esto puede ser la principal razón para la subestimación del área de inundación de Drone respecto a Estación Total. Este análisis indica una clara limitación en la capacidad de los datos satelitales y fotogrametría para representar con precisión la topografía del terreno, resultando en una subestimación o sobreestimación de las áreas de inundación, especialmente en zonas donde los detalles topográficos son cruciales.

6. Conclusiones y recomendaciones

En esta investigación se utilizaron tres tipos de levantamientos topográficos que incluyeron Estación Total, Drone y SIGTIERRAS, en un tramo específico del río Tomebamba. La metodología incluyó la generación de tres superficies topográficas y la evaluación de su precisión vertical utilizando el levantamiento de Estación Total como referencia. Se emplearon métricas como el coeficiente de Nash-Sutcliffe. El objetivo del proyecto, que fue evaluar la influencia de la resolución topográfica en la construcción de mapas de inundación en ríos de montaña usando modelos hidráulicos unidimensionales, se cumplió satisfactoriamente. La investigación comparativa de los modelos topográficos Estación Total, Drone y SIGTIERRAS reveló diferencias significativas en la calidad y detalle de los datos. El modelo generado por Drone, con una resolución de 2.23 cm/pixel, se destacó por capturar detalles finos y proporcionar resultados fiables en tramos rectos, aunque mostró una disminución en la calidad en tramos curvos. En contraste, el modelo SIGTIERRAS, con una resolución de 3 m/pixel, presentó una menor calidad topográfica, con una captura del terreno más suavizada, mayores errores y una menor correlación a lo largo de todo el tramo de estudio.

La resolución topográfica influyó significativamente en los resultados de la modelación hidráulica. Tomando como verdaderos los resultados del modelo Estación total, el análisis comparativo evidenció de manera concluyente dos aspectos fundamentales. Primero, los datos topográficos capturados por Drone ofrecen mayor precisión en la captura de las características del terreno, respecto a SIGTIERRAS. Por ende, el modelo Drone proporciona predicciones más exactas de las elevaciones de la superficie del agua, calados y las áreas de inundación. Segundo, SIGTIERRAS tiende a suavizar el terreno, omitiendo detalles críticos, lo que produce mayores diferencias en la geometría y esto a su vez aumenta los errores en la modelación hidráulica. Esto se traduce en una menor correlación y precisión en los resultados de las simulaciones, especialmente en tramos de río con geometrías complejas, como curvas pronunciadas. La alta resolución del modelo Drone lo convierte en una alternativa viable al modelo de referencia Estación Total, siempre y cuando se incluyeran los puntos de control necesarios y, además, los calados al momento del vuelo fueran bajos o nulos. Por otra parte, SIGTIERRAS requiere mejoras para aplicaciones que demandan mayor exactitud y su uso en este entorno podría no resultar conveniente. En conclusión, con mayor resolución topográfica, mayor es la precisión de la representación del terreno y, por lo tanto, mayor es la precisión en la estimación de las áreas de inundación.

Para un análisis a macro escala combinar las metodologías Drone y SIGTIERRAS podría ser beneficioso, al usar la metodología de Drone en tramos curvos y la metodología de SIGTIERRAS para tramos simples. De modo que, para un análisis de mayor precisión combinar las metodologías Drone (para tramos simples) y Estación Total (tramos complejos) resultaría factible. Esta estrategia permite optimizar la resolución y precisión de los datos topográficos en zonas específicas donde se requiera mayor detalle, mejorando así la fiabilidad de los resultados en áreas críticas, y optimizando recursos.

Referencias

- Abril, J. B., & Knight, D. W. (2010). Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model. J.B. Abril & D.W. Knight. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9628315>
- Alcántara, A., & Castro, A. (2021). Determinación de zonas inundables con HEC-RAS en zonas de la Cordillera Central de los Andes. Microcuenca del río Saraus-río La Llanga. Celendín. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(48), 181-187. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.19852>
- Aronica, G., Hankin, B., & Beven, K. (1998). Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. *Advances in Water Resources*, 22(4), 349-365. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(98\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(98)00017-7)
- Chimborazo, J. E. (2019). *Evaluación hidrológica e hidráulica del Río Tomebamba tramo Balzay-Monay mediante modelación matemática del flujo en uni y bidimensional* [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil]. Universidad de Cuenca.
- Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2001). Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*.
- Hsu, Y.-C., Prinsen, G., Bouaziz, L., Lin, Y.-J., & Dahm, R. (2016). An Investigation of DEM Resolution Influence on Flood Inundation Simulation. *Procedia Engineering*, 154, 826-834. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.435>
- Jafarzadegan, K., Abbaszadeh, P., & Moradkhani, H. (2021). Sequential data assimilation for real-time probabilistic flood inundation mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(9), 4995-5011. <https://doi.org/10.5194/hess-25-4995-2021>
- Li, Z., Yang, T., Zhang, N., Zhang, Y., Wang, J., Xu, C.-Y., Shi, P., & Qin, Y. (2022). Understanding the impacts induced by cut-off thresholds and likelihood measures on confidence interval when applying GLUE approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(5), 1215-1241. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02182-6>
- Madrigal, E. (2022, octubre 28). *Conoce las métricas de precisión más comunes para Modelos de Regresión Grow Up*. Grow Up. <https://www.growupcr.com/post/metricas-precision>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

- Ogania, J. L., Puno, G. R., Alivio, M. B. T., & Taylaran, J. M. G. (2019). Effect of digital elevation model's resolution in producing flood hazard maps. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(1). <https://doi.org/10.22034/gjesm.2019.01.08>
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., & Blazkova, S. (2005). *Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations*. 46-69. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.036>
- Peñafiel, A. G. (2014). *Evaluación de la calidad del agua del río Tomebamba mediante el índice ICA del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*.
- Perreault, S., El Alem, A., Chokmani, K., & Cambouris, A. N. (2022). Development of Pedotransfer Functions to Predict Soil Physical Properties in Southern Quebec (Canada). *Agronomy*, 12(2), 526. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020526>
- Rodas Bustamante, M. C., Timbe Castro, L. M., & Campozano Parra, L. V. (2023). Sensibilidad del coeficiente de Manning en la estimación de los niveles de crecida para el mapeo de inundaciones en un río de la región interandina de Ecuador. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 32(1), 35-49. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v32n1.94764>
- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Yan, X. (2021). A Review of Numerical Simulations of Secondary Flows in River Bends. *Water*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/w13070884>
- Te Chow, V., & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.ec/books?id=XnvUAAAACAAJ>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2010). *HEC-RAS User's Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>
- Vaze, J., Teng, J., & Spencer, G. (2010). Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, 25(10), 1086-1098. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.014>
- Veléz, L. (2018). *Caracterización de la precipitación espacial en las cuencas hidrográficas de los ríos Tomebamba y Yanuncay*. Universidad de Cuenca.
- Werner, M. G. F. (2004). A comparison of flood extent modelling approaches through constraining uncertainties on gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), 1141-1152. <https://doi.org/10.5194/hess-8-1141-2004>
- Wolock, D. M., & McCabe, G. J. (2000). Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000-m resolution digital elevation model data. *Hydrological Processes*, 14(6), 987-1002. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(20000430\)14:6<987::AID-HYP980>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(20000430)14:6<987::AID-HYP980>3.0.CO;2-A)
- Yochum, S. E., Comiti, F., Wohl, E., David, G. C. L., & Mao, L. (2014). *Photographic guidance for selecting flow resistance coefficients in high-gradient channels* (RMRS-GTR-323; p. RMRS-GTR-323). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-323>

Anexos

Anexo A. Metadatos de la ortofotografía proporcionada por SIGTIERRAS.

```

C:\>metadato.exe "C:\Users\usuar\OneDrive\Escritorio\FC+\DATA SIGTIERRAS\DEM\DEM SIGTIERRAS\MDT_FULL\NV-F4b-F1.tif"
ExifTool Version Number      : 12.77
File Name                    : NV-F4b-F1.tif
Directory                   : C:/Users/usuar/OneDrive/Escritorio/FC+/DATA SIGTIERRAS/DEM/DEM SIGTIERRAS/MDT_FULL
File Size                    : 2.4 MB
Zone Identifier              : Exists
File Modification Date/Time   : 2024:04:18 10:46:35-05:00
File Access Date/Time        : 2024:06:14 11:57:43-05:00
File Creation Date/Time      : 2016:08:22 13:17:48-05:00
File Permissions              : -rw-rw-rw-
File Type                    : TIFF
File Type Extension          : tif
MIME Type                    : image/tiff
Exif Byte Order              : Little-endian (Intel, II)
Image Width                  : 775
Image Height                 : 770
Bits Per Sample              : 32
Compression                  : Uncompressed
Photometric Interpretation    : BlackIsZero
Strip Offsets                 : (Binary data 5796 bytes, use -b option to extract)
Orientation                  : Horizontal (normal)
Samples Per Pixel             : 1
Rows Per Strip               : 1
Strip Byte Counts             : (Binary data 3849 bytes, use -b option to extract)
Planar Configuration         : Chunky
Sample Format                  : Float
S Min Sample Value            : 2557.9716796875
S Max Sample Value            : 2762.81396484375
Pixel Scale                   : 3 3 0
Model Tie Point               : 0 0 0 717679.2 9682035.6 0
Geo Tiff Version              : 1.1.0
GT Model Type                 : Projected
GT Raster Type                : Pixel Is Point
GT Citation                   : PCS Name = SIRGAS / UTM zone 17S
Geographic Type              : User Defined
Geog Citation                 : GCS Name = SIRGAS|Ellipsoid = GRS 1980|Primem = Greenwich|
Geog Geodetic Datum          : Unknown (6170)
Geog Angular Units            : Angular Degree
Geog Semi Major Axis          : 6378137
Geog Inv Flattening           : 298.257222101
Geog Prime Meridian Long     : 0
Projected CS Type             : User Defined
Projection                    : UTM zone 17S
Proj Linear Units             : Linear Meter
Image Size                    : 775x770
Megapixels                    : 0.597

```