



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL DEL RIO  
TOMEBAMBA EN EL TRAMO DE LA CAPTACIÓN PTAP DEL  
CEBOLLAR**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTORES: CHRISTIAN EDUARDO ONCE CONDO**

**RONY EFRAÍN CORONEL BUSTAMANTE**

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA**

**CUENCA - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL DEL RIO  
TOMBAMBA EN EL TRAMO DE LA CAPTACIÓN PTAP DEL  
CEBOLLAR**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTORES: CHRISTIAN EDUARDO ONCE CONDO**

**RONY EFRAÍN CORONEL BUSTAMANTE**

**DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA**

**CUENCA – ECUADOR**


**2025**

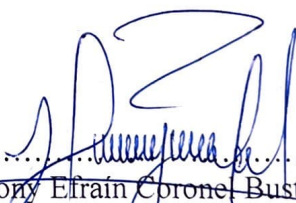
**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD

**Christian Eduardo Once Condo** y **Rony Efraín Coronel Bustamante** portadores de las cédulas de ciudadanía N° **0105724751** y **0302131107**. Declaramos ser autores de la obra: **“Simulación hidrodinámica bidimensional del río Tomebamba en el tramo de la captación PTAP del cebollar”**, sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 7 de abril de 2025

F:   
Christian Eduardo Once Condo  
0105724751

F:   
Rony Efraín Coronel Bustamante  
0302131107

## CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Yo, Santiago Aurelio Ochoa García, certifico que el presente trabajo de titulación fue ejecutado por los estudiantes Once Condo Christian Eduardo y Coronel Bustamante Rony Efraín bajo mi dirección.



SANTIAGO AURELIO  
OCHOA GARCIA

F: .....

Ing. Santiago Aurelio Ochoa García PhD

0104158142

## **DEDICATORIA, RONY EFRAIN CORONEL BUSTAMANTE**

En primer lugar, a **Dios**, que me ha guiado a lo largo de este trayecto académico y me ha brindado el invaluable don de ser mejor ser humano día a día y la persistencia necesaria para este triunfo.

A mi madre, **Ana María**, cuyo amor incondicional y sacrificio han sido la luz que ha guiado mi camino; su fortaleza y dedicación me han inspirado a perseguir mis sueños con valentía.

A mi abuelo **Max**, ejemplo de sabiduría y bondad, cuya presencia ha sido un pilar fundamental en mi vida, enseñándome con su ejemplo el valor del esfuerzo y la humildad.

A mi tía, **María Augusta**, por su apoyo inquebrantable y sus palabras de aliento en cada desafío, demostrando siempre su amor con gestos de generosidad y cariño.

A mi abuela **Elena**, quien, aunque ya no esté físicamente, me cuida desde el cielo y sigue presente en mi corazón; su amor y enseñanzas continúan iluminando mi vida, recordándome siempre la importancia de la familia y el amor verdadero.

A mi **familia y amigos**, quienes con sus consejos y palabras de aliento han hecho este camino más llevadero, su apoyo incondicional, su confianza y los momentos compartidos han sido una fuente de motivación y fortaleza en esta etapa. Gracias por estar siempre, por celebrar mis logros y levantarme en los momentos difíciles, este logro también es de ustedes.

## **DEDICATORIA, CHRISTIAN EDUARDO ONCE CONDO**

Cada uno de mis logros ha sido posible gracias a las personas que supieron guiarme y brindarme su apoyo en los momentos difíciles. Sin su ayuda, no habría alcanzado el lugar en el que me encuentro hoy.

Dedico este trabajo a mi querida madre: **Mercedes Condo**, por su amor incondicional que me impulsó a dar lo mejor de mí y por su incansable apoyo durante este proceso. Su presencia ha sido mi fuente de fuerza y motivación en los momentos más difíciles, sin su motivación este logro no hubiera sido posible.

A mi hermano: **Gustavo Bau**, por ser mi fuente de inspiración ya que me ha demostrado que, a pesar de las incertidumbres, hay que seguir adelante con determinación, confiando en que cada desafío sería una oportunidad para aprender y crecer.

A mi tía, **María Condo**, por el gran apoyo que me ha dado y por facilitarme algunas herramientas que han sido fundamentales para mi crecimiento académico y personal.

A **mi familia y amigos**, por el apoyo incondicional y por siempre impulsarme a ser mejor persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecemos a nuestra casa de estudios, la **Universidad Católica de Cuenca**, institución que nos brindó la oportunidad de la formación académica y el crecimiento profesional en un ambiente enriquecedor y motivador.

De manera especial, a nuestro tutor, el **Ing. Santiago Ochoa García**, por su paciencia y apoyo durante nuestro proceso de investigación académica, su experiencia y orientación fueron fundamentales para culminar nuestra carrera profesional como ingenieros civiles.

## **Resumen**

Este trabajo analiza la modelación hidrodinámica bidimensional del río Tomebamba en la PTAP del Cebollar, en el tramo comprendido entre el sector de Mazán y Sayausí, representando variables hidrodinámicas a partir de las herramientas de modelación HEC-RAS e IBER en una extensión aproximada de 2.6 Km.

La información de entrada de estas herramientas computacionales incluye un modelo digital de elevación obtenido mediante un levantamiento con dron e instrumento RTK. Para las condiciones de entrada y salida de la modelación, se utilizaron hidrogramas y una curva de descarga correspondientes a un periodo de retorno de 10 años, estas condiciones fueron obtenidas de los datos hidrológicos proporcionados por lecturas de estaciones hidrológicas aledañas a la zona de estudio, monitoreadas por las instituciones ETAPA e INAMHI. Para validar los modelos se realizó un contraste con las alturas de agua observadas para eventos similares y a partir de los índices estadísticos NSE,  $R^2$  y ECM que reflejaron una buena calidad de modelación.

Las representaciones de las variables de flujo en la captación mostraron valores asociados a las características de la estructura hidráulica, lo cual infiere una representación aceptable del flujo en esta zona. Se observaron velocidades de hasta 6.19 m/s que pueden producir esfuerzos cortantes de hasta  $177.16 \text{ N/m}^2$ , lo cual podría provocar desgaste en los elementos estructurales de la captación, disminuyendo su funcionalidad y vida útil.

*Palabras clave:* HEC-RAS, IBER, modelación, bidimensional.

## **Abstract**

This research analyzes the two-dimensional hydrodynamic modeling of the Tomebamba River at the Cebollar Waste-Water Treatment Plant (WWTP), in the section between the Mazán and Sayausí areas. Hydrodynamic variables were presented using the HEC-RAS and IBER modeling tools over an approximate length of 2.6 km.

The input data for these computational tools included a digital elevation model obtained through drone surveying and using a Real-Time Kinematic (RTK) instrument. Hydrographs and a discharge curve corresponding to a 10-year return period were used as boundary conditions for the model. These conditions were obtained from hydrological data provided by readings from hydrological stations near the study area, monitored by the Municipal Communication, Water, and Sewage Company (ETAPA by its Spanish acronym) and National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI by its Spanish acronym) institutions. To validate the models, a comparison was made with observed water levels for similar events, and the NSE,  $R^2$ , and ECM statistical indices, reflecting good modeling quality.

The representations of the flow variables in the intake showed values associated with the characteristics of the hydraulic structure, suggesting an acceptable representation of the flow in this area. Velocities of up to 6.19 m/s were observed, producing shear stresses of up to 177.16 N/m<sup>2</sup>, potentially causing wear on the intake's structural elements and reducing their functionality and lifespan.

*Keywords:* HEC-RAS, IBER, modeling, two-dimensional

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES .....</b>	<b>10</b>
1.1 Introducción.....	10
1.2 Antecedentes.....	11
1.1 Justificación .....	14
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo general .....	16
1.2.2 Objetivo específico.....	16
1.3 Descripción metodológica .....	17
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
2.1 Ecuaciones de Navier-Stokes. ....	20
2.2 Ecuaciones de Saint-Venant. ....	21
2.3 Modelo de cierre de turbulencia k- $\epsilon$ (IBER) .....	23
2.4 Modelo de cierre de turbulencia de Smagorinsky (HEC-RAS).....	24
2.5 Análisis de sensibilidad y criterios de validación .....	25
2.5.1 Criterios de validación.....	25
2.5.2 Rugosidad del canal .....	29
2.5.3 Malla del canal .....	30
2.5.4 Geometría del canal.....	31
2.5.5 Condiciones de contorno.....	32
2.6 Modelo HEC – RAS 2D .....	32
2.7 Modelo IBER.....	33

<b>CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1 Área de estudio .....	34
3.2 Análisis del modelo digital de elevación .....	35
3.2.1 Proceso de obtención de datos topográficos.....	35
3.1.1 Modelación 3D en el programa Agisoft Metashape.....	36
3.1 Recopilación y procesamiento de la información hidrológica.....	37
3.1 Análisis de frecuencias para el cálculo de caudales .....	38
3.2 Definición de condiciones de borde y de frontera.....	39
3.1 Simulación Bidimensional con HEC-RAS.....	44
3.1 Simulación Bidimensional con IBER.....	47
<b>CAPITULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
4.1 Evaluación de las variables de flujo .....	51
4.1.1 Calados .....	51
4.1.1.1 Calados en HEC-RAS .....	51
4.1.1.1 Calados en IBER .....	53
4.1.1 Velocidades .....	55
4.1.1.1 Velocidades en HEC-RAS .....	55
4.1.1.2 Velocidades en IBER .....	58
4.1.1 Esfuerzos cortantes.....	60
4.1.1.1 Esfuerzos cortantes en HEC-RAS.....	60
4.1.1.1 Esfuerzos cortantes en IBER.....	62
4.1 Validación de los modelos hidrodinámicos .....	64
4.1.1 Validación del modelo HEC-RAS .....	64
4.1.1 Validación del modelo IBER .....	65

4.1	Análisis comparativo entre los modelos .....	66
4.4.2	Ventajas .....	67
4.4.2.1	Ventajas de IBER .....	67
4.4.2	Desventajas.....	68
4.4.2.1	Desventajas de IBER.....	68
<b>CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>70</b>
5.1	Conclusiones.....	70
5.1	Recomendaciones .....	71
Bibliografía .....		72

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Sección típica de un canal de un cauce ce un río .....	31
<b>Figura 2</b>	Área de estudio. ....	34
<b>Figura 3</b>	Clasificación del terreno.....	36
<b>Figura 4</b>	Gráfica caudal tiempo de la estación Tomebamba para el año 2017. ....	40
<b>Figura 5</b>	Hidrograma de diseño. ....	40
<b>Figura 6</b>	Hidrogramas según periodos de retorno.....	43
<b>Figura 7</b>	Curva de descarga T=10 años. ....	44
<b>Figura 8</b>	Modelo digital de elevación. ....	45
<b>Figura 9</b>	Condiciones de borde y frontera. ....	46
<b>Figura 10</b>	Mallado de cálculo en IBER. ....	48
<b>Figura 11</b>	Mallado con propiedades de elevación. ....	49
<b>Figura 12</b>	Asignación de rugosidades en IBER. ....	50
<b>Figura 13</b>	Profundidad obtenida en el programa HEC-RAS .....	51
<b>Figura 14</b>	Ubicaciones de zonas profundas en HEC-RAS. ....	52
<b>Figura 15</b>	Profundidad obtenida en el programa IBER. ....	53
<b>Figura 16</b>	Ubicaciones de zonas profundas IBER. ....	54
<b>Figura 17</b>	Velocidad obtenida en el programa HEC-RAS.....	56
<b>Figura 18</b>	Zonas de velocidad en HEC-RAS.....	57
<b>Figura 19</b>	Velocidad obtenida en el programa IBER.....	58
<b>Figura 20</b>	Zonas con mayor concentración de velocidad IBER. ....	59
<b>Figura 21</b>	Esfuerzos cortantes obtenidos en el programa HEC-RAS. ....	60
<b>Figura 22</b>	Zonas críticas de esfuerzos cortantes HEC-RAS. ....	61

<b>Figura 23</b>	Esfuerzos cortantes obtenidos en el programa IBER. ....	62
<b>Figura 24</b>	Zonas críticas de esfuerzos cortantes IBER. ....	63
<b>Figura 25</b>	Validación de las simulaciones. ....	64
<b>Figura 26</b>	Zona de inicio de estudio.....	77
<b>Figura 27</b>	Equipo de topografía “dron”. ....	78
<b>Figura 28</b>	Equipo de topografía “RTK”.....	79
<b>Figura 29</b>	Punto de control.....	80
<b>Figura 30</b>	Punto de control.....	81
<b>Figura 31</b>	Recolección de datos topográficos. ....	82

## **CAPÍTULO I. GENERALIDADES**

### **1.1 Introducción**

En este estudio, se aborda la implementación del modelo hidrodinámico bidimensional para analizar un tramo específico del río Tomebamba, situado en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, en las proximidades de la captación de la planta de tratamiento de agua potable El Cebollar (PTAP). Desde la estación Tomebamba hasta la estación Matadero en Sayausi. Este tramo se caracteriza por una longitud de aproximadamente 2.5 km y secciones del río medidas en 100 puntos de control.

La metodología del estudio se divide en dos etapas. En la primera etapa, se adopta un enfoque de recolección de datos que abarca aspectos topográficos, hidráulicos e hídricos. La segunda etapa implica la aplicación del modelo bidimensional HEC-RAS e Iber para simular la dinámica fluvial del área de interés. En este proceso, se implementa la resolución interna de la ecuación de Saint Venant 2D mediante el método de volúmenes finitos.

El propósito principal es realizar un análisis de correlación entre la información numérica generada y los reportes observados por las estaciones. La zona de estudio ha sido previamente identificada como susceptible a inundaciones y a cambios abruptos de caudal durante épocas de estiaje. Además, es de suma importancia tomar en cuenta la interacción del cauce con el entorno que lo rodea, de manera especial con las obras hidráulicas como la captación PTAP el Cebollar, ya que puede existir afectación en el flujo del río lo cual puede originar inundaciones y desbordamientos considerables. Finalmente, comparar con la aplicación de representaciones de cálculo bidimensionales del comportamiento hidráulico del río, aplicando el modelo HEC-RAS e IBER esbozando las ventajas y desventajas de las metodologías analizadas.

## 1.2 Antecedentes

En el año 2015 se ejecutó un análisis y procesamiento de la información pluviométrica y limnimétrica correspondiente a los ríos Tomebamba y Yanuncay, con la finalidad de encontrar medidas independientes de estructuras para mitigar el riesgo que produce este afluente en la ciudad de Cuenca. Se utilizó una modelación hidrológica que usa valores de escorrentía e hidrogramas de flujo, donde se observa la importancia de realizar monitoreos de cauces (Burbano, 2015).

En el año 2018 se efectuó la calibración del modelo hidráulico HEC-RAS 2D correspondiente a un tramo del río Guanuscate en la Provincia de Córdoba-Argentina, con la finalidad de encontrar las áreas de inundación de un río en el cual se tenía ningún tipo de registro de variables hidrodinámicas, para su efecto se utilizó el método de velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (por sus siglas en inglés LSPIV), con este método se consiguió estimar velocidades superficiales, caudales y flujos completos a través del procesamiento de video; tras contar con estas variables se procedió a cargarlas en conjunto con un modelo de elevación. Para la calibración de la rugosidad corrió el programa varias veces hasta ver una mancha de inundación similar a la del video (Vaschalde, Rico, Dasso, 2018).

En el estudio "*Modelo bidimensional de inundación urbana de la ciudad de Azul (Argentina) con herramientas de uso libre*" se utiliza el software Iber 2D para modelar un evento de inundación ocurrido en 2012, validándolo con datos de calado obtenidos a partir de marcas en las paredes de las viviendas. La calibración del modelo se llevó a cabo ajustando los coeficientes de rugosidad de Manning según una zonificación basada en los diferentes tipos de uso de suelo, considerando la influencia de los puentes en la dinámica de la

inundación, ya que estas estructuras, transversales al cauce, contribuyen a una mayor acumulación de agua en ciertas áreas. (Collazos et al., 2018)

Un estudio relevante, realizado con el modelo unidimensional HEC-RAS, analizó un tramo de 15.7 Km del río Magdalena en Colombia, un afluente caudaloso con derivaciones. Para conseguir esto se analiza 431 secciones transversales tomadas cada 50 metros. Entre las conclusiones más destacadas, se determina que el modelo es adecuado para este tipo de ríos, aunque se identificó la ausencia de un módulo de calibración. Además, se recomienda ampliar el área de estudio en los levantamientos topográficos para definir con mayor precisión el talud de las orillas y las planicies de inundación. También se resalta la importancia de realizar aforos para mejorar la calibración del modelo (Santos Rocha et al., 2008).

Otro estudio que se resalta es el desarrollado por la Universidad de Cuenca, donde se utiliza el modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS para analizar un tramo de 10 km del río Burgay. En este estudio, la selección de los coeficientes de rugosidad de Manning se realiza mediante análisis visual y ortofotografías. Los resultados demuestran que el modelo es capaz de simular eventos de crecida en la región interandina, incluso con información limitada, observando una diferencia mínima entre los análisis de crecidas de 100 y 200 años, lo que sugiere que asumir teóricamente los coeficientes de rugosidad no genera un impacto significativo en los resultados. (Timbe & Timbe, 2012).

El artículo titulado "*Unidimensional, Non-Stationary Modeling of a High Mountain River in Southern Ecuador*" da a conocer un estudio realizado en una rama del río Quinoas, ubicado dentro del Parque Nacional Cajas. En esta investigación se emplean dos modelos, MIKE 11 y HEC-RAS, configurando distintos parámetros en las simulaciones hasta

encontrar un modelo válido. Sin embargo, debido a inestabilidades detectadas en HEC-RAS, se opta por utilizar MIKE 11. A través de calibraciones con datos aforados, se determina coeficientes de rugosidad de Manning adecuados, logrando un desempeño satisfactorio del modelo considerando su uso como parte de un sistema de alerta temprana en ríos con pendientes pronunciadas. (Ochoa et al., 2018).

En la ciudad de Manabí, Ecuador, se llevó a cabo un estudio utilizando Iber 2D para analizar un tramo de 25 Km del río Garrapata, ubicado en el cantón Chone. Los resultados destacan la importancia de emplear un mallado no estructurado, ya que se adapta mejor a la topografía irregular de la zona. Mediante un análisis de sensibilidad del mallado, se determina que el tamaño óptimo de malla es de 8 metros, donde se permite reducir el tiempo de simulación sin comprometer la precisión de los resultados. (Guaya Caraguay & Montalván Alcívar, 2018).

Según el Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 (Senplades, 2013), en las últimas dos décadas la cantidad de desastres a nivel mundial se ha duplicado, superando los 400 eventos anuales. Un ejemplo importante ocurrió en 1998, cuando el Fenómeno del Niño provocó en Ecuador pérdidas equivalentes a más del 14% del PIB. En ese año, los daños causados por desastres de origen climático fueron mayores que el costo total de todos los desastres registrados durante la década de 1980 (Vargas, 2002).

La ciudad de Cuenca cuenta con un servicio de agua potable reconocido a nivel nacional gracias a los procesos implementados en sus plantas de tratamiento. El abastecimiento de agua potable proviene principalmente de las plantas de potabilización ubicadas en Tixán, Sustag, El Cebollar y San Pedro, todas operadas por la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ETAPA).

Como parte de sus políticas, ETAPA se encarga de regular sus instalaciones para garantizar que operen conforme a las normativas ambientales vigentes (Plaza, 2015).

La zona Tomebamba y Machángara es abastecida actualmente PTAP el Cebollar, la misma que provee de 2100,000 m<sup>3</sup> de agua potable a la ciudad de Cuenca por mes, beneficiando a 200000 personas del servicio de Agua Potable (ETAPA).

### **1.1 Justificación**

La simulación hidrodinámica del río Tomebamba en la captación de la PTAP el Cebollar es un instrumento técnico avanzado para evaluar los posibles impactos de eventos climáticos adversos, específicamente, fuertes lluvias propensas a generar crecidas y deslizamientos de taludes, las crecidas fluviales podrían resultar en inundaciones en áreas adyacentes a la captación, con potenciales efectos perjudiciales sobre la infraestructura de la captación.

La precipitación intensa conlleva cambios significativos en la morfología del lecho del río, tales como deslizamientos de taludes que incrementan la carga de sedimentos en el cauce fluvial, aumentando la erosión del lecho del río. Esta erosión, a su vez, impacta la geometría del río y la distribución de flujos en la zona de captación, alterando las velocidades del agua, generando unas áreas con flujos rápidos y donde estos cambios podrían afectar la integridad estructural de la captación.

Las inundaciones generadas por el desbordamiento del río Tomebamba en la ciudad de Cuenca plantean consecuencias críticas, en nuestro caso la interrupción total o parcial de la distribución de agua potable y posibles daños estructurales en la obra de la zona de estudio. El enfoque bidimensional de la simulación hidrodinámica, respaldado por tecnologías avanzadas,

permite un estudio más preciso de las llanuras de inundación en un sector de elevada vulnerabilidad, como lo es la PTAP el Cebollar, basándose en estudios previos y experiencias pasadas en la región, la simulación hidrodinámica proveerá información técnica valiosa para la toma de decisiones y la implementación de estrategias de mitigación frente a condiciones climáticas adversas, evaluando el riesgo de inundaciones y cambios en la hidrodinámica del río, sino también salvaguardar las estructuras analizadas mediante la adopción de medidas preventivas y correctivas.

La problemática actual reside en la ausencia de estudios específicos sobre inundaciones u otras eventualidades en el tramo predefinido. Adicionalmente, no se dispone de un análisis de mitigación en la infraestructura hidráulica de captación de la PTAP El Cebollar. El objetivo primordial de este estudio es proporcionar una solución a la problemática identificada, al mismo tiempo que se busca establecer un precedente para investigaciones futuras en la zona delimitada.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Implementar modelos hidrodinámicos bidimensionales del río Tomebamba en el tramo correspondiente a la captación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) el Cebollar utilizando HEC-RAS e IBER, para la evaluación de zonas vulnerables en el tramo de estudio.

### **1.2.2 Objetivo específico**

- Procesar la información topográfica, hidráulica e hidrológica que servirá como variables de entrada a los modelos hidrodinámicos.
- Implementar los modelos numéricos bidimensionales en el dominio de aplicación correspondiente al tramo de la captación de la PTAP el Cebollar del río Tomebamba.
- Analizar las condiciones hidrodinámicas resultantes de los modelos numéricos calibrados y validados para la identificación de zonas vulnerables sobre las estructuras en el tramo de estudio.

### **1.3 Descripción metodológica**

Para llevar a cabo la simulación hidrodinámica bidimensional del río Tomebamba, se realizaron levantamientos topográficos en el tramo de interés, que cubre el tramo comprendido desde la estación Tomebamba hasta la estación Matadero en Sayausi. Estos levantamientos cubrieron una longitud aproximada de 2.5 km y se llevaron a cabo en 100 puntos de control estratégicos.

Se emplea dos herramientas especializadas para la simulación hidrodinámica bidimensional: HEC-RAS e IBER. Estas herramientas permiten modelar de manera precisa la dinámica fluvial, teniendo en cuenta las condiciones topográficas e hidronómicas específicas del río Tomebamba.

Es importante destacar la importancia de los procesos que realizan estos instrumentos, desde la preparación de datos hasta la ejecución del modelo; ya que permiten utilizar interfaces que son fundamentales para definir propiedades como condiciones de contorno y parámetros físicos que posteriormente sirven para generar una malla bidimensional adaptativa que refleje la topografía y las características de flujo de la zona.

De este modo se puede definir condiciones iniciales y de frontera para el modelo, en donde se incluya información sobre niveles de agua iniciales, caudales de entrada/salida, etc., para posteriormente definir escenarios específicos para la simulación, tales como variaciones en las condiciones meteorológicas, eventos extremos, entre otros.

Los datos de entrada para la simulación hidrodinámica bidimensional, como niveles de agua, cantidad de precipitación, caudales y otras variables relacionadas con el flujo del río, se obtienen a partir de documentos de información pública. Dichos datos son aforados por la

estación Tomebamba y la estación Matadero de Sayausi. Estas estaciones proporcionan datos tanto en tiempo real como históricos y son gestionadas por organismos hidrológicos y meteorológicos, en este caso instituciones como INAMHI, y ETAPA.

Siendo la información hidrológica muy importante para la modelación hidráulica, se recolectará información hidrológica de las estaciones limnigráficas denominadas Tomebamba y Matadero Sayausí, ubicadas en el tramo de estudio. Estas estaciones son operadas por la empresa ETAPA, quienes proporcionan la información de caudales históricos representados en hidrogramas, a partir de los cuales se aplicarán métodos estadísticos de distribución de frecuencias con análisis de bondad de ajuste para generar caudales para diferentes periodos de retorno, a partir de los cuales se realizarán las corridas hidráulicas, para obtener resultados que servirán para cumplir el objeto del presente trabajo de investigación.

Con el propósito de validar la precisión del modelo, se realiza un análisis de correlación entre la información numérica generada por los modelos HEC-RAS e IBER y los datos observados por estaciones hidrológicas en la zona. Esto garantiza la confiabilidad y representatividad de los resultados de la simulación.

La simulación hidrodinámica bidimensional se ejecutó en dos etapas. En la primera etapa, se adoptó un enfoque de recolección de datos, que abarcó aspectos topográficos, hidráulicos e hídricos. En la segunda etapa, se implementó el modelo bidimensional utilizando los programas HEC-RAS e IBER, aplicando la resolución interna de la ecuación de Saint Venant 2D mediante el método de volúmenes finitos. Se ingresaron parámetros críticos como condiciones de contorno, coeficientes de rugosidad de Manning y topografía.

A partir de los caudales obtenidos, utilizando tanto HEC-RAS como IBER ofrecen herramientas gráficas y numéricas para evaluar y visualizar las áreas inundadas. Es fundamental ajustar adecuadamente los parámetros del modelo y validar los resultados para garantizar la fiabilidad de las manchas de inundación generadas.

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos de la simulación, centrándose en variables clave como el calado y la velocidad del agua. Estos resultados proporcionan una comprensión detallada de la dinámica fluvial en el tramo del río Tomebamba, permitiendo la implementación de medidas preventivas basadas en información técnica para mitigar el riesgo de inundaciones.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Navier Stokes describen la manera en la que se mueve un fluido ya sea un líquido o un gas, a través de ecuaciones diferenciales que hacen referencia a la conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, mismas que son variables fundamentales en simulaciones de fluidos (White, 2006).

La ecuación de Navier-Stokes es una ley empleada para describir el movimiento del fluido, y puede ser considerada como la Segunda Ley de Newton para su movimiento (Herrera V, 2022)

Es necesario que se apliquen consideraciones fisicomatemáticas, como por ejemplo la relación de esfuerzos tangenciales y el gradiente de velocidad; dichos parámetros ayudan a optimizar la solución de las ecuaciones mediante una formulación diferencial (White, 2006).

Las ecuaciones mencionadas anteriormente se obtienen de la aplicación de los principios de conservación de la mecánica y termodinámica del fluido en cuestión. A continuación, se citan dichas ecuaciones para simulaciones 2D.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Ecuación. 1

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x$$

Ecuación. 2

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_y$$

Ecuación. 3

Donde en las Ecuaciones 1, 2 y 3:

- Las variables  $u$  y  $v$  representan las componentes de la velocidad del fluido para cada dirección  $(x, y)$  respectivamente.
- La variable  $\rho$  representa la densidad del fluido.
- La variable  $\mu$  hace referencia a la viscosidad dinámica del fluido.
- Las variables  $f_x$  y  $f_y$  son los componentes de las fuerzas externas por unidad de volumen para cada dirección.
- Los términos  $\frac{\partial}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial}{\partial t}$  son las derivadas parciales con respecto a  $x$ ,  $y$  y  $t$ , que indican cómo cambia cada variable en cada dirección o en el tiempo.

## 2.2 Ecuaciones de Saint-Venant.

Según Bladé, en 1871 Saint Venant formula por primera vez las ecuaciones para reproducir el flujo inestable en lámina libre en una sola dimensión. Estas ecuaciones son aplicables tanto para representar el régimen gradualmente variable, como el rápidamente variable.

En la mayoría de los flujos en lámina libre, las variables tienden a mostrar poca variación a lo largo de un mismo vertical, especialmente en el análisis de la propagación de avenidas en ríos. Esto permite simplificar las ecuaciones tridimensionales de Reynolds a un modelo bidimensional. Para esta simplificación, se toman en cuenta las siguientes hipótesis

(Bladé y Gómez; 2006):

- Calado de la capa de agua corta con relación a las otras magnitudes del problema.
- Distribución hidrostática de presiones en la vertical.
- Talud de solera reducida.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

Ecuación. 4

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h + Z_0)}{\partial x} - \frac{\tau_{0x} + \tau_{sx}}{\rho} + fhv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x}$$

Ecuación. 5

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h + Z_0)}{\partial y} - \frac{\tau_{0y} + \tau_{sy}}{\rho} + fhu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial x}$$

Ecuación. 6

La escala de tiempo es representada por  $t$  en las ecuaciones anteriores; las medidas de longitud en las direcciones de los ejes del plano cartesiano son representadas por  $x, y$  y  $z$ ;  $u$  y  $v$  son las velocidades de salida en las direcciones del plano  $x$  y  $y$  correspondientemente; el calado de agua es representado por  $h$ ;  $z_0$  representa el nivel de fondo;  $g$  expresa la aceleración de la gravedad de la Tierra;  $\tau_{0x}$  y  $\tau_{0y}$  simbolizan las tensiones de fondo que se manifiestan en las direcciones  $x$  y  $y$ ;  $\tau_{sx}$  y  $\tau_{sy}$  representan las tensiones en la superficie que actúan en la dirección  $x$  y  $y$ ; la densidad del fluido es representada por  $\rho$ ;  $f$  el coeficiente de Coriolis y finalmente  $T_{xx}$  y  $T_{xy}$  son los términos del tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds (Ochoa et al. (2016).

### 2.3 Modelo de cierre de turbulencia k-ε (IBER)

El modelo de cierre de turbulencia k-ε se utiliza constantemente en modelamientos hidráulicos bidimensionales, este modelo de cierre se basa en dos principios fundamentales que lo componen:

- k: representación de la energía cinética turbulenta
- ε: representa la tasa de disipación de dicha energía

Dichas variables abren paso a un cálculo óptimo de viscosidad turbulenta y representan la manera en la que la turbulencia crea una afectación al carácter del flujo. Este modelo de cierre es identificado por su robustez y eficiencia de cálculo computacional que resulta en representaciones muy asertivas a valores medidos en campo (Navarro, 2019).

A continuación, se detallan las ecuaciones que respaldan lo mencionado con anterioridad:

Energía cinética turbulenta (k):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{P_k}{\rho} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

Ecuación. 7

Donde:

- k: Energía cinética turbulenta.
- $U_j$ : Componente de la velocidad media en la dirección j.
- $P_k$ : Producción de energía turbulenta.
- ρ: Densidad del fluido.
- ε: Tasa de disipación de energía cinética turbulenta.
- ν: Viscosidad molecular.

- $v_t$ : Viscosidad turbulenta.
- $\sigma_k$ : Número de Prandtl turbulento para  $k$ .

Disipación ( $\epsilon$ ):

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial j} \left[ \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]$$

Ecuación. 8

Donde:

- $C_{1\epsilon}$  y  $C_{2\epsilon}$ : son constantes empíricas
- $\sigma_\epsilon$ : Es el número de Prandtl turbulento para  $\epsilon$

#### 2.4 Modelo de cierre de turbulencia de Smagorinsky (HEC-RAS)

El modelo de Smagorinsky se basa en la hipótesis de viscosidad turbulenta, utilizado comúnmente en simulaciones numéricas de flujo en aguas poco profundas. Este modelo asume que la viscosidad turbulenta es proporcional a la magnitud del tensor de deformación y a un coeficiente empírico conocido como coeficiente de Smagorinsky. Su uso es frecuente en modelaciones 2D debido a su eficiencia computacional y capacidad para representar efectos turbulentos en flujos ambientales y de ingeniería hidráulica (Blazek, 2015).

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|$$

Ecuación. 9

Donde:

- $C_s$  es la constante de Smagorinsky
- $\Delta$  es el tamaño del filtro o malla
- $S$  corresponde a la tasa de deformación del campo de velocidades promediado

HEC-RAS también utiliza un modelo de cierre de turbulencia en donde la viscosidad se calcula en función de la longitud de la mezcla, que a su vez depende de las características locales del flujo, como la profundidad y el gradiente de velocidad. Este método permite capturar de manera efectiva las variaciones espaciales de la turbulencia en sistemas hidráulicos complejos (Nanía & Molero, 2007)

## **2.5 Análisis de sensibilidad y criterios de validación**

### **2.5.1 Criterios de validación**

La validación en un modelo hidráulico hace referencia al proceso de comprobar la capacidad de un modelo para plasmar de manera óptima y precisa los datos observados en un cauce. Este procedimiento implica comparar resultados simulados con datos históricos, manejando métricas estadísticas para valorar el desempeño, lo cual tiene por objetivo avalar que el modelo realizado represente de manera adecuada la realidad de campo y se pueda identificar de manera confiable resultados del mismo para predecir con confianza escenarios futuros (Beven & Binley, 1989).

Según (Beven & Binley, 1989): “La validación es un concepto relativo, ya que un modelo no puede considerarse completamente verdadero o falso, sino más bien útil dentro de ciertos límites y condiciones específicas. Por ello, la validación debe complementarse con análisis de incertidumbre y sensibilidad para mejorar la confiabilidad de los resultados.”

### 2.5.1.1 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe

Para la validación de la modelación se utilizó como referencia el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe, mismo que utiliza la siguiente fórmula para el respectivo análisis:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Ecuación. 10

Donde:

- $X_i$  Son los valores simulados,
- $Y_i$  Son los valores observados,
- $\bar{y}$  Es el valor medio de los datos observados.

En la siguiente tabla se observa los rangos establecidos por Nash y Sutcliffe:

**Tabla 1**

*Calificación de rendimiento para estadística NSE*

Calificación de desempeño	Rangos
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.50$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$

*Nota:* Fuente: *River flow forecasting through conceptual models part I.*

Es uno de los más empleados de su uso extendido para evaluar la predicción de las series simuladas en modelos hidrológicos. (Nash y Sutcliffe, 1970)

### 2.5.1.2 Coeficiente de determinación ( $R^2$ )

El coeficiente de determinación hace referencia a un coeficiente estadístico que representa una proporción del modelo de regresión, mismo que oscila entre 0 y 1, donde el valor 0 significa que el modelo es muy poco congruente y 1 indica que el modelo es muy congruente (Montgomery, 2021). Para hallar este valor se usa la siguiente formula:

$$R^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Ecuación. 11

Donde:

- $x$  corresponde a los valores obtenido por el modelo.
- $\bar{x}$  corresponde a la media de los valores obtenidos por el modelo.
- $y$  corresponde a los valores observados.
- $\bar{y}$  corresponde a la media de los valores observados.

En la siguiente tabla se observa los rangos establecidos para el coeficiente de determinación:

**Tabla 2**

*Calificación de rendimiento para estadística  $R^2$*

Calificación de desempeño	Rangos
Insatisfactorio	$R^2 \leq 0.50$
Satisfactorio	$0.50 < R^2 \leq 0.7$
Bueno	$0.7 < R^2 \leq 0.85$
Muy bueno	$0.85 < R^2 \leq 1.00$

*Nota: Fuente: Introduction to Linear Regression Analysis.*

### 2.5.1.3 Error cuadrático medio

Este error hace referencia a una medida estadística que cuantifica una diferencia promedio entre valores asociados a una representación frente a valores observados. Este índice estadístico es crucial en la evaluación de la eficacia de modelos debido a que brinda una idea clara de precisión de una simulación computacional; mientras menor sea el valor, mas ajustado se encuentra un modelo a lo observado (Guerrero & Arias, 2019).

Dicho índice se calcula con la ecuación presentada a continuación:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2$$

Ecuación. 12

Donde:

- $n$  corresponde al número total de observaciones.
- $\widehat{y}_i$  corresponde a los valores predichos por el modelo.
- $\bar{y}$  corresponde a la media de los valores observados.

En la siguiente tabla se observa los rangos establecidos para el error cuadrático medio:

**Tabla 3**

*Calificación de rendimiento para el error cuadrático medio*

<b>Calificación de desempeño</b>	<b>Rangos</b>
Insatisfactorio	$0.85 < R^2 \leq 1.00$
Satisfactorio	$0.7 < R^2 \leq 0.85$
Bueno	$0.50 < R^2 \leq 0.7$
Muy bueno	$R^2 \leq 0.50$

*Nota: Fuente: An Introduction to Statistical Learning*

### **2.5.2 Rugosidad del canal**

En canales a superficie libre, la rugosidad es identificada en los límites aledaños al fluido, de esta manera es posible analizar el momentum, así como la disipación de la energía que se encuentran de manera implícita en formulaciones simples o discretas usadas en la ciencia en donde este proceso físico no es tomado en cuenta (Morvan et al., 2008).

Bajo el análisis anterior, la rugosidad del canal representa una de las variables más sensibles en la modelación de un río. Este parámetro se define como un coeficiente de resistencia al flujo dependiendo de la forma física y material del canal en cuestión, lo cual la hace susceptible a variaciones considerables en los índices estadísticos, los tres coeficientes más usados son:  $n$  de Manning,  $C$  de Chezy y  $f$  de Darcy-Weisbach (Tacuri, 2023).

Según (Bathurst, 2002) “La resistencia al flujo en ríos ubicados en terrenos montañosos es un proceso de difícil explicación; este es un componente clásico del análisis hidráulico, más aún en aplicaciones de enrutamiento de inundaciones, representaciones de profundidad y velocidad de flujo, diseños de ingeniería, modelos de enrutamientos de sedimentos y otras aplicaciones científicas. No obstante, por las propiedades pertenecientes a cauces montañosos, y por la carencia de datos disponibles en la actualidad, las fórmulas disponibles típicamente tienen errores de más o menos el 30% en su obtención, la mayor parte de relaciones tienen una razón empírica significativa proveniente de canales artificiales o datos de campo, por lo que a menudo generan especulaciones e incertidumbre frente a un desarrollo práctico satisfactorio.”

**Tabla 4***Valores de rugosidad por tipo de superficie*

<b>Tipo</b>	<b>n</b>
Río	0.025
Vegetación urbana	0.032
Hormigón	0.018
Arena, arcilla	0.023
Suelo desnudo	0.023
Pradera	0.05
Bosque	0.12
Vegetación dispersa	0.08

*Nota:* Fuente: IBER. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones, 2022.

### **2.5.3 Malla del canal**

La modelación 2D utiliza un esquema de solución de volumen finita, mismo que permite el desarrollo de un mallado computacional de manera estructurada o no estructurada, lo que implica que esta pueda entenderse como una mezcla de celdas computacionales de  $n$  número de lados, sin embargo, lo más recomendable es usar una cuadrícula nominal de lados iguales (Bladé et al., 2014).

La malla de cálculo es uno de los procesos más complejos en la simulación numérica del flujo en ríos, ya que se requiere que su geometría sea irregular con el fin adaptarse a cambios bruscos de la topografía del terreno, la calidad de la malla impacta directamente en la exactitud de la simulación (Blade, Zea, Corestein, & Escolano, 2014).

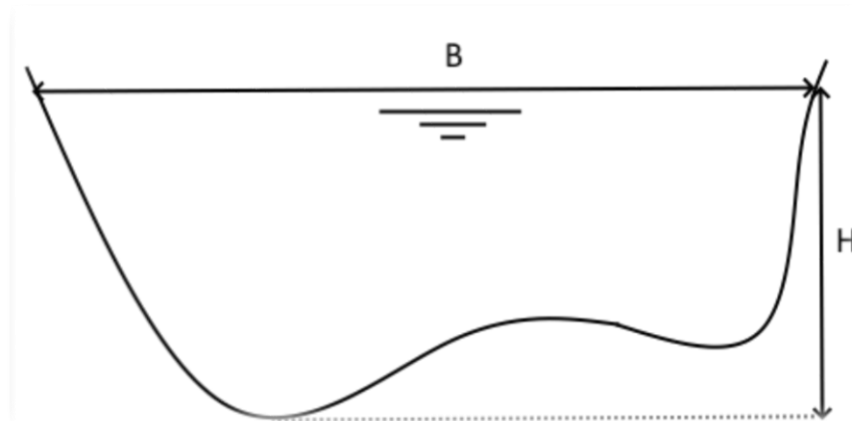
#### **2.5.4 Geometría del canal.**

Hace referencia a cambios en el ancho, profundidad o pendiente del lecho, por lo general cuando se habla de cauces montañosos, la geometría tiende a ser irregular en toda su sección.

Los canales pueden ser de tipo natural o artificial, para el caso de este estudio en específico se toma en cuenta el primer tipo, en donde estos han sido creados por los ecosistemas a manera de drenajes de agua de la tierra en forma de ríos u arroyos. Los canales naturales tienen un flujo irregular debido a la variación de caudales respecto al tiempo, lo cual hace que la profundidad y su forma varíen a lo largo de su sección (Castellanos et al., 2017).

#### ***Figura 1***

*Sección típica de un canal de un cauce de un río*



***Nota:*** Fuente: Elaboración propia.

### **2.5.5 Condiciones de contorno.**

Las condiciones de entrada y salida se definieron a través de lecturas de estaciones ubicadas en puntos estratégicos a lo largo del cauce. En la entrada se trabajó con un hidrograma de flujo (relación tiempo-caudal), los datos de precipitación se obtuvieron de lecturas horarias de la estación Tomebamba/Mazan. Por otro lado, para en análisis de la salida se procedió a trabajar con una curva de descarga (relación tirante- caudal) con datos de la estación Matadero / Sayausí.

Un hidrograma de flujo es una representación gráfica de la variación del caudal en un punto específico de un río o cuenca hidrográfica a lo largo del tiempo. Este permite analizar el comportamiento del flujo en respuesta a eventos de precipitación y otros factores hidrológicos (Chow, 1988).

Por otro lado, la curva de descarga, o curva altura-caudal, es una representación gráfica que muestra la relación entre la altura del agua en una sección específica de un río y el caudal que fluye a través de esa sección. Esta herramienta es esencial en hidrología para estimar caudales basándose en mediciones de nivel de agua, facilitando la gestión de recursos hídricos y el diseño de infraestructuras hidráulicas (Germán, 2019).

### **2.6 Modelo HEC – RAS 2D**

Para la predicción de inundaciones fluviales se debe realizar el trazado de las inundaciones con modelos hidrológicos mediante picos de inundación. Según (Hicks & Peacock, 2005) “Los picos de inundación obtenidos se transforman en pronósticos del nivel del agua mediante un modelo hidráulico de flujo constante, como lo hace HEC-RAS”. Este software gratuito para modelización hidráulica ofrece diversas funcionalidades, incluyendo la entrada de datos, análisis hidráulico, capacidades gráficas, gestión de datos, y más.

Recientemente, el modelo HEC-RAS se ha ampliado para permitir el análisis de flujo inestable, el enrutamiento de inundaciones en aguas abiertas y la generación simultánea de pronósticos del nivel del agua.

## **2.7 Modelo IBER**

IBER es un programa de modelación matemática bidimensional que incluye un módulo hidrodinámico para simular flujos en ríos, canales y cauces naturales, permitiendo calcular avenidas e inundaciones, así como delimitar zonas inundables. Esto resulta en una herramienta de modelización numérica del flujo de agua y sedimentos en ríos y estuarios, que emplea esquemas numéricos avanzados, altamente estables y robustos en diversas situaciones, siendo especialmente adecuada para flujos discontinuos y, en particular, para cauces torrenciales y regímenes irregulares. IBER es una herramienta que integra un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, utilizando diferentes métodos para cumplir con los requisitos relacionados con el agua establecida en las normativas y recomendaciones vigentes (E. Bladé<sup>12</sup>, s/f).

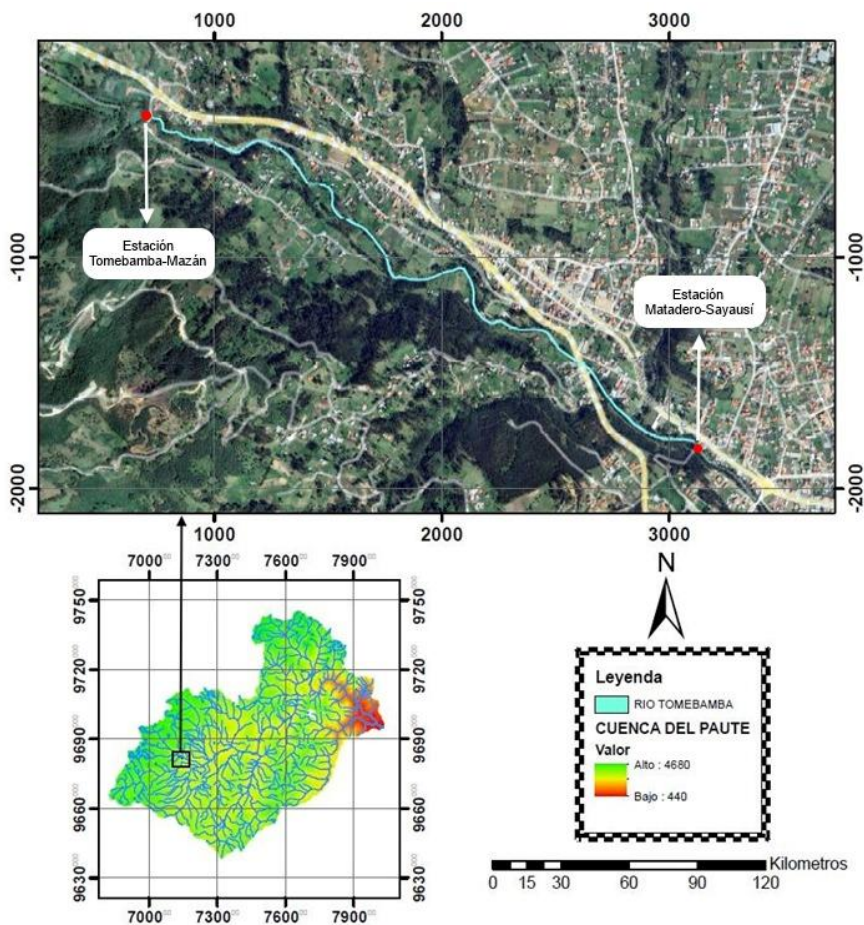
## CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Área de estudio

La zona de estudio se centra en el río Tomebamba, este río nace en el parque nacional Cajas situada al noreste de la provincia del Azuay. Su trayectoria atraviesa la ciudad de Cuenca y es el más importante de los cuatro pequeños ríos que fluyen a través de la ciudad, los otros son Yanuncay, Tarqui y Machángara, y juntos le dan el nombre a la ciudad de Cuenca.

**Figura 2**

*Área de estudio.*



**Nota:** Fuente: Elaboración propia.

El tramo de análisis para la modelación tiene una longitud de 2.5 kilómetros iniciando en las coordenadas 712641.498 E, 9682862.941 N y terminando en las coordenadas 714628.518 E, 9681661.132 N. Considerando una zona de inundación que va desde la rivera del río Tomebamba hasta aproximadamente 100 metros o hasta considerar un desnivel muy pronunciado.

### **3.2 Análisis del modelo digital de elevación**

#### **3.2.1 Proceso de obtención de datos topográficos**

Para obtener los datos topográficos se establecieron 10 puntos de control distribuidos a lo largo del río utilizando el instrumento RTK. Estos puntos de control fueron posicionados con una separación entre 200 a 300 metros, para garantizar una cobertura completa del área de estudio. El uso combinado del RTK y los drones permitió proporcionar las correcciones necesarias a los datos obtenidos, asegurando un posicionamiento de alta precisión. Para realizar la medición con la máxima exactitud posible, fue necesario implementar dianas. Las dianas fueron realizadas con papel adhesivo y cartón prensado, con estos materiales se logró reducir el tiempo de elaboración y el costo de fabricación (revisar anexos).

Con los drones se realiza un mapeo lineal a lo largo del área de estudio, operando a una velocidad constante de 2 km/h y manteniendo una altura de vuelo de 130 metros sobre el terreno. Para llevar a cabo este proceso, se utiliza inicialmente un dron perteneciente a la Universidad Católica de Cuenca, el cual cubrió una distancia aproximada de 1,100 metros, capturando un total de 241 fotografías del área. Posteriormente, se empleó un segundo dron para completar el levantamiento topográfico, el cual abarcó los 1,400 metros restantes. Durante esta segunda etapa, se tuvo especial cuidado en asegurar que existiera una superposición adecuada entre las imágenes obtenidas por ambos drones, con el fin de

garantizar la continuidad y la coherencia en los datos recolectados. Como resultado, se logró capturar un total de 542 fotografías adicionales con el segundo dron, lo que elevó el número total de imágenes recopiladas a 783. Este conjunto de fotografías fueron las suficientes para la generación de un modelo topográfico ideal del área en estudio.

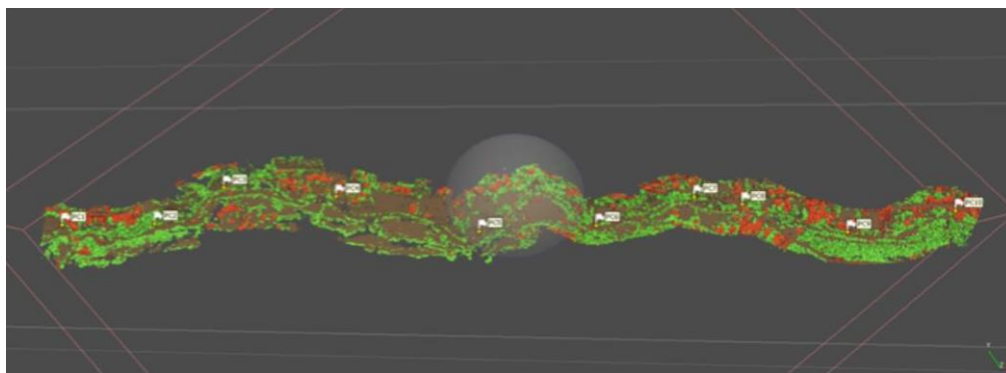
### **3.1.1 Modelación 3D en el programa Agisoft Metashape.**

Luego de alinear las fotografías se añadió manualmente los puntos de control en el programa Agisoft Metashape. Después de eso se tuvo que ubicar cada punto de control con todas las fotografías en las que aparecieran dichos puntos. Para luego procesar la nube de puntos densa de toda la fotogrametría, filtrando las edificaciones y la vegetación para que el DEM tenga solo la información del terreno.

El punto en donde se encuentra el puente vehicular, de igual manera formó parte del grupo de edificaciones. A partir de la nube de puntos del terreno se genera un modelo digital de elevaciones para seguidamente poder trabajar con las elevaciones tomadas del terreno.

### ***Figura 3***

*Clasificación del terreno*



***Nota:*** Fuente: *Elaboración propia.*

En la figura 3 se muestra la clasificación de los distintos componentes del terreno de estudio, mismos parámetros que se detallan a continuación:

- Verde: Zonas de vegetación
- Café: cobertura de suelo
- Anaranjado: Estructuras urbanas

La manipulación de estos datos mediante el software ya mencionado tiene como objetivo realizar una “limpieza” para enfocar la fotogrametría directamente al terreno de interés, y generar un modelo digital de elevación lo más parecido posible al relieve de la vida real.

### **3.1 Recopilación y procesamiento de la información hidrológica**

La etapa de recopilación de datos hidrológicos es básica para el desarrollo de esta tesis, ya que proporciona la información fundamental para la elaboración de un modelo bidimensional del río Tomebamba. Para la recopilación de datos hidrológicos se realiza principalmente a través de estaciones de monitoreo automatizadas, ubicadas en cuerpos de agua y otros puntos estratégicos. Estas estaciones miden diversos parámetros como el nivel del agua, su flujo, temperatura, y velocidad. Para este caso se utilizaron datos de las estaciones Tomebamba y Matadero Sayausí, gestionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y la Empresa Pública Municipal ETAPA.

Se obtuvo cerca de treinta y dos mil datos con intervalos de una hora, abarcando así cerca de cuatro años de información. Debido a la presencia de datos faltantes en algunas series temporales, se realizó un proceso de interpolación para garantizar la continuidad del contenido. También se llevó a cabo un proceso para determinar el caudal relacionado a un período de retorno de diez años con el cual se puso en funcionamiento la modelación.

Para la construcción de este modelo, se definieron condiciones de borde y frontera, para esto se estableció un hidrograma de flujo en la sección de entrada del modelo, el cual representa

la variación por hora del caudal en el río durante 24 horas. También se incorporó una curva de descarga en la sección de salida para definir la relación entre el caudal y el nivel del agua en relación con las mismas 24 horas analizadas en la entrada del sistema fluvial. Esto permitió analizar zonas de inundación y velocidades entre los modelos de los dos programas, Hec-Ras e Iber, con la finalidad de comparar la variabilidad de los resultados obtenidos.

### **3.1 Análisis de frecuencias para el cálculo de caudales**

El análisis de frecuencias se considera como una opción válida para estimar la ocurrencia de un evento de precipitación, y sirve como contribución para un modelo hidrológico (Malekinezhad & Zare-Garizi, 2014).

Se eligió un periodo de retorno de 10 años por que esta cantidad de tiempo permite representar una crecida significativa que puede ocurrir con una frecuencia considerable, lo que es aceptable para el tipo de estudio que se realizó. Este dato se usó debido a que es indispensable analizar el comportamiento hidráulico en eventos que, sin ser extremos, pueden generar problemas de inundación o afectar infraestructuras cercanas al cauce.

Al tratarse de un análisis enfocado en evaluar condiciones reales y posibles en un determinado evento de tormenta, este periodo ofrece un balance entre seguridad y representación óptima del suceso para condiciones cercanas a la realidad.

Para dar inicio al cálculo del periodo de retorno es indispensable interpolar datos faltantes, de esta manera se genera un entorno confiable de cómputo, debido a que el hallazgo de dichos datos resulta en una calibración que se asemeja de mejor manera a la realidad que se desea representar con el modelo hidráulico. Es oportuno ordenar los datos obtenidos de manera descendente, y además, numerar los datos de manera consecutiva para posteriormente calcular la probabilidad de ocurrencia con la fórmula propuesta a continuación:

$$p = \frac{n * 100}{\text{cantidad de datos}}$$

Ecuación. 13

Finalmente se calcula el periodo de retorno obteniendo la inversa de la probabilidad hallada con anterioridad:

$$T = \frac{1}{p}$$

Ecuación. 14

Para este caso en específico se calcularon periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años.

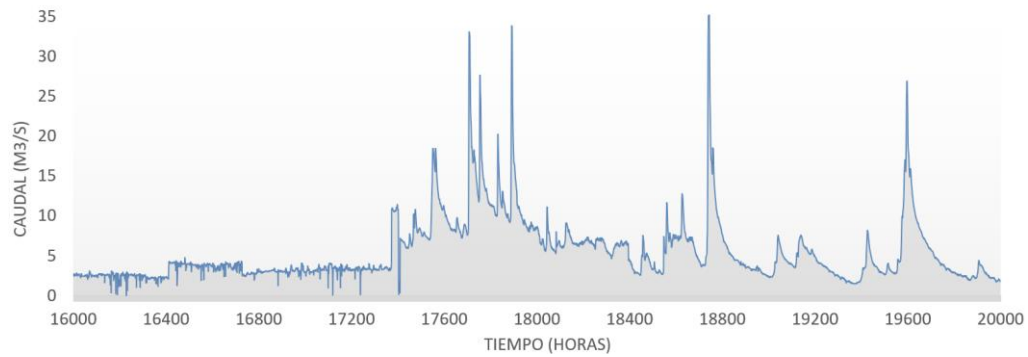
### **3.2 Definición de condiciones de borde y de frontera**

Un hidrograma de caudal es una gráfica o una tabla que muestra la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. En efecto el hidrograma es una "expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular" (Naranjo, 2018).

Como condición de entrada para el modelo bidimensional del río Tomebamba se optó por realizar un hidrograma de flujo. Con los datos obtenidos de la estación Tomebamba se generaron gráficas de caudal-tiempo con un intervalo aproximado de seis meses, con esto se pudo observar cual es el periodo de tiempo óptimo para la construcción del hidrograma.

**Figura 4**

*Gráfica caudal tiempo de la estación Tomebamba para el año 2017.*

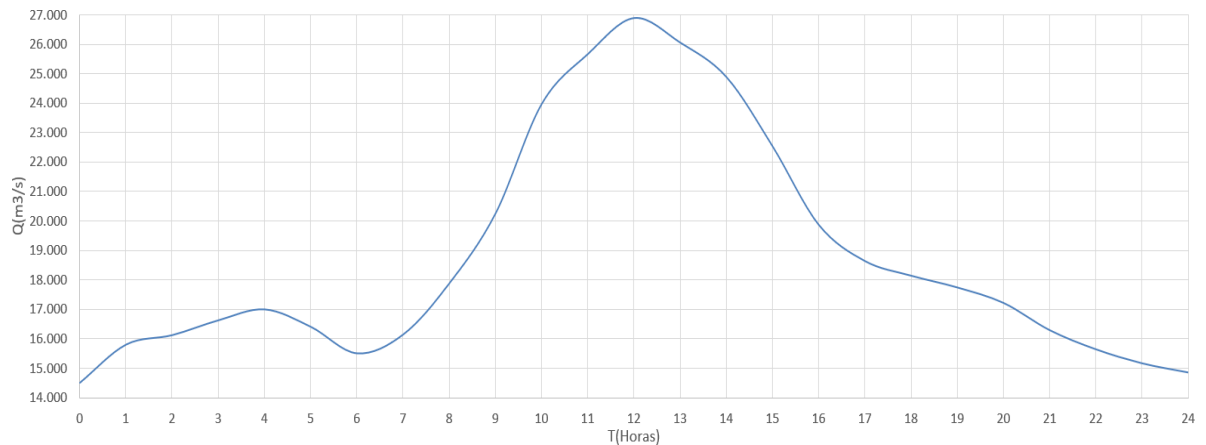


*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

Para delimitar el hidrograma de flujo principal, se tomó los datos del año 2017, específicamente desde el 26 de julio de 2017 a las 3:59 a. m. hasta el 27 de julio de 2017 a las 3:59 a. m., analizando así un periodo de 24 horas consecutivas.

**Figura 5**

*Hidrograma de diseño.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

Estudiar el comportamiento de los patrones climáticos y conocer en qué momentos del año ocurren las lluvias más intensas puede ser clave para establecer un sistema de alerta temprana. Esto permite informar a la población con anticipación, dándoles la oportunidad de tomar precauciones y reducir el impacto de posibles desastres. Para analizar estos fenómenos se debe tener conocimientos sobre aspectos como el caudal, la precipitación, el concepto de cuenca hidrográfica y el proceso para elaborar hidrogramas, entre otros temas que se detallarán a continuación. (Naranjo, 2018).

Se obtuvo una relación entre el caudal calculado para distintos períodos de retorno y el caudal observado más alto. A partir de esta relación, se multiplicó los coeficientes obtenidos con cada uno de los caudales observados en el intervalo de 24 horas analizado. Con esto se pudo generar hidrogramas de flujo específicos para cada período de retorno, con la finalidad de analizar la variación de respuesta de cada parámetro.

**Tabla 5**

*Caudales para diferentes periodos de retorno*

HORAS	5 AÑOS	10 AÑOS	25 AÑOS	50 AÑOS
0	14.521	14.521	14.521	14.521
1	17.146	17.520	19.858	22.085
2	17.785	18.249	21.148	23.908
3	18.797	19.404	23.197	26.808
4	19.538	20.249	24.692	28.922
5	18.315	18.849	22.183	25.359
6	16.465	16.731	18.395	19.980

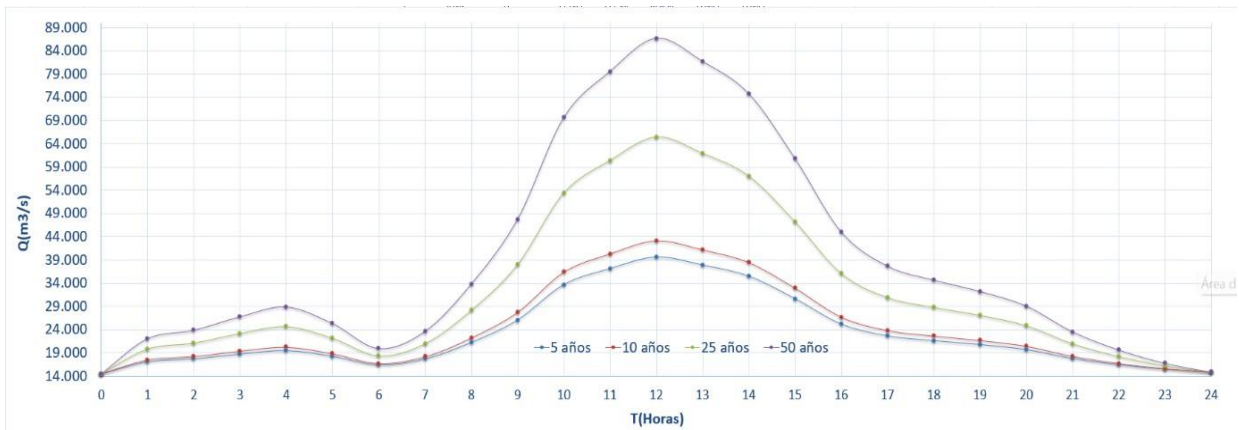
7	17.752	18.201	21.005	23.675
8	21.279	22.232	28.183	33.850
9	26.101	27.742	38.000	47.768
10	33.668	36.393	53.418	69.630
11	37.112	40.328	60.425	79.562
12	39.590	43.159	65.464	86.703
13	37.873	41.194	61.948	81.709
14	35.478	38.454	57.048	74.754
15	30.659	32.942	47.207	60.790
16	25.213	26.713	36.085	45.010
17	22.688	23.823	30.920	37.677
18	21.660	22.646	28.808	34.676
19	20.829	21.694	27.099	32.246
20	19.745	20.453	24.874	29.083
21	17.844	18.276	20.981	23.556
22	16.504	16.743	18.234	19.654
23	15.518	15.614	16.209	16.776
24	14.869	14.869	14.869	14.869

---

*Nota: Fuente: Elaboración propia*

**Figura 6**

*Hidrogramas según periodos de retorno.*

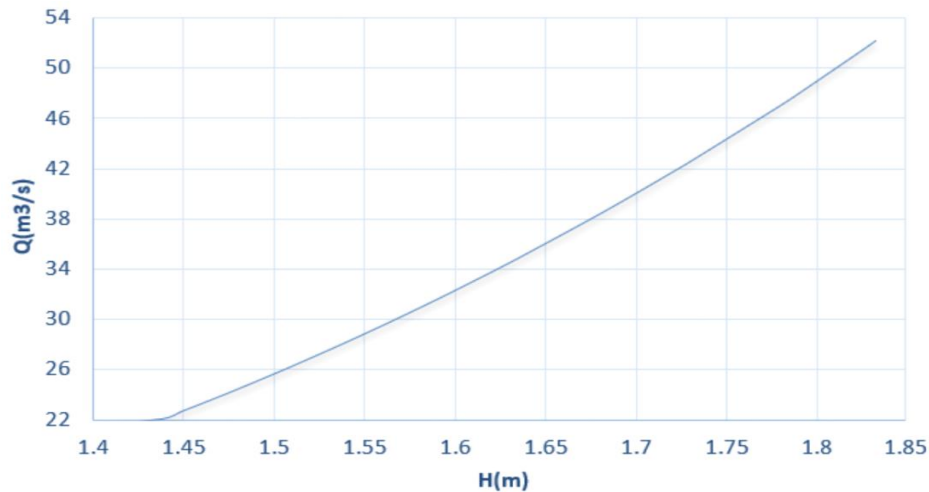


**Nota:** Fuente: *Elaboración propia.*

Para la condición de salida del modelo, se utilizó una curva de descarga obtenida a partir de los datos observados en la estación Matadero Sayausí. La curva de descarga representa la relación entre el caudal del agua y la altura del flujo en el cauce. Para la elaboración de esta curva se tomó en cuenta los datos correspondientes al mismo período analizado en el hidrograma de flujo, es decir, desde el 26 de julio de 2017 a las 3:59 a. m. hasta el 27 de julio de 2017 a las 3:59 a. m., así se asegura la coherencia temporal en la modelación.

**Figura 7**

Curva de descarga  $T=10$  años.



*Nota:* Fuente: Elaboración propia.

### 3.1 Simulación Bidimensional con HEC-RAS

La ubicación de río Tomebamba favorecen las crecidas del caudal durante la estación de invierno, por lo que se necesita tomar medidas de prevención a las inundaciones, más si se considera suelo urbano. Para efectos de prevención, mediante el programa Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS) se realizó la simulación hidráulica de un tramo del río Tomebamba comprendido entre dos estaciones meteorológicas.

El entorno con el que trabaja HEC-RAS facilita la introducción de manera ordenada de datos, este software, presenta herramientas muy útiles que facilitan el trabajo, tales como la interpolación de secciones transversales o la reducción automática de puntos que conforman las secciones (Orellana, 2021).

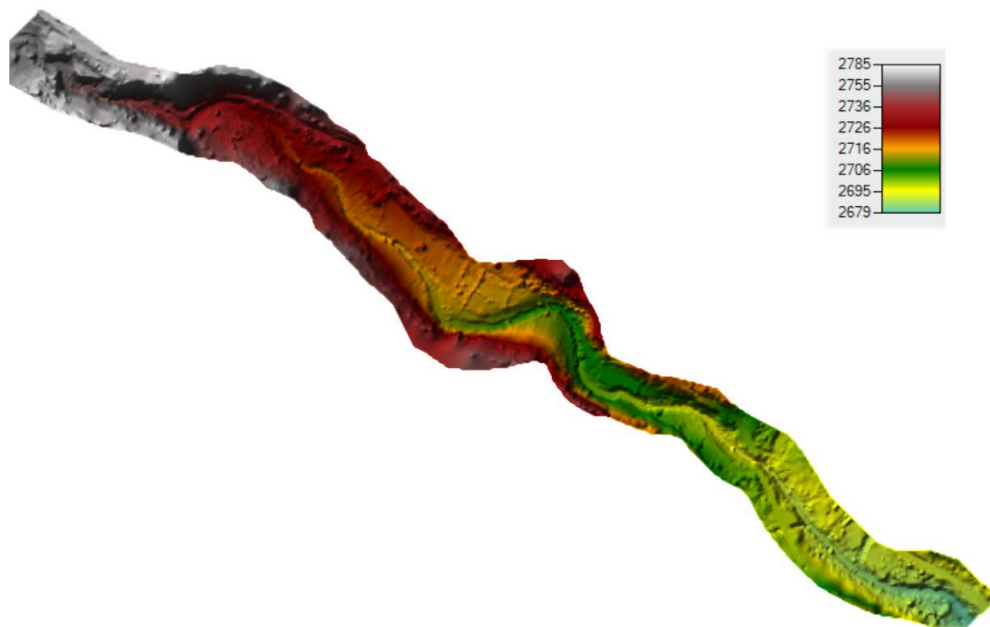
Se utilizó un archivo .tif como base para la representación del terreno en el programa. Este archivo corresponde a un Modelo Digital de Elevación (DEM), obtenido a partir de los

datos topográficos adquiridos mediante el trabajo en campo con la ayuda de un dron. La incorporación de este archivo de Modelo Digital de Elevación al software permite generar una superficie tridimensional del área de estudio otorgando información detallada del terreno.

Este modelo digital deberá realizarse con mucha precisión, debido a que influye directamente en la calidad de los resultados obtenidos, afectando en la identificación de posibles zonas de inundación y alterando el comportamiento del río bajo diferentes escenarios hidrológicos.

**Figura 8**

*Modelo digital de elevación.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

Dentro del modelo digital de elevación (DEM), se delimitó un área de análisis que abarcó la zona más propensa a inundaciones. Sobre esta área se generó la geometría del canal, utilizando un mallado computacional con una separación entre secciones de 5 metros en el

eje X y 5 metros

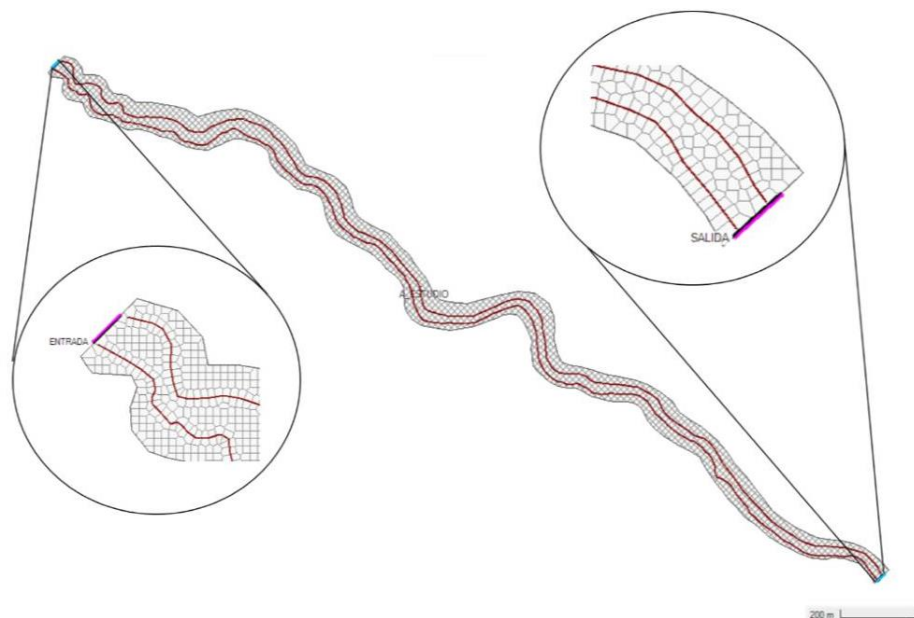
en el eje Y, este mallado permite examinar las variaciones de velocidad y nivel del agua evitando producir tiempos de simulación excesivamente largos.

La extensión total del área analizada es de aproximadamente de 100000 m<sup>2</sup>, cubriendo tanto el cauce del río como las zonas adyacentes que podrían verse afectadas por crecidas.

También se establecieron las condiciones de frontera en los puntos de entrada y salida del modelo, correspondiendo la entrada a la estación Tomebamba y la salida a la estación Matadero.

### **Figura 9**

*Condiciones de borde y frontera.*



**Nota:** Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar de manera eficiente el comportamiento del flujo, se utilizó diferentes coeficientes de Manning, En el cauce del río se asignó un coeficiente de Manning de 0.025, representativo de un lecho de grava y sedimentos, mientras que en las márgenes se utilizó un

valor de 0.032 correspondiente a zonas con vegetación densa y suelos menos permeables. Es importante diferenciar los coeficientes de Manning utilizados, ya que la rugosidad del terreno influye en el comportamiento del flujo.

Por último, se ingresaron los valores de caudal de entrada y caudal de salida, obtenidos de los cálculos realizados con anterioridad. Estos valores; tanto los coeficientes de Manning como los caudales, fueron utilizados de la misma manera en el programa IBER.

### **3.1 Simulación Bidimensional con IBER.**

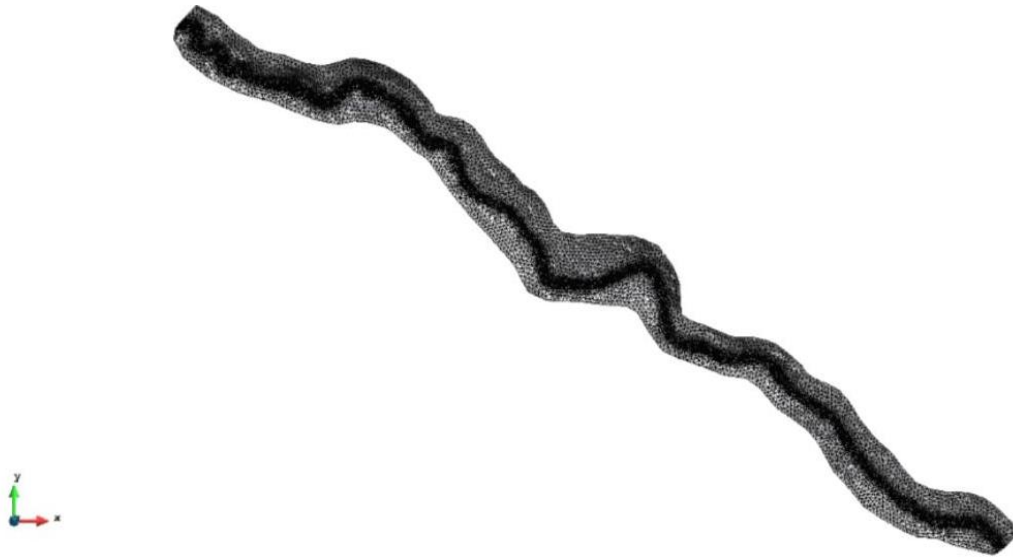
En primer lugar, para esta modelación es de mucha importancia tener en cuenta que se va a generar un mallado, mismo que va a adquirir propiedades pertenecientes a todos los datos preliminares recopilados por el modelo digital de elevación y los datos hidrológicos pertenecientes a las estaciones hidrológicas aledañas. Estos datos son procesados e importados a IBER, donde se establecen los límites del dominio de estudio y se realiza una primera visualización de la superficie para evaluar su coherencia y calidad.

Con la topografía definida, se procede a delimitar el área de modelado, determinando el tramo del río y sus zonas de influencia. En esta fase, se decide la extensión del dominio, estableciendo los contornos laterales, aguas arriba y aguas abajo.

Posteriormente, se realiza la construcción de un mallado computacional, dividiendo el dominio en elementos más pequeños que para este caso fueron triángulos. Este proceso es crucial, ya que la precisión del modelo dependerá en gran medida de la calidad y resolución de este mallado.

**Figura 10**

*Mallado de cálculo en IBER.*



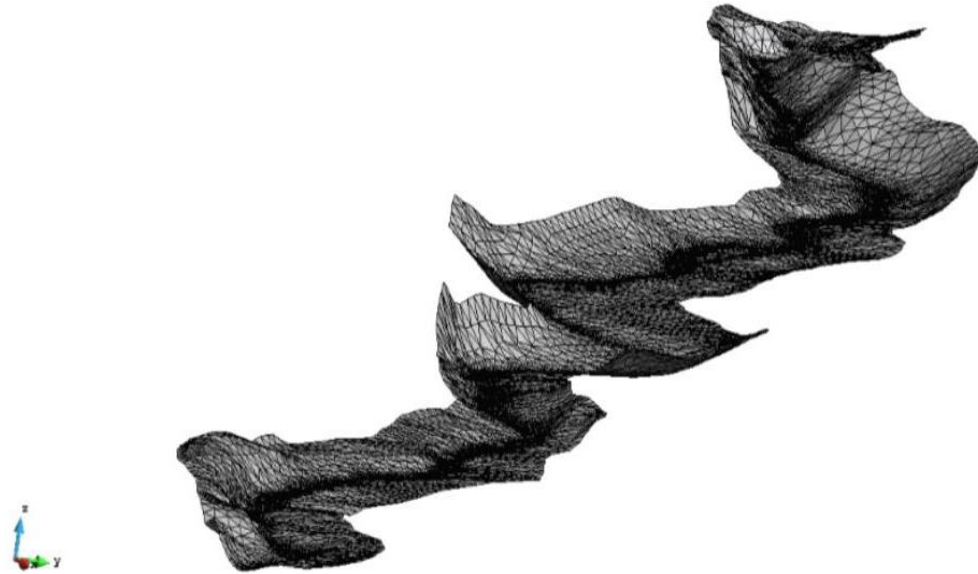
*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

La generación del mallado en IBER se basa en un algoritmo de triangulación, el cual puede ser refinado dependiendo de la complejidad geométrica del cauce. Para mejorar la precisión de la simulación, es recomendable un mallado más denso en zonas críticas, como curvas, estrechamientos o áreas con alta variabilidad hidráulica.

Una vez creado el mallado, se evalúa su calidad mediante herramientas que permiten detectar elementos con geometrías inadecuadas, como ángulos muy agudos o celdas excesivamente deformadas, ya que estos podrían comprometer la estabilidad numérica del modelo

**Figura 11**

*Mallado con propiedades de elevación.*

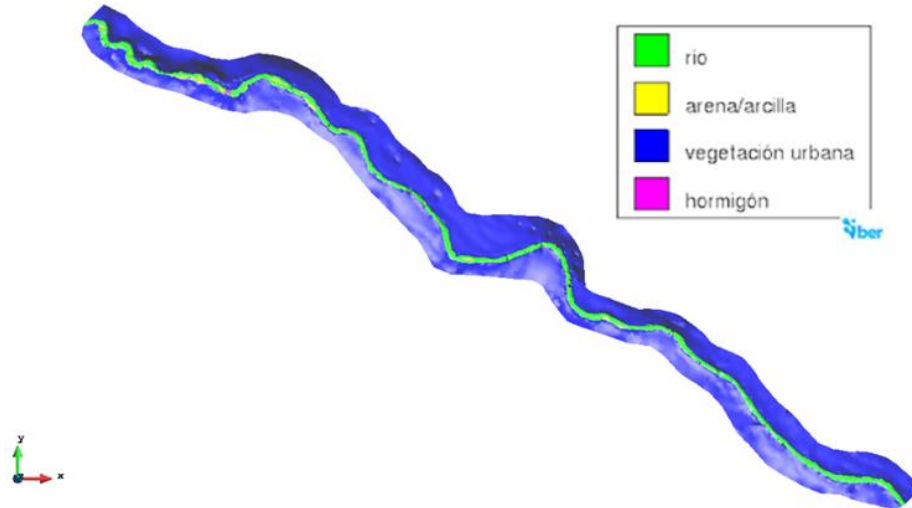


*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

Una vez finalizado el proceso de mallado, se procede a la asignación de propiedades hidráulicas a cada celda. Esto implica definir coeficientes de rugosidad en función de la naturaleza del lecho y las márgenes del río, utilizando la clasificación de Manning. Asimismo, se establecen las condiciones de contorno, como caudales, niveles de agua y posibles estructuras hidráulicas presentes en el tramo modelado, tales como puentes o presas. La correcta asignación de estos parámetros es determinante para garantizar la precisión de la simulación y obtener resultados representativos del comportamiento real del flujo.

**Figura 12**

*Asignación de rugosidades en IBER.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 12 se puede identificar las áreas a las cuales corresponde un coeficiente de Manning asociado al tipo de superficie que conforman las distintas zonas presentes en el flujo. A continuación, se puede apreciar dichos valores para cada superficie mencionada.

**Tabla 6**

*Valores de rugosidad asignados en el cauce*

<b>Tipo</b>	<b>n</b>
Río	0.025
Vegetación urbana	0.032
Hormigón	0.018
Arena, arcilla	0.023

*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

## CAPITULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Evaluación de las variables de flujo

#### 4.1.1 Calados

Para entender de manera eficaz este resultado es importante tomar en cuenta que cuando se habla de un calado se hace referencia a la altura medida desde el punto más bajo de la sección transversal a la superficie libre del agua.

##### 4.1.1.1 Calados en HEC-RAS

El resultado que arroja el software se encuentra directamente ligado a la calidad del modelo digital de elevación, debido a que las cotas de fondo juegan un rol fundamental en esta variable. En la siguiente imagen se puede observar la profundidad del agua que varía entre 0.00 m que se representa con azul claro y 2.24 m representado por color azul oscuro.

#### **Figura 13**

*Profundidad obtenida en el programa HEC-RAS*

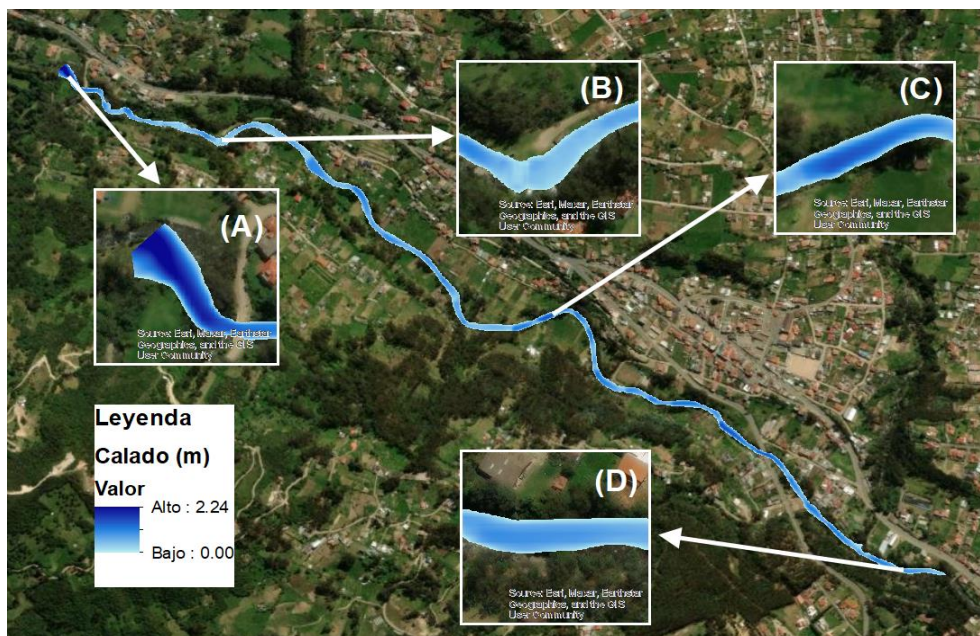


*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

La mayor parte del cauce presenta profundidades bajas, pero hay zonas con acumulación de agua donde el flujo alcanza su punto máximo de profundidad, aquello debido por estrechamientos u obstáculos en el río. Por otro lado, se observa la extensión del perímetro que cubre el agua del modelo, lo que indica riesgo de inundación en ciertos sectores.

**Figura 14**

*Ubicaciones de zonas profundas en HEC-RAS.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

En la sección (A), de la figura 14, se puede apreciar un calado máximo, mismo que puede representar bajas velocidades, zonas de estancamiento de sedimentos y poca probabilidad de socavación; por el contrario, en temas de inundación, esta zona puede producir un desbordamiento crítico, causando daños a infraestructuras cercanas.

En la sección (B) se puede observar una variación entre alturas de agua debido a la presencia de la captación de agua, misma que está conformada por un vertedor tipo Creager

que hace que el tirante disminuya notablemente.

En la sección (C) se puede notar una altura más pronunciada respecto a las zonas aledañas, lo cual podría resultar en una zona susceptible a inundación.

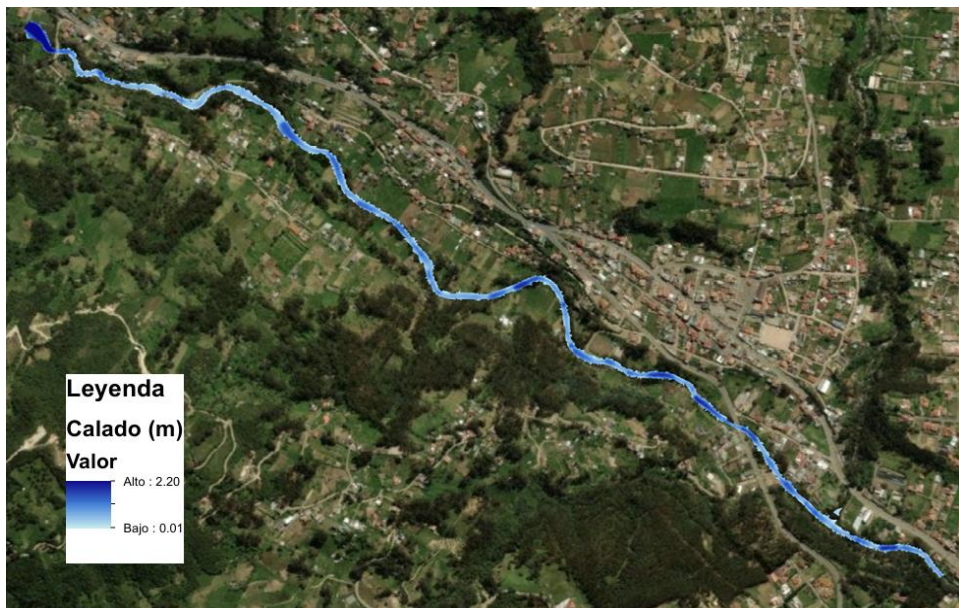
En la sección (D) se obtuvo un calado menor lo cual es favorable debido a que a pocos metros se encuentra el puente que conduce hacia la Unidad Educativa Alborada, y así se puede garantizar que mediante el periodo de retorno para el cual se ha modelado, la estructura mencionada no recibirá daños por inundación.

#### 4.1.1.1 Calados en IBER

Por su parte el software IBER arroja un resultado de modelación similar al obtenido con el programa anteriormente mencionado, ubicando los calados representados en un rango de 0.01m que se simboliza con azul claro y 2.20 m simbolizado por color azul oscuro.

#### **Figura 15**

*Profundidad obtenida en el programa IBER.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

De la misma manera que en el programa HEC-RAS, se pueden observar una gran cantidad de zonas con baja profundidad, concentrándose la mayor profundidad del lecho en la zona de la entrada.

La figura mostrada a continuación muestra 4 zonas en donde el calado es mayor correspondiente al violeta, estas ubicaciones resaltan profundidades mayores a las del resto del cauce.

**Figura 16**

*Ubicaciones de zonas profundas IBER.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

En la sección (A) el programa IBER genera un área, vista en planta, mayor respecto al programa HEC-RAS, sin embargo, el valor del calado es semejante al presentado en la otra modelación.

En la sección (B) se vuelve a notar una repentina disminución de profundidad debido a la obra hidráulica ya mencionada, con la diferencia que presenta menor altura.

En la sección (C) se puede apreciar una coloración repetitiva respecto al modelo en HEC-RAS, misma que representa un calado considerable y un posible riesgo a inundación.

La sección (D) ilustra una zona con aguas medianamente profundas que se diferencian levemente del programa HEC-RAS.

#### **4.1.1 Velocidades**

En canales abiertos, la velocidad de flujo se ve afectada por factores como la pendiente del canal, la rugosidad de sus paredes y el radio hidráulico (Sanabria, 2024).

Los factores que influyen para el modelamiento de esta variable son extensos, estas van desde la pendiente del terreno hasta la rugosidad del cauce.

##### **4.1.1.1 Velocidades en HEC-RAS**

El rango de velocidades a lo largo del cauce corresponde a 0 m/s representado con color azul intenso y 5.86 m/s representado con color verde intenso. Se puede apreciar un claro dominio de velocidades altas a lo largo de la vertiente.

**Figura 17**

*Velocidad obtenida en el programa HEC-RAS.*

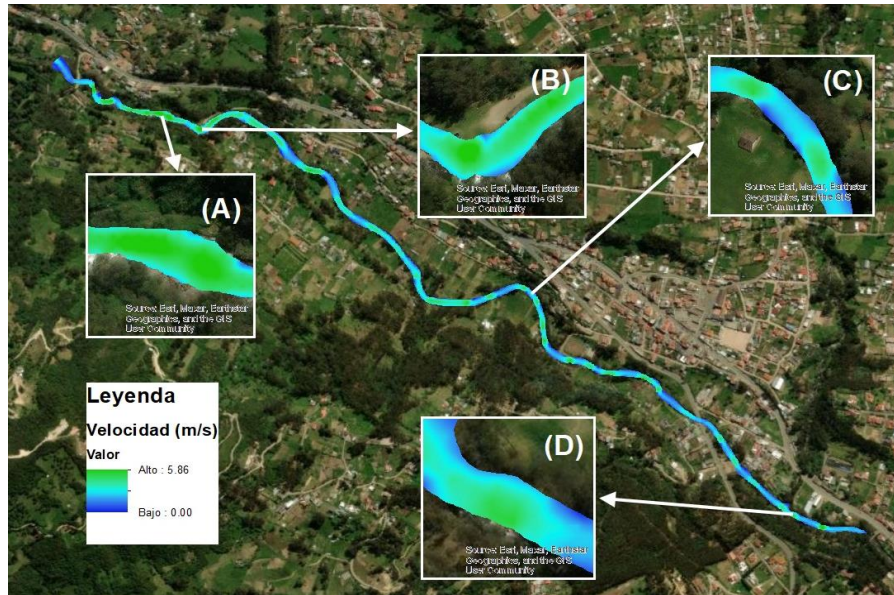


*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 17, se puede apreciar que los valores altos se hallan ubicados generalmente en zonas con curvatura pronunciada, y a su vez en zonas donde la pendiente del terreno es notablemente mayor que en otras secciones. Por su parte, las velocidades bajas se ven fuertemente ligadas a puntos de estudio en donde la sección transversal tiende a ser más ancha.

**Figura 18**

*Zonas de velocidad en HEC-RAS.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

La sección (A) representa una velocidad elevada que se mantiene a lo largo de aproximadamente 70 metros, lo cual está relacionada con un aumento de pendiente y poca profundidad, los valores elevados de esta zona pueden afectar significativamente a las riberas del afluente.

La sección (B) que corresponde a la PTAP del Cebollar, evidencia velocidades altas que incrementan repentinamente debido a la pendiente que es característica destacable de una estructura de esta índole.

La sección (C) presenta una variación de velocidades brusca, debido a que existe un salto apreciable entre cotas.

En la sección (D) se cuenta con una alta velocidad lo cual podría repercutir de manera perjudicial a la infraestructura cercana como lo es el puente que conecta a la Unidad Educativa

Alborada.

#### 4.1.1.2 Velocidades en IBER

Los resultados de velocidades obtenidos por el programa IBER corresponden a un rango entre 0 m/s y 6.19 m/s. Estos valores corresponden a una relación cercana con los obtenidos por el software HEC-RAS.

#### **Figura 19**

*Velocidad obtenida en el programa IBER.*



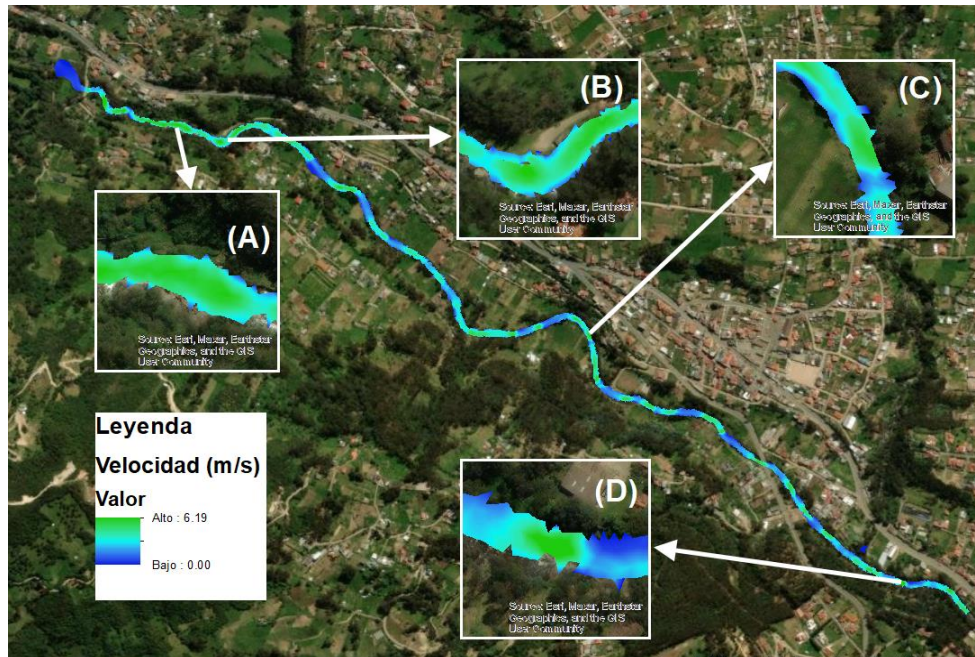
*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

Se puede observar que las máximas velocidades se encuentran en zonas de secciones más angostas y con mayor pendiente según las elevaciones obtenidas a través de la topografía, manteniendo una característica constante de ubicación en la mitad de la sección del río.

Por su parte, las velocidades más bajas se presentan en sectores más anchos y en los costados del río, lo que sugiere zonas de estancamiento o posibles depósitos de sedimentos.

**Figura 20**

*Zonas con mayor concentración de velocidad IBER.*



**Nota:** Fuente: *Elaboración propia.*

La sección (A) se caracteriza por representar una alta similitud con el programaman HEC-RAS, ya que presentan una notable aproximación visual en la escala de color, reiterando la vulnerabilidad de este tramo.

La sección (B) expone un incremento de velocidades después de la captación de agua. Esto se puede explicar debido al impulso que genera el vertedor.

En la sección (C) se nota una ligera diferencia en cuanto a la extensión longitudinal de la coloración verde, sin embargo, se puede observar que, respecto al otro software, se cuenta con velocidades similares.

La sección (D) expone un incremento de velocidad corto en su representación longitudinal, a pesar de ello, es notable la similitud de esta variable en la representación de ambos programas.

#### 4.1.1 Esfuerzos cortantes

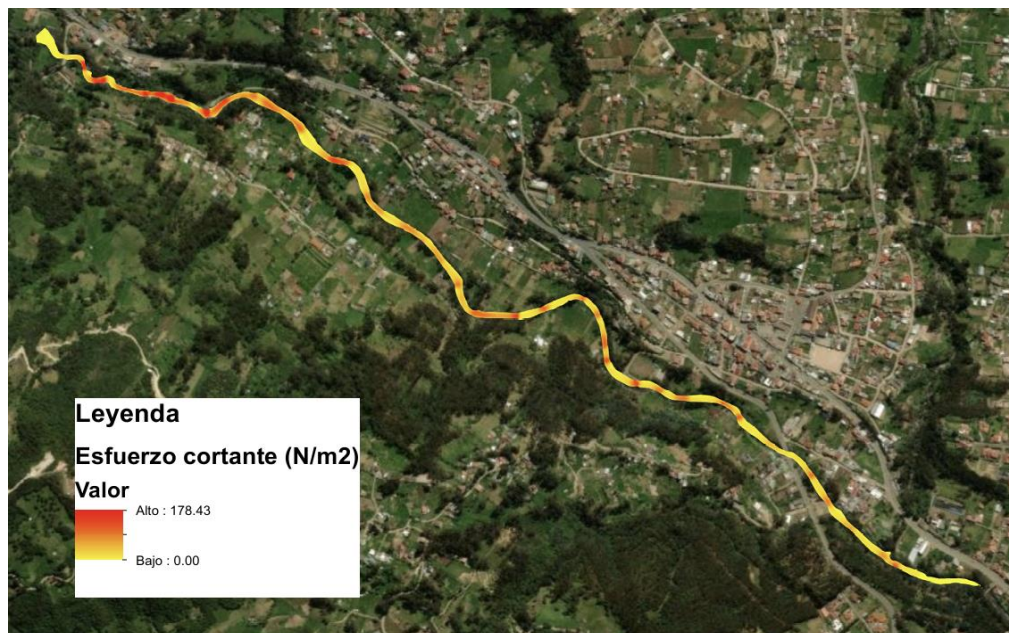
Según (Chow1988): “El esfuerzo cortante es fundamental para entender el comportamiento hidráulico de un río, ya que influye directamente en procesos como transporte de sedimentos, estabilidad de márgenes y evolución geomorfológica del cauce”.

##### 4.1.1.1 Esfuerzos cortantes en HEC-RAS

En el apartado de los esfuerzos cortantes se puede apreciar un rango de 0 Pa a 406 Pa mismo que se halla ubicado con los colores: amarillo (valores bajos) y rojo (valores altos).

#### **Figura 21**

*Esfuerzos cortantes obtenidos en el programa HEC-RAS.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

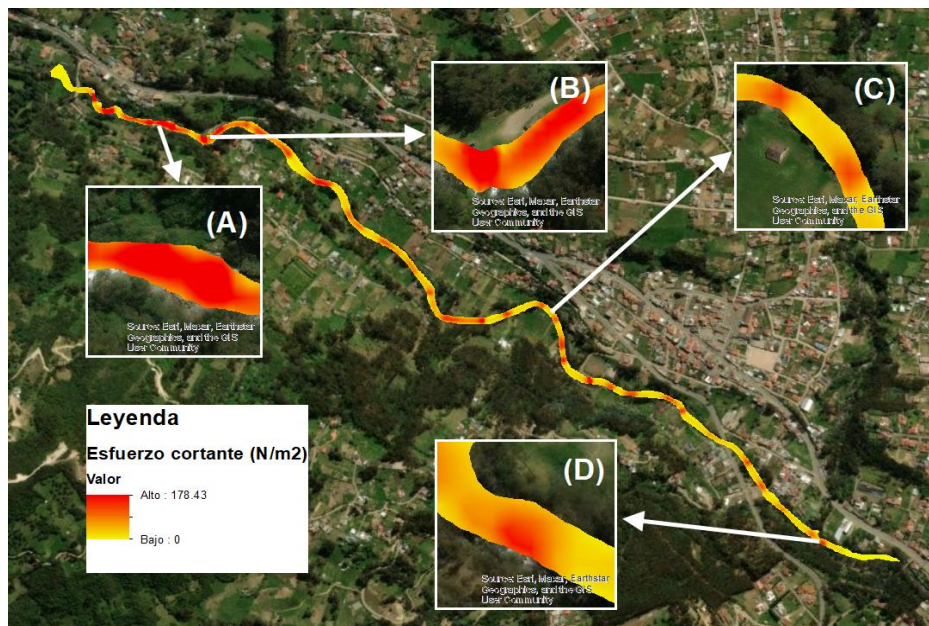
Es posible observar que los valores más altos, se concentran en zonas de curvatura pronunciada y en sectores donde la pendiente o la velocidad del flujo tienden a incrementarse, estas áreas son críticas porque el aumento del esfuerzo cortante puede causar erosión

acelerada, afectando la estabilidad de las márgenes y el fondo.

Los valores más bajos, se presentan en tramos rectos o de menor pendiente, donde el flujo es más uniforme y la velocidad tiende a ser menor, estas zonas tienen menor riesgo de erosión, aunque en ellas pueden presentarse procesos de sedimentación si la capacidad de transporte del flujo disminuye demasiado.

**Figura 22**

*Zonas críticas de esfuerzos cortantes HEC-RAS.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

La sección (A) ilustra zonas de esfuerzos críticos, mismos que resultan dañinos para los taludes que contienen el cause, debido a que puede provocar socavamiento, y en muchos de los casos un arrastre comprometedor de sedimentos.

En la sección (B) se puede observar que la franja de color rojo cubre toda la superficie del vertedero y refleja que esta estructura pueda estar comprometida debido a que puede generar desgastes a largo plazo.

En la sección (C) se identifica bajos esfuerzos cortantes, esto puede suceder debido al cambio de dirección en el flujo lo cual disminuye la velocidad de transporte y disipa los esfuerzos cortantes.

En la sección (D) se aprecia una zona levemente caracterizada por el color rojo, lo cual indica que el esfuerzo cortante este concentrado en el borde derecho del rio, lo cual puede producir serios problemas de erosión en el rio.

#### 4.1.1.1 Esfuerzos cortantes en IBER

Por otro lado, en el programa IBER se tiene una tensión cortante máxima que ronda los 405 Pa, hasta disminuir en  $3.65e-5$  a lo largo del cauce de estudio.

#### **Figura 23**

*Esfuerzos cortantes obtenidos en el programa IBER.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

Estos esfuerzos se encuentran distribuidos en zonas en donde el flujo representa mayor incidencia de socavamiento y erosión de los bancos que conforman el perímetro mojado. Resulta de vital importancia poner especial atención a los tramos referidos con un esfuerzo



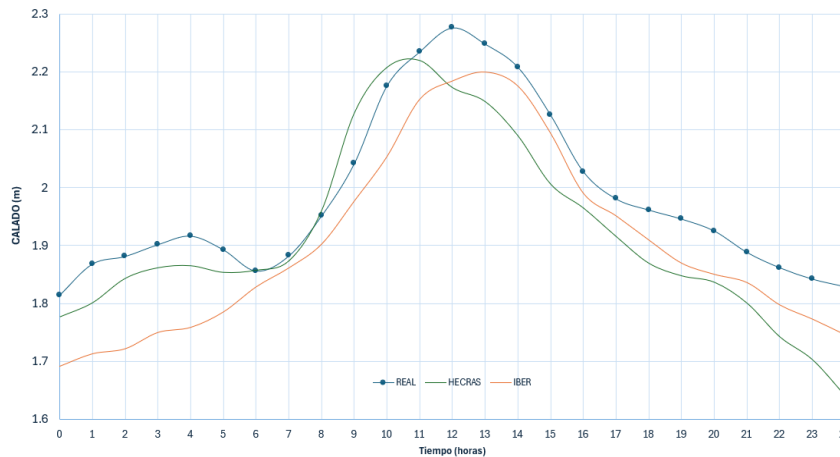
En la sección (D) se puede observar la concentración de esfuerzo anteriormente mencionada, sin embargo, presenta una leve extensión del área color rojo hacia la mitad del cauce.

#### 4.1 Validación de los modelos hidrodinámicos

La validación de los modelos bidimensionales se realizó en base a los calados que presentaban cada uno de ellos y los calados obtenidos en campo mediante lecturas, cabe recalcar que es de vital importancia identificar de manera correcta los datos obtenidos para así obtener un resultado confiable.

**Figura 25**

*Validación de las simulaciones.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

##### 4.1.1 Validación del modelo HEC-RAS

En la tabla situada a continuación se puede apreciar valores correspondientes a cada criterio estadístico referido con anterioridad, estos establecen una relación de los datos obtenidos con HEC-RAS y los datos obtenidos en campo.

Se logró obtener un valor para el índice de Nash Sutcliffe igual a 0.71, mismo que se encuentra dentro del rango correspondiente a “Bueno”.

Por su parte, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) arroja un resultado de 0.94 lo cual indica que existe una variación levemente considerable a lo largo del tramo de río.

Finalmente, el error cuadrático medio obtuvo un valor de 0.55, mismo que refleja un ajuste satisfactorio entre los datos de campo y los datos obtenidos de la modelación hidrodinámica en base al programa en cuestión.

### **Tabla 7**

*Criterios de validación del modelo HEC-RAS*

<b>Criterios de análisis estadístico</b>	
Índice de Nash Sutcliffe	0.64
Coeficiente de Determinación ( $R^2$ )	0.93
Error Cuadrático Medio	0.09

*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.1.1 Validación del modelo IBER**

Por otro lado, en el software de modelación hidrodinámica IBER se obtuvo valores de índices estadísticos correspondientes a su calidad de modelación, mismos que se describen a continuación.

Se logró obtener un valor para el índice de Nash Sutcliffe igual a 0.76, lo cual refleja un rango correspondiente a “Bueno”.

Además, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 0.94 lo cual revela que existe una variación ligeramente considerable a lo largo del tramo. Finalmente, el error cuadrático medio obtuvo un valor de 0.50, mismo que refleja un ajuste satisfactorio entre los datos de campo y los datos obtenidos de la modelación hidrodinámica en base al software IBER.

### **Tabla 8**

*Criterios de validación del modelo IBER*

<b>Criterios de análisis estadístico</b>	
Índice de Nash Sutcliffe	0.60
Coeficiente de Determinación ( $R^2$ )	0.96
Error Cuadrático Medio	0.09

*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.1 Análisis comparativo entre los modelos**

Si bien los dos programas realizan una modelación hidrodinámica bidimensional precisa, resulta interesante contrastar y comparar los modelos obtenidos para entender los fenómenos físicos presentes en el flujo de estudio, debido a que en base a este análisis se puede inferir en elegir la simulación con porcentajes de error menores.

Los dos programas presentan una leve variación de datos hidrodinámicos que se reflejan en las ubicaciones de sus máximos valores representados en el río, sin embargo, los valores conformados por dichas ubicaciones reflejan diferencias menores, lo cual resulta de cierta manera despreciable cuando se habla de modelos hidráulicos que requieren una magnitud demandante de cálculo para su interpretación computacional y visual.

Lo anteriormente señalado tiene relación directa con los índices presentados en las tablas 3 y 4, ya que cada programa se ajusta a la representación real mediante sus propios mecanismos y cálculos de software interno a pesar de tener los mismos valores de histogramas de crecida para sus condiciones de entrada y salida.

#### **4.4.2 Ventajas**

##### **4.4.2.1 Ventajas de HEC-RAS**

Este software desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos le otorga una gran validación en estudios hidrológicos e hidráulicos. Una de las principales ventajas del uso de HEC-RAS en el modelamiento bidimensional del río Tomebamba es su interfaz, las herramientas que proporciona el programa logran, de manera fácil, la implementación de condiciones hidráulicas a un modelo digital de elevación. Otra ventaja de este software es su conectividad con otras herramientas. El uso de programas afiliados a HEC-RAS, como ARC MAP, simplifican procesos como la elaboración del terreno digital y la implementación de secciones transversales, entre otras.

Una de las mayores ventajas de HEC-RAS es que es un software completamente gratuito y existen numerosos manuales, tutoriales y foros donde los usuarios pueden encontrar soluciones a problemas comunes y aprender nuevas herramientas de modelado. Esto lo convierte en una herramienta accesible para estudiantes y profesionales que requieran realizar modelaciones hidráulicas sin incurrir en costos de licencias.

##### **4.4.2.1 Ventajas de IBER**

El software IBER ofrece ventajas en la precisión de la modelación y en la resolución numérica del flujo bidimensional. Este programa desarrollado por el Centro Internacional

de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) y la Universidad Politécnica de Cataluña, emplea métodos de resolución que permite una mayor estabilidad en la simulación de flujos en cauces complejos.

El software contiene herramientas ideales para estudios detallados sobre erosión, sedimentación y riesgos de inundación en zonas. También integra herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) facilitando el análisis espacial de los resultados. Aunque el tiempo de simulación en IBER puede ser mayor debido a su enfoque numérico más preciso, la calidad de los resultados obtenidos justifica su uso en estudios donde se requiere una mayor resolución del comportamiento hidrodinámico del río. De manera similar, IBER es un software de acceso libre y gratuito, pero, a pesar de no requerir el pago de una licencia, ofrece herramientas adicionales de pago que aumentan las capacidades de modelado.

#### **4.4.2 Desventajas**

##### **4.4.2.1 Desventajas de HEC-RAS**

HEC-RAS, aunque es ampliamente utilizado en ingeniería hidráulica, tiene ciertas desventajas. A pesar de haber incorporado modelación en 2D, su enfoque principal sigue siendo unidimensional, lo que puede limitar su precisión en flujos complejos. Su dependencia de simplificaciones matemáticas puede generar estimaciones menos detalladas en algunos escenarios, especialmente en zonas con alta variabilidad en la velocidad y dirección del flujo. La integración con software SIG es muy limitada, lo que puede hacer el procesamiento de datos menos preciso. También, su facilidad de uso puede llevar a interpretaciones erróneas si el usuario no cuenta con experiencia suficiente en hidráulica fluvial.

##### **4.4.2.1 Desventajas de IBER**

A pesar de que es una herramienta potente para modelación 2D de flujos superficiales,

presenta ciertas limitaciones. Su interfaz de aprendizaje es muy compleja, lo que puede dificultar en un grado muy alto el uso cómodo del mismo para quienes no tienen experiencia en modelación hidráulica. Además, sus simulaciones requieren equipos con alta capacidad de procesamiento, lo que puede ralentizar los tiempos de ejecución. Otro aspecto que considerar, es su dependencia de distintas herramientas SIG externos, como QGIS o ArcGIS, para la manipulación de datos geospaciales previos, lo cual resulta en un mayor tiempo de modelación. En el modelado de estructuras complejas como puentes y vertederos, ofrece menos flexibilidad en comparación con otras herramientas más especializadas. Por último, el hecho de que es un software de código abierto repercute en que su comunidad de soporte es más reducida, lo que puede dificultar la resolución de problemas específicos y recomendaciones de uso.

## **CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **5.1 Conclusiones**

Se implementaron dos modelos hidrodinámicos aplicando los instrumentos HEC-RAS e IBER en un tramo del río Tomebamba en la zona de Sayausí, los resultados representaron apropiadamente las características principales del flujo, en donde se aprecia zonas vulnerables a inundaciones y socavación en el cauce.

La recolección de datos topográficos permite tener un modelo digital de elevación de alta precisión, cubriendo aproximadamente 2.6 Km de longitud y 100 m de ancho del río. Por otro lado, a través de los datos proporcionados por las lecturas de estaciones hidrológicas se construyeron hidrogramas y curvas de descarga para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años, siendo 10 años el periodo de retorno elegido para la simulación.

En cuanto a zonas vulnerables se identificaron tramos que se caracterizan por tener esfuerzos cortantes y velocidades elevadas; estas propiedades se identifican claramente en las secciones de estudio A y C de ambos modelos. Dichas características hacen que exista la presencia de amenazas en épocas de crecida y puede resultar en el socavamiento y afectación de estructuras hidráulicas.

En la zona de la captación de agua de la planta de tratamiento del Cebollar, se observaron velocidades en el orden de 5 m/s con esfuerzos cortantes de hasta 177 N/m<sup>2</sup>, que puede afectar significativamente a los elementos estructurales que conforman las obras de captación, pudiendo reducir su vida útil y de servicio.

## **5.1 Recomendaciones**

El diseño y simulación de modelos hidráulicos en software como IBER y HEC-RAS requieren una considerable capacidad computacional, lo que puede generar diversas limitaciones en el proceso. Uno de los principales desafíos es el tiempo de procesamiento, ya que los modelos en 2D involucran una considerable cantidad de ecuaciones que deben resolverse iterativamente, lo que puede ralentizar el análisis, especialmente en equipos con poca capacidad de componentes computacionales. Esto obliga a simplificar las condiciones del modelo, reduciendo la resolución de la malla o limitando la extensión del área de estudio, lo que puede afectar la precisión de los resultados.

## Bibliografía

- Hicks, F. E., & Peacock, T. (2005). *Suitability of HEC-RAS for flood forecasting*. *Canadian water resources journal*, 30(2), 159-174. <https://doi.org/10.4296/cwrj3002159>
- Bathurst, J. C. (2002). *At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers*. *Journal of Hydrology*, 269(1-2), 11-26. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00191-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00191-9)
- Castellanos, H. E., Collazos, C. A., Farfan, J. C., & Meléndez-Pertuz, F. (2017). *Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable*. *Información Tecnológica*, 28(6), 103–114. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000600012>
- Pabon, J. C. R., Pabón, C. E. R., & Ríos, G. V. (2019). *Solución de las ecuaciones de Navier–Stokes*. *Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales*, (90), 713-768. ISSN 1012-1587
- White, F.M. (2006). *"Mecánica de Fluidos"* (McGraw-Hill). ISBN 0-07-240217-2
- Malekinezhad, H., & Zare-Garizi, A. (2014). *Regional frequency analysis of daily rainfall extremes using L-moments approach*. *Atmósfera*, 27(4), 411-427. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)70039-6](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)70039-6)
- Nanía, L., & Molero, E. (2007). *CE México groups*. Obtenido de CE México groups: [https://cemexico.groups.et.byu.net/vocabulary/ManualBasico\\_HEC-RAS313\\_HEC-GeoRAS311\\_Espanol.pdf](https://cemexico.groups.et.byu.net/vocabulary/ManualBasico_HEC-RAS313_HEC-GeoRAS311_Espanol.pdf). ISBN: 978-84-690-5877-0
- M. Sanz-Ramos, L. Cea, E. Bladé, D. López-Gómez, E. Sañudo, G. Corestein, G. García-

Alén and J. Aragón-Hernández, Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones, Iber. More than 2D Hydraulic modelling (2022). 1 URL [https://www.scipedia.com/public/Sanz-Ramos\\_et\\_al\\_2022b](https://www.scipedia.com/public/Sanz-Ramos_et_al_2022b). DOI: 10.23967/iber.2022.01

- Morvan, H., Knight, D., Wright, N., Tang, X., & Crossley, A. (2008). *The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models*. En Journal of Hydraulic Research (Vol. 46, Número 2, pp. 191–208). International Association of Hydraulic Engineering Research. <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521855>.
- Tacuri, H. J. (2023). *Análisis del coeficiente de rugosidad en ríos de montaña mediante la aplicación de modelos hidráulicos bidimensionales (2D)*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/41347>.
- Liendo, G. A., & Guillén, N. F. (2019). *Análisis de incertidumbre relacionada a la extrapolación de curvas altura-caudal (HQ) e implementación de la técnica LSPIV para cuantificar caudales*.
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6(3), 279-298. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>.
- Blade, E., Zea, L., Corestein, G., & Escolano, E. (2014). *Iber, Herramientas de simulación numérica del flujo en ríos*. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería., 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.
- Blazek, J. (2015). *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Butterworth-Heinemann. ISBN 978 – 0 – 08 – 099995 – 1

- Montgomery, D. C. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis*.
- Naranjo Martínez, D. P. (2018). *Elaboración de hidrogramas de crecidas de las cuencas de los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay desde el año 1997-2017* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay). <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8304> .
- Guerrero, J. G., & Arias, M. A. (2019). Evaluación de desempeño de métodos de relleno de datos pluviométricos en dos zonas morfoestructurales del Centro Sur de Chile. *READLYC*. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.59837> .
- Moreno Sanabria, J. A. (2024). *Diseño de un sistema de tratamiento de agua potable compacta de 1 litro por segundo, para satisfacer la demanda de la empresa Sativa Nativa que opera en la localidad de Curvalito ubicada en la ciudad de Santa Marta* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). URI: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/87151> .
- Aguirre Granda, D. M., & Berrezueta Tapia, R. A. (2016). *Protecciones naturales contra la socavación en ríos: estudio de caso del río Tomebamba*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/25938> .
- Bladé Castellet, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). *Modelización numérica de inundaciones fluviales*. *Ingeniería del agua*, 18(1), 71-82. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144> .
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2015). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador*. (2nd ed., p. 54) Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. [www.inamhi.gob.ec](http://www.inamhi.gob.ec) .
- Chimborazo Ochoa, J. E. (2019). *Evaluación hidrológica e hidráulica del Río Tomebamba tramo Balzay-Monay mediante modelación matemática del flujo en uni y bidimensional*.

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33568> .

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. ISBN: 958-600-228-4
- Collazos, G., Villanueva, I., Briceño, N., Cazenave, G., Guevara, C., & Blanco, M. (2018, September). *Modelo bidimensional de inundación urbana de la ciudad de Azul (Argentina) con herramientas de uso libre*. In XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina (pp. 2064-2075). [https://www.ina.gob.ar/congreso\\_hidraulica](https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica)
- Condo, A., & Juela, M. (2017). *Análisis Del Comportamiento Hidrológico Y Estado Actual Del Recurso Hídrico En Las Cuencas Del Río Tomebamba Y Yanuncay Durante El Año 2015*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27757> .
- Córdova, M., Céleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). *Near-Surface Air Temperature Lapse Rate Over Complex Terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for Temperature Mapping*. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684. <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-077> .
- García Mendivelso, D. A. (2017). *Comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D* (Doctoral dissertation, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito). <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/746>
- Guaya Caraguay, C. I., & Montalván Alcívar, E. A. (2018). *Modelación numérica bidimensional del río Garrapata en la provincia de Manabí aplicando el programa Iber* (Bachelor's thesis, Quito, 2018.). <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19326> .
- Rocha, A. C. S., Peña, C. E. C., & Luna, A. V. (2008). *Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS*. *Avances en recursos hidráulicos*,

(17), 45-54. ISSN: 0121-5701

- Timbe, L., & Timbe, E. (2012). *Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña, caso de estudio del río Burgay*. Maskana, 3(1), 87-96. <https://doi.org/10.18537/mskn.03.01.07>
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (1970). *River flow forecasting through conceptual models' part I — A discussion of principles*. Journal of Hydrology. [https://doi.org/10.1016/00221694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/00221694(70)90255-6).
- IBER Software: <https://www.iberaula.es> (Accedida diciembre 2024)
- HEC-RAS Software: <https://www.hec.usace.army.mil> (Accedida diciembre 2024)

## Anexos

**Figura 26**

*Zona de inicio de estudio.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 27**

*Equipo de topografía “dron”.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 28**

*Equipo de topografía “RTK”.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 29**

*Punto de control.*



**Nota:** Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 30**

*Punto de control.*



**Nota:** Fuente: Elaboración propia.

**Figura 31**

*Recolección de datos topográficos.*



*Nota: Fuente: Elaboración propia.*

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros, **Christian Eduardo Once Condo** y **Rony Efraín Coronel Bustamante** portadores de las cédulas de ciudadanía N.º 0105724751 y 0302131107. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Simulación hidrodinámica bidimensional del río Tomebamba en el tramo de la captación PTAP del Cebollar”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 7 de abril de 2025

F:   
- Christian Eduardo Once Condo  
0105724751

F:   
Rony Efraín Coronel Bustamante  
0302131107