



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.

**MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DE LA CONFLUENCIA
DE LOS RÍOS MACHÁNGARA Y TOMBAMBA, CON
DELFT3D**

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

AUTORES: WILSON ALEXANDER LEMA NACIPUCHA

EDWIN OSWALDO VILE CORTE

DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.

CUENCA-ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,

INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN.

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DE LA CONFLUENCIA DE LOS
RÍOS MACHÁNGARA Y TOMBAMBA, CON DELFT3D

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

AUTORES: WILSON ALEXANDER LEMA NACIPUCHA

EDWIN OSWALDO VILE CORTE

DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.

CUENCA-ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Wilson Alexander Lema Nacipucha y Edwin Oswaldo Vile Corte portadores de las cédulas de ciudadanía N° 0107301533 y 0106172547. Declaramos ser autores de la obra: “Modelación bidimensional de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, con Delft3D”, 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, 9 de abril de 2025

F: 
Wilson Alexander Lema Nacipucha
0107301533

F: 
Edwin Oswaldo Vile Corte
0106172547

CERTIFICACIÓN

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TESIS

Yo Ing. Santiago Aurelio Ochoa García certifico que el presente trabajo de titulación realizado por los Sres. WILSON ALEXANDER LEMA NACIPUCHA y EDWIN OSWALDO VILE CORTE, egresados de la UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN, fue realizado bajo mi supervisión y tutoría con el tema “MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DE LA CONFLUENCIA DE LOS RÍOS MACHÁNGARA Y TOMBAMBA, CON DELFT3D”.



ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.

C.I. 010415814-2

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

DEDICATORIA WILSON ALEXANDER LEMA NACIPUCHA

De corazón, dedico este trabajo de investigación a las personas que han sido el pilar fundamental en mi vida y en mi formación académica. A mis padres Inés Nacipucha y Alberto Lema, con sincero amor y gratitud, por ser mi apoyo constante e incondicional. Su amor, esfuerzo y motivación han sido el motor que me impulsó a seguir adelante. Gracias por enseñarme que la dedicación y perseverancia es el mejor camino.

A mis hermanos y familiares más cercanos, por estar siempre a mi lado, brindándome su compañía, apoyo y sabios consejos que me ayudaron a mantenerme firme en este camino. Su compañía ha sido un soporte invaluable que atesoro con el corazón. A mis amigos, por ser una parte esencial de este viaje. Gracias por compartir conmigo no solo momentos de estudio y esfuerzo, sino también de alegría, tristeza y complicidad.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este capítulo tan importante de mi vida. Este logro también es suyo.

DEDICATORIA EDWIN OSWALDO VILE CORTE

A lo largo del camino, descubrí que los sueños no se construyen solos. Se forjan con esfuerzo, perseverancia y, sobre todo, con el apoyo incondicional de quienes creen en uno incluso en los momentos más inciertos.

Dedico este trabajo a mis padres, pilares fundamentales en mi vida. A mi madre, Nancy Corte, quien, con su amor incondicional, sus palabras de aliento y su presencia constante fue mi refugio en los momentos más oscuros y mi fuerza cuando sentí flaquear. A mi padre, Rufino Vile, quien, a pesar de la distancia física, nunca dejó de acompañarme con su apoyo inquebrantable y sus palabras llenas de sabiduría y aliento. Y a mi hermano, Luis Vile, por ser mi cómplice en el camino, por su compañía silenciosa pero firme, por ser ese confidente que supo entender mis silencios y levantarme en mis batallas más duras. A ustedes, mi más profundo agradecimiento y todo mi amor. Este logro también es suyo.

Finalmente, dedico este trabajo con todo mi corazón a mi familia, que, con cada palabra de aliento, cada consejo sincero y cada pequeño gesto, fue sembrando la fuerza que necesitaba para continuar. Su apoyo, aunque a veces silencioso, fue un faro constante en este camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a Dios por habernos brindado la fortaleza, sabiduría y perseverancia para culminar esta etapa tan importante de nuestras vidas. Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestros padres, por ser nuestro pilar fundamental. Su amor incondicional, consejos sabios y apoyo constante han sido el motor que nos impulsó a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Este logro también les pertenece a ustedes.

Agradecemos al Ing. Santiago Ochoa, director de este trabajo de titulación, por su guía, paciencia y compromiso durante el desarrollo del proyecto. Su experiencia y aportes fueron cruciales para la realización de esta investigación. Nuestro reconocimiento también a la Universidad Católica de Cuenca, por proporcionarnos una formación académica integral, y a la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción por ser el espacio donde forjamos nuestros conocimientos y valores profesionales. Al personal designado de ETAPA EP y la Dirección de Áridos y Pétreos del Ecuador, por su valioso apoyo técnico y logístico en la recolección de datos, que permitió consolidar los resultados de esta investigación.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a nuestros amigos y compañeros de carrera, con quienes compartimos innumerables experiencias que enriquecieron nuestro camino universitario. A todos quienes de una u otra manera aportaron a la culminación de este proyecto, muchas gracias.

RESUMEN

La modelación hidráulica bidimensional (2D) es una herramienta fundamental para el análisis y gestión de sistemas fluviales, ya que permite simular y evaluar la dinámica del flujo en ríos y sus confluencias con un alto nivel de detalle. La confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador, es un área de interés debido a su relevancia en la gestión de riesgos de inundación y erosión. Este estudio tiene como objetivo caracterizar el comportamiento hidrodinámico de dicha confluencia mediante el uso del software Delft3D, analizando parámetros clave como distribución de velocidades, esfuerzos cortantes, zonas de recirculación y potenciales áreas de sedimentación y erosión.

Para ello, se realizó un levantamiento batimétrico detallado, complementado con datos hidrométricos obtenidos de estaciones de monitoreo de ETAPA EP. Posteriormente, se implementó un modelo numérico bidimensional, cuya validación se llevó a cabo utilizando técnicas de Velocimetría de Imágenes a Gran Escala (LSPIV). Los resultados evidenciaron variaciones significativas en la dinámica de flujo, identificando zonas críticas donde se presentan altos esfuerzos cortantes y recirculaciones que pueden afectar la estabilidad de las márgenes.

Los resultados de esta investigación proporcionan información relevante para la planificación y gestión de recursos hídricos en Cuenca, contribuyendo a la toma de decisiones informadas para la mitigación de riesgos y la optimización de intervenciones en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba. Además, resaltan la importancia del uso de modelos bidimensionales para evaluar de manera precisa la hidrodinámica fluvial en contextos urbanos.

Palabras clave: Confluencia fluvial, Modelación Bidimensional, Delft3D, Hidrodinámica

ABSTRACT.

Two-dimensional (2D) hydraulic modeling is a fundamental tool for the analysis and management of river systems, as it allows for the simulation and evaluation of flow dynamics in rivers and their confluences with a high level of detail. The confluence of the Machángara and Tomebamba rivers, located in the city of Cuenca, Ecuador, is an area of interest due to its relevance in flood and erosion risk management. This study aims to characterize the hydrodynamic behavior of the confluence using Delft3D software, analyzing key parameters such as velocity distribution, shear stresses, recirculation zones, and potential areas of sedimentation and erosion.

To this end, a detailed bathymetric survey was carried out, complemented by hydrometric data obtained from ETAPA EP monitoring stations. Subsequently, a two-dimensional numerical model was implemented and validated using Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) techniques. The results showed significant variations in flow dynamics, identifying critical zones where high shear stresses and recirculations occur that may affect the stability of the riverbanks.

The results of this research provide relevant information for water resource planning and management in Cuenca, contributing to informed decision-making for risk mitigation and the optimization of interventions at the confluence of the Machángara and Tomebamba rivers. Furthermore, they highlight the importance of using two-dimensional models to accurately assess river hydrodynamics in urban contexts.

Keywords: River Confluence, Two-Dimensional Modeling, Delft3D, Hydrodynamics

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE GENERAL	X
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
CAPÍTULO 1	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.6 OBJETIVOS.....	7
1.6.1 GENERAL	7
1.6.2 ESPECÍFICOS	7
CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO.....	8
2.1 Modelación Bidimensional.	8
2.1.1 Herramientas Computacionales Para La Modelación 2d	9
2.1.2 Caracterización De Los Modelos Bidimensionales.....	10

2.2 Delft3D.....	13
2.2.1 Módulos Principales	14
2.3 Caracterización de las Confluencias Fluviales.....	15
2.3.1. Procesos Hidrodinámicos en Confluencias	15
2.3.2. Factores que Influyen en la Dinámica de la Confluencia.....	16
2.3.3. Importancia del Análisis de Confluencias.....	17
2.4 Parámetros Hidráulicos Claves	18
2.4.1. Geometría y Batimetría	18
2.4.2. Rugosidad del Lecho y Coeficientes de Manning.....	19
2.4.3. Hidrogramas y Su Importancia.....	22
2.4.4. Condiciones de Contorno en Modelos Numéricos.....	24
2.5 Validación de Modelos Hidráulicos.....	26
2.5.1. Métodos de Validación de Modelos Numéricos.....	27
2.5.2. Técnicas de Velocimetría de Imágenes (LSPIV)	29
2.5.3. Aplicaciones de Drones en la Hidrometría.....	30
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	32
3.1 Definición de la Zona de Estudio.....	32
3.2 Descripción del Área de Estudio.....	33
3.2.1 Ubicación de la Confluencia de los Ríos Machángara y Tomebamba	33

3.2.2	Características Geomorfológicas e Hidrológicas	34
3.2.3	Cuencas a las que Pertenece Cada Río y Como Aportan a la Confluencia	34
3.3	Levantamiento De Información	35
3.3.1.	Levantamiento Batimétrico	35
3.3.2.	Datos Hidrométricos (Estaciones de Etapa EP, Curvas De Descarga).....	38
3.3.3.	Procesamiento de Datos Hidrométricos (Sumatoria De Caudales).....	47
3.4	Parámetros de Entrada y Salida Para la Modelación.....	51
3.4.1.	Hidrogramas de Entrada (Caudales).....	51
3.4.2.	Modelo Unidimensional Condición de Salida.....	54
3.4.3.	Geometría del Modelo.....	58
3.4.4.	Batimetría	61
3.4.5.	Rugosidades.....	62
3.4.6.	Condiciones de Contorno	63
3.5	Simulación Hidráulica.....	66
3.5.1.	Configuración y Simulación Bidimensional en Delft3D.....	66
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS		68
4.1.	Comparación de Velocidades Obtenidas con LSPIV.....	68
4.2	Resultados del Modelo Bidimensional.....	73
4.2.1.	Mapas de Distribución de Velocidades y Niveles de Agua.....	73

4.2.2. Identificación de Zonas de Esfuerzo Cortante.....	76
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1 Conclusiones	78
5.2 Recomendaciones.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	82
ANEXOS:.....	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Componentes de un hidrograma.	23
Ilustración 2. Ubicación de la zona de la confluencia	33
Ilustración 3. Equipo topográfico base, colector y rober	35
Ilustración 4. Proceso levantamiento topográfico.....	36
Ilustración 5. Ubicación de los puntos levantados.....	37
Ilustración 6 .corrección de triangulaciones	38
Ilustración 7. Ubicación de las estaciones de etapa ep y red hídrica	41
Ilustración 8. Registro de caudales en la estación ucubamba	42
Ilustración 9. Registro de caudales en la estación machángara	43
Ilustración 10. Registro de caudales en la estación tomebamba.....	44
Ilustración 11. Registro de caudales en la estación tarqui	45
Ilustración 12. Registro de caudales en la estación yanuncay	46
Ilustración 13. Sumatoria de caudales	47
Ilustración 14. Comparación de caudales calculados y registrados.....	48
Ilustración 15. Registro de caudal máximo calculado en la confluencia.....	49
Ilustración 16. Hidrograma confluencia	52

Ilustración 17. Hidrograma río machángara	53
Ilustración 18. Hidrograma río tomebamba	54
Ilustración 19. Secciones exportadas a hec-ras.....	55
Ilustración 20. Malla diseñada en civil 3d	59
Ilustración 21. Ortogonalidad de la malla.....	60
Ilustración 22. Batimetría delft3d	61
Ilustración 23. Rugosidades implementadas.....	63
Ilustración 24. Descarga por celdas	64
Ilustración 25. Corrección de distorsión y escala del video.....	68
Ilustración 26. Mapa de velocidades lspiv	69
Ilustración 27. Sección de velocidades delft3d exportadas	70
Ilustración 28. Comparación de velocidades en la sección transversal de la confluencia	72
Ilustración 29. Recirculación de flujo en la confluencia machángara - tomebamba	74
Ilustración 30. Velocidad promedio en la confluencia machángara - tomebamba.....	75
Ilustración 31. Profundidad del agua en la confluencia machángara - tomebamba.....	76
Ilustración 32. Esfuerzo cortante del lecho de la confluencia machángara - tomebamba	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rugosidades para diferentes condiciones de contorno	21
Tabla 2. Datos de hidrogramas (caudal máximo registrado)	50
Tabla 3. Relación caudales y altura de salida	57
Tabla 4. Coeficientes de manning implementados	62
Tabla 5. Discretización de caudales (Tomebamba)	64
Tabla 6. Discretización de caudales (Machángara)	65

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

La gestión de sistemas fluviales en zonas de interés como lo es la confluencia del río Machángara y Tomebamba requieren un proceso que garantice un adecuado análisis y modelación de fenómenos hidrodinámicos. La modelación hidráulica bidimensional (2D) es una técnica clave para la simulación de flujos en sistemas fluviales, proporcionando información detallada sobre la distribución de velocidades, esfuerzos cortantes, zonas de recirculación y fenómenos de sedimentación.

La modelación hidráulica bidimensional (2D) constituye una herramienta fundamental en los procesos de planificación y toma de decisiones para la gestión eficaz y eficiente de los sistemas fluviales. En la actualidad, se disponen de diversos programas informáticos para la representación y análisis de las características hidráulicas, lo que permiten simular y observar diferentes comportamientos hidrodinámicos. Estos modelos son esenciales para planificar intervenciones en los sistemas fluviales de manera eficaz y eficiente. El análisis 2D es implementado particularmente por su capacidad para manejar datos detallados y precisos, además, de ofrecer ventajas en la modelación hidrodinámica, especialmente en términos de simplicidad y eficiencia computacional (Arbat-Bofill et al., 2015).

La confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, en Cuenca, Ecuador, representa un entorno de especial interés debido a su influencia en la estabilidad de márgenes, la distribución de caudales y los procesos de erosión (Vashist & Singh, 2023). A pesar de la importancia de esta confluencia, los estudios previos han sido limitados en cuanto a su caracterización hidrodinámica, lo que implica incertidumbre en la toma de decisiones para la gestión de este sistema fluvial.

La modelación bidimensional requiere el proceso de validación del modelo, esto se realizó mediante la técnica de Velocimetría de Imágenes a Gran Escala (LSPIV), lo que permite obtener un registro de velocidades y patrones de flujo en campo, los cuales son contrastados con datos de la modelación. Los resultados de esta investigación no solo aportan conocimiento técnico sobre la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, sino que también ofrecen herramientas para la gestión eficiente de los sistemas fluviales en Cuenca.

En este contexto, la presente investigación se enfoca en la modelación bidimensional de la confluencia, utilizando el programa informático Delft3D, con el propósito de comprender la dinámica de flujo y evaluar posibles impactos en la infraestructura y el entorno natural.

1.2 ANTECEDENTES

La modelación hidráulica de confluencias fluviales facilita la gestión y toma de decisiones, ya que permite comprender la dinámica del flujo y sus implicaciones en fenómenos como erosión, sedimentación y transporte de sedimentos. La confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, ubicada en Cuenca, Ecuador, es un sistema complejo cuya caracterización hidrodinámica resulta crucial para la toma de decisiones en infraestructura y mitigación de riesgos.

Estudios previos han demostrado que las confluencias fluviales presentan patrones de flujo turbulento altamente variables, lo que dificulta su representación con modelos simplificados. Por ejemplo, Herrero et al. (2013) realizaron una evaluación experimental de la hidrodinámica y los procesos de mezcla en la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo, utilizando perfiladores acústicos Doppler (ADCP) para analizar la batimetría y el comportamiento de la mezcla. Sus

resultados permitieron identificar zonas de estancamiento y corte, información importante para la predicción de sedimentación y erosión en estas áreas.

De manera similar, Ochoa García et al. (2023), llevaron a cabo una modelación tridimensional de la confluencia de los ríos Yanuncay y Tarqui, en la provincia de Azuay, Ecuador. Su estudio, basado en simulaciones con el programa informático Delft3D, evidenció la presencia de capas de corte y separación altamente erosivas, así como zonas de estancamiento y mezclas turbulentas. Estos resultados resaltan la importancia de utilizar herramientas numéricas avanzadas para evaluar la vulnerabilidad de las confluencias fluviales en regiones montañosas.

Adicionalmente, Yuan et al. (2024), propusieron un modelo optimizado basado en entropía para la estimación de la hidrodinámica en confluencias fluviales de gran escala. Su trabajo destaca la influencia de las corrientes secundarias y el fenómeno de velocity dip en la distribución de velocidades dentro de la confluencia, lo que puede afectar significativamente la estimación de caudales y esfuerzos cortantes.

Desde un enfoque aplicado, Freitez et al. (2017), utilizaron un modelo bidimensional para evaluar la estabilidad hidráulica de puentes sobre la quebrada La Guardia. Su análisis resaltó la importancia de integrar datos topográficos y batimétricos en la modelación para prever fallas estructurales asociadas a erosión del lecho y socavación de pilares. Este tipo de metodologías pueden extrapolarse al análisis de la confluencia Machángara-Tomebamba, permitiendo una mejor gestión de infraestructura y mitigación de riesgos de erosión.

Por otra parte, el monitoreo de caudales en los ríos de Cuenca muestra una variabilidad significativa, lo que refuerza la necesidad de comprender su comportamiento hidrodinámico en

distintos escenarios. Según registros recientes de Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ETAPA EP), el caudal del río Machángara puede variar entre 9.00 m³/s en condiciones normales y superar los 105.53 m³/s en eventos de alerta. Por su parte, los ríos Yanuncay y Tarqui presentan caudales normales de 2.71 m³/s y 1.62 m³/s, respectivamente, pero han alcanzado valores de 66.52 m³/s y 11 m³/s en eventos extremos. El río Tomebamba, que recibe aportes del Yanuncay y Tarqui, generalmente registra caudales entre 10.24 m³/s y 11.23 m³/s en condiciones normales, pero puede alcanzar valores superiores a 35.74 m³/s en prealerta previo al aporte de los otros ríos.

Esta variabilidad en los caudales evidencia la importancia de la modelación hidrodinámica bidimensional en la confluencia Machángara-Tomebamba, ya que permite analizar los efectos de estos cambios en la distribución de velocidades, esfuerzos cortantes y zonas de recirculación. Aunque este estudio no se enfoca en la modelación de inundaciones, comprender la dinámica del flujo en diferentes escenarios de caudal puede proporcionar información clave para la planificación de infraestructuras y la gestión de los recursos hídricos en Cuenca.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador, presenta un comportamiento hidráulico complejo cuya dinámica no ha sido determinada de manera precisa y detallada. El principal problema identificado radica en la falta de información respecto a la identificación precisa de zonas de esfuerzos cortantes, áreas de recirculación, estancamiento y la distribución de velocidades. Diversos programas informáticos especializados, permiten simular y analizar las características hidráulicas de sistemas fluviales con un alto grado

de precisión. Estos modelos son esenciales para representar el comportamiento del agua de manera detallada y exacta, lo cual es fundamental para la planificación y toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos. Los modelos 2D pueden ser muy efectivos y similares a los modelos 3D en cuanto a resultado sin embargo limitados en precisión en situaciones donde las variaciones verticales son significativas (Bladé et al., 2014).

1.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación se centrará en la modelación bidimensional de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba. La urgencia de esta investigación se debe a la necesidad de ETAPA EP y la dirección de áridos y pétreos del Ecuador de contar con datos precisos para realizar mejoras en los bordes de los ríos, proteger las comunidades locales y optimizar el uso de recursos naturales. Además, existe un vacío de conocimiento en cuanto a las dinámicas específicas de esta confluencia, lo que hace que esta investigación sea esencial tanto desde una perspectiva teórica como práctica, mediante los distintos programas informáticos, se puede resolver estas interacciones no lineales de manera eficiente. Integra múltiples datos como pueden ser atmosféricos, batimétricos y de olas de múltiples fuentes, mostrando la capacidad del modelo para manejar diversas condiciones (Rueda-Bayona et al., 2020).

La investigación se realizó con la colaboración de ETAPA EP y la Dirección de Áridos y Pétreos del Ecuador, quienes proporcionan apoyo logístico y técnico. La delimitación geográfica y temporal del estudio responde a la necesidad de obtener datos detallados y precisos que permitan una modelación confiable de las dinámicas hidráulicas en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba. La colaboración con instituciones locales asegura el acceso a recursos y datos

relevantes, y la temporalidad del estudio permite capturar las condiciones de batimetría durante la temporada de estiaje.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La investigación es fundamental para la gestión de sistemas fluviales y la planificación de estructuras hidráulicas en la región de Cuenca. Los resultados proporcionarán información relevante para ETAPA EP y la Dirección de Áridos y Pétreos del Ecuador, quienes están interesados en mejorar las infraestructuras fluviales y garantizar la seguridad de las comunidades locales. Estas instituciones están colaborando activamente con el proyecto de tesis al proporcionar apoyo logístico y técnico, incluyendo la disposición de herramientas avanzadas para la recolección de datos y la realización de levantamientos topográficos. La colaboración institucional no solo subraya la urgencia y relevancia del estudio, sino que también garantiza la viabilidad del proyecto en términos de recursos y tiempo. Este estudio contribuirá al avance del conocimiento en la modelación hidráulica bidimensional, lo que permite analizar problemas hidroambientales importantes y evaluar alternativas de diseño de obras fluviales, considerando la complejidad de los sistemas fluviales y la necesidad de datos precisos para una planificación efectiva (Basile et al., 2016)

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 GENERAL

Caracterizar el comportamiento hidrodinámico en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba mediante la aplicación de modelos hidráulicos bidimensionales.

1.6.2 ESPECÍFICOS

- Recopilar información morfométrica y de caudales característicos en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba que servirán como datos de entrada y condiciones de contorno para la modelación bidimensional planteada.
- Validar los modelos implementados con base en campos de velocidad superficial obtenidos mediante el método de Velocimetría de Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba.
- Evaluar los resultados hidrodinámicos validados para identificar las zonas críticas de la confluencia propensas a desborde, sedimentación y erosión en las riberas de los cauces analizados.

CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO

La región en torno a la confluencia del río Tomebamba y Machángara, se encuentra caracterizada por una variada composición de suelos, que incluyen material arcillo limoso, materia orgánica y canto rodado con un diámetro mayor a cincuenta centímetros (Segarra, 2016). Dicha composición del suelo se debe a los diversos procesos geológicos y erosivos, los cuales han dado origen a este tipo de paisaje.

En los últimos años el desarrollo de modelos computacionales ha tomado un entorno valioso, debido a su gestión de recursos. Estos modelos permiten una gran ayuda en la comprensión de datos y generan una rápida optimización y gestión de los mismos; sin embargo, existen diversas limitaciones con respecto a la entrada de información, así como en la interpretación de resultados y su incerteza (Munar Samboní & Méndez Pedroza, 2021).

2.1 Modelación Bidimensional.

La modelación bidimensional es un método numérico que simula el flujo en dos dimensiones, teniendo en cuenta variables como la velocidad y la profundidad del agua en sistemas hidráulicos. Este método ofrece una representación más precisa del comportamiento hidrodinámico comparado con los modelos unidimensionales (Ochoa et al., 2016).

Los modelos bidimensionales son fundamentales para estudiar el comportamiento de los ríos y sus zonas de inundación, erosión, entre otros fenómenos, permitiendo prever la efectividad de las medidas de contención. Esto facilita la implementación de las mejores estrategias, tanto en términos de inversión como en la gestión efectiva de eventos extraordinarios (Ortega & Rebolledo, 2020).

2.1.1 Herramientas Computacionales Para La Modelación 2d

A lo largo de la historia las herramientas computacionales han evolucionado de manera significativa gracias a los diversos programas y plataformas especializadas. Estos programas informáticos permiten simular y analizar el comportamiento de flujos de agua en dos dimensiones, proporcionando datos valiosos. A continuación, se describen algunos de los principales programas informáticos utilizados en la modelación 2D.

HEC-RAS 2D. - Hydrologic Engineering Center's River Analysis System es un programa informático desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Este programa permite realizar cálculos hidráulicos complejos y análisis detallados de ríos y sistemas fluviales. Con una interfaz gráfica de usuario intuitiva y componentes de análisis separados, HEC-RAS facilita la realización de perfiles de superficie de flujo estacionario, simulaciones de flujo no estacionario unidimensional y bidimensional, y cálculos de transporte de sedimentos (Hydrologic Engineering Center, 2021).

TELEMAC-2D. - Télématique Environnemental pour le Maillage et l'Analyse du Code es un sistema informático de modelación numérica avanzada, el cual resuelve las ecuaciones de Saint-Venant mediante el método de elementos finitos y una malla de cálculo de elementos triangulares (*TELEMAC, 2013*).

MIKE 21. - Paquete de software especializado en la modelación bidimensional de cualquier flujo de superficie libre. Este consta de una amplia gama de aplicaciones tanto en el ámbito de ingeniería y ambientales como en hidráulica costera, ríos y procesos de sedimentos (Warren & Bach, 1992).

IBER. – Es un modelo hidráulico utilizado en simulaciones de flujo en superficies libres como el de ríos y estuarios. Aplicado en la resolución de problemas hidrodinámicos, turbulencias, calidad de agua y hábitat.

DELFT3D. - Programa de modelado 2D y 3D usado en el ámbito de investigación de la hidrodinámica, morfología y calidad de agua en entornos fluviales, estuarinos y costeros.

2.1.2 Caracterización De Los Modelos Bidimensionales

Los programas incorporados en la modelación hidrodinámica a régimen no permanente del flujo son herramientas hidro informáticas las cuales permite la incorporación de los efectos producidos por el viento, densidad del flujo, turbulencia y presión atmosférica, de igual manera permite la simulación de flujo en dos y tres dimensiones el cual puede o no incluir el transporte de sedimentos, teniendo en cuenta la morfología variable o fija (Gyssels et al., 2013).

La gran infinidad de herramientas informáticas empleadas en casos de modelado se centra en la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes las cuales son utilizadas en flujos incompresibles, bajo los supuestos de aguas poco profundas promediadas por reynolds las cuales deben satisfacer ciertos requisitos como: precisión, estabilidad, eficiencia e idoneidad (*Ruiz, 2015*).

El modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes bajo la suposición de la hipótesis de Boussinesq. Estas ecuaciones diferenciales parciales, junto con un conjunto adecuado de condiciones iniciales y de contorno, se resuelven en una malla de diferencias finitas utilizando el método de Navier-Stokes Promediado de Reynolds (RANS).

El modelo numérico soluciona las ecuaciones hidrodinámicas dentro de una malla curvilínea, la cual requiere discretización espacial de la zona de estudio, con el fin de optar un número apropiado de celdas las mismas que dependen de la cantidad de detalle que se requiere para la tipología del problema de estudio (Gyssels et al., 2013).

- Ecuación de Continuidad promedio

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial [(d+\zeta) U \sqrt{G\eta\eta}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial [(d+\zeta) U \sqrt{G\xi\xi}]}{\partial \eta} = Q \quad (1)$$

Donde:

Q: Caudal por unidad de área

U y V: Velocidades horizontales

d: Profundidad por debajo del nivel de referencia

ζ : Nivel de superficie libre con respecto al nivel de referencia

$G\eta\eta$ y $G\xi\xi$: Factores de conversión de coordenadas curvilíneas a coordenadas planas.

η y ξ : Representan las coordenadas curvilíneas en el plano

- Ecuaciones de cantidad de movimiento en dirección horizontal

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} - f v = + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G\xi\xi}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v v \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + M_\xi$$

(2)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} - fv = + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G\eta\eta}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta$$

(3)

Donde:

u, v y w : Velocidades locales según las dimensiones.

f : Parámetro de Coriolis

σ : Coordenada vertical escalada

P_ξ y P_η : Presión hidrostática en el plano

F_ξ y F_η : Componentes del flujo turbulento horizontales.

M_η y M_ξ : Momento de flujos

- Coeficiente de viscosidad vertical

$$\nu_v = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_v^{back})$$

Donde:

ν_{mol} : Viscosidad cinemática

ν_{3D} : Componente de viscosidad turbulenta vertical

ν_v^{back} : Mínimo valor asignado a la contribución turbulenta

- Número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}} < 10 \quad (4)$$

Donde:

Δt : Variación de tiempo

g : Aceleración de la gravedad

H : Altura del tirante medio

$\{\Delta x, \Delta y\}$: Tamaños de las celdas en las direcciones x e y de la malla computacional.

2.2 Delft3D

Delft3D, es una suite de software de modelo hidrodinámico y ambiental desarrollado por deltares, un instituto de investigación holandés especializados en agua, subsuelos e infraestructuras. Esta herramienta está diseñada para realizar simulaciones y análisis de interacción entre el agua, los sedimentos, la ecología y calidad del agua en entornos naturales y artificiales. Es ampliamente utilizado en la gestión de recursos hídricos, las planificaciones costeras y fluvial, y la evaluación de impactos ambientales.

A lo largo de los años, Delft3d ha experimentado una evolución significativa, mejorando continuamente su interfaz de usuario y ampliando su campo de aplicación a diversos escenarios. Este programa se ha consolidado como una herramienta fundamental en el estudio y predicción de

comportamientos de sistemas acuáticos, permitiendo su aplicación en distintos contextos, tales como:

- Zonas costeras
- Ríos y estuarios
- Puertos y estructuras artificiales
- Calidad del agua y ecología
- Cambio climático

2.2.1 Módulos Principales

Al constar de múltiples áreas de aplicación, esta herramienta informática proporciona una gran suite compuesta por varios módulos interconectados, cada uno especializado en un aspecto específico, a continuación, se da a conocer dichos módulos.

Modulo Grind, es un apartado especializado en la generación y manipulación de mallas estructuradas y no estructuradas, diseñadas para integrarse con los módulos FLOW Y WAVE. Este módulo permite optimizar la resolución de la malla en función al caso de estudio, de esta manera se optimiza la eficiencia computacional sin comprometer la precisión de los resultados (Deltares, s.f.).

Modulo Flow, es un componente utilizado para la simulación hidrodinámica multidimensional (2D o 3D) en sistemas acuáticos. Este módulo nos permite modelar el comportamiento de un flujo o los procesos de transporte en diversos entornos, como ríos, estuarios, zanjas zonas costeras, etc.

Su función principal es simular la dinámica del agua debido a la acción de diversas fuerzas externas como lo son mareas, vientos, descargas fluviales y gradientes de densidad (Deltares, s.f.).

Modulo Weve, es una herramienta especializada en la simulación de la propagación y evolución del oleaje en contornos costeros y oceánicos. Su objetivo principal es calcular parámetros claves, como la altura, dirección y periodos de oleaje, así como su interacción con el fondo marino y las estructuras costeras (Deltares, s.f.).

Modulo Part, permite representar el transporte y dispersión de diversas sustancias en medios acuáticos mediante el enfoque de movimiento de partículas individuales q forman parte del flujo de agua. Generalmente se implementa en estudios de calidad de agua, derrames de petróleo y otros temas ambientales (Deltares, s.f.).

2.3 Caracterización de las Confluencias Fluviales

2.3.1. Procesos Hidrodinámicos en Confluencias

Las confluencias fluviales representan entornos hidrodinámicamente complejos, donde la interacción de dos o más flujos genera patrones de mezcla y estructuras de flujo coherentes a gran escala. La dinámica en estas zonas está gobernada por una combinación de parámetros geométricos y de flujo, entre los que destacan la relación de velocidades y de cantidad de movimiento entre los flujos convergentes, los ángulos de confluencia, la densidad de las masas de agua y las variaciones en la batimetría del fondo ya sea de manera gradual (fondo concordante) o abrupta (fondo no concordante) (Pozzi Piacenza et al., 2014). La interacción simultánea de estos factores dificulta la

caracterización precisa de la hidrodinámica en estos ambientes, lo que resalta la necesidad de estudios detallados y modelaciones avanzadas para comprender su comportamiento y evolución.

2.3.2. Factores que Influyen en la Dinámica de la Confluencia

La dinámica de la confluencia de flujos ya sea en ríos, canales o tuberías, es un fenómeno complejo que está determinado por la interacción de múltiples factores físicos y geométricos. A continuación, se presenta un análisis formal de los principales factores que influyen en este proceso:

Rugosidad. - La rugosidad de la superficie en contacto con el flujo, así como los lechos de ríos, cumplen un papel fundamental dentro de dinámica de la confluencia, dado que esta afecta de manera directa a la fricción entre el flujo y las superficies, lo que influye en la disipación de energía y la generación de turbulencia Este efecto se cuantifica mediante el coeficiente de rugosidad, que representa la resistencia impuesta por las paredes y el fondo del canal al desplazamiento del fluido; a mayor rugosidad, mayor será la dificultad para el movimiento del flujo (Martínez & Solano, 2020).

Caudales. - La magnitud y diferencia de caudales los cuales convergen dentro de una confluencia son considerados un parámetro crítico, debido a que uno caudal dominante puede generar un desequilibrio y a su vez provocaría una asimetría en la confluencia, generaría zonas de estancamiento o recirculación del flujo (Best, 1987).

Velocidad. - La velocidad del flujo en una confluencia genera condiciones en el patrón de circulación en la confluencia, lo cual provoca una inestabilidad en el interfaz del río, formando turbulencias y estructuras coherentes, como lo son vórtices y remolinos, los cuales afectan en la

disipación de energía he influyen en los esfuerzos cortantes, transporte de sedimentos y procesos de erosión (Rhoads & Kenworthy, 1995).

Esfuerzo cortante. -El esfuerzo cortante es la fuerza tangencial que actúa sobre un material, cuando es sometido a un cierto tipo de movimiento. Dicho esfuerzo esta relacionando de manera directa con la velocidad del flujo, la viscosidad y rugosidad del material. Además, los mismos pueden provocar socavaciones y erosión en el lecho de un rio (Te Chow, 1999).

Recirculación. -La recirculación se da en áreas donde la interacción de flujos con direcciones y velocidades diferentes generan zonas en las cuales el flujo se mueve en sentido contrario o en forma de espiral (vórtices) que pueden genera alteraciones con respecto a la trayectoria del flujo principal (Te Chow, 1999).

Estancamiento. -Las zonas de estancamiento son áreas en las cuales el flujo tiende a reducir su velocidad de manera significativa, esto puede darse debido a la geometría compleja de la confluencia. Estas zonas son un punto crítico con respecto a términos de acumulación de sedimentos y calidad de agua (Neary et al., 2011).

Angulo de confluencia. - El ángulo de confluencia es aquel que se forma entre los ejes de los canales que se unen en un punto en común. Este juega un papel fundamental dentro de la estabilidad de un lecho y los márgenes del cruce de los lechos (García, 2008).

2.3.3. Importancia del Análisis de Confluencias

La ingeniería fluvial se especializa en la planificación y ejecución de intervenciones en los ríos con el propósito de optimizar el aprovechamiento de sus recursos y mitigar el riesgo asociados

a su dinámica natural. A diferencia de infraestructuras estáticas como carreteras o ferrocarriles, los ríos son un elemento natural que recoge las aguas de una cuenca y las transportan en lámina libre hasta su desembocadura (Carriquí Porras, 2012). Esta disciplina no solo busca adaptar los ríos a las necesidades humanas, como el control de inundaciones o la prevención de la erosión, sino también preservar el equilibrio ecológico, garantizar la biodiversidad y la conectividad de los ecosistemas fluviales (Chima & Toledo, 2022).

El desarrollo social y económico de la sociedad está estrechamente vinculada a los ríos, al igual que la comunidad científica, que investiga su comportamiento y evolución. Dentro de ese contexto, la demanda de estrategias de intervención sostenible resulta fundamental para garantizar una gestión eficiente y responsable de los recursos hídricos (Pérez et al., 2018).

La ingeniería de ríos en conjunto con la hidráulica fluvial, integran conocimientos de hidrología, hidráulica, geomorfología y transporte de sedimento a gran escala lo cual permite analizar y gestionar los recursos de agua. Dentro de sus estudios abarcan variables claves como lo son los caudales, niveles de agua, velocidad del flujo y modificación en el lecho fluvial debido a procesos de socavación y sedimentación (Vallés, 2018). Además, abordan temas como esenciales para el diseño y construcción de estructuras hidráulicas, tales como presas diques y puentes.

2.4 Parámetros Hidráulicos Claves

2.4.1. Geometría y Batimetría

La geometría y batimetría son disciplinas esenciales para el análisis y la gestión integrada de los cuerpos de agua, ya sea en entornos fluviales, lacustres o mareas.

Geometría. - Es el estudio de las características de un río, como su ancho, profundidad, forma, patrones de flujo, caudal, velocidad y transporte de sedimentos. Bajo este parámetro se producen dos tipos de variaciones: variaciones en una sección transversal (en una estación) y variaciones a lo largo de la longitud del cauce (variación aguas abajo) (Ritter, DF et al., 2014).

Batimetría. – Se describe como la medición de la profundidad de los cuerpos de agua con relación al nivel del mar, la cual se dedica a describir y brindar información topográfica con respecto a la variación de profundidad a lo largo de un cauce o en una zona específica (Kokinou, 2021).

En conjunto, estas disciplinas proporcionan las bases para comprender la dinámica hidrológica desde la superficie hasta el fondo del lecho, de igual manera permite predecir fenómenos como inundaciones, problemas de erosión entre otros aspectos fundamentales presentes en un cuerpo de agua.

2.4.2. Rugosidad del Lecho y Coeficientes de Manning

En los cauces naturales, las secciones transversales se caracterizan por tener una morfología compuesta y una significativa variabilidad en las condiciones de la rugosidad a lo largo del perímetro mojado y las planicies de inundación adyacentes. Esto conduce a situaciones de flujo con resistencias adicionales, lo que complejiza la determinación del coeficiente de rugosidad (Zucarelli & Ceirano, 2024). En consecuencia, la estimación de la resistencia hidráulica al escurrimiento basada en valores tabulados solo resulta aplicable en casos específicos.

En mecánica de fluidos la rugosidad es un parámetro esencial dado que considera la interacción del flujo con los límites de las paredes. Esta característica influye de manera directa en

la transferencia de momentum y la disipación de energía. En muchas de las formulaciones tanto numéricas o de la ciencia aplicada, la rugosidad no se representa explícitamente debido a las limitaciones de resolución y modelado (Tacuri, 2023).

La rugosidad definida como un coeficiente de resistencia al flujo que, en función tanto de la forma física como la presencia y composición del material del lecho, influye en la profundidad, el ancho y la velocidad media del flujo (Thome & Zevenbergen, 1985). Su representación es fundamental en el desarrollo de modelos hidrodinámicos, ya que permite caracterizar las pérdidas de energía y el desarrollo del perfil de velocidades. De entre los coeficientes más usados para su cuantificación se encuentra el coeficiente de Manning (n), coeficiente de Chezy (C) y el factor de fricción de Darcy-Weisbach (f).

Coeficiente de Manning. - La n de Manning es la expresión que da a conocer la cantidad de resistencia al movimiento del agua en causas tanto naturales como artificiales. Este valor de resistencia al flujo es muy variable y depende de una serie de factores como: la vegetación, irregularidad del cauce, alineamiento, sedimentación, nivel del flujo, caudal, entre otros (Fernández de Córdova Webster et al., 2018).

Existen diversos libros, artículos, trabajos investigativos los cuales presentan valores estándar obtenidos mediante casos experimentales o numéricos, para la obtención y uso de los diferentes coeficientes de Manning dependiendo del tipo de material presente en la zona de interés. A continuación, se presenta una tabla obtenida de “HidroJING” los cuales presentan soluciones en proyectos y estudios de la ingeniería hidráulica, modelación y asistencia técnica.

Tabla 1. Rugosidades para diferentes condiciones de contorno.

A Cauces naturales			
A.I Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida 30 m)	Mínimo	Normal	Máximo
A.1.1 Cursos en planicies			
Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
Limpios con meandros, con algunos pozos y banc	0,033	0,040	0,045
Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
Tramo con mucho pasto, poros profundos y cauce en crocida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes promciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida			
Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustor			
Pasto corto	0,025	0,030	0,035
Pasto alto	0,030	0,035	0,050
4.2.2 Zonas cultivadas			
Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
Cultivos sembrados en lines en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
Cultivos sembrados a volco en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
A.2.3 Zonas arbustivas			
Escasos arbustos y pasto abundante	0,35	0,050	0,070
Poqueños árboles y arbustos sin follaje (parada invemal)	0,035	0,050	0,060
Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
Arbustos medianos a densos durante la parada invemal	0,045	0,070	0,110
Arbustos medianos a donios durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
A.2.4 Zona arboreas			
Sauces densos, temporada invemal	0,110	0,150	0,200
Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
Temeno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
Zonas de explotación maderers con árboles caidos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
Zonas de explotación maderera con árboles caidos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0,100	0,120	0,1 60
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente son inferiores a los corespondientes de cauces secundarios análogos, ya que los hancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
Socción regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

2.4.3. Hidrogramas y Su Importancia

En hidrología se denomina hidrograma a la representación gráfica de la variación de un caudal en relación con el tiempo, en un determinado punto de una cuneca hidrográfica. Esta puede representarse en distintas escalas como anuales, mensuales o diarias, esto dependiendo de la cantidad de datos disponibles.

En esencia, el hidrograma representa la respuesta de una cuenca ante un patrón de precipitación específico, mostrando la interacción entre las características fisiográficas de la cuenca y la relación entre la lluvia y la escorrentía que se genera en ella.

Los elementos que determinan la forma del hidrograma incluyen: la intensidad de la precipitación, la duración del evento de lluvia, el tamaño de la cuenca, su forma, así como su capacidad de almacenamiento, la cual depende de factores como la topografía, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, entre otros.

Los hidrogramas están compuestos por distintos componentes como se muestra en la Ilustración 1, donde se puede observar:

- Pico del hidrograma: valor máximo de la escorrentía
- Tiempo al pico: Tiempo entre el inicio de la escorrentía y la ocurrencia del pico del hidrograma
- Tiempo de recesión: Tiempo desde el inicio de la recesión hasta el final de esta.
- Tiempo base: Tiempo transcurrido desde el inicio de la crecida hasta el final de la escorrentía directa.

- Volumen de escorrentía: Área bajo la curva del hidrograma.
- Tiempo retardado: Tiempo entre la mitad de la duración de la lluvia efectiva y el tiempo pico.
- Tiempo de concentración: Tiempo entre el final de la lluvia efectiva y el primer punto de inflexión.

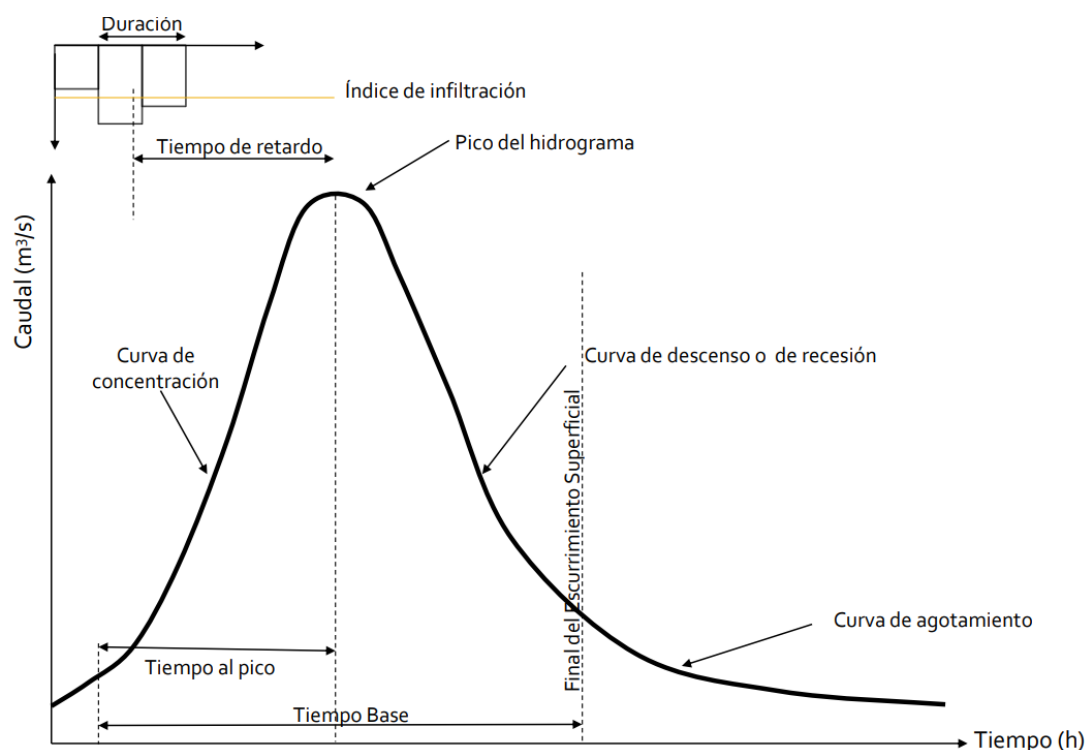


Ilustración 1. Componentes de un hidrograma. Fuente: Ovalles, Y et al., 2008

Teniendo en cuenta el conocimiento y la comprensión del comportamiento de los hidrogramas, así como los diversos factores que influyen en las corrientes, es posible tener una perspectiva más clara y mejor ante eventos como precipitaciones prolongadas. Esto permite definir y determinar los siguientes aspectos de manera más efectiva.

- Comparar los caudales pico y los tiempos de descarga de varias cuencas hidrográficas.
- Gestionar y tener en cuenta los tiempos de respuesta
- Observar las variaciones en la descarga a través de una tormenta o a través del año hidrológico.
- Observar el flujo de base o aporte de las aguas subterráneas al flujo.
- Observar las variaciones estacionarias de los caudales.

2.4.4. Condiciones de Contorno en Modelos Numéricos

La descripción matemática de un flujo requiere establecer de manera precisa tanto las ecuaciones de conservación como las condiciones de contorno e iniciales. Una condición de contorno se define como aquella que determina el comportamiento de un modelo en sus límites, lo que implica que los contornos condicionan el resultado de la simulación (*Lasso, 2017*).

Las condiciones de contorno constituyen un elemento fundamental en la formulación de modelos matemáticos y numéricos, ya que permite establecer el comportamiento del sistema en sus límites y su estado de partida. Estas condiciones se clasifican en dos categorías principales: condiciones iniciales y condiciones de frontera (*Oliveras, 2013*).

2.4.4.1 Condiciones iniciales. Las condiciones iniciales definen el estado del cuerpo de agua al inicio de la simulación, en cualquier modelo numérico desentendiendo del tiempo, dichas condiciones se emplean para establecer valores ambientales iniciales al comienzo del proceso de simulación. La evolución del sistema deriva a partir de dichas condiciones iniciales, las cuales representan de manera fiel el estado real del cuerpo o cause del agua o, en su defecto, constituir

una simplificación aceptable que preserve las características esenciales del sistema real (Atencia & Verbel, 2021).

Nivel de agua inicial. – Es un parámetro fundamental dentro de la modelación hidrodinámica la cual define la distribución espacial de la altura de la superficie del agua en todo el dominio de estudio al inicio de la simulación, puede constar de un valor constante o variable esto dependerá del caso de estudio (Deltares, s.f.).

Velocidad inicial. – Especifica la magnitud y dirección del flujo de agua en cada punto del dominio al comienzo de la simulación, al igual que el nivel de agua este puede ser variable o constante. Estos valores son de suma importancia debido a que permiten que el modelo parta de una situación física realista y coherente (Deltares, s.f.).

Temperatura. – Es una variable fundamental en la modelación hidrodinámica, debido a que influye de manera directa en las propiedades físicas, química y biológicas de los cuerpos de agua. Esto quiere decir q afecta la densidad del agua, la estratificación térmica y los procesos de mezcla entre distintos tipos de flujo (Deltares, s.f.).

2.4.4.2 Condiciones de frontera. Las condiciones de frontera se definen como un valor, función o distribución de una variable o de alguna de sus derivadas especiales, aplicada en un punto, región o volumen del dominio espacial durante todo el periodo de simulación. Estas condiciones no pueden derivarse directamente de las ecuaciones utilizadas para describir fenómenos físicos, sino que deben ser especificadas a partir de información externa. Cabe destacar que diferentes condiciones de frontera pueden generar resultados considerablemente distintos en el modelo (Atencia & Verbel, 2021).

Descarga por celdas. – Hace referencia a la distribución del caudal máximo (o caudal total) en múltiples celdas o puntos de entrada dentro de un modelo hidrodinámico. En otros términos, consiste en dividir el caudal total en partes más pequeñas, para posteriormente asignar un valor específico a cada celda o punto de entrada (Deltares, s.f.).

Descargas totales. – Herramienta esencial dentro de la distribución de caudales, ya que permite representar de manera precisa el caudal total en una sección asignado. Su correcta implementación asegura que el modelo capture adecuadamente el comportamiento del flujo y proporcione resultados confiables (Deltares, s.f.).

Condiciones de Neumann. – Se considera un tipo de condición de borde utilizada en ecuaciones diferenciales que especifica el valor de la derivada de una función en todos los puntos del contorno. Si esta es nula la condición se llama homogénea e indica que no hay flujo neto a través del borde, como en superficies aisladas térmicamente o paredes solidas en hidrodinámica (Daniel, 2011).

2.5 Validación de Modelos Hidráulicos

Dee (1997), en su investigación menciona que, "La validación de un modelo computacional es el proceso de formular y documentar acerca de la aplicabilidad y precisión de los resultados computacionales del modelo en relación con los propósitos de éste y del sistema natural que representa".

Es fundamental destacar que la validación consiste en evaluar la capacidad predictiva de un modelo aplicado a cuerpos de agua. Este proceso implica comparar los resultados de este con

los datos observados y realizar los ajustes necesarios en sus parámetros hasta que los resultados se encuentren dentro de los límites de precisión aceptable.

Es importante destacar que la validación de un modelo aplicado a cuerpos de agua a gran escala representa un desafío significativo. A diferencia de las pruebas controladas en laboratorio, en entornos naturales los instrumentos y métodos de medición presentan variaciones y conllevan un cierto grado de error (Torres Bejarano et al., 2016). Además, el factor humano desempeña un papel fundamental, debido a la interpretación de datos y la apreciación subjetiva pueden introducir un nivel adicional de incertidumbre en los procesos de validación.

Estas condiciones hacen que la evaluación de la precisión y fiabilidad del modelo requieran un análisis de manera rigurosa y la aplicación de metodologías que minimicen los errores asociados.

2.5.1. Métodos de Validación de Modelos Numéricos

A lo largo de los años, el avance de las ciencias computacionales se ha propiciado el desarrollo de métodos de validación para modelos de simulación hidrodinámica. Estos métodos han permitido tener un énfasis preciso en la obtención y comparación de fenómenos hidrológicos e hidráulicos, facilitando una mayor concordancia entre los resultados simulados y el comportamiento real de los flujos naturales (S. A. Ochoa et al., 2014).

A continuación, se mencionan algunos de los métodos empleados para el mejoramiento y optimización de resultados.

LSPIV. – El método LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry), sirve para monitorear diversos flujos superficiales en cauces naturales de forma no intrusiva. Esta técnica analiza el desplazamiento de las partículas que flotan sembradas en el flujo, o a su vez determinar los patrones que existen sobre la superficie del agua los cuales son generados por la turbulencia (Quinn & Bruce, 2018).

ADCP. – Los perfiladores acústicos de corriente Doppler, es un método utilizado comúnmente para medir el caudal fluvial. Este se lleva a cabo mediante ondas de sonido constantes en el agua. A medida que las ondas sonoras viajan, rebotan en las partículas suspendidas en el agua en movimiento y se reflejan de vuelta al instrumento. Dicho cambio de frecuencia es proporcional a la velocidad de las partículas, lo cual permite calcular la velocidad del flujo (SAWSC, 2016).

Trazadores. – Son sustancias con colorante que pueden incorporarse a una masa de agua con el propósito de analizar distintos aspectos de su dinámica. Entre sus aplicaciones principales de encuentra la determinación del tiempo de residencia, es decir, el periodo que tarda una molécula de agua en desplazarse desde un punto de origen hasta un punto de destino del flujo de agua (Bruckner, 2007).

Análisis estadísticos. – Herramienta fundamental para procesar, interpretar y validar datos en estudios hidrológicos y hidráulicos. A diferencia de los métodos ya mencionados anteriormente, el método estadístico permite cuantificar la precisión de los modelos y comparar resultados. Algunos indicadores comunes son:

- Error absoluto (MAE), medida de la magnitud promedio de los errores entre los valores observados o simulados (Willmott & Matsuura, 2005):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (5)$$

- Error cuadrático medio (RMSE), medida de la magnitud promedio de errores demasiado grandes o con gran peso. Valores más cercanos a cero indican un mejor desempeño del modelo o simulación (Chai & Draxler, 2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

- Coeficiente de correlación (R^2), mide la proporción de la varianza en los valores observados que es explicada por el modelo. Es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson (Legates & McCabe, 1999):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (7)$$

- Error cuadrático medio (MSE), promedio de los errores elevados al cuadrado. Mide qué tan lejos están las predicciones de los valores reales (Willmott, 1981):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

- Error porcentual absoluto medio (MAPE), expresa el error en porcentajes, útil cuando se quiere interpretar la magnitud del error en términos relativos (Armstrong, 1985):

$$MSE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (9)$$

2.5.2. Técnicas de Velocimetría de Imágenes (LSPIV)

La técnica LSPIV es una técnica moderna experimental con gran potencial para el monitoreo de diversos flujos superficiales en cauces naturales de manera remota (no intrusiva).

Con esta técnica LSPIV se puede analizar el desplazamiento de las partículas que flotan en el flujo o determinados patrones existentes sobre la superficie del agua, generados por la turbulencia. El desarrollo de esta técnica en los últimos años ha permitido su aplicación en la caracterización de flujos complejos logrando un avance notable en el campo de la mecánica de los fluidos e hidráulica (Quinn & Bruce, 2018).

Para el procesamiento de las imágenes y la obtención de los campos de velocidad superficial, se utilizó el programa PIVlab, un módulo informático gratuito basado en MATLAB ampliamente utilizada en investigaciones experimentales de mecánica de fluidos (Thielicke & Stamhuis, 2014). PIVlab permite realizar el análisis de imágenes al relacionar fotogramas consecutivos de un video, generando mapas de velocidad en dos dimensiones. Entre sus ventajas se destacan su interfaz amigable y la posibilidad de preprocesamiento de imágenes como la aplicación de filtros de contraste, corrección de distorsiones, y su capacidad para calcular parámetros estadísticos, así como para exportar los datos. El flujo de trabajo en PIVlab incluye la importación de videos o secuencia de imágenes, la calibración espacial del sistema definiendo la escala en metros por píxel, el preprocesamiento de imágenes, el análisis mediante correlación, y la validación de vectores para eliminar posibles errores por ruido o interferencias. Esta herramienta permite obtener los campos de velocidad superficial utilizados en la validación del modelo numérico desarrollado con Delft3D.

2.5.3. Aplicaciones de Drones en la Hidrometría

La evolución de la tecnología en conjunto con la implementación de satélites civiles marco el inicio del monitoreo de la superficie terrestre mediante sensores remotos que capturaban

imágenes espectrales y fue pionero de sus múltiples aplicaciones en diversas áreas, entre ellas la ingeniería.

Los drones o UAV (Unmanned Aerial Vehicle), son vehículos aéreos no tripulados, controlados de manera remota, semiautomáticos o automáticos. Estos equipos están acondicionados para el transporte de equipos auxiliares de monitoreo o control. Pueden ser para uso civil, militar, recreativo o científico. Suelen estar equipados con sensores, cámara y micrófonos dependiendo del tipo de aplicación (Ojeda Bustamante et al., 2016).

Dentro del ámbito de la hidrometría, el uso de drones desempeña un papel fundamental, ya que facilita la recopilación de datos hidrológicos y monitoreo de cuerpos de agua. Estos dispositivos ofrecen una combinación única de flexibilidad y alta resolución espacial, lo que los hace ideales para la aplicación dentro de la hidrología, hidráulica y gestión de recursos hídricos. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la fotogrametría a gran escala, medición de caudales, monitoreo de niveles de agua, detección de cambios morfológicos entre otros (Ojeda Bustamante et al., 2017).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio, se adoptó una metodología de enfoque cuantitativo y experimental, basada en la modelación hidráulica bidimensional (2D) para caracterizar la dinámica de flujo en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba. El proceso metodológico incluyó la recopilación y procesamiento de datos hidrométricos, batimétricos entre otros datos que se detallan a continuación, los cuales sirvieron como insumos para la construcción del modelo numérico. Se utilizó un enfoque computacional, empleando HEC-RAS 1D para estimar niveles de agua como condición de contorno en la salida del modelo, y Delft3D 2D para la simulación hidrodinámica. La modelación consideró la definición de malla computacional, la calibración de coeficientes de rugosidad y la imposición de condiciones de contorno de entrada adecuadas. Finalmente, los resultados fueron analizados en términos de distribución de velocidades, esfuerzos cortantes y zonas de recirculación, con el objetivo de identificar áreas críticas en la confluencia.

3.1 Definición de la Zona de Estudio

La zona de estudio abarca un aproximado de 500 metros desde la confluencia hacia cada río y 500 metros aguas abajo de la confluencia. Esta delimitación ha sido seleccionada para cubrir una superficie representativa que permita un análisis detallado y preciso de las dinámicas hidráulicas en la confluencia. Estos límites responden a varios factores prácticos y técnicos. En primera instancia, es práctico que la extensión del estudio incluya zonas de flujos estables y batimetría sencilla en sus extremos, lo cual es esencial para reducir la incertidumbre en las condiciones de frontera del modelo. Estas condiciones son necesarias ya que en los puntos de frontera la modelación es más incierta y puede afectar la precisión de los resultados. Estas medidas

aseguran que la confluencia será modelada con el mayor detalle posible, garantizando una representación precisa y cercana a la realidad de los fenómenos de recirculación, estancamiento, erosión, socavación y esfuerzos cortantes.

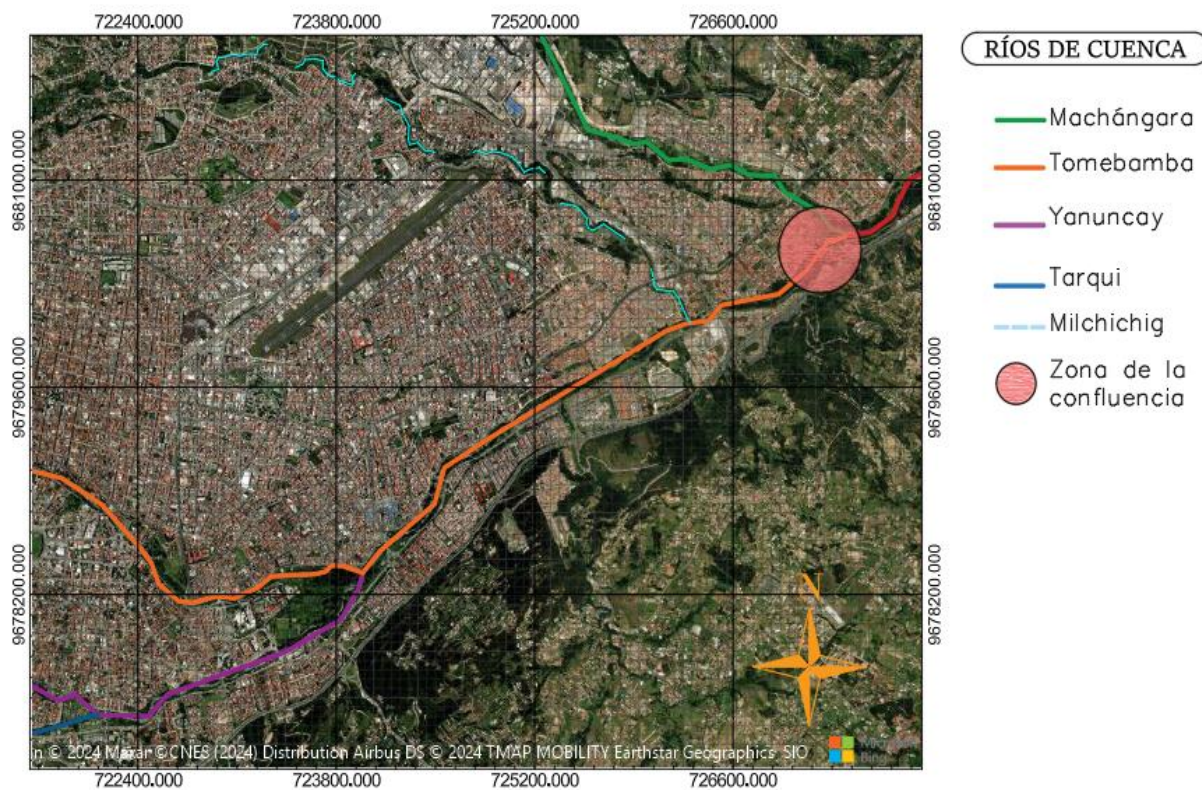


Ilustración 2. Ubicación de la zona de la confluencia. Fuente: Propia.

3.2 Descripción del Área de Estudio

3.2.1 Ubicación de la Confluencia de los Ríos Machángara y Tomebamba

La confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba se encuentra en la ciudad de Cuenca, Ecuador, dentro de la cuenca hidrográfica del río Paute. Esta zona es de particular interés debido a su influencia en la dinámica fluvial urbana, afectando la estabilidad de las márgenes y la

distribución del caudal en eventos hidrológicos extremos. La confluencia se sitúa en un sector donde la topografía y las características hidráulicas generan variaciones en la velocidad del flujo, la presión y los esfuerzos cortantes, lo que hace necesaria su modelación para la gestión adecuada de los recursos hídricos y la mitigación de riesgos.

3.2.2 Características Geomorfológicas e Hidrológicas

Los ríos Machángara y Tomebamba presentan diferencias geomorfológicas e hidrológicas significativas que afectan su interacción en la confluencia. El río Machángara, con una cuenca de mayor pendiente y suelos predominantemente rocosos, aporta flujos con velocidades relativamente altas y un mayor potencial erosivo. En contraste, el río Tomebamba, con una cuenca más amplia y con presencia de suelos arcillosos y vegetación ribereña, contribuye con un caudal más estable y menor velocidad en condiciones normales. Estas diferencias generan procesos de mezcla de caudales, variaciones en la distribución de sedimentos y patrones de recirculación en la zona de unión.

3.2.3 Cuencas a las que Pertenece Cada Río y Como Aportan a la Confluencia

Los caudales varían estacionalmente, con incrementos significativos en épocas de lluvia. Además, es importante considerar que el río Tomebamba previo a la confluencia está más influenciado por la recarga proveniente de los ríos Yanuncay y Tarqui.

3.3 Levantamiento De Información

3.3.1. Levantamiento Batimétrico

Para realizar el modelo es necesario definir con precisión la geometría del cauce y las condiciones del terreno en la zona de estudio. Para ello, se realizó una campaña de campo con el objetivo de obtener datos batimétricos detallados, asegurando una adecuada representación del lecho y las márgenes de los ríos Machángara y Tomebamba.



Ilustración 3. Equipo topográfico Base, Colector y Rober. Fuente: Propia.

Los datos de batimetría fueron obtenidos en campo utilizando el equipo topográfico mostrado en las Ilustración 3. Para garantizar un proceso sin contratiempos, es fundamental planificar las actividades durante épocas de estiaje y emplear el equipo adecuado, como se observa en las Ilustración 4. Además, es esencial contar con un plan de manejo de riesgos y asegurar el correcto uso del equipo. Por esta razón, se contó con la colaboración de técnicos de Áridos y Pétreos.



Ilustración 4. Proceso levantamiento topográfico. Fuente: Propia.

En total se obtuvieron 665 puntos topográficos, distribuidos en las ubicaciones que se muestra en la Ilustración 5. Para procesar los datos se realizó una interpolación de los puntos para generar la superficie en el programa Civil 3D. El proceso más adecuado para la correcta triangulación de datos debe tener en cuenta que los puntos topográficos se tomaron en dirección perpendicular al flujo, y la interpolación debe priorizar las triangulaciones en la dirección paralela al flujo. En el levantamiento topográfico de ríos, la interpolación de datos debe priorizarse en la dirección paralela al cauce del río. Esta práctica es fundamental para capturar con precisión las variaciones longitudinales del lecho y las características hidráulicas del río. Al interpolar en esta dirección, se obtiene un modelo digital de elevaciones (MDE) que refleja fielmente la morfología del cauce, lo cual es esencial para este trabajo.



Ilustración 5. Ubicación de los puntos levantados. Fuente: Propia.

La Ilustración 6, muestra el proceso de triangulación aplicado a los datos topográficos obtenidos en el levantamiento del área de estudio. En la imagen de la izquierda, denominada "Triangulación Inicial", se observa una distribución irregular de los triángulos generados a partir de los 665 puntos topográficos levantados. En esta primera etapa, la triangulación no sigue un patrón que refleje la morfología del cauce de manera óptima, generando mallas con direcciones desordenadas y sin respetar la alineación del flujo del río.

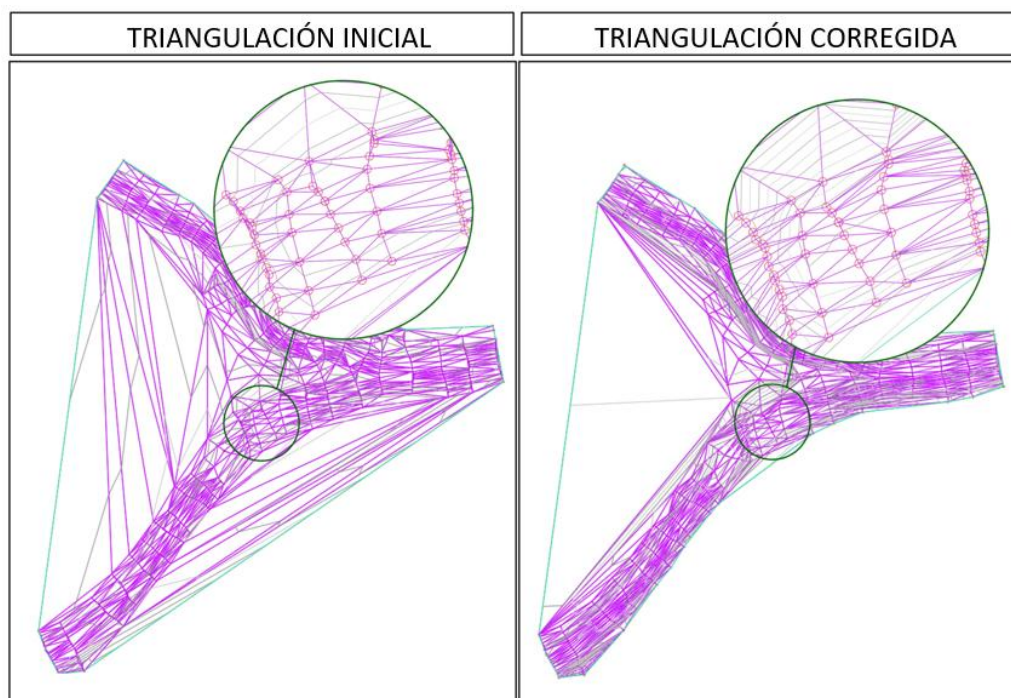


Ilustración 6 .Corrección de triangulaciones. Fuente: Propia.

Mientras que, en la imagen de la derecha, titulada "Triangulación Corregida", se aprecia una mejora significativa en la distribución de las triangulaciones. La interpolación de los puntos debe priorizar la generación de triángulos en la dirección paralela al flujo del río, lo que permite capturar con mayor precisión las variaciones longitudinales del lecho y las características hidráulicas del cauce. Este ajuste es fundamental para obtener un modelo digital de elevaciones (MDE) más representativo de la realidad, facilitando análisis hidrodinámicos más precisos en el contexto de la modelación bidimensional de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba.

3.3.2. Fuentes de Datos Hidrométricos (Estaciones de Etapa EP, Curvas De Descarga)

Respecto a los dos hidrogramas necesarios para definir los caudales de entrada se tiene datos disponibles en las estaciones de ETAPA EP, estos datos tienen intervalos de tiempo de entre

cinco minutos a una hora y se tienen registros desde el año 2014 al 2023 sin embargo hay periodos de tiempo en los que no existen registros disponibles por ello fue necesario procesar los datos de la manera que se detalla. Además, los datos disponibles son lecturas de alturas de agua en las estaciones que se detallan más adelante, para convertir estas lecturas a caudales se realiza el cálculo con las curvas de descarga correspondiente a cada estación. Las ecuaciones y factores fueron proporcionados por ETAPA EP.

Una curva de descarga, también conocida como curva de gasto, es una representación gráfica y matemática de la relación entre la altura del agua y el caudal en un punto específico del cauce, expresada generalmente como $Q=f(h)$. El caudal de un río está directamente relacionado con la altura del agua debido a la geometría del canal, la pendiente del flujo y las características hidráulicas del sistema. A medida que aumenta el nivel del agua, se incrementa la sección transversal disponible para el flujo, y también pueden variar la velocidad y la energía del mismo, generando un aumento en el caudal. Para cuantificar esta relación, se emplea una ecuación empírica del tipo:

$$Q = C(h - h_0)^n \quad (10)$$

donde Q es el caudal (m^3/s), h la altura del agua (m), h_0 la altura base o cero de la escala (m), y C y n son coeficientes empíricos determinados a partir de mediciones de campo. Esta forma funcional se deriva del ajuste de datos observados en un punto de control hidráulico específico y es ampliamente aceptada en el estudio de canales abiertos (Chow, 1999).

Para realizar un cálculo estadístico confiable del caudal mediante métodos como la distribución de Gumbel u otras distribuciones de valores extremos, es fundamental contar con una

serie de datos suficientemente larga que permita capturar la variabilidad natural del sistema hidrológico. Se recomienda disponer, al menos, de entre 10 y 15 años de registros continuos de caudales máximos anuales para reducir la influencia de eventos atípicos y lograr estimaciones más estables. Series más largas, de 20 a 30 años, ofrecen resultados considerablemente más representativos, mientras que registros superiores a 30 años son ideales para estudios hidrológicos robustos (Chow, Maidment y Mays, 1988).

Desde el punto de vista normativo, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) establece que para obtener resultados confiables en la estimación de caudales bajos y extremos — tanto para fines de gestión del recurso como para diseño de obras hidráulicas—, es recomendable contar con al menos 20 años de datos hidrológicos continuos (WMO, 2009). La falta de un periodo suficientemente largo de observaciones introduce alta incertidumbre en los parámetros estadísticos, afectando tanto la frecuencia como la magnitud estimada de los eventos extremos.

Dado que en el presente estudio no se dispone de una serie histórica extensa de caudales máximos anuales, no fue posible aplicar estos métodos con plena confianza. Por lo tanto, se optó por el proceso que se indica a continuación.

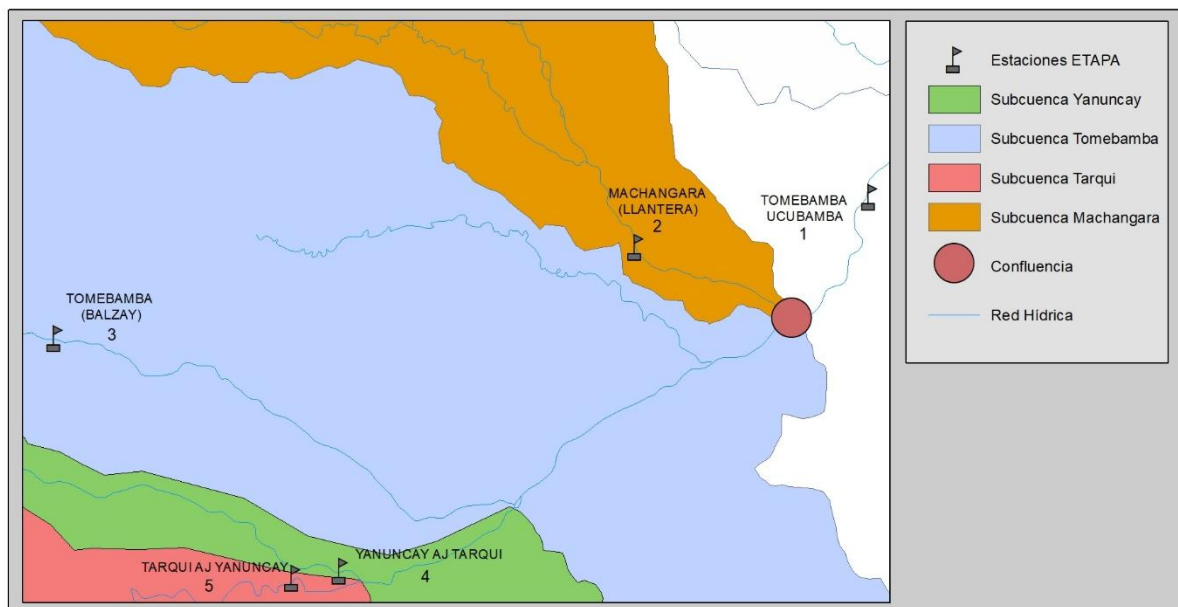


Ilustración 7 Ubicación de las estaciones de ETAPA EP y Red hídrica. Fuente: Propia.

Para el modelo son necesarios los hidrogramas del río Machángara y río Tomebamba previo a la confluencia este último es el resultado del aporte los caudales en los ríos Tomebamba, Yanuncay y Tarqui como se puede observar en la Ilustración 7. Por lo antes mencionado se decidió modelar los hidrogramas máximos a partir de los caudales que se tenga registro y no para un periodo de retorno específico, ya que únicamente se tienen datos del 2014 al 2023.

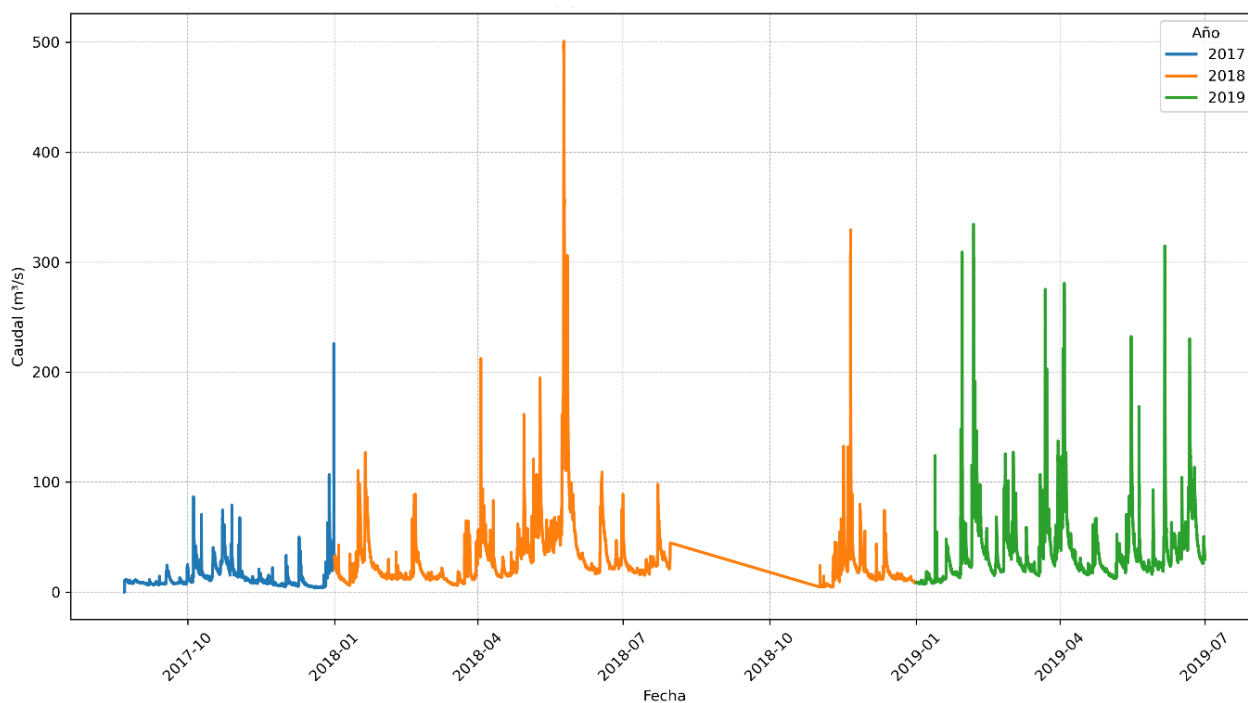


Ilustración 8. Registro de caudales en la estación Ucubamba. Fuente: Propia.

En la Ilustración 8, se observa los datos ya procesados de las variaciones del caudal en la estación Ucubamba ubicada río abajo de la confluencia, el registro empieza en el año 2017 y terminal en el año 2019 con un intervalo sin registros en el 2018. Se observan fluctuaciones en el caudal que están relacionadas con las condiciones climáticas y eventos hidrológicos. Las variaciones serán usadas para comparar que los registros de las demás estaciones tengan correspondencia con estos datos y verificar que los caudales calculados en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba sea información precisa para el análisis hidrodinámico en la modelación.

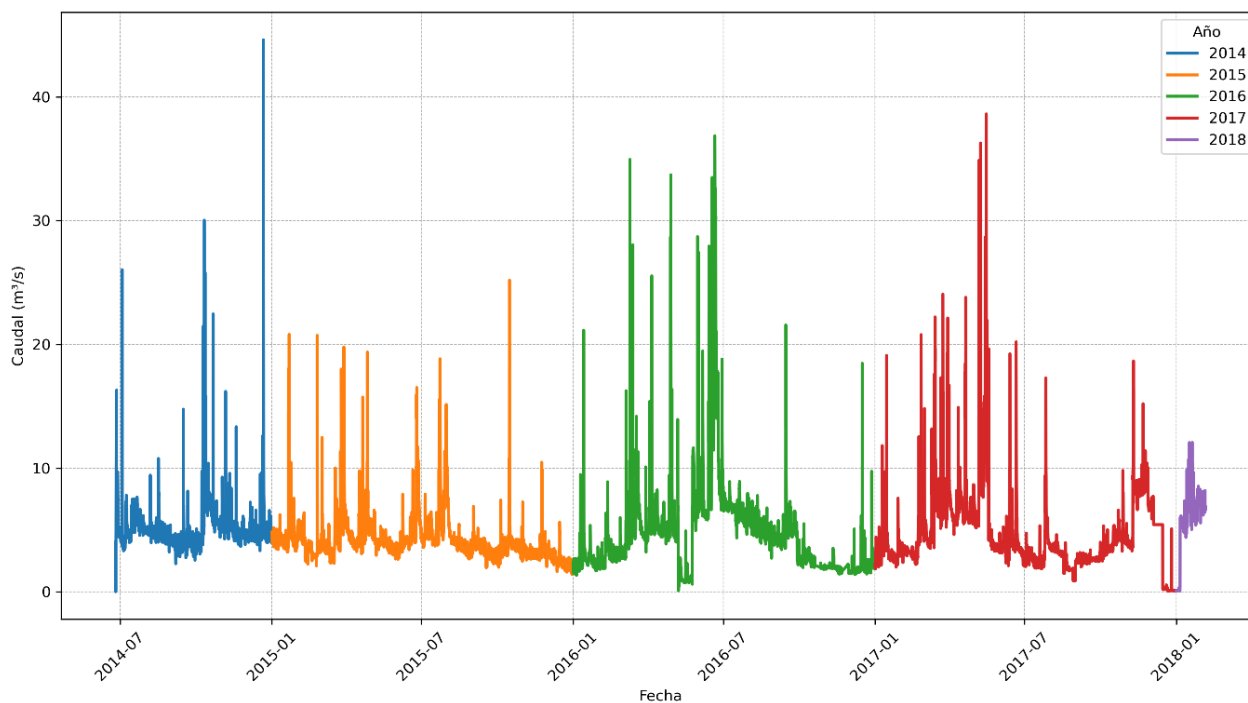


Ilustración 9. Registro de caudales en la estación Machángara. Fuente: Propia.

La Ilustración 9, representa las variaciones del caudal en la estación del río Machángara, ubicado aguas arriba de la confluencia. La estación del río Machángara (Ilantera) no recibe el aporte de otros caudales, lo que lo convierte en un factor determinante para el análisis. Este comportamiento del caudal es crucial para la generación del hidrograma, ya que condiciona directamente las condiciones de flujo en la confluencia.

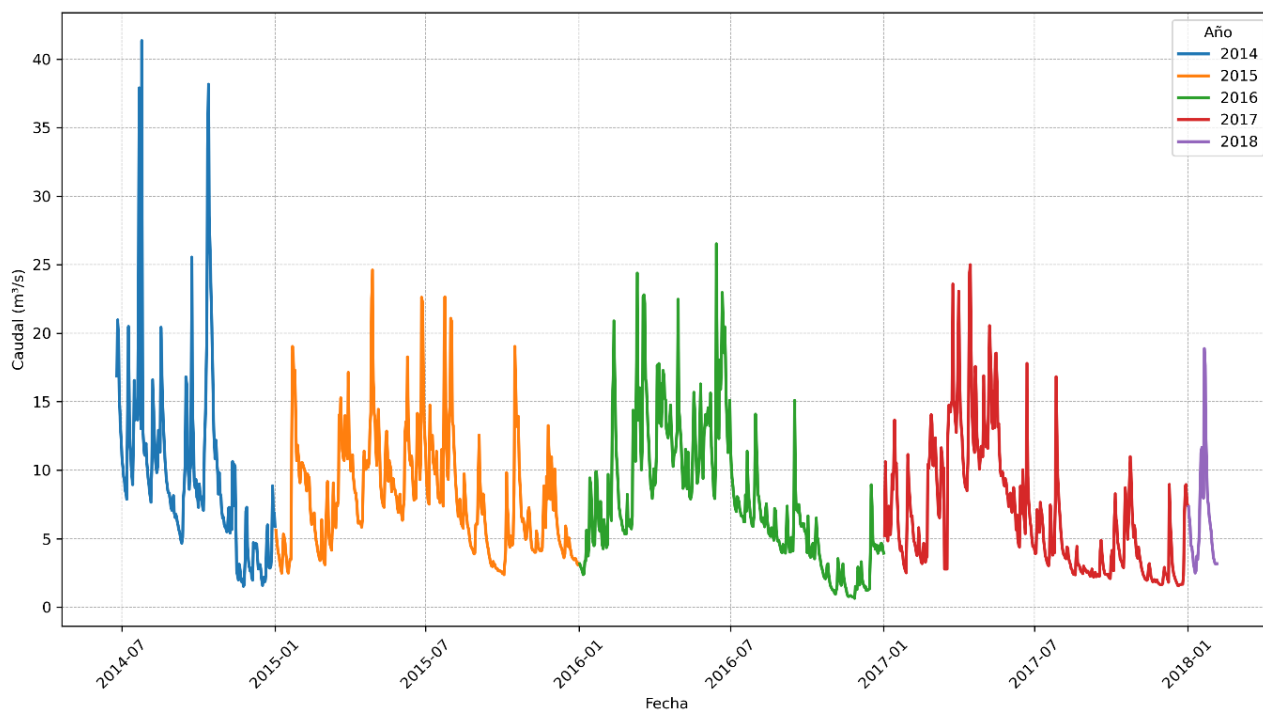


Ilustración 10 Registro de caudales en la estación Tomebamba. Fuente: Propia.

La Ilustración 10, muestra las variaciones del caudal en la estación Tomebamba (Balzay), ubicada río arriba de la confluencia. La gráfica empieza en el año 2014 y terminal en el año 2018 con una buena cantidad de datos, solo se aprecia un pequeño vacío de datos al inicio del año 2017. Se puede observar un comportamiento similar a los datos de la estación Machángara. Estos caudales son datos previos al aporte de la estación Tarqui y Yanuncay.

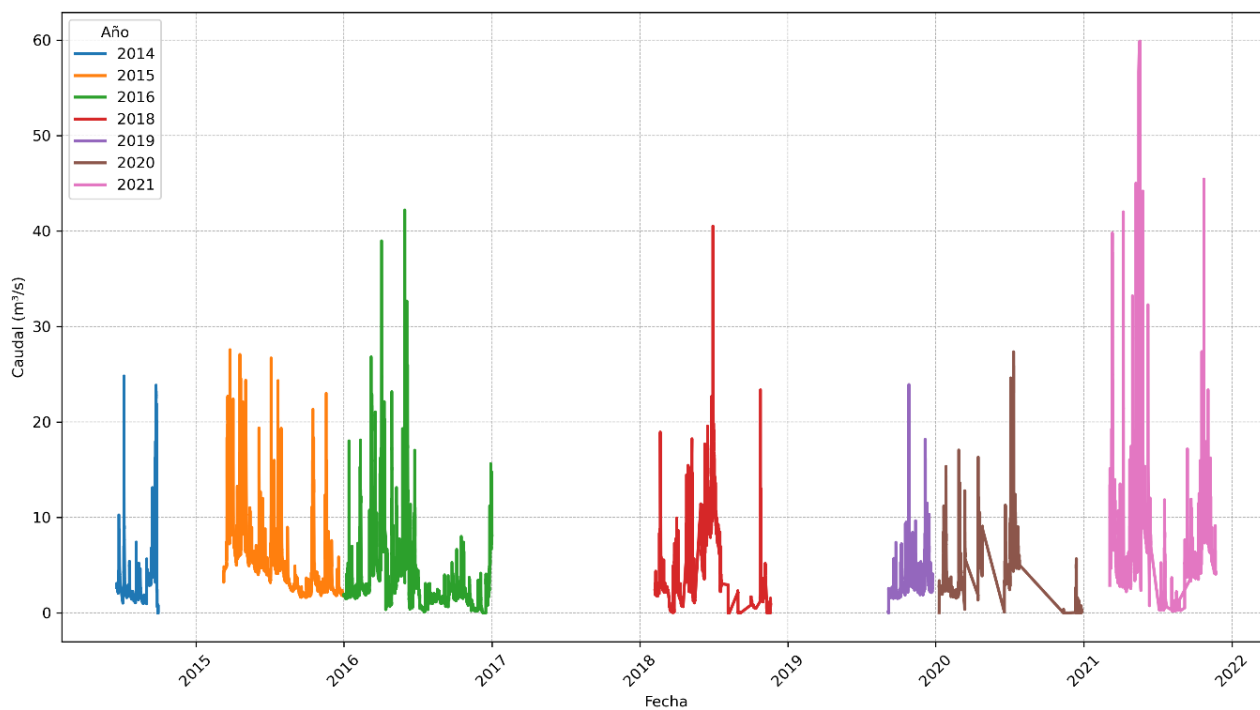


Ilustración 11 Registro de caudales en la estación Tarqui. Fuente: Propia.

En los registros de la estación Tarqui del 2014 al 2015 se observan vacíos significativos, además de una variación más significativa entre los caudales picos y caudales mínimos como se observa en la Ilustración 11, a diferencia de las estaciones Machángara (Llantera) y Tomebamba (Balzay) que mantienen una variación menor.

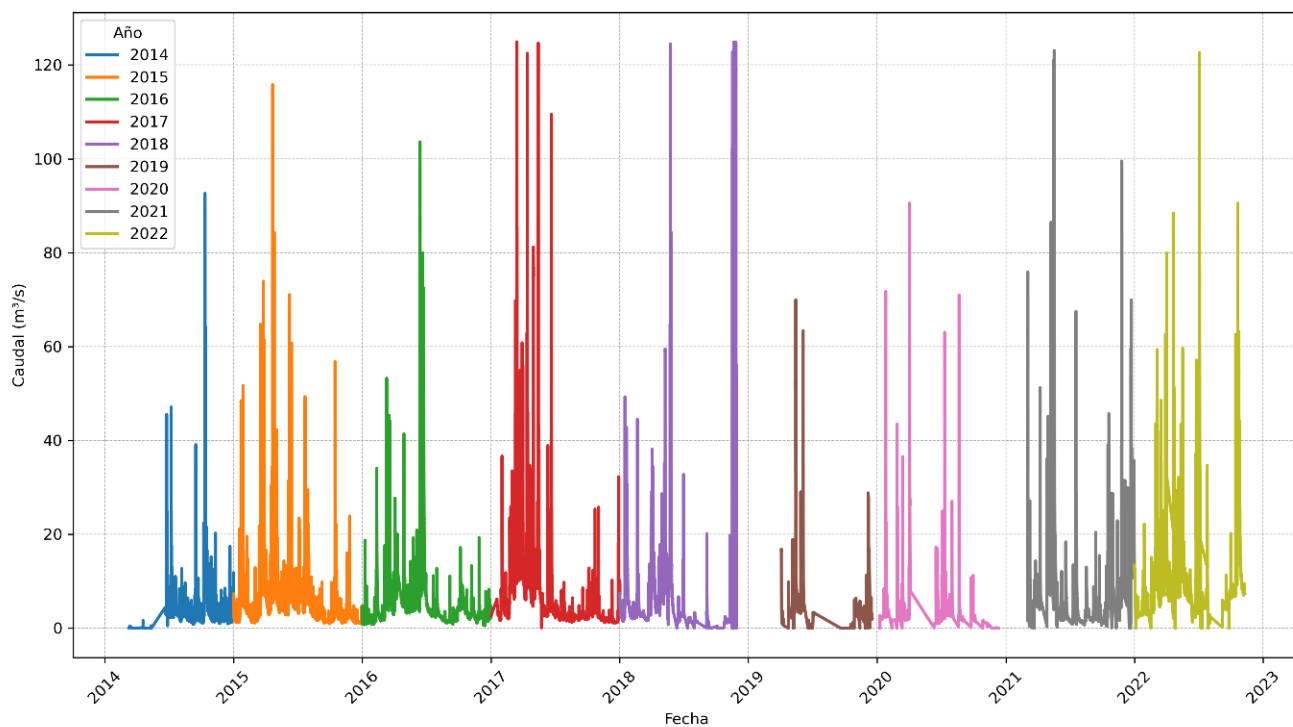


Ilustración 12 Registro de caudales en la estación Yanuncay. Fuente: Propia.

La estación Yanuncay es la que muestra caudales picos más altos como se ve en la Ilustración 12. El río Yanuncay muestra el aporte más significativo de caudal a la confluencia sin embargo pese a que en esta estación hay datos hasta el año 2023, se debe considerar que no se tienen registros de la estación Machángara a partir del 2017 y tampoco de la estación Tomebamba a partir del 2018 por lo que no se podrá considerar los datos a partir del 2017 para calcular los hidrogramas.

3.3.3. Procesamiento de Datos Hidrométricos (Sumatoria De Caudales)

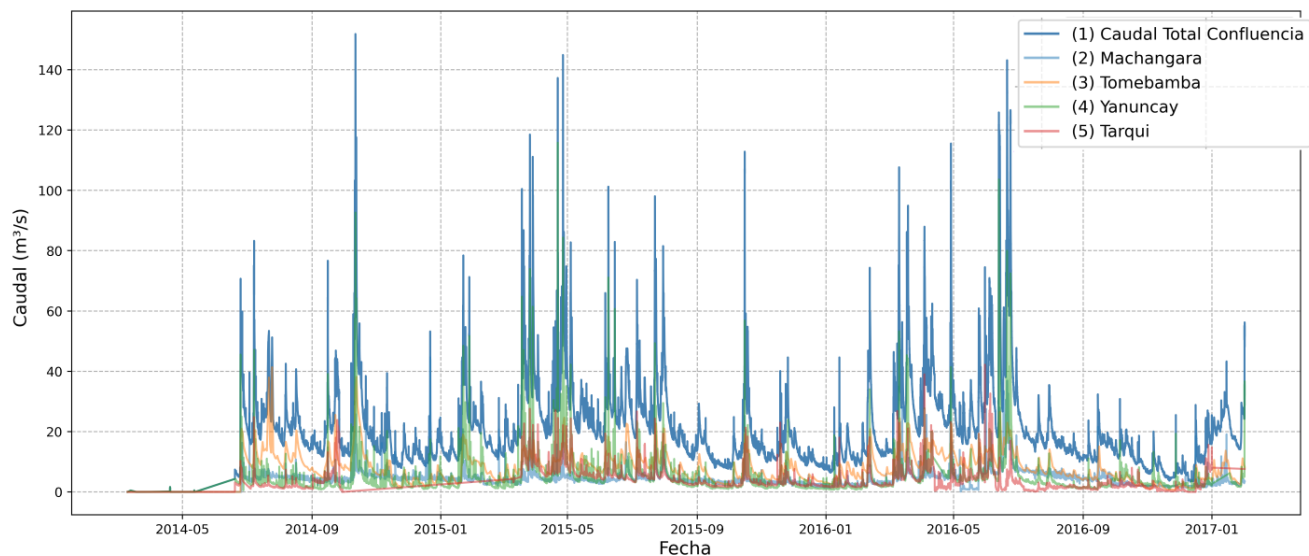


Ilustración 13 Sumatoria de caudales. Fuente: Propia.

Como se mencionó anterior mente los caudales de los que se tienen registro se encuentran desde el año 2014 al 2023 sin embargo solo se tomaran hasta el año 2017 por la incertidumbre para determinar el hidrograma del río Machángara en esas fechas. En la Ilustración 13, se muestra en color azul la suma de todos los caudales que aportan a la confluencia siendo el pico máximo en el año 2014. En la Ilustración 14, se compara este caudal calculado con los datos registrados en la estación Tomebamba (Ucubamba).

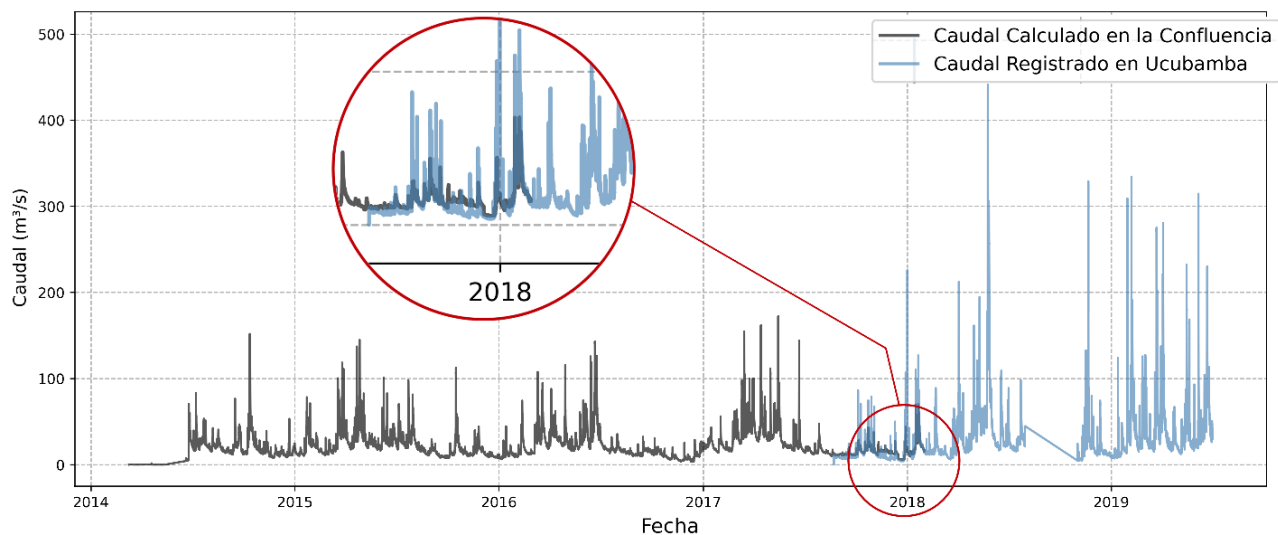


Ilustración 14 Comparación de caudales calculados y registrados. Fuente: Propia.

En la Ilustración 15, pese a que hay datos faltantes para el año 2018 (línea en color negro), el intervalo de tiempo en el que se cruzan los datos calculados y los datos registrados tienen un comportamiento similar. Se puede apreciar que la variación de caudales se da en las mismas fechas y se mantiene una forma consistente en cuanto al comportamiento de los caudales registrados en Ucubamba.

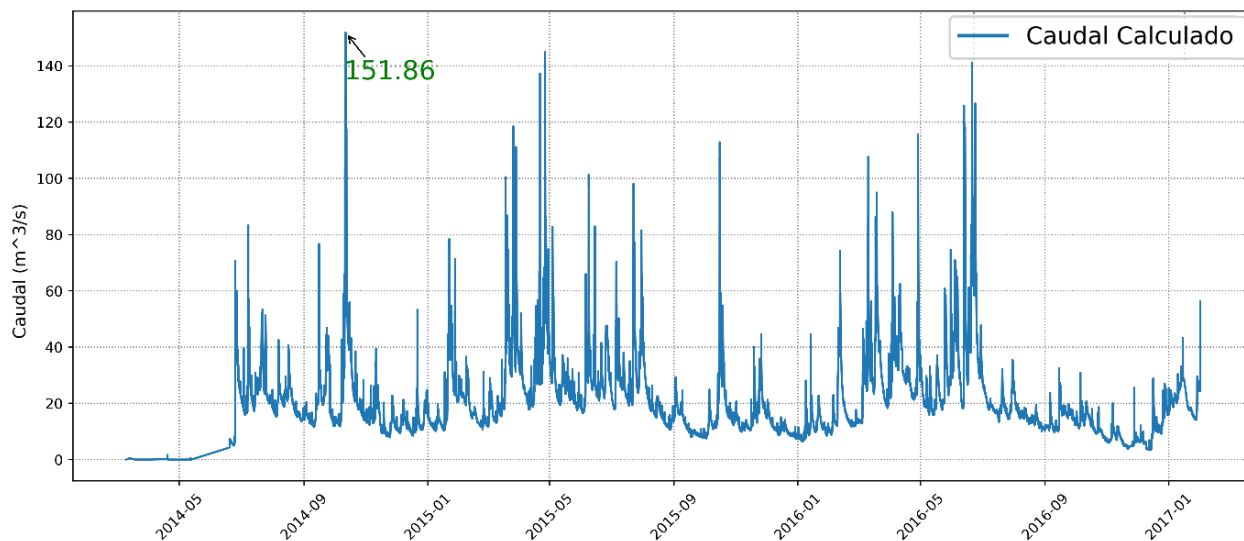


Ilustración 15 Registro de caudal máximo calculado en la confluencia. Fuente: Propia.

El caudal máximo se determinó en el día 11/10/2014 con un total de 151.86 m^3/s en la confluencia, por lo tanto, se decidió tomar el registro de 24 horas en el que se dio este pico. El hidrograma para el río Machángara será el de la misma fecha y el hidrograma de Tomebamba será la suma de los caudales de los ríos Tomebamba (Balzay), Yanuncay y Tarqui en esta fecha como se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2 Datos de hidrogramas (caudal máximo registrado)

Caudal máximo horario (m ³ /s)				
Fecha	Hora	Tomebamba	Machangara	Confluecnia
2014-10-11	15:00:00	62.679	8.973	71.652
2014-10-11	16:00:00	58.68	7.537	66.217
2014-10-11	17:00:00	55.662	7.206	62.869
2014-10-11	18:00:00	53.3	7.543	60.471
2014-10-11	19:00:00	55.032	7.992	63.024
2014-10-11	20:00:00	54.198	7.981	62.179
2014-10-11	21:00:00	65.211	8.343	73.554
2014-10-11	22:00:00	107.079	15.395	122.474
2014-10-11	23:00:00	114.059	21.517	135.576
2014-10-12	00:00:00	126.107	25.796	151.857
2014-10-12	01:00:00	126.624	25.408	151.563
2014-10-12	02:00:00	125.667	22.585	148.252
2014-10-12	03:00:00	119.632	17.609	137.242
2014-10-12	04:00:00	111.569	14.461	126.03
2014-10-12	05:00:00	100.311	12.438	112.749
2014-10-12	06:00:00	88.303	10.819	99.122
2014-10-12	07:00:00	82.358	9.559	91.917
2014-10-12	08:00:00	75.085	9.007	84.092
2014-10-12	09:00:00	69.716	8.736	78.452
2014-10-12	10:00:00	65.419	8.214	73.634
2014-10-12	11:00:00	62.293	7.848	70.141
2014-10-12	12:00:00	60.167	7.633	67.8
2014-10-12	13:00:00	60.007	7.575	67.582
2014-10-12	14:00:00	69.478	8.531	78.009
2014-10-12	15:00:00	76.161	9.728	85.889

Fuente: Propio

3.4 Parámetros de Entrada y Salida Para la Modelación

3.4.1. Hidrogramas de Entrada (Caudales)

Para la implementación de los hidrogramas en el modelo bidimensional de Delft3D, fue necesario generar archivos de entrada en el formato adecuado. Delft3D requiere un archivo de series temporales de caudal denominado. dis (abreviatura de discharges, que en inglés significa descargas), el cual almacena la variación del caudal en función del tiempo. Este archivo se configura en un formato similar a .txt, con registros tabulados en los que cada fila representa un instante de tiempo y su correspondiente valor de caudal en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

El proceso de carga inicia con la conversión de los datos de hidrogramas en un archivo dis, estableciendo el tiempo en minutos y el caudal respectivo en cada instante. Posteriormente, en el entorno de Delft3D-FLOW, se definen las condiciones de entrada del modelo mediante la vinculación del archivo dis con los nodos de frontera donde se imponen los caudales. En este caso, se asignaron los hidrogramas a los puntos de entrada correspondientes a los ríos Machángara y Tomebamba, garantizando que la simulación hidrodinámica refleje con precisión la contribución de cada cauce a la confluencia.

En contraste con los archivos dis, que representan las descargas o caudales de entrada, la condición de salida del dominio se establece mediante un archivo bnd (boundary), en el cual se especifican las alturas de agua previamente determinadas en HEC-RAS. Estas alturas corresponden a la relación entre caudal y nivel de agua calculada en el modelo unidimensional, asegurando coherencia en la transición del flujo hacia aguas abajo del dominio.

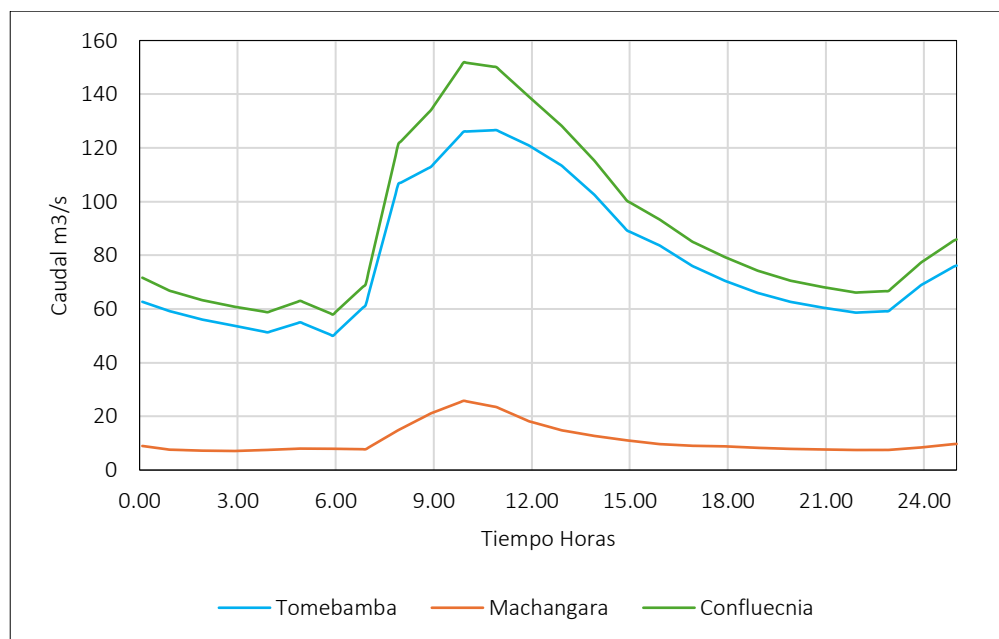


Ilustración 16 Hidrograma confluencia. Fuente: Propia.

Los hidrogramas utilizados en la modelación reflejan la variación de caudales en la confluencia en función del tiempo. La Ilustración 14, conjunta muestra los caudales de los ríos Tomebamba y Machángara, así como el caudal total en la confluencia. Se observa que el Tomebamba aporta la mayor parte del caudal al sistema, mientras que el Machángara contribuye con un volumen significativamente menor. En promedio, para este evento puntual, el Machángara representa el 12% del caudal total, mientras que el Tomebamba aporta el 88%. Este patrón se mantiene a lo largo del registro, evidenciando la predominancia del Tomebamba en la confluencia.

Al analizar la totalidad de los datos históricos, se observa que los valores promedio de contribución relativa son de 22.95% para el Machángara y 77.17% para el Tomebamba, lo que indica que, en condiciones normales, el Machángara tiene una participación más significativa en

el balance de caudales. Sin embargo, en este caso específico, su aporte es menor debido a variaciones hidrológicas temporales.

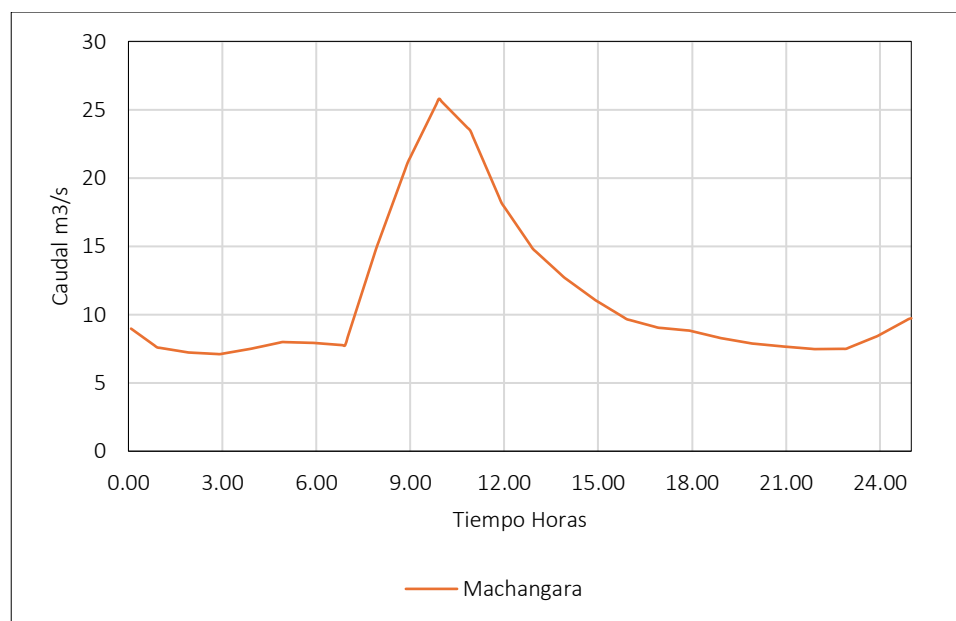


Ilustración 17 Hidrograma río Machángara. Fuente: Propia.

Otro aspecto relevante en los hidrogramas es la sincronización de los picos de caudal. Se evidencia que el caudal del Machángara presenta un aumento significativo en un corto periodo de tiempo, alcanzando su máximo alrededor de las 9:00 horas y posteriormente descendiendo de manera progresiva. Por otro lado, el caudal del Tomebamba muestra una tendencia similar, pero con valores de mayor magnitud. Como resultado, el hidrograma de la confluencia refleja la superposición de ambos caudales, generando un pico máximo alrededor del mediodía antes de comenzar un descenso gradual.

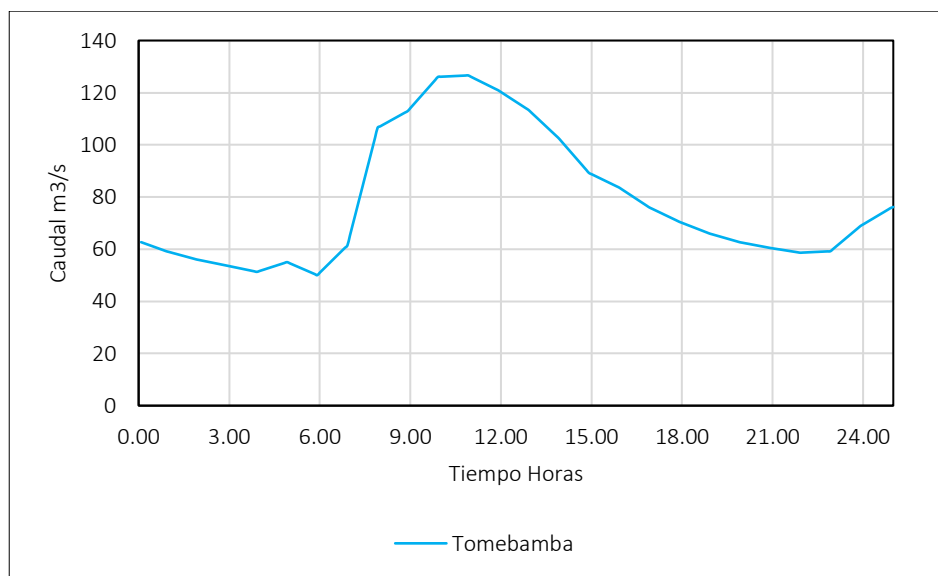


Ilustración 18 Hidrograma río Tomebamba. Fuente: Propia.

Este comportamiento es crucial en la modelación bidimensional, ya que permite analizar los efectos de la confluencia en la distribución de velocidades, esfuerzos cortantes y posibles zonas de recirculación. La correcta implementación de los hidrogramas y la coherencia en las condiciones de entrada y salida garantizan que la simulación hidrodinámica en Delft3D represente fielmente la dinámica del flujo en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba.

3.4.2. Modelo Unidimensional Condición de Salida

Para definir los niveles de agua en la salida de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, se elaboró un modelo unidimensional en HEC-RAS, utilizando como base la superficie interpolada y corregida en Civil 3D. A partir de esta superficie, se trazaron tres ejes principales correspondientes a los cauces de ambos ríos y su confluencia. Sobre cada eje, se generaron secciones transversales con una separación de 10 metros, permitiendo representar con precisión la variabilidad morfológica del lecho y sus márgenes. Estas secciones fueron exportadas

a HEC-RAS, donde se realizaron ajustes e interpolaciones adicionales para mejorar la continuidad del modelo.

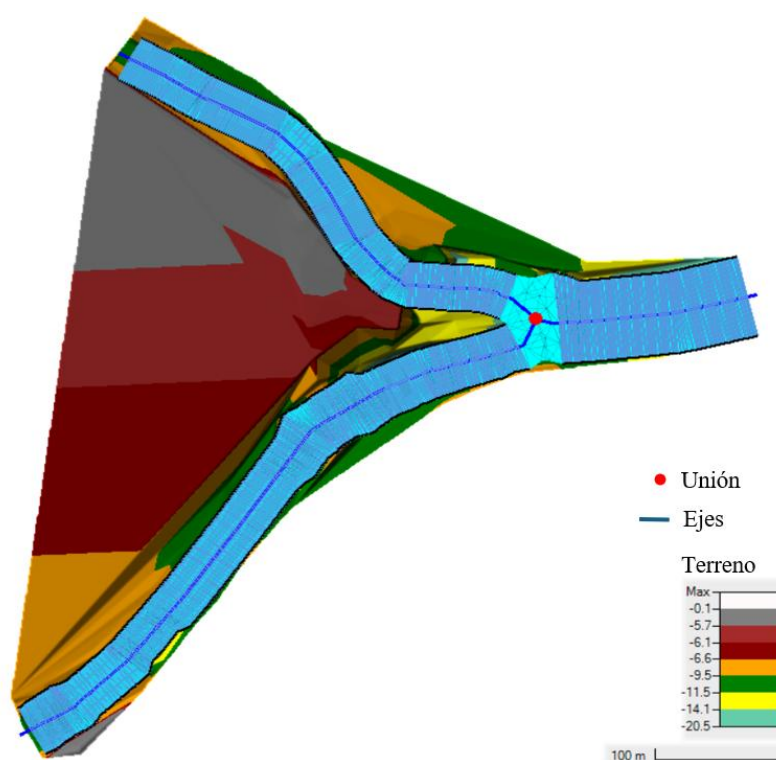


Ilustración 19 Secciones exportadas a Hec-Ras. Fuente: Propia.

Dentro de HEC-RAS, las secciones transversales fueron interpoladas con el objetivo de obtener una mayor resolución en el análisis hidráulico, garantizando la correcta representación de las variaciones topográficas a lo largo de los cauces. Además, se realizó la unión de los tres ejes en un solo punto mediante la herramienta Join, lo que permitió modelar de manera integral la confluencia. En la Ilustración 19 Secciones exportadas a Hec-Ras, se presenta la visualización del modelo en HEC-RAS, donde se pueden observar las secciones transversales generadas, la unión de los ejes y la superficie interpolada.

Para la simulación del flujo en HEC-RAS, se asignaron los mismos valores de rugosidad utilizados en el modelo bidimensional de Delft3D, manteniendo la coherencia en los parámetros hidráulicos. Los caudales de entrada fueron tomados de los hidrogramas generados a partir de los datos registrados en estaciones de monitoreo, asegurando que la modelación refleje condiciones reales del sistema fluvial.

El análisis hidráulico en HEC-RAS se realizó utilizando un método mixto, permitiendo la coexistencia de flujos en régimen subcrítico, crítico y supercrítico según las condiciones hidráulicas del sistema. Esta metodología es ideal para modelar cauces naturales con variaciones de pendiente y caudales variables, ya que evita restricciones en la transición entre los distintos regímenes de flujo. A partir de esta simulación, se determinaron los niveles de agua en la salida de la confluencia, valores que posteriormente fueron ajustados restando el nivel mínimo registrado. Como resultado, se obtuvo una relación entre nivel de agua y caudal, los datos se cargan respecto a la altura mínima como se muestra en la Tabla 3, información clave para definir la condición de salida en el modelo bidimensional.

Tabla 3 Relación Caudales y Altura de Salida

Q (m ³ /s)	Mínimo (m)	Altura (m)	H Relativa (m)
71.65	-19.93	-15.21	-4.72
66.22	-19.93	-15.27	-4.66
62.87	-19.93	-15.30	-4.63
60.47	-19.93	-15.33	-4.6
63.02	-19.93	-15.30	-4.63
62.18	-19.93	-15.31	-4.62
73.55	-19.93	-15.19	-4.74
122.47	-19.93	-14.73	-5.2
135.58	-19.93	-14.63	-5.3
151.86	-19.93	-14.50	-5.43
151.56	-19.93	-14.50	-5.43
148.25	-19.93	-14.53	-5.4
137.24	-19.93	-14.61	-5.32
126.03	-19.93	-14.70	-5.23
112.75	-19.93	-14.81	-5.12
99.12	-19.93	-14.94	-4.99
91.92	-19.93	-15.00	-4.93
84.09	-19.93	-15.08	-4.85
78.45	-19.93	-15.14	-4.79
73.63	-19.93	-15.19	-4.74
70.14	-19.93	-15.22	-4.71
67.80	-19.93	-15.25	-4.68
67.58	-19.93	-15.25	-4.68
78.01	-19.93	-15.14	-4.79
85.89	-19.93	-15.06	-4.87

Fuente: Propia

Finalmente, los niveles de agua calculados en HEC-RAS fueron utilizados como condición de salida en el modelo bidimensional implementado en Delft3D, asegurando la continuidad hidráulica entre ambos enfoques. Este procedimiento garantiza que las simulaciones bidimensionales consideren una referencia realista en la salida del dominio, evitando errores en la propagación del flujo aguas abajo. La integración entre resultados de HEC-RAS y las simulaciones

en Delft3D permite aprovechar las ventajas de ambos modelos: el enfoque unidimensional para definir las condiciones de contorno y el bidimensional para capturar con mayor detalle las dinámicas del flujo en la confluencia.

3.4.3. Geometría del Modelo

Se construyó una malla estructurada en un sistema curvilíneo y ortogonal para fines de discretización espacial del modelo con un total de 7 fila, 45 columnas y 315 celdas para la zona del río Tomebamba, mientras que para la zona del río Machángara consta de 45 filas, 7 columnas y 315 celdas, y como parte final la zona de la confluencia consta de 7 filas, 25 columnas y un total de 175 celdas. Se optó por una malla regular formando recuadros de 10x10 metros generando un total de 805 celdas, cabe recalcar que todo el proceso se llevó a cabo en el programa Civil 3D (Ilustración 20).

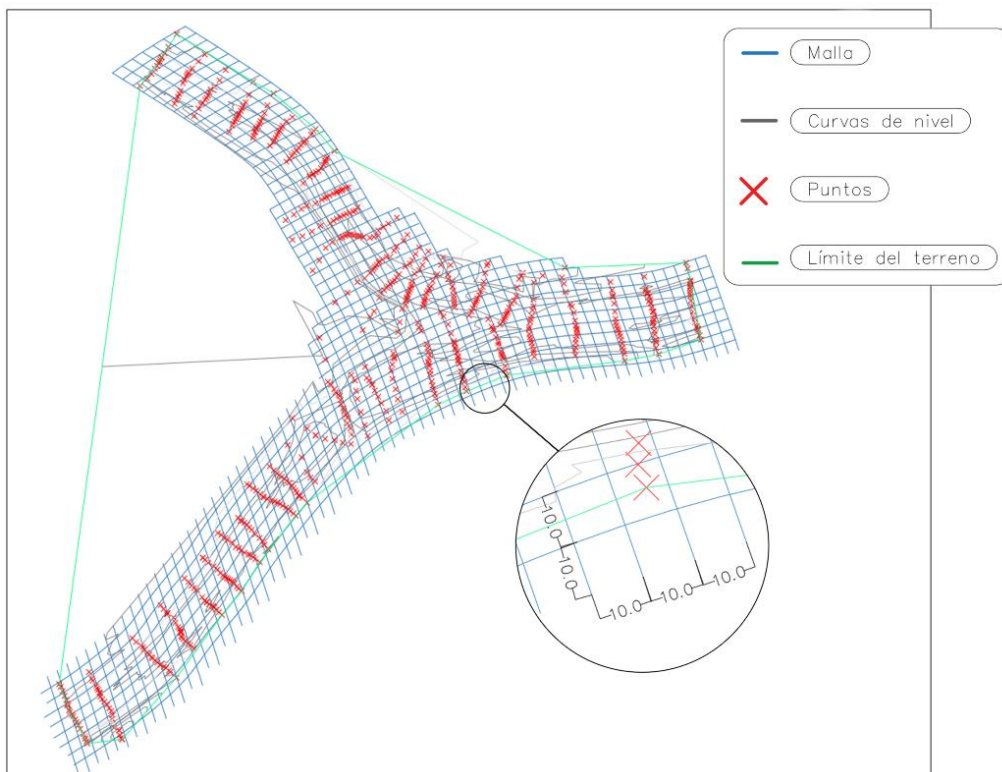


Ilustración 20 Malla diseñada en Civil 3D. Fuente: Propia.

Tras la discretización de la malla numérica, se procede a su exportación en formato Shape. Es importante destacar que DELFT 3D permite el ingreso de archivos en formato Land Boundaries (LDB). Para ello, dentro del interfaz del programa, se dispone de la herramienta QUICKPLOT, la cual facilita la conversión de archivos desde formato Shape a LDB, garantizando la compatibilidad del modelo con el entorno de simulación.

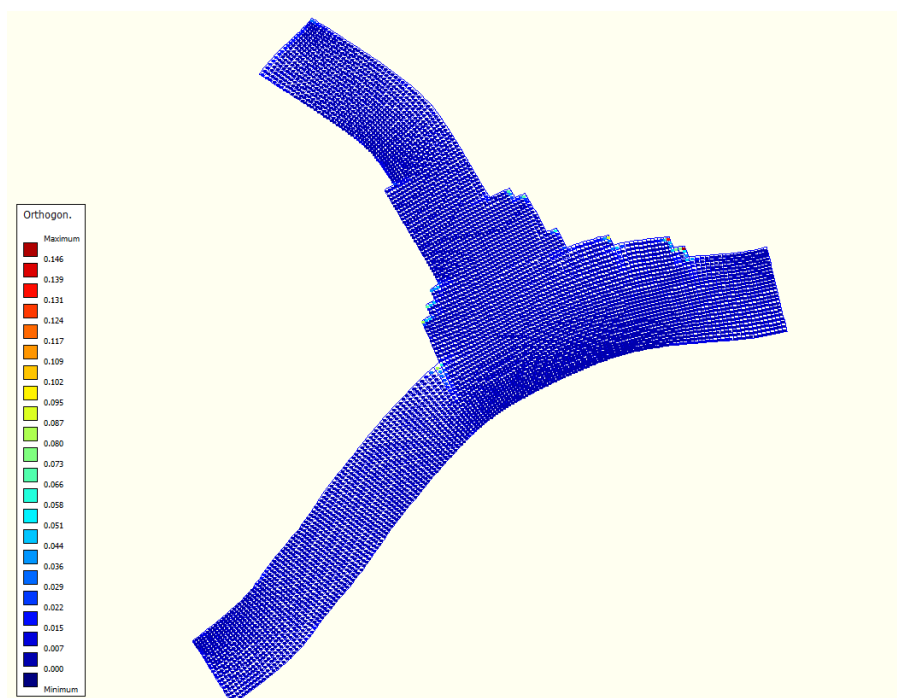


Ilustración 21 Ortogonalidad de la malla. Fuente: Propia.

El diseño de la malla computacional en Delft3D requiere cierta ortogonalidad para garantizar estabilidad numérica y precisión en la simulación del flujo. La ortogonalidad ideal implica que las celdas mantengan ángulos cercanos a los 90° , lo que minimiza errores en el cálculo de transporte de caudal, velocidades y esfuerzos cortantes. En este caso, se observa que la malla es mayormente ortogonal en los tramos rectos de los ríos y en la confluencia. Sin embargo, en los límites de la malla, la presencia de celdas con mayor distorsión no afecta la calidad de los resultados numéricos. La confluencia, interactúan de manera compleja, lo que hace difícil mantener la estructura ortogonal sin embargo como se parecía en la Ilustración 21, se ha logrado mantener la geometría ortogonal en la confluencia.

Para mejorar la ortogonalidad en la zona de confluencia, podrían considerarse estrategias como el refinamiento de la malla en la región crítica, generando celdas más pequeñas que permitan

transiciones más suaves en la geometría. La reestructuración de la malla, ajustando la dirección de las celdas para que sigan mejor la trayectoria del flujo, en lugar de mantener una cuadrícula rígida.

3.4.4. Batimetría

Con base en los datos recolectados durante el levantamiento topográfico, se obtuvo la batimetría de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba (Ilustración 22). En esta representación, es posible observar la variación profundidad, evidenciando cambios significativos en la elevación del lecho, pasando de un promedio de 6 metros de profundidad en las entradas a 2 metros en la zona de confluencia, lo que refleja una marcada transformación en la morfología del cauce.

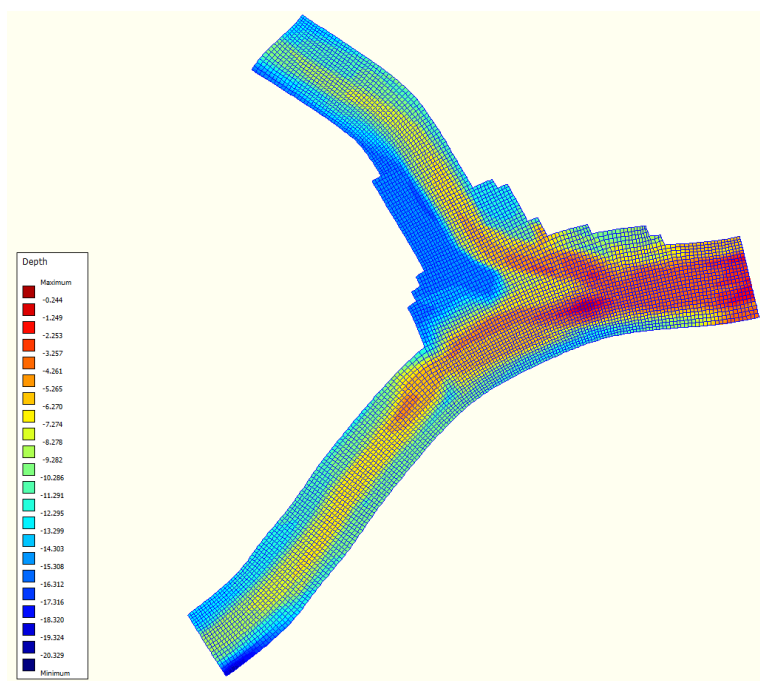


Ilustración 22. Batimetría Delfi3D. Fuente: Propia.

3.4.5. Rugosidades

La rugosidad de las cuencas hidrográficas fue determinada a partir de estudios previos. Según el estudio de Martínez y Solano (2020), el coeficiente de Manning (n) para el lecho del río Tomebamba varía en un rango de 0.030 a 0.035. Por otro lado, el estudio realizado por Méndez y Vásquez (2021) establece un valor de 0.035 para el lecho del río Machángara. Para los valores de los contornos del río, se emplearon valores estándar, los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Coeficientes de Manning implementados

<u>Zona uso de suelo</u>	<u>N de Manning</u>
Tomebamba	0.03 a 0.035
Machagara	0.035
Terreno claro con ramas con crecimiento de brotes	0.06
Terreno claro con ramas sin brotes	0.04

Fuente: Propia

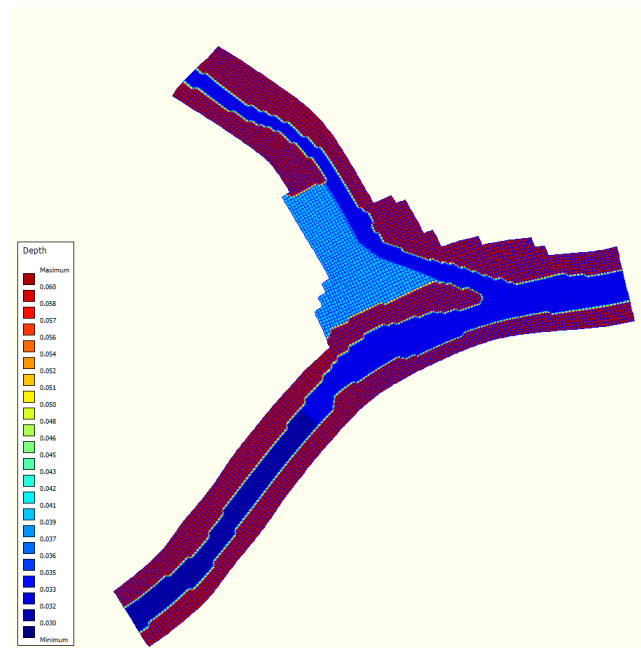


Ilustración 23 Rugosidades implementadas. Fuente: Propia.

3.4.6. Condiciones de Contorno

Para la definición de las condiciones de contorno del modelo, el caudal de entrada se discretizo considerando la distribución no uniforme del flujo. En el caso del río Tomebamba, el caudal máximo del hidrograma se dividió en ocho celdas, asignado a cada una un porcentaje específico en función de la distribución del flujo. De manera similar, para el río Machángara, el caudal máximo horario se dividió en seis celdas, con valores diferenciado por celda (Ilustración 24). Esta metodología permite representar con mayor precisión la variabilidad del flujo en la entrada del sistema, asegurando una adecuada asignación de los caudales en el modelo.

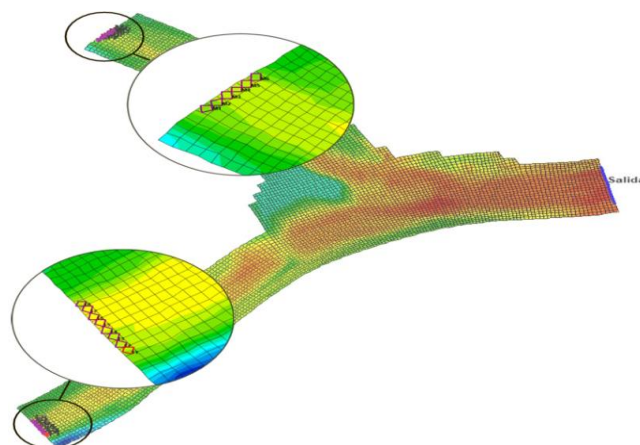


Ilustración 24: Descarga por celdas. Fuente: Propia.

La Tabla 5 y Tabla 6, presenta los valores máximos de los caudales horarios, discretizados en porcentajes diferenciados, lo que permite evidenciar que el caudal no es constante en lo largo de la sección transversal de los ríos.

Tabla 5: Discretización de caudales (Tomebamba)

Distribución por celdas (m ³ /s)								
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Total
11%	11%	13%	15%	15%	13%	11%	11%	100%
6.895	6.895	8.148	9.402	9.402	8.148	6.895	6.895	62.679
6.455	6.455	7.628	8.802	8.802	7.628	6.455	6.455	58.680
6.123	6.123	7.236	8.349	8.349	7.236	6.123	6.123	55.662
5.863	5.863	6.929	7.995	7.995	6.929	5.863	5.863	53.300
6.054	6.054	7.154	8.255	8.255	7.154	6.054	6.054	55.032
5.962	5.962	7.046	8.130	8.130	7.046	5.962	5.962	54.198
7.173	7.173	8.477	9.782	9.782	8.477	7.173	7.173	65.211
11.779	11.779	13.920	16.062	16.062	13.920	11.779	11.779	107.079
12.546	12.546	14.828	17.109	17.109	14.828	12.546	12.546	114.059
13.872	13.872	16.394	18.916	18.916	16.394	13.872	13.872	126.107
13.929	13.929	16.461	18.994	18.994	16.461	13.929	13.929	126.624
13.823	13.823	16.337	18.850	18.850	16.337	13.823	13.823	125.667
13.160	13.160	15.552	17.945	17.945	15.552	13.160	13.160	119.632
12.273	12.273	14.504	16.735	16.735	14.504	12.273	12.273	111.569
11.034	11.034	13.040	15.047	15.047	13.040	11.034	11.034	100.311
9.713	9.713	11.479	13.245	13.245	11.479	9.713	9.713	88.303
9.059	9.059	10.707	12.354	12.354	10.707	9.059	9.059	82.358
8.259	8.259	9.761	11.263	11.263	9.761	8.259	8.259	75.085
7.669	7.669	9.063	10.457	10.457	9.063	7.669	7.669	69.716
7.196	7.196	8.504	9.813	9.813	8.504	7.196	7.196	65.419
6.852	6.852	8.098	9.344	9.344	8.098	6.852	6.852	62.293
6.618	6.618	7.822	9.025	9.025	7.822	6.618	6.618	60.167
6.601	6.601	7.801	9.001	9.001	7.801	6.601	6.601	60.007
7.643	7.643	9.032	10.422	10.422	9.032	7.643	7.643	69.478
8.378	8.378	9.901	11.424	11.424	9.901	8.378	8.378	76.161

Fuente: Propia

Tabla 6: Discretización de caudales (Machángara)

Distribución por celdas (m ³ /s)						
C1	C2	C3	C4	C5	C6	Total
5%	10%	35%	35%	10%	5%	100%
0.449	0.897	3.141	3.141	0.897	0.449	8.973
0.377	0.754	2.638	2.638	0.754	0.377	7.537
0.360	0.721	2.522	2.522	0.721	0.360	7.206
0.377	0.754	2.640	2.640	0.754	0.377	7.543
0.400	0.799	2.797	2.797	0.799	0.400	7.992
0.399	0.798	2.793	2.793	0.798	0.399	7.981
0.417	0.834	2.920	2.920	0.834	0.417	8.343
0.770	1.540	5.388	5.388	1.540	0.770	15.395
1.076	2.152	7.531	7.531	2.152	1.076	21.517
1.290	2.580	9.029	9.029	2.580	1.290	25.796
1.270	2.541	8.893	8.893	2.541	1.270	25.408
1.129	2.259	7.905	7.905	2.259	1.129	22.585
0.880	1.761	6.163	6.163	1.761	0.880	17.609
0.723	1.446	5.061	5.061	1.446	0.723	14.461
0.622	1.244	4.353	4.353	1.244	0.622	12.438
0.541	1.082	3.787	3.787	1.082	0.541	10.819
0.478	0.956	3.346	3.346	0.956	0.478	9.559
0.450	0.901	3.152	3.152	0.901	0.450	9.007
0.437	0.874	3.058	3.058	0.874	0.437	8.736
0.411	0.821	2.875	2.875	0.821	0.411	8.214
0.392	0.785	2.747	2.747	0.785	0.392	7.848
0.382	0.763	2.672	2.672	0.763	0.382	7.633
0.379	0.758	2.651	2.651	0.758	0.379	7.575
0.427	0.853	2.986	2.986	0.853	0.427	8.531
0.486	0.973	3.405	3.405	0.973	0.486	9.728

Fuente: Propia

Esta variabilidad de distribución heterogénea del flujo proporciona una representación más precisa de la dinámica hidráulica en el sistema del modelo.

3.5 Simulación Hidráulica

3.5.1. Configuración y Simulación Bidimensional en Delft3D

Para la modelación hidrodinámica bidimensional de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, se utilizó el programa Delft3D, que permite representar con alta precisión los procesos de flujo en cuerpos de agua y confluencias fluviales. A continuación, se detallan los parámetros configurados en el modelo:

Condiciones Iniciales. -Se estableció un nivel de agua uniforme de 8 m en todo el dominio de simulación (**Anexo 5**). Esta configuración permite que el modelo tenga un estado inicial estable antes de la aplicación de los caudales de entrada.

Parámetros Físicos. -En la configuración de constantes hidrodinámicas, se definió la aceleración gravitacional en 9.81 m/s^2 y una densidad del agua de 1000 kg/m^3 (**Anexo 6**). Estos valores corresponden a las condiciones físicas estándar del agua en entornos fluviales.

Rugosidad del Lecho. -Se empleó la fórmula de Manning para representar la rugosidad del lecho fluvial. En este caso, la rugosidad fue ingresada mediante un archivo externo (**Anexo 7**), permitiendo una variabilidad espacial en la rugosidad del fondo del río y asegurando una mejor representación del flujo.

Viscosidad y Difusividad. -Se estableció una viscosidad horizontal uniforme de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ (**Anexo 8**), lo que influye en la disipación de energía dentro del flujo. No se activó el modelo de turbulencia en subescala (Subgrid Scale HLES), lo que sugiere que el modelo se ejecuta con una aproximación estándar de la difusión en dos dimensiones.

Parámetros Numéricos. -Se activó la opción de verificación de secado e inundación en los centros y caras de las celdas para garantizar que el modelo represente correctamente la dinámica de las zonas expuestas y sumergidas.

- Se fijó una profundidad umbral de 0.0001 m para evitar inestabilidades numéricas.
- Se estableció un tiempo de suavizado de 120 minutos, lo que ayuda a estabilizar las transiciones de flujo en el dominio.

Para la advección del momento, se utilizó el esquema de "Flood", que es apropiado para la modelación de caudales variables en ríos (**Anexo 9**).

La simulación del modelo bidimensional en Delft3D se ejecutó durante un tiempo total de 4 horas con 57 minutos, lo que permitió obtener resultados estables en la representación del flujo en la confluencia.

Los principales resultados generados incluyen:

- Velocidades del flujo en toda el área modelada, permitiendo analizar patrones de circulación y zonas de recirculación en la confluencia.
- Niveles y profundidades del agua, fundamentales para la caracterización hidrodinámica del sistema fluvial.

Para facilitar el análisis y la visualización de los datos, se exportaron los resultados en diferentes formatos. En este caso, los datos fueron exportados a ArcGIS en formato shapefile (SHP), lo que permitió extraer información puntual y comparar los resultados con datos de campo o estudios previos.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Comparación de Velocidades Obtenidas con LSPIV

El proceso para la técnica LSPIV inicia con la medición de longitudes referenciales en campo y la obtención de datos de video de la confluencia con un dron. Previo al procesamiento con LSPIV, es necesario realizar una corrección geométrica del video, asegurando que el análisis de velocidad este correctamente escalado y sin distorsiones. Para ello, se realizaron correcciones de ángulos y perspectiva. Se ajustó la inclinación del video para alinear la vista con el plano horizontal del cauce y se establecieron referencias espaciales en la imagen utilizando puntos de control sobre el río como se muestra en la Ilustración 25.



Ilustración 25 Corrección de distorsión y escala del video. Fuente: Propia.

Una vez corregido el video, se ingresó a la aplicación de LSPIV en MATLAB, donde se ejecutó el cálculo de velocidades mediante el análisis del desplazamiento de partículas en la superficie del agua. Se debe considerar que la técnica LSPIV requiere la segmentación del video en fotogramas para analizar los cambios en la textura superficial del flujo y el análisis consiste en la comparación de fotogramas consecutivos para identificar los desplazamientos característicos de

las partículas flotantes. El proceso mencionado generando un mapa de velocidades como se observa en la Ilustración 26, donde la escala de colores representa diferentes magnitudes de velocidad en m/s.

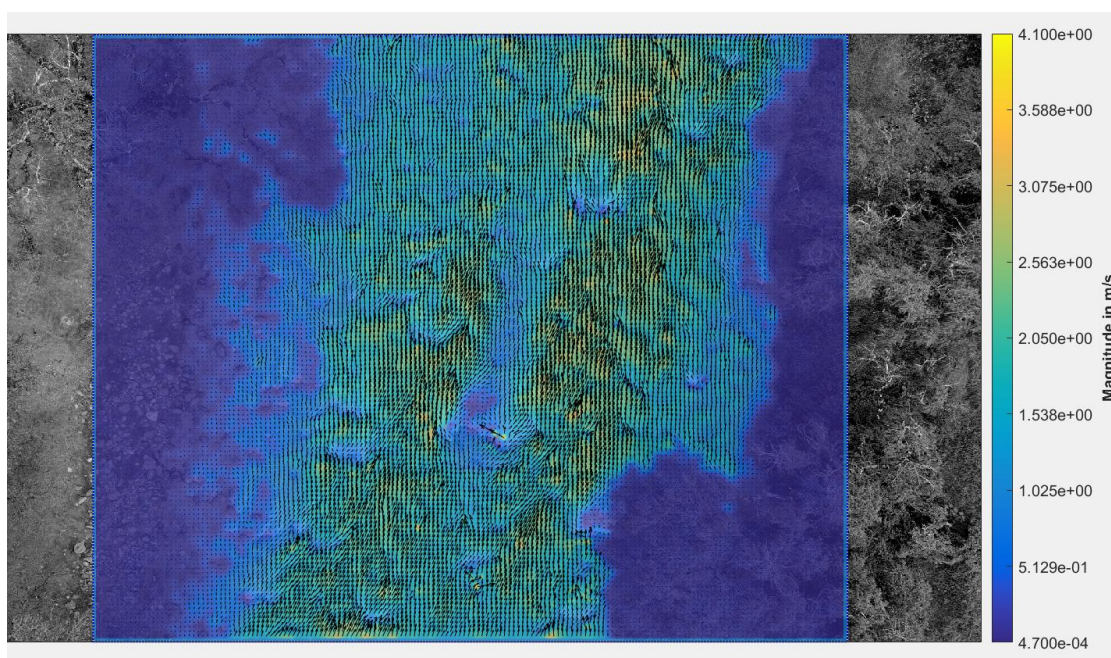


Ilustración 26 Mapa de velocidades LSPIV. Fuente: Propia.

Para validar los datos obtenidos, se trazó una línea de referencia transversal al flujo, en base a la cual se exporta una base de datos con valores de velocidad superficial en distintos puntos. Por otra parte, el modelo Delft3D genera un campo de velocidades sobre una malla computacional que representa la hidrodinámica en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba. Para extraer información de velocidad en un punto de control específico, se optó por exportar la malla de datos como un archivo shapefile (SHP) compatible con ArcGIS, asegurando que los datos espaciales pudieran ser utilizados para análisis detallado.

En la Ilustración 27, se observa la representación del terreno modelado en Delft3D, junto con la malla de velocidades y la sección de control utilizada para la comparación con LSPIV. Esta sección fue ubicada en la misma posición que la línea transversal trazada en MATLAB, permitiendo una comparación directa de las velocidades estimadas por ambos métodos. Esto permite realizar un análisis comparativo y evaluar la coherencia de los resultados obtenidos con las características esperadas del flujo en la confluencia.

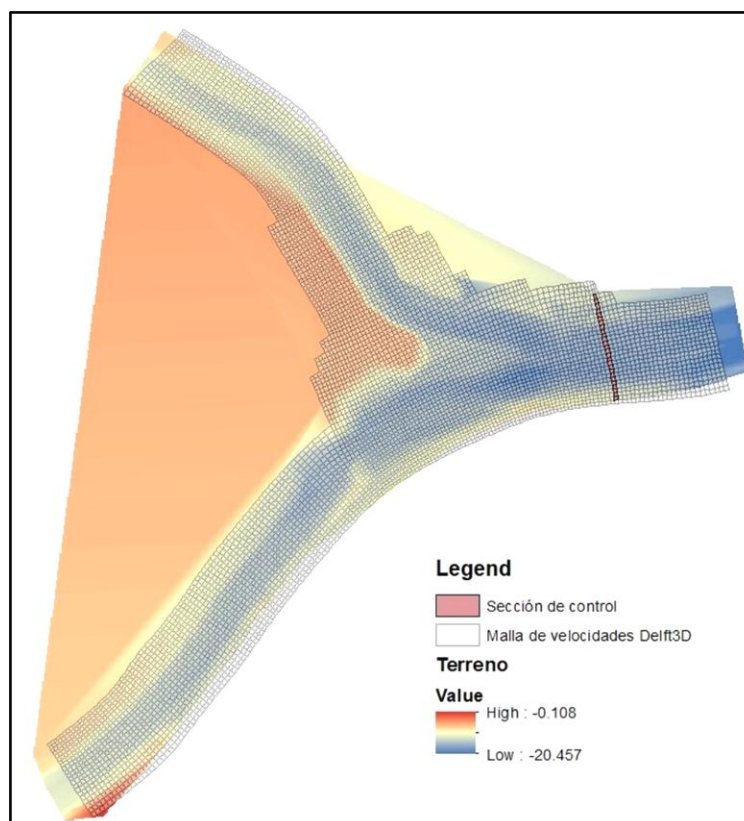


Ilustración 27 Sección de velocidades Delft3D exportadas. Fuente: Propia.

Con los datos de velocidad extraídos de Delft3D y los datos obtenidos mediante LSPIV, se realizó una comparación cuantitativa. En la Ilustración 28, se presenta la comparación de

velocidades a lo largo de la sección transversal, los puntos rojos corresponden a las velocidades medidas con LSPIV y la línea azul representa las velocidades simuladas por Delft3D.

La ilustración 28 presenta la comparación entre las mediciones experimentales de velocidad obtenidas mediante LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) y los resultados de la modelación bidimensional con Delft3D en una sección específica de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba. A lo largo de la sección analizada, se observa un aumento progresivo de la velocidad del flujo hasta alcanzar un punto máximo, seguido de una disminución abrupta en la parte final. En términos generales, el modelo numérico captura la tendencia del flujo, aunque se evidencian discrepancias en ciertos puntos con respecto a las mediciones experimentales.

Al analizar las diferencias entre el modelo y la medición, se observa que Delft3D tiende a subestimar la velocidad máxima en comparación con los valores medidos mediante LSPIV. Esta diferencia puede deberse a ciertas limitaciones en la representación de fenómenos turbulentos y vórtices presentes en la confluencia. Además, las mediciones experimentales presentan fluctuaciones más pronunciadas que el modelo, lo que podría indicar que el método LSPIV es más sensible a pequeñas variaciones superficiales del agua, mientras que el modelo numérico suaviza el comportamiento del flujo.

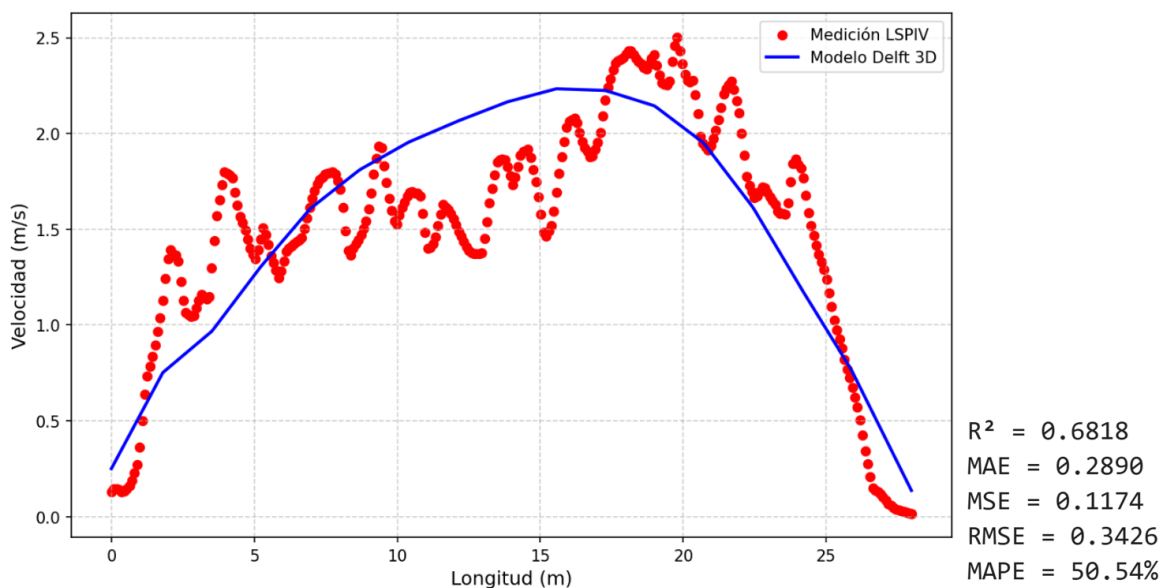


Ilustración 28 Comparación de velocidades en la sección transversal de la confluencia. Fuente: Propia.

Los indicadores estadísticos de validación reflejan el nivel de ajuste del modelo con respecto a las mediciones reales. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.6818$) indica que el modelo explica aproximadamente un 68.18% de la variabilidad de los datos medidos, lo cual es aceptable, pero deja margen para mejoras en la calibración. Asimismo, el error absoluto medio ($MAE = 0.2890$ m/s) señala una desviación promedio entre los valores simulados y observados, evidenciando una ligera subestimación de las velocidades por parte del modelo. Por otro lado, el error cuadrático medio ($MSE = 0.1174$) y la raíz del error cuadrático medio ($RMSE = 0.3426$ m/s) reflejan la magnitud de los errores individuales, siendo el RMSE una métrica clave para evaluar la dispersión de los errores respecto a los valores medidos. Finalmente, el error porcentual absoluto medio ($MAPE = 50.54\%$) es relativamente alto, lo que sugiere que las desviaciones en ciertos puntos específicos son significativas, probablemente debido a la parametrización de la rugosidad del lecho o a las condiciones de contorno utilizadas en la simulación.

4.2 Resultados del Modelo Bidimensional

Se aplicó un modelo hidrodinámico bidimensional utilizando Delft3D para analizar las características hidráulicas de una confluencia de un sistema fluvial. Para la simulación propuesta, se emplearon datos recopilados de estaciones meteorológicas ubicadas aguas arriba de la confluencia del río Machángara y Tomebamba. El módulo fue calibrado para representar el evento de precipitación máxima registrada en un periodo de 24 horas, comprendido entre el 11 y el 12 de octubre del 2014, con el fin de evaluar las respuestas hidrodinámicas del sistema.

4.2.1. Mapas de Distribución de Velocidades y Niveles de Agua

Para la distribución de velocidades observada en la Ilustración 29, se identifican zonas de estancamiento aguas abajo del río Machángara con variaciones desde los 0.5 m/s hasta 1 m/s, en proximidad a la confluencia con el río Tomebamba. Por otro lado, se puede identificar zonas de recirculación en la región de la confluencia, caracterizadas por la presencia de vórtices generados por la interacción de las corrientes de ambos ríos.

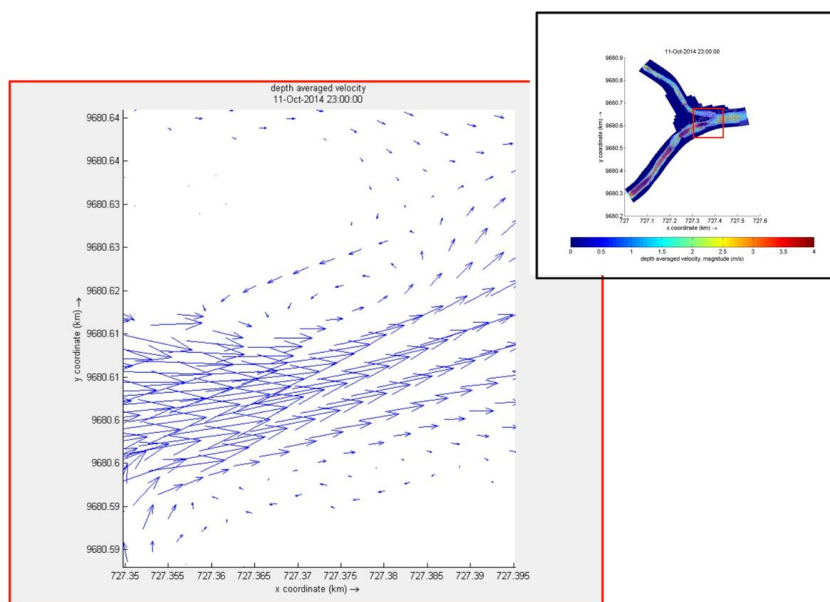


Ilustración 29: Recirculación de flujo en la confluencia Machángara - Tomebamba. Fuente: Propia.

Dentro de la confluencia, se observa que la velocidad en el margen derecho es superior a la velocidad del margen izquierdo variando desde 2 m/s a 3 m/s, lo que sugiere una distribución asimétrica del caudal. Adicionalmente, aguas arriba de la confluencia, en el río Tomebamba se identifica zonas de aceleración de velocidad, relacionadas con la topografía del lecho.

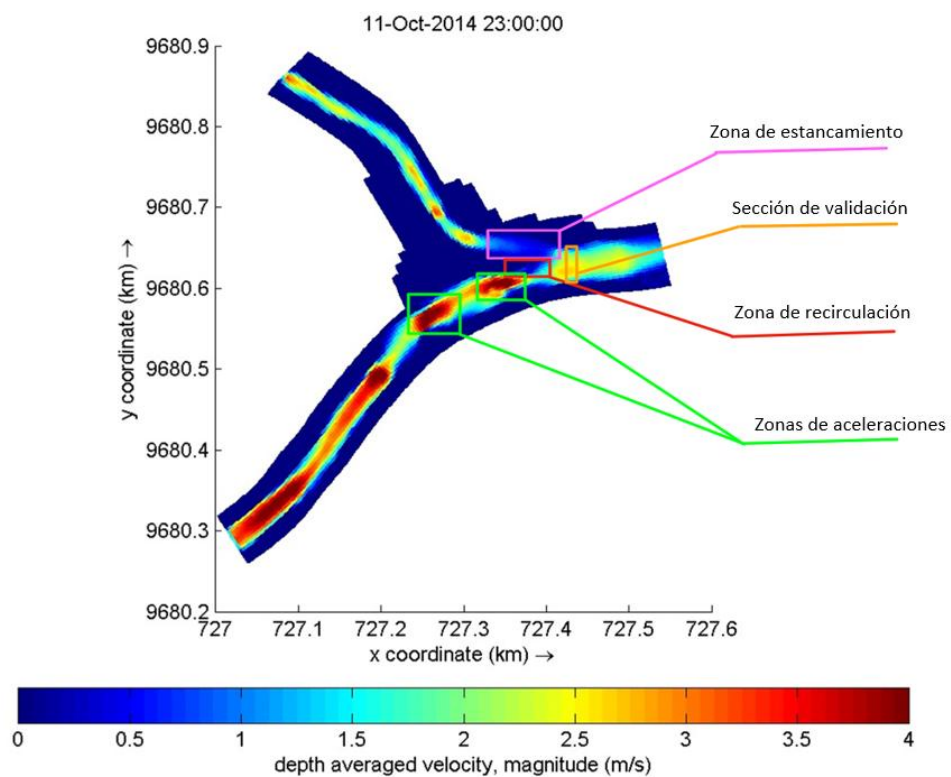


Ilustración 30: Velocidad promedio en la confluencia Machángara - Tomebamba. Fuente: Propia.

Según la Ilustración 31, el río Machángara presenta una altura de agua aproximada de un metro aguas arriba de la confluencia mientras que el río Tomebamba alcanza una altura promedio de dos metros en la misma región. Se observa que, en la zona de confluencia, la altura de agua aumenta a 2.5 metros, evidenciando un proseo de acumulación y mezcla de caudales.

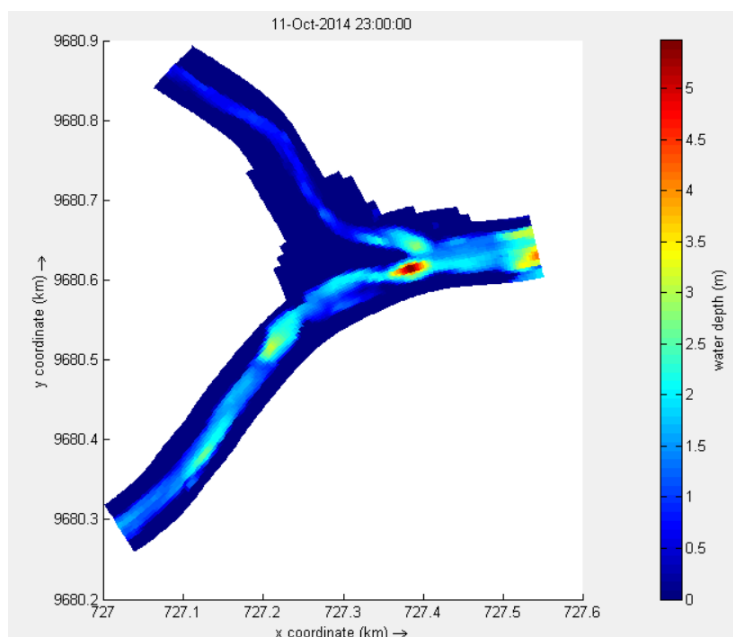


Ilustración 31: Profundidad del agua en la confluencia Machángara - Tomebamba. Fuente: Propia.

El valor de altura de agua de la confluencia no es uniforme, ya que se ve influenciado por la topografía del lecho del río, presentando una diferencia notable entre los márgenes: el lado izquierdo exhibe una cota más baja en comparación con el lado derecho, lo que contribuye a la variabilidad en la distribución de profundidad del flujo.

4.2.2. Identificación de Zonas de Esfuerzo Cortante

Las zonas de cizallamiento, reflujos, mezcla y aceleración del flujo están estrechamente relacionadas con la presencia de esfuerzos cortantes significativos en el lecho del río, los cuales producen generar procesos de erosión en los límites del flujo.

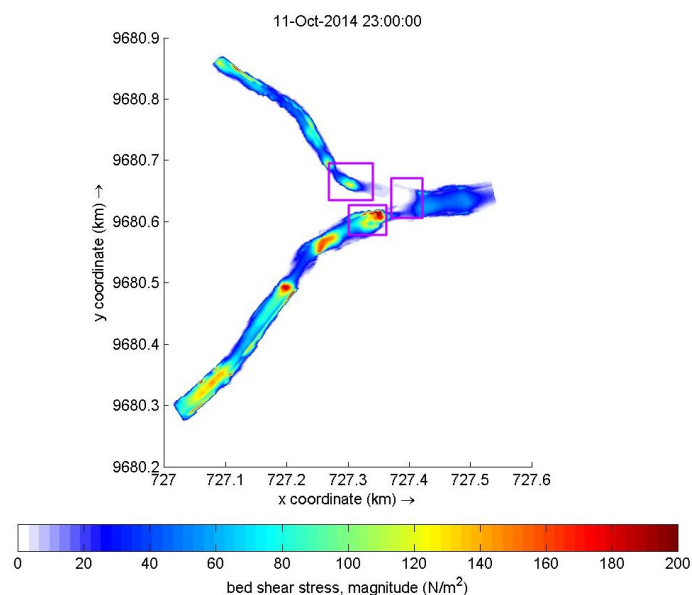


Ilustración 32: Esfuerzo cortante del lecho de la confluencia Machángara - Tomebamba. Fuente: Propia.

Los esfuerzos cortantes en el fondo es una variable clave en la dinámica fluvial y depende directamente de la relación entre velocidad del flujo y la profundidad del agua. A mayor velocidad y menor profundidad, los esfuerzos cortantes aumentan, intensificando los procesos de transporte de sedimentos y modificación morfológica del cauce. son directamente proporcionales a la relación de la velocidad del flujo con respecto a su profundidad.

Para la evaluación de las características dinámicas de la confluencia, los valores de esfuerzos cortantes en fondo, obtenidos a partir de la simulación con Delft3D se presentan en la Ilustración 32.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El presente estudio sobre la modelación bidimensional de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba ha permitido caracterizar la hidrodinámica de este sistema fluvial. A través de la aplicación de modelos numéricos en Delft3D, se lograron obtener resultados precisos que aportan al entendimiento de los procesos hidráulicos que ocurren en la confluencia. A continuación, se detallan las principales conclusiones respecto a los objetivos del estudio.

La dinámica del flujo en la confluencia está principalmente influenciada por la topografía del lecho y la diferencia de interacción de caudales entre los dos ríos. Los resultados más relevantes muestran una variabilidad en la distribución de velocidades, con zonas de recirculación y esfuerzos cortantes significativos en los márgenes y zonas centrales del río Tomebamba lo que sugiere una alta probabilidad de socavación en determinados sectores. Asimismo, la presencia de recirculación y estancamiento del flujo podría generar acumulación de sedimentos, afectando la estabilidad del cauce y la calidad del agua. Además de zonas de estancamiento en la confluencia del río Machángara y una estabilización del flujo en la confluencia. Estos factores pueden contribuir a procesos erosivos y alteraciones en la morfología del cauce.

La recopilación y análisis de datos hidrométricos y batimétricos son fundamentales para la modelación numérica. Los datos de caudales característicos y geometría del cauce son necesarios para definir con precisión la geometría y las condiciones de contorno del modelo, asegurando una representación confiable del comportamiento del flujo.

La comparación de los datos modelados con mediciones experimentales permitió validar los resultados obtenidos en Delft3D. El análisis de validación mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.682, lo que indica una correspondencia aceptable entre los valores observados y los simulados. No obstante, se identificaron algunas discrepancias que podrían atribuirse a limitaciones en la resolución espacial de las mediciones de campo. En conclusión, el modelo implementado en Delft3D logra representar la tendencia general del flujo, pero muestra desviaciones en la estimación de velocidades locales, especialmente en zonas donde la turbulencia y la interacción entre los caudales de los ríos generan complejidades hidráulicas difíciles de modelar con precisión.

La implementación del modelo bidimensional permitió analizar de manera detallada los patrones de flujo en la confluencia, demostrando su utilidad para estudios de hidrodinámica fluvial. En conclusión, la modelación bidimensional ha proporcionado información valiosa para la gestión de los sistemas fluviales y la planificación de infraestructuras en la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados por entidades locales para la toma de decisiones en el manejo del cauce y la mitigación de impactos ambientales asociados a la dinámica fluvial.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar mediciones de validación en más puntos de la confluencia, considerando diferentes épocas del año y variaciones en los caudales. Esto permitiría obtener una validación más representativa del comportamiento del flujo en distintos escenarios hidrológicos. A pesar de que el método LSPIV demostró ser una herramienta útil en la validación del modelo,

se identificó que la vegetación densa en las riberas puede interferir con la captura de imágenes.

Para mejorar la precisión de esta técnica, se recomienda:

Realizar la captura de datos en periodos en los que la vegetación sea menos densa.

Complementar la medición con imágenes tomadas desde diferentes ángulos o utilizando cámaras con sensores multiespectrales que reduzcan la interferencia visual.

Implementar un protocolo de despeje controlado en puntos estratégicos donde la vegetación pueda ser removida sin afectar el ecosistema.

Uso de modelos tridimensionales para mejorar la representación del flujo

Aunque la modelación bidimensional proporcionó resultados detallados, en escenarios con variaciones verticales significativas (como cambios abruptos en la batimetría o turbulencias marcadas), la implementación de modelos tridimensionales podría aportar mayor precisión en la simulación de esfuerzos cortantes y patrones de mezcla.

Dado que la dinámica del cauce puede cambiar con el tiempo debido a la erosión, sedimentación y variabilidad en los caudales, se recomienda realizar estudios periódicos de batimetría y velocidad de flujo para actualizar los modelos y mejorar su precisión predictiva.

Con base en los resultados obtenidos, se sugiere evaluar posibles intervenciones en las zonas identificadas como propensas a erosión y sedimentación. Esto podría implicar un análisis posterior a este estudio para determinar obras adecuadas de protección en márgenes, revegetación controlada y estructuras hidráulicas que regulen la distribución del flujo.

Dada la precisión de la modelación en la confluencia Machángara-Tomebamba, se recomienda replicar esta metodología en otros puntos críticos de la ciudad de Cuenca. Esto permitiría mejorar la gestión de los sistemas fluviales y la planificación de intervenciones en zonas con hidrodinámicas que lo requieran. Para mejorar la exactitud del modelo, se recomienda ajustar los coeficientes de rugosidad, refinar la resolución de la malla computacional y considerar la implementación de otras metodologías de validación como el uso de ADCP o trazadores.

BIBLIOGRAFÍA.

- Arbat-Bofill, M., Martí-Cardona, B., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Niñerola, D., Dolz, J., Prats, J., & Cea, L. (2015). *Modelación numérica (2D y 3D) de la hidrodinámica en el entorno de la confluencia Ebro-Segre* [Informe técnico].
- Armstrong, J. S. (1985). *Long-range forecasting: From crystal ball to computer* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Atencia, M. C., & Verbel, M. (2021). *Modelación hidrodinámica y de la calidad del agua para evaluar la capacidad de asimilación de vertimientos del río Sinú (tramo Sierra Chiquita—Universidad de Córdoba)* [Tesis de pregrado, Universidad de Córdoba].
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/4364>
- Barbolla, J. G. (2024). *Implementación de LSPIV para estudiar el flujo en una superficie libre* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000852852/3/0852852.pdf>
- Basile, P. A., Riccardi, G., Peruzzo, F. & Garcia, M. (2016). *Modelación hidrodinámica bidimensional del río Paraná inferior. Aqua-LAC*, 8(2), 1-13.
- Best, J. L. (1987). Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology. En K. S. Richards (Ed.), *Recent developments in fluvial sedimentology* (pp. 27–35). SEPM (Society for Sedimentary Geology).
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). *Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

- Bruckner, M. Z. (2007). *Using hydrological tracers to characterize a watershed. Environmental Sampling*.
https://serc.carleton.edu/microbelife/research_methods/environ_sampling/hydrotrace.html
- Carriquí, P. M. (2012). *Estudio batimétrico río Ebro: Tramo Puente del Milenio* [Trabajo de fin de grado, Escuela Politécnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2099.1/15895>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE. Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250.
<https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chima, J. M., & Toledo, D. F. (2022). *Uso de UAV para el levantamiento de variables hidrológicas en la gestión de la subcuenca del río Yanuncay, área dentro de los AMA, Cuenca-Ecuador* [Informe académico]. Escuela Politécnica Salesiana.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Chow, V.T. (1999). *Hidráulica de Canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Daniel, D. C. (2011). *Simulaciones hidrodinámicas alternativas basadas en partículas* [Informe técnico]. ETS de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid.
<https://dcain.etsin.upm.es/~daniel/ProyectoInvestigador.pdf>
- Dee, D. P. (1997). A pragmatic approach to model validation. En D. L. T. Anderson & J. Willebrand (Eds.), *Proceedings of the ECMWF seminar on validation of models over Europe* (pp. 1–13). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/CE047p0001>
- Deltares. (s.f.). *Delft3D FLOW user manual* (Versión 4.05) [Manual de usuario]. Deltares.
<https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>

Deltares. (s.f.). *Delft3D PART user manual* (Versión 3.0) [Manual de usuario]. Deltares.

<https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>

Deltares. (s.f.). *Delft3D RGFGRID user manual* (Versión 7.000) [Manual de usuario]. Deltares.

<https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>

Deltares. (s.f.). *Delft3D WAVE user manual* (Versión 4.05) [Manual de usuario]. Deltares.

<https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>

Fernández de Córdova Webster, C. J., León Méndez, A. J. F., Rodríguez López, Y., Martínez

Ramírez, P. G., & Meneses Meneses, D. M. (2018). *Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales*. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1),

17–31.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100002&lng=es&tlng=es)

[03382018000100002&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100002&lng=es&tlng=es)

Freitez, C., Martínez, F., & Rincón, J. C. (2017). *Evaluación hidráulica de los puentes sobre la*

quebrada La Guardia aplicando un modelo bidimensional con fondo móvil. *Revista*

INGENIERÍA UC, 24(2), 196-203. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70753474007>

García, M. H. (2008). *Ingeniería de sedimentación: Procesos, mediciones, modelado y práctica*

(Manual e informe sobre prácticas de ingeniería n.º 110). Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.

Gyssels, P., Marcelo Baldissone, C., Hillman, G., Rodriguez, A., Bosc, J., Corral, M., Pagot, M.,

Brea, D., Spalletti, P., & Farias, H. D. (2013). *Aplicaciones del modelo numérico Delft3D a diferentes problemas hidrosedimentológicos en casos argentinos* [Informe técnico].

Pilcomayo.net. https://www.pilcomayo.net/media/uploads/biblioteca/libro_1470056639.pdf

- Herrero, H., García, C. M., Patalano, A., & Szupiany, R. (2013). *Evaluación experimental de la hidrodinámica y procesos de mezcla en la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo* [Informe técnico]. Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. <http://hdl.handle.net/11086/30069>
- Hydrologic Engineering Center. (2021). *Introduction to HEC-RAS*. Army.Mil. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest/introduction-to-hec-ras>
- Kokinou, E. (2021). Automatic pattern recognition and GPS/GNSS technology in marine digital terrain model. En G. Gikas (Ed.), *GPS and GNSS technology in geosciences* (pp. 241–254). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818617-6.00019-6>
- Lasso, C. A. (2017). *Modelación numérica con OpenFOAM del flujo de los paneles sumergidos y comparación numérica-experimental* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19218>
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). *Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation*. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Martínez, D. X., & Solano, H. A. (2020). *Determinación del coeficiente de rugosidad del río Tomebamba por fórmulas empíricas* [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10272>
- Méndez, C. D., & Vásquez, G. D. (2021). *Modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca del río Machángara para evaluar zonas de inundación* [Tesis pregrado, Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/62e7cca5-9bf3-4ad3-9773-4f232114b2fc>

- Munar Samboní, A. M., & Méndez Pedroza, N. M. (2021). *Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en un ecosistema estuarino urbano con incidencia maregráfica y vertimientos de aguas residuales*. *Entramado*, 17(1). <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.7285>
- Neary, V. S., Saleh, F., & Gunawan, B. (2011). *Hidráulica de zonas de baja velocidad en ríos*. *Revista de Investigación Hidráulica*, 49(5), 585–592.
- Ochoa García, S. A., Matovelle Bustos, C. M., Córdova González, N. F., & Maldonado Noboa, C. H. (2023). *Three-dimensional hydrodynamic modeling in the confluence of Yanuncay and Tarqui rivers, Province of Azuay-Ecuador*. Ponencia presentada en el 27th International Congress on Project Management and Engineering, Donostia-San Sebastián, España, 10–13 de julio de 2023.
- Ochoa, S. A., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Patalano, A., & Labaque, M. (2014). *Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales*. *MASKANA*, 5, 83–95. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/556>
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, J. M. (2016). *Modelación Hidrodinámica del tramo Medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba*. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(2), 95–101. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/11847>
- Ojeda Bustamante, W., Flores Velázquez, J., & Ontiveros Capurata, R. E. (2016). *Uso y manejo de drones*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/uso-y-manejo-de-drones.pdf
- Ojeda Bustamante, W., González Sánchez, A., Mauricio-Pérez, A., & Flores-Velázquez, J. (2017). *Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería*

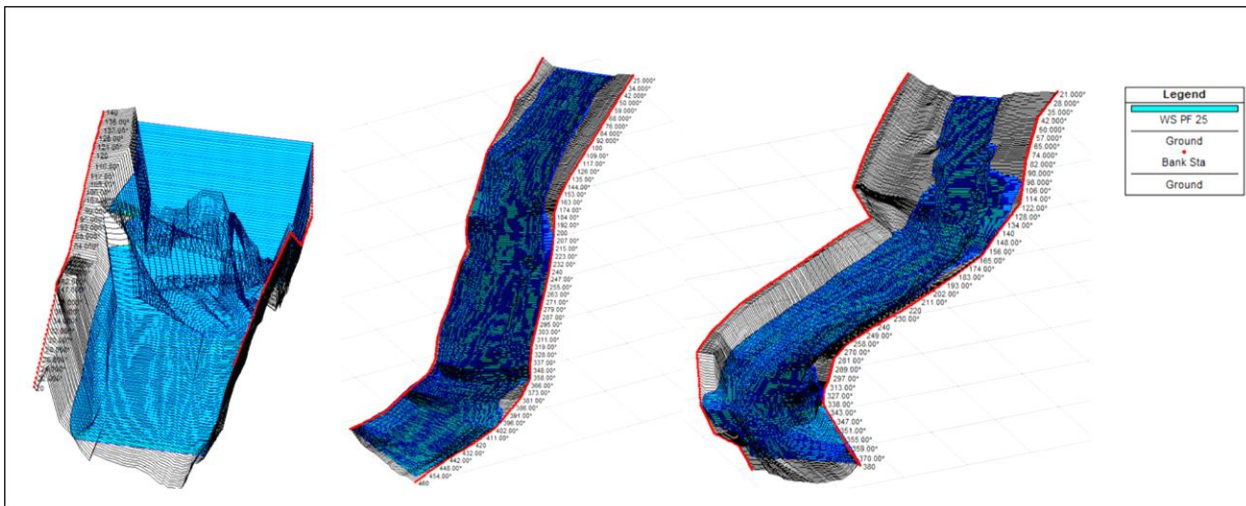
- hidroagrícola. Tecnología y ciencias del agua*, 08(4), 157–166. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2017-04-10>
- Oliveras, J. (2013, marzo 25). *Condiciones de contorno en HEC-Ras, simulación en régimen permanente*. *HidroJING*. <https://www.hidrojing.com/condiciones-de-contorno-en-hec-ras/>
- Oliveras, J. (2016, febrero 22). *Como seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales*. *HidroJING*. <https://www.hidrojing.com/como-seleccionar-el-coeficiente-de-rugosidad-de-manning-en-cauces-naturales/>
- Ortega, J. C., & Rebolledo, M. R. (2020). *Análisis de Herramientas de Modelización Hidráulica Bidimensional*. *Wsp.com*. <https://www.wsp.com/-/media/Insights/Spain/Documents/Analisis-de-Herramientas-de-Modelizacion-Hidraulica-Bidimensional.pdf>
- Ovalles, Y., Méndez Vergara, E., & Ramírez, G. (2008). *Ordenación de cuencas hidrográficas. Un reto al conocimiento, la acción y la gestión*. *La Revista Forestal Venezolana*, 52(2), 241+. <https://link.gale.com/apps/doc/A303756947/IFME?u=anon~8d825954&sid=googleScholar&xid=b557d683>
- Pérez, G. B., Rodríguez, J. A., & Molina, J. P. (2018). *Ingeniería de ríos* [Apuntes de clase, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. <http://hidraulica.umich.mx/bperez/APUNTES%20INGENIER%20C3%8DA%20DE%20R%20C3%8DOS-AGO-2018%20V-3.pdf>
- Pozzi Piacenza, C. E., Marquez Damian, S., Herrero, H. S. J., Ragessi, I. M., Furlan, P., & Garcia Rodriguez, C. M. (2014). *Evaluación de Simulaciones Numéricas Bi y Tridimensionales del*

- Flujo en una Confluencia Fluvial. Asociación Argentina de Mecánica Computacional; Mecánica Computacional*, 6, 9. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/43026>
- Quinn, W. L., & Bruce, L. R. (2018). *LSPIV measurements of two-dimensional flow structure in streams using small unmanned aerial systems. Water Resources Research*, 54(12), 10165–10179. <https://doi.org/10.1029/2018WR022550>
- Rhoads, B. L., & Kenworthy, S. T. (1995). *Flow structure at an asymmetrical stream confluence. Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 11(4), 273–293. [https://doi.org/10.1016/0169-555x\(94\)00069-4](https://doi.org/10.1016/0169-555x(94)00069-4)
- Ritter, D. F., Dury, G. H., Schumm, S. A., & Lustig, L. K. (2025, marzo 8). *Río. Enciclopedia Británica*. <https://www.britannica.com/science/river>
- Rueda-Bayona, J. G., Osorio, A. F. & Guzmán, A. (2020). *Set-up and input dataset files of the Delft3d model for hydrodynamic modelling considering wind, waves, tides and currents through multidomain grids. Data in Brief*, 28, 104921. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104921>
- Ruiz, D. A. (2015). *Metodología para simular la dinámica marina en el Mar Caribe usando DELFT3D*. Core.ac.uk. <https://core.ac.uk/download/pdf/47250593.pdf>
- SAWSC. (2016). *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) to measure streamflow*. USGS. <https://www.usgs.gov/media/images/acoustic-doppler-current-profiler-adcp-measure-streamflow>
- Segarra Rojas, J. M. (2016). *Impacto del cambio del uso de suelo sobre la calidad del agua del río Tomebamba* [Tesis de maestría, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6481>

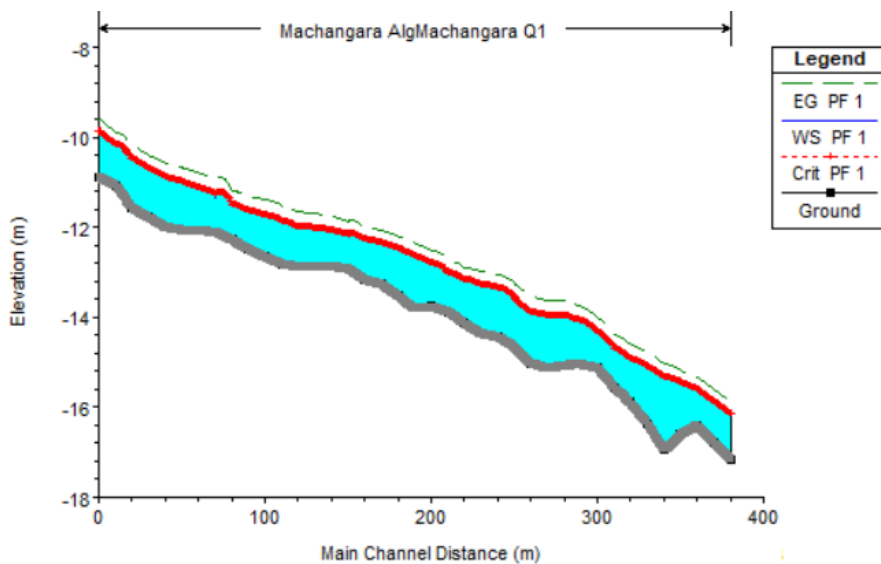
- Tacuri, H. J. (2023). *Análisis del coeficiente de rugosidad en ríos de montaña mediante la aplicación de modelos hidráulicos bidimensionales (2D)* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c5271b9f-d085-4047-bdf2-7911f9ecf2fa/content>
- TELEMAC-2D - two-dimensional hydrodynamic. (2013). *Opentelemac.org*. <https://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=17>
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2(1), e30. <https://doi.org/10.5334/jors.bl>
- Thome, C. R., & Zevenbergen, L. W. (1985). *Estimating Mean Velocity in Mountain Rivers*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(4), 612–624. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:4\(612\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:4(612))
- Torres Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). *La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia*. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Vallés, F. J. (2018). *Estudios y diseños de ingeniería de ríos y restauración fluvial*. La Librería UPV. <https://aplicat.upv.es/exploraupv/ficha-servicio/capacidad/14402>
- Vashist, K., & Singh, K. K. (2023). *HEC-RAS 2D modeling for flood inundation mapping: a case study of the Krishna River Basin*. *Water Practice & Technology*, 18(4), 831-844. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.048>

- Warren, I. R., & Bach, H. K. (1992). *MIKE 21: A modelling system for estuaries, coastal waters and seas*. *Environmental Software*, 7(4), 229–240. [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(92\)90006-p](https://doi.org/10.1016/0266-9838(92)90006-p)
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- World Meteorological Organization (WMO). (2009). *Manual on low-flow estimation and prediction* (WMO-No. 1029). WMO. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=10130
- Yuan, S., Lin, H., Tang, H., Qiu, J., Li, Z., Xu, D., Luo, X., & Gualtieri, C. (2024). *An optimized entropy-based model for estimating river confluence hydrodynamics: Accounting for the effects of velocity dip*. *Journal of Hydrology*, 628, 130408. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130408>
- Zucarelli, G. V., & Ceirano, E. B. (2024). *Determinación de la rugosidad de manning en el tramo medio del río paraná*. *Abrhidro*. <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/155/345.pdf>

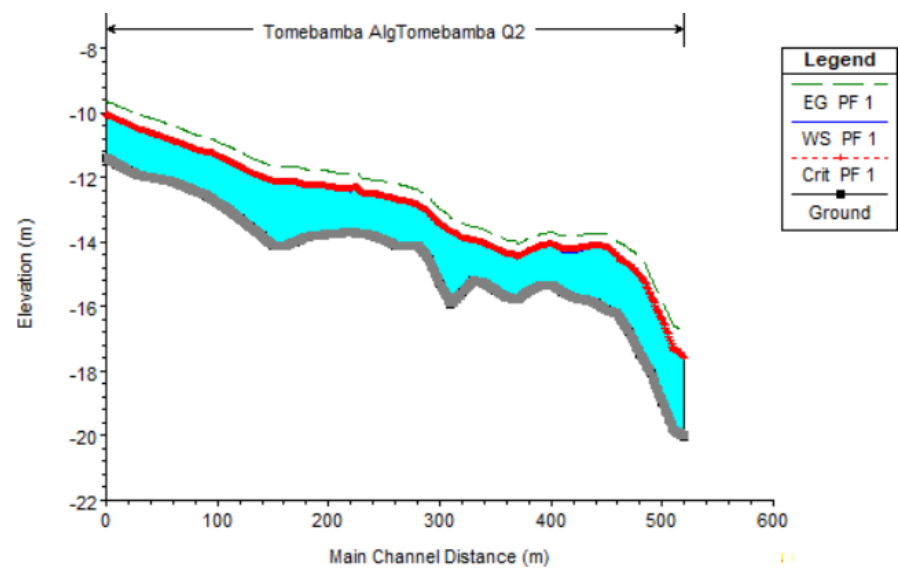
ANEXOS:



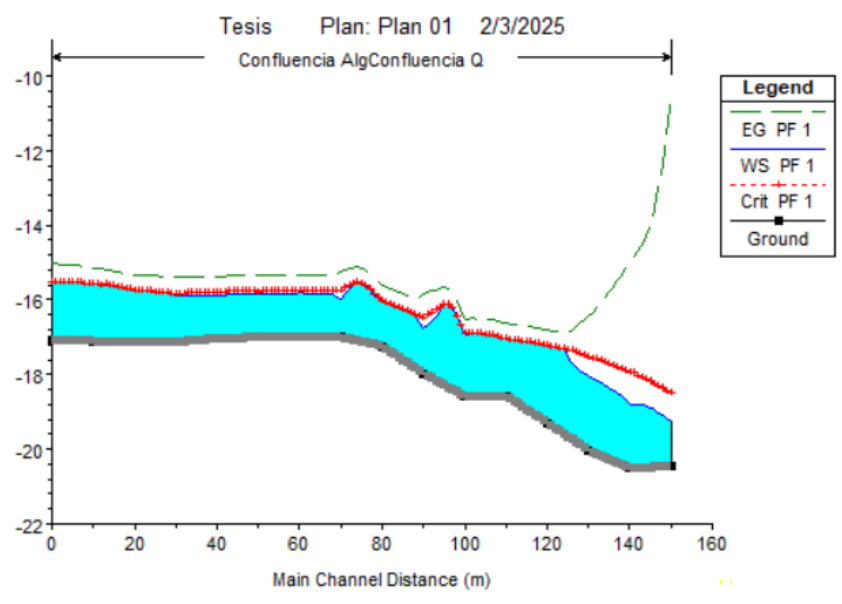
Anexo 1 : Vista 3D Modelo Unidimensional Hec-Ras Alineaciones Confluencia, Tomebamba y Machángara



Anexo 2 : Perfil Longitudinal Machángara modelo Hec-Ras



Anexo 3: Perfil Longitudinal Tomebamba modelo Hec-Ras



Anexo 4 : Perfil Longitudinal Confluencia modelo Hec-Ras

Initial conditions

Uniform values

File :

Water level [m]

Anexo 5 : Condiciones iniciales Delft3D

Constants | Roughness | Viscosity

Hydrodynamic constants

Gravity [m/s²]

Water density [kg/m³]

Anexo 6 : Parámetros físicos Delft3D

Description
Domain
Time frame
Processes
Initial conditions
Boundaries
Physical parameters
Numerical parameters
Operations
Monitoring
Additional parameters
Output

Constants | **Roughness** | Viscosity

Bottom roughness

Roughness formula: Manning

Uniform U: 65 V: 65

File

File: ..\Rugosidad.rgh

Wall roughness

Slip condition: Free

Roughness length: 0 [m]

Anexo 7: Rugosidades Delft3D

Description
Domain
Time frame
Processes
Initial conditions
Boundaries
Physical parameters
Numerical parameters
Operations
Monitoring
Additional parameters
Output

Constants | Roughness | **Viscosity**

Background horizontal viscosity/diffusivity

Uniform

Horizontal eddy viscosity 1 [m²/s]

File

File: Filename unknown

Model for 2D turbulence

Subgrid scale HLES

Anexo 8: Viscosidad horizontal Delft3D

Numerical parameters

Drying and flooding check at: Grid cell centres and faces
 Grid cell faces only

Depth at grid cell faces: [m]

Threshold depth: [m]

Marginal depth: [m]

Smoothing time: [min]

Advection scheme for momentum: [m]

Threshold depth for critical flow limiter: [m]

Anexo 9: Parámetros numéricos Delft3D

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros, **Wilson Alexander Lema Nacipucha** y **Edwin Oswaldo Vile Corte** portadores de las cédulas de ciudadanía N.º 0107301533 y 0106172547. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Modelación bidimensional de la confluencia de los ríos Machángara y Tomebamba, con Delft3D”** 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, 9 de abril de 2025

F: 
Wilson Alexander Lema Nacipucha
0107301533

F: 
Edwin Oswaldo Vile Corte
0106172547