



Universidad del Azuay

Departamento de Posgrados

MAESTRÍA EN HIDROSANITARIA

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO TOMEBAAMBA EN UN TRAMO URBANO DE CUENCA- ECUADOR

Autores:

**KARELYS NICOLE AGUIRRE JARA
JUAN MARTÍN VÁZQUEZ SERRANO**

Director:

ING. MSC. PATRICIA ALEJANDRA PALACIOS ROMERO

**Cuenca – Ecuador
2025**

Dedicatoria

Agradezco principalmente a Dios, por concederme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para alcanzar este propósito; a mis padres, por su ejemplo de integridad y sacrificio, pilares fundamentales en mi vida y en cada logro alcanzado; a mis hermanos, por su constante apoyo y por compartir conmigo los valores que nos unen como familia; a mi esposo, por su comprensión, aliento y compañía incondicional a lo largo de este camino; y a mi hija, razón de mi mayor esfuerzo y fuente de inspiración para seguir superándome cada día.

Karelys Nicole Aguirre Jara

Dedico este trabajo a mi familia, quienes han sido mi mayor fuente de fortaleza y motivación. Tanto a mi madre como a mi padre; Fernanda y Juan, por su amor incondicional, sus enseñanzas y sacrificios a lo largo de mi vida. A mis hermanos; Alejandra y Eduardo, por su compañía, apoyo incondicional y confianza. Finalmente; a mis abuelos, quienes con su ejemplo y cariño han dejado huellas imborrables en mi camino.

Juan Martin Vázquez Serrano

Agradecimiento

Expreso mi más profundo agradecimiento a la Ingeniera Patricia Palacios, tutora de este trabajo, por su valiosa guía, paciencia y compromiso durante el desarrollo de la investigación; a mi compañero de tesis, Martín, por su dedicación, apoyo y compañerismo que hicieron posible culminar con éxito este proyecto; a la Universidad del Azuay, por brindarme los conocimientos, las herramientas y el espacio académico necesarios para mi formación profesional y personal; y a mi familia, por su amor incondicional, comprensión y respaldo permanente, pilares fundamentales que me han impulsado a seguir adelante y alcanzar esta meta.

Karelys Nicole Aguirre Jara

Expreso mi profundo agradecimiento a quienes hicieron posible la culminación de este trabajo de titulación. A mi tutora; Ing. Patricia Palacios, por su guía, paciencia y compromiso durante el desarrollo de este proyecto. Su acompañamiento fue fundamental para avanzar con claridad y determinación. A mi compañera; Ing. Karelys Aguirre, por su colaboración constante, dedicación y apoyo en cada etapa del proyecto. Y nuevamente a mi familia; Fernanda, Juan, Alejandra y Eduardo, por su respaldo emocional, motivación y confianza, que me impulsaron a alcanzar esta meta.

Juan Martin Vázquez Serrano

Resumen

Las inundaciones urbanas representan una de las amenazas naturales más frecuentes y con mayores impactos sociales y económicos en la ciudad de Cuenca, Ecuador. El río Tomebamba, al atravesar zonas densamente pobladas, ha presentado eventos de desbordamiento recurrentes que ponen en riesgo a la población y a la infraestructura. Sin embargo, la gestión actual se centra principalmente en medidas reactivas, sin un enfoque preventivo basado en modelos técnicos de predicción.

El presente estudio desarrolla un modelo hidráulico del tramo urbano del río Tomebamba (7,88 km) mediante el uso del software HEC-RAS, a partir de información hidrométrica, topográfica y levantamientos fotogramétricos con drones. La metodología incluyó la delimitación de secciones transversales, la determinación de coeficientes de rugosidad de Manning y el análisis de distintos escenarios de caudal máximo en Abril del 2017 de 251.762 l/s, caudal medio correspondiente al mes de Octubre del 2014 de 17.998 l/s, y caudal mínimo en el Octubre del 2014 de 3.315 l/s.

Los resultados muestran zonas críticas de inundación en sectores como el Puente Roto, el Teatro Carlos Cueva Tamariz, la Av. Doce de Abril, Puertas del Sol y el Parque El Paraíso, donde se evidenció la vulnerabilidad de áreas urbanas ante caudales máximos superiores a 250 m³/s. Asimismo, el modelo confirma la capacidad de ciertos tramos para contener el flujo bajo condiciones medias.

En conclusión, la construcción del modelo hidráulico constituye una herramienta técnica esencial para identificar las áreas más expuestas, mejorar la planificación territorial y orientar medidas de mitigación estructurales y no estructurales, contribuyendo a la seguridad y desarrollo de la ciudad.

Palabras clave: *inundaciones, modelación hidráulica, río Tomebamba, HEC-RAS, gestión de riesgos.*

Abstract

Urban flooding represents one of the most frequent natural hazards with the greatest social and economic impacts in the city of Cuenca, Ecuador. The Tomebamba River, which flows through densely populated areas, has experienced recurrent overflow events that threaten both the population and urban infrastructure. However, current management efforts are mainly reactive, lacking a preventive approach based on technical prediction models.

This study develops a hydraulic model of the urban reach of the Tomebamba River (7.88 km) using the HEC-RAS software, based on hydrometric, topographic, and drone-based photogrammetric data. The methodology included the delineation of cross sections, determination of Manning's roughness coefficients, and the analysis of different flow scenarios: a maximum discharge in April 2017 of 251.762 L/s, an average discharge in October 2014 of 17.998 L/s, and minimum discharge in October 2014 of 3.315 L/s.

The results identify critical flood-prone areas in sectors such as Puente Roto, Teatro Carlos Cuevá Tamariz, Av. Doce de Abril, Puertas del Sol, and Parque El Paraíso, highlighting the vulnerability of urban zones to peak discharges exceeding 250 m³/s. Likewise, the model confirms the capacity of certain reaches to contain flow under average conditions.

In conclusion, the development of the hydraulic model constitutes an essential technical tool for identifying the most exposed areas, improving land-use planning, and guiding both structural and non-structural mitigation measures, thereby contributing to the safety and development of the city.

Keywords: *floods, hydraulic modeling, Tomebamba River, HEC-RAS, risk management.*

ÍNDICE GENERAL

1.	Capítulo I ANTECEDENTES.....	2
1.1.	Problemática	2
1.2.	Justificación	4
1.3.	Objetivos.....	5
1.3.1.	Objetivo general	5
1.3.2.	Objetivos específicos.....	6
1.4.	Metodología.....	6
1.4.1.	Definición de la zona de estudio	6
1.5.	Hipótesis	9
2.	Capítulo II MARCO TEÓRICO	10
2.1.	Flujo en Canales Abiertos.....	10
2.1.1.	Estados de Flujo	10
2.1.2.	Numero de Reynolds	10
2.1.3.	Numero de Froude.....	11
2.2.	Tipos de flujo en canales abiertos.....	11
2.2.1.	Flujo Permanente.....	11
2.2.2.	Flujo No Permanente.....	11
2.2.3.	Flujo Uniforme.....	11
2.2.4.	Flujo Variado.....	11
2.3.	Principios de Energía en canales abiertos.....	12
2.3.1.	Energía del flujo en canales abiertos	12
2.3.2.	Propiedades de los Canales Abiertos	13
2.3.3.	Coeficiente de rugosidad de Manning.....	14
2.3.4.	Coeficientes de contracción y expansión	15
2.4.	Cuencas Hidrográficas.....	16
2.4.1.	Elementos de una cuenca	16

2.4.2. Morfología Fluvial	16
2.5. Inundaciones	18
2.5.1. Riesgo de Inundación	18
2.5.2. Causas de las Inundaciones	18
2.6. Fundamento teórico HEC-RAS	20
2.6.1. Condiciones de frontera en HEC-RAS.....	21
3. Capítulo III MODELACIÓN HIDRÁULICA	24
3.1. Levantamiento Fotogramétrico.....	24
3.1.1. Visualización de archivos Geo TIFF en RAS Mapper.....	28
3.1.2. Secciones Transversales.....	29
3.1.3. Determinación de pendientes de los tramos	31
3.2. Características generales del programa HEC-RAS	34
3.2.1. Exportación de Datos a HEC-RAS	34
4. Capítulo IV RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA	46
4.1. Parámetros Hidráulicos.....	46
4.1.1. Escenarios de simulación	46
4.1.2. Pendiente promedio.....	46
4.1.3. Coeficientes de rugosidad (Manning's n)	47
4.1.4. Variación de secciones transversales	48
4.1.5. Condiciones de frontera	48
4.1.6. Criterios numéricos y de estabilidad	48
4.1.7. Criterio de evaluación de resultados	49
4.2. Análisis gráfico del modelo hidráulico.....	50
4.2.1. Tramo 1.1 n mínimo	50
4.2.2. Tramo 1.1 n medio	51
4.2.3. Tramo 1.1 n máximo	52

4.2.4.	Tramo 1.2 n mínimo	53
4.2.5.	Tramo 1.2 n medio	54
4.2.6.	Tramo 1.2 n máximo	55
4.2.7.	Tramo 2 n mínimo	56
4.2.8.	Tramo 2 n medio	57
4.2.9.	Tramo 2 n máximo	58
4.2.10.	Tramo 3 n mínimo	59
4.2.11.	Tramo 3 n medio	60
4.2.12.	Tramo 3 n máximo	61
4.2.13.	Tramo 4 n mínimo	62
4.2.14.	Tramo 4 n medio	63
4.2.15.	Tramo 4 n máximo	64
4.2.16.	Tramo 5 n mínimo	65
4.2.17.	Tramo 5 n medio	67
4.2.18.	Tramo 5 n máximo	68
4.2.19.	Tramo 6 n mínimo	69
4.2.20.	Tramo 6 n medio	70
4.2.21.	Tramo 6 n máximo	70
4.3.	Comparación analítica de los resultados del modelo hidráulico	71
4.4.	Resumen comparativo de parámetros hidráulicos en los diferentes escenarios	82
5.	CONCLUSIONES	84
6.	RECOMENDACIONES	86
7.	BIBLIOGRAFÍA	88
8.	ANEXOS	92
8.1.	Anexo 1. RAS 3D viewer de todos los escenarios presentes en el modelo	92
8.2.	Anexo 2. Tablas comparativas de parámetros de estudio	103

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Vista en planta del río Tomebamba	7
Ilustración 2 Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos	12
Ilustración 3 Esquema de los ríos	17
Ilustración 4 Tramos por colores de los 7.88 km del río Tomebamba	25
Ilustración 5 Ortofoto -Tramo 1.1 Puente universidad nuevo campus – ITALPISOS	25
Ilustración 6 Ortofoto -Tramo 1.2 Puente puertas del sol - Puente universidad nuevo campus...	25
Ilustración 7 Ortofoto -Tramo 2 Puente puertas del sol - Piscina Olímpica.....	26
Ilustración 8 Ortofoto -Tramo 3 Piscina Olímpica - Carlos Cueva	26
Ilustración 9 Ortofoto -Tramo 4 Carlos Cueva - Puente José Peralta.....	27
Ilustración 10 Ortofoto -Tramo 5 Puente José Peralta - Pumapungo	27
Ilustración 11 Ortofoto -Tramo 6 Pumapungo - Paraíso	28
Ilustración 12 Visualización de Ras Mapper cargado archivo tif, tramo 1.1	29
Ilustración 13 Secciones transversales y cauce del río del tramo 1.1	30
Ilustración 14 Sección transversal corte 65 – Tramo 1.1.....	30
Ilustración 15 Representación gráfica de datos de los bancos.....	37
Ilustración 16 Hidrograma Octubre 2014	40
Ilustración 17 Hidrograma Octubre 2015	40
Ilustración 18 Hidrograma Abril 2016	41
Ilustración 19 Hidrograma Mayo 2016.....	42
Ilustración 20 Histograma Abril 2017	42
Ilustración 21 Histograma Junio 2019	43
Ilustración 22 Histograma Marzo-Junio 2019	44

Ilustración 23 Tramo 1.1 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)	51
Ilustración 24 Tramo 1.1 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med).....	52
Ilustración 25 Tramo 1.1 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max).....	53
Ilustración 26 Tramo 1.2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)	54
Ilustración 27 Tramo 1.2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med).....	55
Ilustración 28 Tramo 1.2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max).....	56
Ilustración 29 Tramo 2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)	57
Ilustración 30 Tramo 2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med).....	58
Ilustración 31 Tramo 2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max).....	59
Ilustración 32 Tramo 3 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)	60
Ilustración 33 Tramo 3 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med).....	61

Ilustración 34 Tramo 3 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max).....	62
Ilustración 35 Tramo 4 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)	63
Ilustración 36 Tramo 4 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med).....	64
Ilustración 37 Tramo 4 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max).....	65
Ilustración 38 Tramo 5 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)	66
Ilustración 39 Tramo 5 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med).....	67
Ilustración 40 Tramo 5 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max).....	68
Ilustración 41 Tramo 6 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)	69
Ilustración 42 Tramo 6 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med).....	70
Ilustración 43 Tramo 6 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max).....	71
Ilustración 44 Análisis comparativo de valores promedio por tramo.....	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coeficiente de contracción y expansión.....	15
Tabla 2 Tabla de pendientes del tramo 1.1.....	31
Tabla 3 Tabla de pendientes del tramo 1.2.....	32
Tabla 4 Tabla de pendientes del tramo 2.....	32
Tabla 5 Tabla de pendientes del tramo 3.....	32
Tabla 6 Tabla de pendientes del tramo 4.....	33
Tabla 7 Tabla de pendientes del tramo 5.....	33
Tabla 8 Tabla de pendientes del tramo 6.....	34
Tabla 9 Tabla de numero de Manning según cada puente analizado	36
Tabla 10 Tabla de caudales Octubre 2014	40
Tabla 11 Tabla de caudales Octubre 2015	41
Tabla 12 Tabla de caudales Abril 2016.....	41
Tabla 13 Tabla de caudales Mayo 2016.....	42
Tabla 14 Tabla de caudales Abril 2017.....	43
Tabla 15 Tabla de caudales Junio 2019.....	43
Tabla 16 Tabla de caudales Junio 2019.....	44
Tabla 17 Tabla con los caudales seleccionados	44
Tabla 18 Tabla de pendientes de cada tramo	47
Tabla 19 Tabla resumen de parámetros hidráulicos.....	49
Tabla 20 Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (1.1)	71
Tabla 21 Tabla comparativa parámetros de estudio n media (1.1)	72
Tabla 22 Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (1.1)	72

Tabla 23 Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (1.2)	74
Tabla 24 Tabla comparativa parámetros de estudio n media (1.2)	74
Tabla 25 Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (1.2)	75
Tabla 26 Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (2)	75
Tabla 27 Tabla comparativa parámetros de estudio n media (2)	76
Tabla 28 Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (2)	76
Tabla 29 Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (4)	78
Tabla 30 Tabla comparativa parámetros de estudio n media (4)	78
Tabla 31 Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (4)	79
Tabla 32 Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (5)	79
Tabla 33 Tabla comparativa parámetros de estudio n media (5)	80
Tabla 34 Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (5)	80
Tabla 35 Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (6)	80
Tabla 36 Tabla comparativa parámetros de estudio n media (6)	81
Tabla 37 Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (6)	81

Introducción

Las inundaciones en los ríos se presentan cuando las precipitaciones exceden la capacidad de carga del cauce o cuando los suelos ya no pueden absorber más agua. En otras palabras, el agua de lluvia que no logra infiltrarse en el terreno genera escorrentía superficial, lo que provoca un aumento en el nivel del río hasta que este se desborda.

El río Tomebamba, ubicado en Cuenca, Ecuador, es un ejemplo claro de la necesidad de modelar y analizar flujos en contextos urbanos, donde las dinámicas del agua se ven influenciadas por la intervención humana y los cambios en el uso del suelo.

La presente investigación se centra en la construcción de un modelo hidráulico del río Tomebamba en un tramo aproximado de 8km utilizando el software HEC-RAS, que permite representar las características hidráulicas del flujo y evaluar las zonas críticas con riesgo de inundación. A través de un análisis exhaustivo de la geometría del río y un levantamiento de datos topográficos, se busca proporcionar información valiosa para la gestión sostenible del recurso hídrico y la prevención de desastres en la región.

En este contexto, se abordarán conceptos clave como el número de Manning, hidrogramas de caudales, y las secciones transversales a lo largo del río Tomebamba, (morfología fluvial) y los factores que contribuyen al riesgo de inundación. Todo ello con el fin de desarrollar un enfoque integral que permita comprender mejor la dinámica del río Tomebamba y su interacción con el entorno urbano que lo rodea.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Problemática

Las inundaciones siempre han representado un peligro natural que ocurre con frecuencia alrededor del mundo. La ciudad de Cuenca está atravesada por cuatro ríos, que presentan ocasionales desbordamientos debido a fuertes precipitaciones, especialmente durante la temporada de lluvias, las fuertes lluvias provocan pérdidas humanas y materiales. Abordar estos riesgos climáticos requiere investigaciones que puedan describir el comportamiento de los caudales y utilizar este conocimiento para implementar una gestión de riesgos adecuada como un enfoque no estructurado para la mitigación de desastres.(Calle Chuqui, 2021)

Frente a esta problemática el gobierno nacional y locales deben adoptar estrategias para abordar los riesgos climáticos. Sin embargo, esta tarea resulta difícil debido a la falta de investigaciones que describan el comportamiento del río para poder tomar decisiones basadas en información confiable. Una empresa consultora contratada por el Municipio de Cuenca determinó los caudales pico más altos registrados que corresponden a inundaciones y para los ríos Tomebamba (154.68 m³/s), Yanuncay (197.74 m³/s) y Tarqui (980.304 m³/s). Es necesario estudiar cómo se producen estos incrementos de caudales sabiendo que el caudal promedio está en el orden de 11.88 m³/s para el río Tomebamba , 7.75 m³/s para el río Yanuncay y 3.21 m³/s para el río Tarqui.(Vallejo, 2014)

Como se puede observar el río Tomebamba es el río que mayor pico a alcanzó y es por ello que es importante conocer los caudales máximos y sus crecidas históricas, según estudios publicados son los siguientes:

Crecida histórica de 1950: *En abril de 1950*, el río alcanzó un caudal estimado de **aproximadamente 350 m³/s**, como consecuencia de un deslizamiento de tierra que generó un dique natural en la zona del Cajas. Este fenómeno desencadenó una crecida súbita que provocó la destrucción de varios puentes coloniales emblemáticos, entre ellos El Vado, Todos Santos y El Vergel.

Registros recientes de prealerta: *Febrero de 2020:* El caudal del río se elevó a **36,4 m³/s**, nivel considerado de prealerta por parte de la empresa pública ETAPA EP. *Noviembre de 2024:* En un intervalo de 24 horas, el caudal se incrementó rápidamente desde cerca de **1 m³/s hasta 7,47 m³/s**, debido a precipitaciones intensas continuas. *Diciembre de 2024:* El río alcanzó un caudal de **62,7 m³/s**, el más alto registrado recientemente por ETAPA EP, situándose dentro de los niveles críticos monitoreados por el sistema de alerta temprana.

Así mismo, debido a las frecuentes crecidas han afectado las zonas inundables de la urbe y zonas aledañas, a continuación, se mostrarán algunos de los eventos suscitados:

-Junio 2012. El río Tomebamba se desborda por fuertes lluvias inundando el sector coliseo Jefferson Pérez, tramos frente a la universidad de Cuenca, puente Centenario, Hospital Regional Vicente Corral Moscoso, Puertas del Sol y Río Amarillo.(Vallejo, 2014)

-Octubre 2016. El río Tomebamba crece por intensas lluvias, dos agentes de la policía lograron rescatar a tres menores que estuvieron en peligro de ser arrastrados por las corrientes. Al parecer ellas intentaron cruzar.(Astudillo, 2014)

Por lo tanto, es de vital importancia el siguiente estudio para que con ello se pueda evitar futuras inundaciones.

1.2. Justificación

La necesidad de realizar un estudio detallado y preciso de los flujos hídricos en el río Tomebamba surge de la creciente preocupación por los riesgos de inundación en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Este fenómeno afecta tanto a las comunidades cercanas como a las infraestructuras urbanas, especialmente durante la temporada de lluvias, lo que resalta la urgencia de contar con un modelo hidráulico que permita identificar y prever las zonas de riesgo. Las inundaciones no solo representan un desafío para la seguridad de la población, sino que también ocasionan graves pérdidas económicas y daños a la infraestructura pública y privada.

El análisis y la modelización hidráulica del río Tomebamba son fundamentales, ya que este río atraviesa áreas urbanas con alta densidad de población y desarrollo, lo que amplifica los efectos de cualquier evento extremo. Dado que el comportamiento de los caudales es altamente variable y depende de factores como las precipitaciones, la topografía y la intervención humana, disponer de una herramienta de simulación precisa permitirá conocer en detalle las características hidráulicas del río y prever los efectos de eventos de inundación bajo diferentes escenarios. La información que se genere con el modelo hidráulico será esencial para tomar decisiones informadas y oportunas en la planificación de infraestructuras, la gestión de riesgos y la implementación de medidas preventivas.

Al simular los flujos y las variaciones de caudal en diferentes tramos del río Tomebamba, se podrán identificar de manera más eficiente las zonas críticas y vulnerables, lo que facilitará la adopción de estrategias de mitigación de riesgos, tales como la ampliación de cauces, la construcción de sistemas de drenaje o la reubicación de viviendas en áreas de alto riesgo.

Además, este estudio permitirá avanzar en la caracterización de la amenaza por inundación, entendida como el grado de peligro que representan los diferentes escenarios hidrológicos e hidráulicos sobre el territorio. En este sentido, el modelo hidráulico constituye el insumo fundamental para definir la extensión, la profundidad y la velocidad de los flujos de agua en las zonas urbanas expuestas, información clave para cuantificar los niveles de amenaza y vincularlos con la vulnerabilidad existente. De esta manera, se obtiene un panorama integral que no solo identifica las áreas de mayor riesgo, sino que también establece una base técnica sólida para la elaboración de planes de gestión del riesgo y ordenamiento territorial.

La investigación permitirá, además, mejorar el conocimiento sobre la morfología fluvial de la zona y los efectos que el cambio climático podría tener sobre las precipitaciones y los caudales futuros. Por otro lado, la metodología empleada, que incluye el uso de tecnología avanzada como el levantamiento fotogramétrico y la visualización en 3D mediante el programa HEC-RAS, proporciona un enfoque innovador y preciso para la recolección de datos, permitiendo una evaluación detallada de los tramos críticos que hasta ahora no han sido suficientemente estudiados.

En conclusión, este estudio no solo tiene un valor técnico, sino que también contribuye de manera significativa a la seguridad y sostenibilidad de la ciudad de Cuenca, al proporcionar herramientas concretas para la toma de decisiones basadas en datos reales y confiables.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Construcción de modelo hidráulico en HEC-RAS del río Tomebamba en la zona urbana de Cuenca-Ecuador desde el puente de Balzay hasta el parque Paraíso.

1.3.2. Objetivos específicos

Analizar la información levantada de la geometría del río Tomebamba para un tramo de 7.88km.

Identificar información faltante de la geometría del río Tomebamba para un tramo de 7.88km.

Levantar de forma longitudinal y transversal las zonas faltantes de la geometría del río Tomebamba.

Construir el modelo hidráulico en HEC-RAS e identificar tramos críticos.

1.4. Metodología

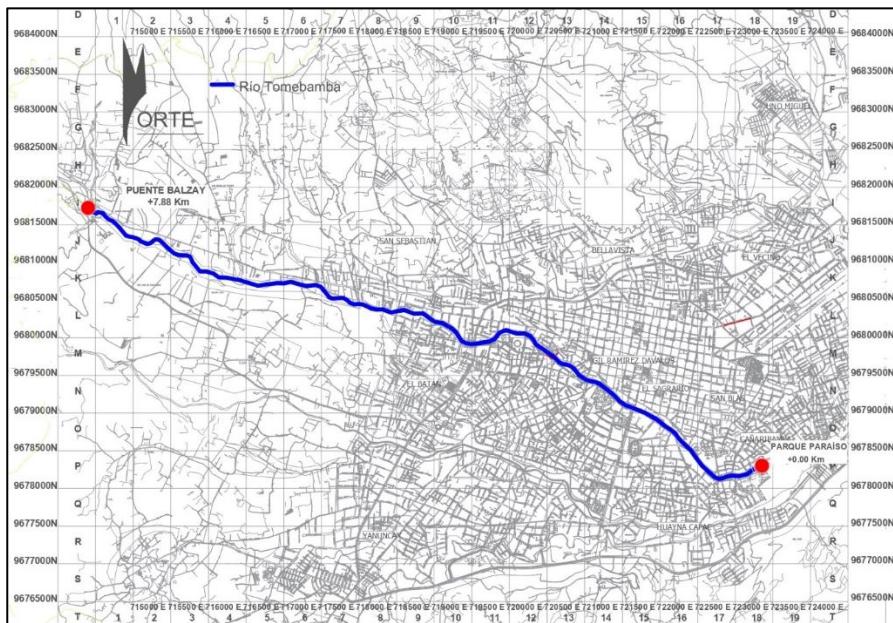
1.4.1. Definición de la zona de estudio

El presente trabajo se enfoca en el río Tomebamba debido a que es el río mejor monitoreado, cuenta con un gradiente altitudinal desde los 2.600 m sobre el nivel del mar hasta los 4.300 m sobre el nivel del mar y comienza en el límite norte del Parque Nacional el Cajas, PNC, en una zona denominada Tres Cruces (estación de monitoreo de la Toreadora), que se considera su punto más alto. Este río discurre por la zona de Balzay (estación de monitoreo Matadero Sayausí), al noroeste de Cuenca, que se considera el punto más bajo de medición.(Flores Rengifo, s. f.)

La zona de estudio comprende 7.88 km del río Tomebamba del Cantón Cuenca, Provincia del Azuay, con margen de 15m desde el eje de dicho río. Empezando desde el Oeste en la calle Monseñor Leonidas Proaño y Av. Ordoñez Lazo (redondel) hasta el Este con el parque paraíso.

Ilustración 1

Vista en planta del río Tomebamba



Nota. Realizado por el autor.

Para la construcción del modelo hidráulico de un tramo del río Tomebamba se realizó un recorrido preliminar, para así observar sus cambios de secciones, topografía e identificar puentes para tener una mejor visión de este trabajo. Se identificó la información faltante en las zonas críticas y se levantó la información con la ayuda de los dispositivos topográficos o la bibliografía necesaria.

Una vez identificada la información inexistente, se realizó un levantamiento y visualización de la topografía en los tramos críticos del río; con el fin de identificar las zonas con y sin riesgo de inundación mediante un plan de vuelo; no obstante, se escogió condiciones específicas de viento, iluminación y meses del año secos para presenciar la problemática de manera notoria. Con el objetivo de obtener información precisa de la morfología del río Tomebamba en el sector urbano de Cuenca, Ecuador, se llevó a cabo un levantamiento aéreo mediante dron. Debido a las características del entorno, el cauce fue dividido en 7 tramos, ya que no fue posible realizar un vuelo continuo por restricciones operativas como la prohibición de vuelo en ciertas zonas (por

normativa de la DGAC), presencia de vegetación alta, infraestructura urbana (puentes, edificios), y limitaciones de accesibilidad física.

Se ejecutaron vuelos fotogramétricos individuales por tramo, utilizando drones equipados con cámaras de alta resolución y programando rutas con superposición frontal y lateral adecuada (80% y 70% respectivamente). Para garantizar la precisión de los modelos generados, se instalaron puntos de control terrestre (GCPs) georreferenciados con tecnología GNSS RTK (*Global Navigation Satellite System* (Sistema Global de Navegación por Satélite)).

El procesamiento se realizó con software especializado (QGIS), obteniendo modelos digitales del terreno (DTM) y orto mosaicos. A partir del DTM se extrajeron secciones transversales del cauce, ubicadas cada 25 a 50 metros. En zonas con cobertura vegetal densa o interferencias, se recurrió al levantamiento topográfico complementario en campo. Esta metodología permitió obtener información precisa del perfil del río Tomebamba, fundamental para el análisis hidráulico, evaluación de riesgos por inundación y planificación urbana en Cuenca.

Con los datos obtenidos en el punto anterior, se exportó esta información para compartirla y trabajar en el software libre HEC-RAS; donde se construirá el modelo hidráulico con las diferentes condiciones que presenta el proyecto, así también de definieron las condiciones de frontera, numero de Manning, donde se analizaron los hidrogramas de ingreso y de salida de la cuenca del río, las rugosidades en el margen del cauce, el perfil transversal de cada punto analizado, las zonas de inundación existentes a lo largo del río, entre otros.

1.5. Hipótesis

La modelación hidráulica del río Tomebamba mediante HEC-RAS permite representar adecuadamente las características hidráulicas del cauce ante eventos de crecida.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de la investigación. Se abordan los principales conceptos relacionados con el flujo en canales abiertos, la modelación hidráulica y el uso del software HEC-RAS, entre otros temas relevantes, con el fin de proporcionar un marco conceptual claro y sólido.

2.1. Flujo en Canales Abiertos

En el flujo de canal abierto, el fluido fluye bajo la influencia de la gravedad. Se caracteriza por tener una superficie libre y sólo tiene presión y presión atmosférica debido a su propio peso. Las capas superficiales internas de los canales abiertos pueden variar desde el metal pulido utilizado en los arroyos de laboratorio hasta los lechos de los ríos ásperos y desiguales. Dado que la rugosidad depende de la ubicación de la superficie libre, para canales abiertos se requiere una gran incertidumbre para seleccionar correctamente el coeficiente de fricción (Espinoza & Vintimilla, 2013).

2.1.1. Estados de Flujo

Las condiciones o el comportamiento del flujo en un canal abierto están determinados principalmente por los efectos de la viscosidad y la gravedad en relación con las fuerzas de inercia del flujo. Los flujos impulsados por la viscosidad pueden ser laminares, turbulentos y transitorios (mixtos o promedio) en relación con la inercia. Además, el flujo debido a la gravedad puede ser crítico, subcrítico o supercrítico (Espinoza & Vintimilla, 2013).

2.1.2. Número de Reynolds

Es un número adimensional que refleja la relación entre las fuerzas de inercia, que se originan por la aceleración y desaceleración del fluido y las fuerzas de corte debidas a la viscosidad.

Para valores de número de Reynolds menores a 2000, el flujo en el canal es laminar, para valores mayores a 4000, el flujo es turbulento, y para valores intermedios es un flujo transicional. (Espinoza & Vintimilla, 2013).

2.1.3. Número de Froude

El número de Froude se utiliza cuando para clasificar los estados de flujo según la acción de la gravedad. Según este número, el flujo se puede dividir en tres estados: flujo crítico, subcrítico y supercrítico (Espinoza & Vintimilla, 2013).

2.2. Tipos de flujo en canales abiertos

La clasificación del flujo en vías navegables abiertas se basa en los cambios en la profundidad del flujo a lo largo del tiempo y el espacio (Encalada Guachún & Jara Jara, 2010).

2.2.1. Flujo Permanente

Se da cuando las propiedades del fluido y las condiciones del movimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo. (Encalada Guachún & Jara Jara, 2010).

2.2.2. Flujo No Permanente

Se da cuando las propiedades del fluido y las condiciones de movimiento en cualquier punto cambian con relación al tiempo. (Encalada Guachún & Jara Jara, 2010).

2.2.3. Flujo Uniforme

Se da cuando en cualquier punto de un fluido la velocidad tiene el mismo valor, dirección y sentido. (Encalada Guachún & Jara Jara, 2010).

2.2.4. Flujo Variado

Se da cuando en cualquier punto de un fluido la velocidad no tiene el mismo valor, dirección y sentido. (Encalada Guachún & Jara Jara, 2010).

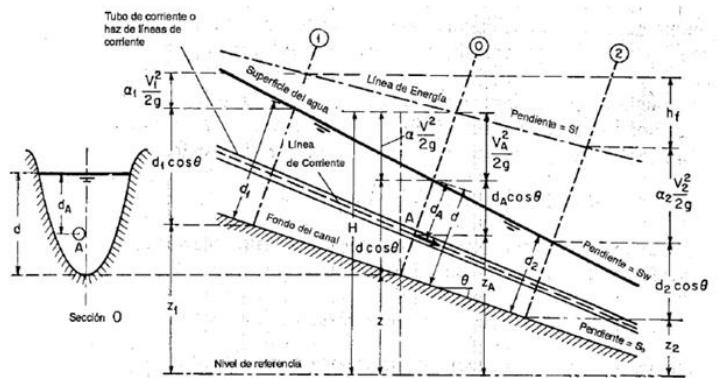
2.3. Principios de Energía en canales abiertos

2.3.1. Energía del flujo en canales abiertos

La energía total del agua de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal puede expresarse como la altura total de agua, que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad (Encalada Guachún & Jara Jara, 2010).

Ilustración 2

Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos



Fuente: Encalada Guachún & Jara Jara, 2010.

De la ilustración 2, la energía total en la sección del canal es:

$$H = Z_A + D_A \cos \theta + (V_A^2 / 2g)$$

Dónde:

Z_A : Elevación del punto por encima del plano de referencia.

D_A : Profundidad del punto por debajo de la superficie del agua medida a lo largo de la sección del canal. θ : Ángulo de la pendiente del fondo del canal.

$(V_A^2 / 2g)$: Altura de la velocidad del flujo en la línea de corriente que pasa a través de la sección.

Para canales con pendientes bajas, $\theta=0$, por lo que la ecuación es:

$$H = z + d \cos \theta + \alpha (V^2 / 2g)$$

La pendiente de la línea de energía se conoce como gradiente de energía, representada por S_f . La pendiente de la superficie del agua se representa por S_w y la pendiente del fondo del canal por $S_0 = \tan(\theta)$.

De acuerdo con el principio de conservación de energía, la altura de energía total en la sección 1 localizada agua arriba debe ser igual a la altura de energía total en la sección 2 localizadas aguas abajo más la pérdida de energía h_f entre las dos secciones (Encalada Guachún & Jara Jara, 2010).

$$Z_1 + d_1 \cos\theta + \alpha_1(V^2/2g) = Z_2 + d_2 \cos\theta + \alpha_2(V^2/2g) + h_f$$

La ecuación anterior es aplicable a flujos paralelos o gradualmente variados. Para un canal de pendiente pequeña es:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1(V_1^2/2g) = z_2 + y_2 + \alpha_2(V_2^2/2g) + h_f$$

Las ecuaciones (1) y (2) son conocidas como ecuación de la energía. Cuando $h_f=0$ y $\alpha_1=\alpha_2=1$, la ecuación de la energía total se convierte en la Ecuación de Bernoulli.

2.3.2. Propiedades de los Canales Abiertos

2.3.2.1. Geometría de los Canales Abiertos

Las secciones transversales de los canales pueden considerarse regulares o irregulares. Una sección regular es una sección cuya forma no cambia a lo largo del canal, y una sección irregular es una sección con cambios geométricos.

2.3.2.2. Elementos Geométricos de un canal

Los factores geométricos son muy importantes y se utilizan ampliamente en los cálculos de flujo. Puede estar completamente determinado por la geometría de la sección transversal y la profundidad del flujo.

Los elementos geométricos básicos más importantes son:

- Profundidad del flujo (y): Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta una superficie libre.
- Ancho Superficial (T): es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- Área Mojada (A): es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.
- Perímetro Mojado (P): es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección del flujo.
- Radio Hidráulico (R): es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado. $R=A/P$.
- Profundidad Hidráulica (D): es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie. $D=A/P$.

2.3.3. *Coeficiente de rugosidad de Manning*

El coeficiente de rugosidad de Manning (n) representa la resistencia que ofrece el canal al flujo de agua debido a las características de su superficie, como rugosidad, vegetación e irregularidades. Este valor puede variar dentro de un mismo cauce, ya que los márgenes laterales suelen tener coberturas vegetales distintas al cauce central, lo que influye en la velocidad y en la pérdida de energía del flujo en canales abiertos.(Chow, Ven Te, 1994).

2.3.3.1. *Método de Meyer-Peter y Müller*

El método de Meyer-Peter y Müller es una fórmula empírica desarrollada para calcular el transporte de sedimentos de fondo (bed-load) en canales con material no cohesivo, especialmente gravas. Esta expresión fue derivada a partir de experimentos de laboratorio y establece una relación entre el esfuerzo cortante del flujo (shear stress) y el inicio del movimiento de partículas. Es ampliamente utilizado en ríos de montaña y cauces con material grueso, y constituye una base

importante en la modelación hidráulica de sedimentos en programas como HEC-RAS. (Meyer-Peter, E.; Müller, R., 1948)

2.3.3.2. Método de Limerinos

El método de Limerinos permite estimar el coeficiente de rugosidad de Manning (n) en cauces naturales con material de fondo rocoso, considerando el tamaño de los sedimentos del lecho y la pendiente del canal. Esta fórmula, desarrollada a partir de mediciones de campo, es útil para representar la pérdida de energía por fricción en ríos de cauce irregular donde los métodos convencionales subestiman la resistencia del flujo. Es comúnmente usado en evaluaciones hidráulicas cuando se requiere un cálculo detallado de la rugosidad sin depender únicamente de valores tabulados. (Limerinos, J. T., 1970)

2.3.4. Coeficientes de contracción y expansión

Los coeficientes de contracción y expansión son factores que permiten estimar las pérdidas de energía en el flujo cuando este atraviesa cambios geométricos entre secciones contiguas, como estrechamientos o ensanchamientos del canal. Estos valores dependen de la forma en que ocurre la transición: si es progresiva o abrupta.(Aldana, M, 2006)

Tabla 1
Coeficiente de contracción y expansión

Descripción de la transición	Coeficiente de contracción	Coeficiente de expansión
Perdida sin transición	0	0
Transición gradual	0.1	0.3
Sección típica de puentes	0.3	0.5
Transiciones abruptas	0.6	0.8

Nota. Tomado de Brunner, G., & Ceiwr-Hec.(2016). HEC-RAS River Analysis System: User Manual 1D and 2D

Version 5.0 (5.0). US Army Corps of Engineers

2.4. Cuencas Hidrográficas

Es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, zona donde el agua desemboca en el mar a través de un único curso de agua. Una masa de agua está delimitada por crestas. Las cuencas hidrográficas cubren únicamente aguas superficiales, mientras que las cuencas hidrológicas contienen aguas subterráneas (Córdova Diaz, 2017).

2.4.1. *Elementos de una cuenca*

2.4.1.1. El río principal

Generalmente se define como la vía de mayor caudal de agua o de mayor longitud o zona de mayor área de drenaje. La mayoría de las cuencas tienen ríos principales bien definidos desde sus desembocaduras hasta sus cuencas. (Córdova Diaz, 2017).

2.4.1.2. Afluentes

Estos son ríos más pequeños que desembocan en el río principal. Cada afluente tiene su propia cuenca de drenaje, denominada subcuenca. (Córdova Diaz, 2017).

2.4.1.3. Relieve de la cuenca

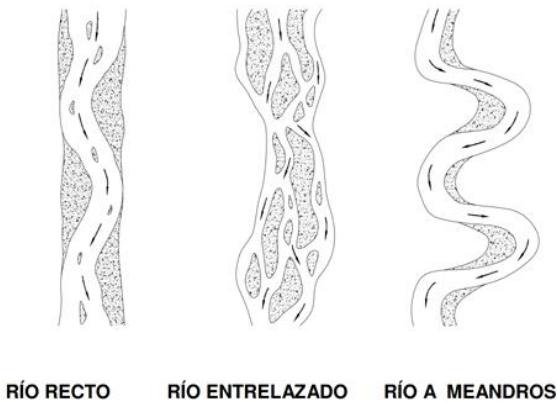
La topografía de la cuenca se compone de valles principales y valles secundarios, topografía primaria y topografía secundaria, y la red fluvial que conforman la cuenca. Está formado por montañas, y sus laderas pasan por cañones o quebradas, valles y meseta (Córdova Diaz, 2017).

2.4.2. *Morfología Fluvial*

La fluviomorfología es la ciencia que estudia la forma de los ríos. Es importante entender que cuando hablamos de la apariencia de un río, es decir, de cómo se ve desde el aire. Sin embargo, no hay que olvidar que la forma del río, llamada en inglés "channel patrón", no es constante en el tiempo. Los caudales que ocurren principalmente durante la temporada seca o de inundaciones, juegan un papel importante en la determinación de la forma y sección real del río, porque los ríos

no tienen la misma forma en todo su recorrido. La morfología del río tiene en cuenta tres formas básicas, que se muestran esquemáticamente en la Figura 1.(La, 2009)

Ilustración 3
Esquema de los ríos



Nota. (La, 2009)

Ríos Rectos. - Es de onda sinusoidal baja y de un solo canal. Los ríos son muy inestables y suelen convertirse en otro tipo de ríos a menos que fluyan a través de fallas geológicas. Tienen un alto flujo de energía y una alta capacidad de erosión. Un río recto se puede definir como aquel en el que la sinuosidad es tan pequeña que puede despreciarse.(La, 2009)

Ríos Anastomosados. - También llamado trenza o trenza, es un sistema multicanal. Tienen excelentes habilidades de transporte y asentamiento. Debido a que tiene menos energía que una corriente recta, cuando encuentra un obstáculo tiende a cambiar su curso para adaptarse a la topografía y los sedimentos del fondo del canal, lo que da como resultado grandes islas y amplios valles. Los ríos trenzados son inestables y su comportamiento es muy difícil de predecir. Pueden contener grandes cantidades de sólidos que forman islas temporales.(La, 2009)

Ríos Meándricos. - Tienen altas sinusoides y canales únicos. La característica principal es la unidad geométrica serpentina. Se caracteriza por una curvatura del canal que produce dos velocidades diferentes en las dos orillas. Debido a que los sedimentos de estos ríos se depositan

por la acción de los canales principales y las inundaciones periódicas de las llanuras flanqueantes, están asociados con características morfológicas como canales principales, terraplenes naturales, llanuras aluviales, lagos laterales y llanuras aluviales.(La, 2009)

2.5. Inundaciones

2.5.1. Riesgo de Inundación

Las inundaciones son eventos naturales que ocurren en los valles aluviales de ríos de gran envergadura y se están volviendo más frecuentes debido a la ocupación humana de los cauces fluviales. Estos sucesos obedecen a la dinámica de las cuencas hidrográficas y su frecuencia está influenciada por las condiciones climáticas y las características de la cuenca. (Santana & Lima, 2021).

La amenaza de inundación, se determina mediante la relación entre la profundidad de inundación y la probabilidad anual de que ocurra, representada en una curva de frecuencia de profundidad. Por lo general, este riesgo se evalúa utilizando modelos hidráulicos. El concepto de riesgo se refiere a las posibles pérdidas asociadas con una amenaza específica, como una inundación, para un elemento particular en riesgo durante un período futuro determinado. Estas pérdidas pueden manifestarse en términos de vidas humanas, daños o destrucción de edificaciones, o en términos económicos (Pinos et al., 2017)

2.5.2. Causas de las Inundaciones

2.5.2.1. Causas Naturales

Inundaciones lentas: Cuando llueve lo suficiente como para saturar el suelo, es decir, el suelo no puede absorber más agua de lluvia, la cantidad restante fluye hacia los ríos, arroyos o hacia el suelo. La escorrentía aumenta en proporción al área de escorrentía a medida que avanza hacia el este de la cuenca. Si la cantidad que fluye a través de un canal excede la capacidad de

carga, se pueden formar corrientes en sus orillas y el agua desplazada puede inundar el terreno durante horas o días. Este efecto ocurre principalmente cuando las pendientes del canal son pequeñas, reduciendo así la capacidad de transporte de flujo (Córdova Diaz, 2017).

Inundaciones súbitas: Esto suele ocurrir en cuencas de canales verticales debido a la presencia de grandes cantidades de agua en un periodo de tiempo muy corto, causado por lluvia, tormentas o huracanes dependiendo de la intensidad y duración de las precipitaciones, el terreno, las condiciones del suelo y la cubierta vegetal, puede ocurrir en cuestión de minutos u horas. Este tipo de inundaciones pueden arrastrar rocas, derribar árboles, destruir edificios y otras estructuras y crear nuevas zanjas de drenaje. Los escombros flotantes pueden acumularse en una presa o represa, restringiendo el flujo y provocando inundaciones río arriba, pero una vez que el flujo pasa la barrera, la inundación se mueve río abajo (Córdova Diaz, 2017).

Por inundaciones “in situ”: es decir, acumulación de agua por fuertes lluvias. En este caso, es muy importante el estado de la red de alcantarillado y la presencia de infraestructuras como sótanos y pasajes subterráneos propensos a inundaciones. (Córdova Diaz, 2017).

No meteorológicos: cosas como el derretimiento del hielo y las intrusiones oceánicas (Córdova Diaz, 2017).

2.5.2.2. Causas no naturales

Ruptura de presa: cuando una presa se rompe, toda el agua que contiene se libera repentinamente, expandiéndose y destruyendo todo lo que la rodea (Córdova Diaz, 2017).

2.5.2.3. Actividades Humanas

- A medida que se pavimentan áreas cada vez más grandes, los suelos se vuelven impermeables, lo que impide que el agua se absorba en el suelo, y la escorrentía

aumenta a niveles peligrosos, lo que permite que el agua llegue fácilmente a 25 canales de ríos a través de drenajes y zanjas. (Córdova Diaz, 2017).

- La tala de árboles para plantar destruye las plantas del suelo. Cuando llueve, el agua arrastra la tierra a elevaciones más bajas, bloqueando el drenaje, bloqueando ríos y presas, provocando inundaciones y erosión del suelo. (Córdova Diaz, 2017).
- Los oleoductos resuelven los problemas de inundaciones en algunas partes del río, pero los empeoran en otras partes del río donde el agua llega rápidamente. (Córdova Diaz, 2017).
- La carga de canales por estructuras reduce el área disponible para drenaje y la capacidad del río para atravesar la llanura aluvial. (Córdova Diaz, 2017).
- Descuido o falta de mantenimiento de los sistemas de drenaje. Los ríos y arroyos se utilizan como vertederos de todo tipo de residuos. (Córdova Diaz, 2017).

2.6. Fundamento teórico HEC-RAS

HEC-RAS es un software desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Corps of Engineers (HEC), diseñado para realizar análisis hidráulicos de ríos en un modelo unidimensional (1D) y bidimensional (2D) para flujos no estacionarios. Este sistema integrado permite un uso interactivo en un entorno multiusuario y multitarea. El software incluye una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis hidráulicos, almacenamiento de datos, capacidades de gestión, gráficos y opciones de informes. (Brunner, 2016)

HEC-RAS facilita el cálculo de los perfiles de agua y diversos parámetros hidráulicos de los cauces. El programa es capaz de simular desde un tramo aislado de un río hasta una red fluvial completa. El análisis del flujo puede llevarse a cabo considerando regímenes subcríticos, supercríticos o mixtos (Villón, 2014).

2.6.1. *Condiciones de frontera en HEC-RAS*

Las condiciones de frontera permiten resolver las ecuaciones hidráulicas en los extremos del tramo modelado. Su elección depende del régimen de flujo (subcrítico, supercrítico o mixto) (Luna Reyes, 2014)

2.6.1.1. *Tipos de regímenes*

- ✓ Subcrítico ($Fr < 1$): predomina la energía potencial → se fija la condición aguas abajo.
- ✓ Supercrítico ($Fr > 1$): predomina la energía cinética → se fija la condición aguas arriba.
- ✓ Mixto: puede haber saltos hidráulicos → se requieren condiciones en ambos extremos. (Luna Reyes, 2014)

2.6.1.2. *Tipos de condiciones de frontera en HEC-RAS*

2.6.1.2.1. *Aguas arriba:*

Corresponden a la condición de entrada del flujo en el inicio del tramo modelado

Caudal constante: Se utiliza en simulaciones de régimen permanente (steady flow). Se asigna un valor fijo de caudal (m^3/s) que ingresa al sistema. Es útil para análisis simplificados o estudios de diseño con un caudal de proyecto.

Hidrograma (flujo no permanente): En simulaciones no permanentes (unsteady flow), se emplea un hidrograma de caudales que varía con el tiempo. Representa la respuesta hidrológica de la cuenca frente a un evento de lluvia o de crecida. Permite estudiar la propagación de avenidas y el comportamiento transitorio del sistema.(Luna Reyes, 2014)

2.6.1.2.2. *Aguas abajo*

Definen la condición de salida del flujo en el extremo final del tramo modelado.

Tirante normal (con pendiente de fondo): El programa calcula la elevación del agua suponiendo flujo uniforme, usando la pendiente del canal y la ecuación de Manning. Es muy útil cuando no se dispone de mediciones aguas abajo.

Nivel de agua conocido: Se fija directamente una cota de la superficie del agua (por ejemplo, cuando existen datos de estación hidrométrica). Es una de las condiciones más precisas cuando se dispone de información de campo.

Curva gasto-nivel (rating curve): Se establece una relación funcional entre caudal y nivel, obtenida a partir de aforos. Permite al modelo ajustar automáticamente el nivel de agua de salida en función del caudal que se esté propagando.

Hidrograma de nivel (stage hydrograph): En régimen no permanente, se ingresa un registro temporal de niveles aguas abajo. Esta condición refleja con mayor realismo el comportamiento hidráulico en zonas de control como ríos con mareas, lagos o embalses. (Luna Reyes, 2014)

2.6.1.2.3. Internas

Representan interacciones dentro del tramo modelado, como aportes o conexiones adicionales.

Aportes laterales: Corresponden a caudales que ingresan al sistema a lo largo del canal, ya sea de manera constante o variable (hidrogramas de quebradas, descargas de alcantarillado pluvial, etc.). Estos influyen directamente en la propagación de avenidas.

Conexiones con embalses, estructuras u otros tramos: HEC-RAS permite enlazar tramos de río con embalses, presas, compuertas, alcantarillas y estructuras de control. Estas condiciones internas son clave en estudios complejos de cuencas y obras hidráulicas, donde no solo interesa el

flujo en el cauce principal, sino también las interacciones con infraestructuras y sistemas adyacentes. (Luna Reyes, 2014)

CAPÍTULO III

MODELACIÓN HIDRÁULICA

3.1. Levantamiento Fotogramétrico

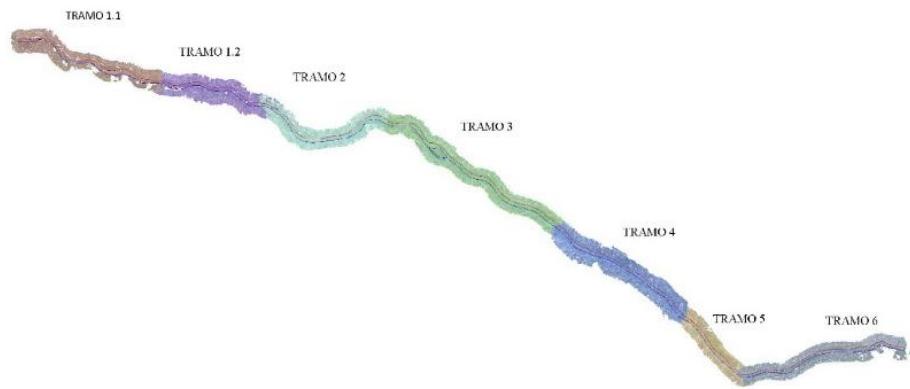
Un levantamiento fotogramétrico es un proceso que utiliza fotografías para obtener datos precisos sobre un área u objeto, capturando imágenes desde diferentes perspectivas y procesándolas con técnicas que miden y correlacionan puntos comunes para determinar dimensiones y ubicación en 3D. El resultado es un modelo o mapa detallado del terreno u objetos..(Martínez Macancela & Bermeo Cabrera, 2023).

Los drones capturan imágenes aéreas de alta resolución y, con cámaras estabilizadas, crean modelos 3D del terreno. También emplean tecnología LIDAR, que utiliza pulsos láser para obtener datos de elevación y generar nubes de puntos en 3D, especialmente útil en terrenos inaccesibles. Entre las ventajas de usar drones se destacan la rapidez en los levantamientos, la seguridad al evitar áreas peligrosas, y la alta precisión de los modelos generados. Además, son útiles en la inspección y monitoreo de proyectos de construcción. Sin embargo, los desafíos incluyen cumplir con regulaciones locales y garantizar la seguridad durante las operaciones. (Martínez Macancela & Bermeo Cabrera, 2023)

En este caso específico, se emplearon drones para realizar vuelos sobre diferentes tramos del río Tomebamba, algunos de los cuales se encontraban en áreas restringidas debido al aeropuerto, lo que implicó el uso de diferentes drones en los distintos tramos. Esto dio lugar a variaciones en las altitudes obtenidas en cada vuelo, las cuales deben ser corregidas para asegurar la uniformidad de los datos.

Ilustración 4

Tramos por colores de los 7.88 km del río Tomebamba



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 5

Ortofoto -Tramo 1.1 Puente universidad nuevo campus – ITALPISOS



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 6

Ortofoto -Tramo 1.2 Puente puertas del sol - Puente universidad nuevo campus



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 7

Ortofoto -Tramo 2 Puente puertas del sol - Piscina Olímpica



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 8

Ortofoto -Tramo 3 Piscina Olímpica - Carlos Cueva



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 9

Ortofoto -Tramo 4 Carlos Cueva - Puente José Peralta



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 10

Ortofoto -Tramo 5 Puente José Peralta - Pumapungo



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 11
Ortofoto -Tramo 6 Pumapungo - Paraíso



Nota. Realizado por el autor.

3.1.1. Visualización de archivos Geo TIFF en RAS Mapper

El módulo **RAS Mapper** de HEC-RAS permite integrar archivos ráster georreferenciados en formato Geo TIFF (.tif) con el objetivo de mejorar el análisis espacial en proyectos hidráulicos. Esta funcionalidad resulta especialmente útil para incorporar modelos de elevación del terreno, imágenes satelitales u otros insumos cartográficos relevantes. (U.S. Army Corps of Engineers, 2021)

3.1.1.1. Aspectos a tener en cuenta

Es indispensable que el archivo Geo TIFF contenga información de georreferenciación y utilice el mismo sistema de coordenadas del modelo para garantizar su correcta ubicación espacial.

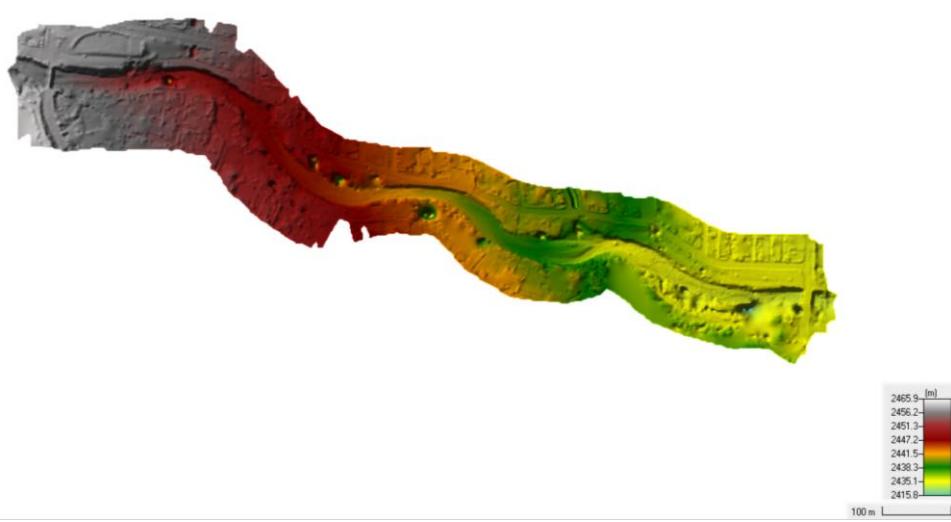
En caso de incompatibilidad o si el archivo no se despliega correctamente, es recomendable validarla previamente en un software SIG.

Archivos de gran tamaño pueden ralentizar la visualización dentro de RAS Mapper, por lo que se sugiere trabajar con resoluciones optimizadas.

Una vez cargada toda la información correcta se tiene una visualización como la **ilustración 12**, donde se toma como ejemplo el **tramo 1.1** para mejor explicación..(U.S. Army Corps of Engineers, 2021)

Ilustración 12

Visualización de Ras Mapper cargado archivo tif, tramo 1.1



Nota. Realizado por el autor.

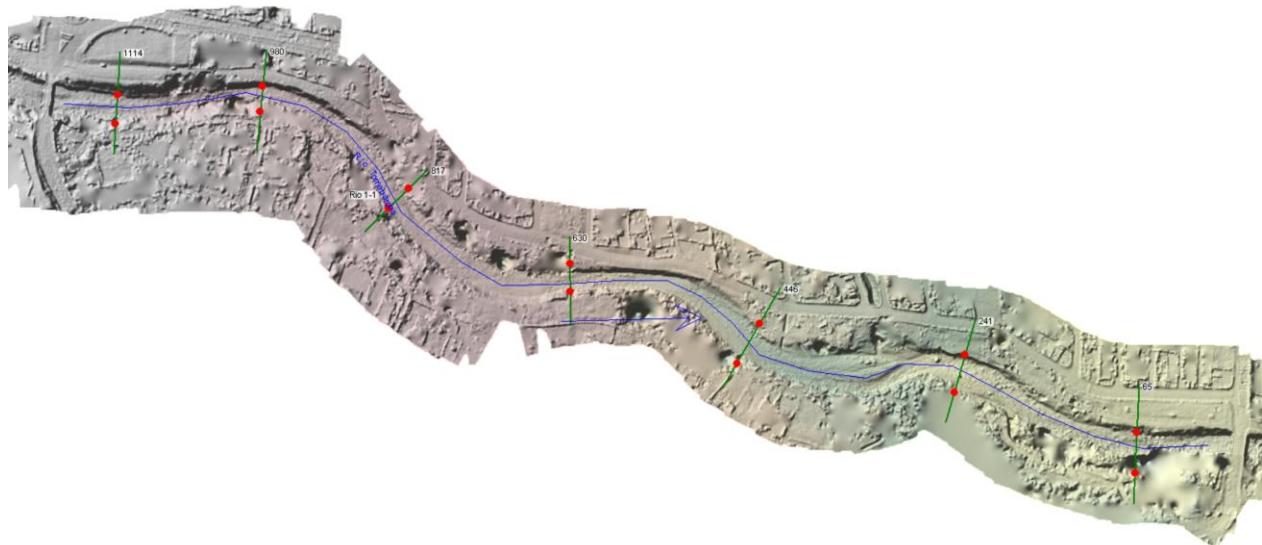
3.1.2. Secciones Transversales

Para la creación del modelo es necesario contar con las secciones transversales del cauce, para ello se contó con la topografía, de donde con el uso de las curvas de nivel como se muestra en la siguiente imagen. (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2016)

En zonas rectas del río, las secciones transversales pueden estar separadas por **100 a 200 metros**, dependiendo de la longitud del tramo. En zonas de meandros o curvas pronunciadas, las secciones pueden espaciarse cada **50 a 100 metros**, ya que las condiciones de flujo pueden cambiar rápidamente debido a la geometría del cauce. En zonas de alto riesgo de inundación, donde las variaciones en el caudal o la pendiente son más marcadas, es recomendable reducir la distancia entre secciones a **20 a 50 metros** para capturar las pequeñas variaciones en el flujo de agua.

Ilustración 13

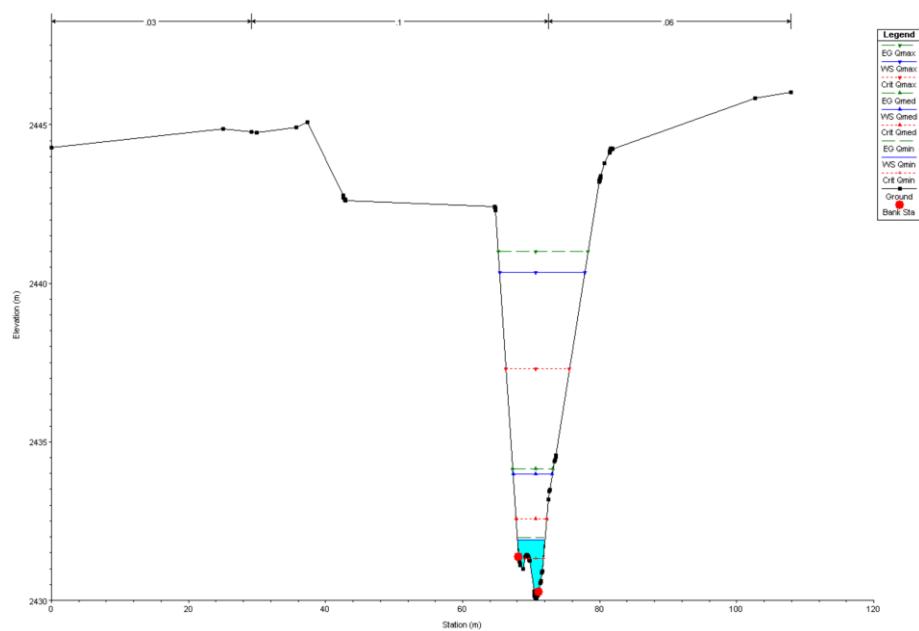
Secciones transversales y cauce del río del tramo 1.1



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 14

Sección transversal corte 65 – Tramo 1.1



Nota. Realizado por el autor.

3.1.3. Determinación de pendientes de los tramos

A partir del modelo digital del terreno obtenido mediante el levantamiento fotogramétrico, se calcularon las pendientes longitudinales promedio para cada tramo del sistema.

La pendiente se determinó en función de la diferencia de cotas de fondo entre el inicio y el final del tramo, dividida para la longitud proyectada en planta, de acuerdo con la expresión:

$$S = (\Delta h / L) \times 100$$

donde:

S = pendiente (%)

Δh = diferencia de cotas (m)

L = longitud del tramo (m)

Estas pendientes se emplearon en la definición geométrica dentro del software HEC-RAS, ya que controlan la energía disponible del flujo y permiten obtener el perfil hidráulico a lo largo del recorrido. (Chow, 1994).

En las siguientes tablas se presentan los valores promedio obtenidos para cada tramo.

Tabla 2

Tabla de pendientes del tramo 1.1

Tramo 1.1		
Cota fondo	Longitud	Pendiente
2454.20		
2449.64	133.80	0.034
2446.67	163.30	0.018
2442.56	187.00	0.022
2438.90	183.60	0.020
2433.50	204.70	0.026
2430.07	175.90	0.019
Pendiente promedio		0.0233

Nota. Realizado por el autor.

Tabla 3*Tabla de pendientes del tramo 1.2*

Tramo 1.2		
Cota fondo	Longitud	Pendiente
2430.92		
2429.48	115.60	0.012
2428.97	96.10	0.005
2427.59	98.80	0.014
2426.11	112.90	0.013
2423.98	110.30	0.019
2423.22	100.90	0.008
2420.21	98.40	0.031
2418.72	55.80	0.027
2417.11	67.10	0.024
Pendiente promedio		0.0170

*Nota. Realizado por el autor.***Tabla 4***Tabla de pendientes del tramo 2*

Tramo 2		
Cota fondo	Longitud	Pendiente
2424.93		
2423.87	123.70	0.01
2418.52	144.50	0.04
2413.91	154.30	0.03
2412.44	212.50	0.01
2411.81	124.50	0.01
2410.03	125.40	0.01
2406.30	135.60	0.03
Pendiente promedio		0.0185

*Nota. Realizado por el autor.***Tabla 5***Tabla de pendientes del tramo 3*

Tramo 3		
Cota fondo	Longitud	Pendiente
2395.91		
2393.63	89.40	0.03
2392.30	103.70	0.01
2390.04	128.50	0.02
2387.72	103.60	0.02
2387.11	96.00	0.01
2383.61	158.20	0.02
2381.85	141.20	0.01
2380.64	104.10	0.01

2378.37	108.20	0.02
2376.88	111.30	0.01
2375.10	93.00	0.02
2372.52	100.40	0.03
2372.08	65.50	0.01
2369.78	82.10	0.03
2367.83	116.00	0.02
2365.81	118.40	0.02
Pendiente promedio	0.0174	

Nota. Realizado por el autor.

Tabla 6

Tabla de pendientes del tramo 4

Tramo 4		
Cota fondo	Longitud	Pendiente
2364.06		
2366.43	60.40	-0.039
2369.20	66.00	-0.042
2370.94	74.30	-0.023
2370.28	90.00	0.007
2369.31	98.00	0.010
2367.53	82.60	0.022
2366.44	62.00	0.018
2365.28	96.50	0.012
2362.41	111.70	0.026
2360.12	95.80	0.024
2357.79	69.00	0.034
2354.23	90.80	0.039
2353.13	80.00	0.014
2350.94	91.50	0.024
Pendiente promedio	0.0089	

Nota. Realizado por el autor.

Tabla 7

Tabla de pendientes del tramo 5

Tramo 5		
Cota fondo	Longitud	Pendiente
2349.95		
2350.45	68.50	-0.007
2350.69	84.50	-0.003
2349.66	86.50	0.012
2348.73	68.00	0.014
2346.73	80.70	0.025
2345.32	80.00	0.018

2343.40	81.00	0.024
2341.21	75.70	0.029
2340.55	58.50	0.011
Pendiente promedio		0.0135

Nota. Realizado por el autor.

Tabla 8

Tabla de pendientes del tramo 6

Cota fondo	Tramo 6	
	Longitud	Pendiente
2340.34	56.20	0.000
2340.44	43.00	-0.002
2341.58	76.50	-0.015
2342.38	69.70	-0.011
2341.12	54.20	0.023
2340.04	50.50	0.021
2339.23	40.00	0.020
2338.24	50.80	0.019
2336.08	66.10	0.033
2335.47	59.90	0.010
2334.92	70.80	0.008
2334.22	59.60	0.012
2333.12	72.40	0.015
2331.89	56.70	0.022
2330.73	64.00	0.018
2328.31	55.30	0.044
2325.97	59.70	0.039
2325.41	71.50	0.008
2325.27	55.50	0.003
2325.16	51.90	0.002
Pendiente promedio		0.0134

Nota. Realizado por el autor.

3.2. Características generales del programa HEC-RAS

3.2.1. Exportación de Datos a HEC-RAS

Para la modelización hidráulica en HEC-RAS, es necesario contar con datos precisos sobre el terreno, incluidos los perfiles transversales.

Definición del Modelo Hidráulico: Con los perfiles importados, se pueden definir las secciones transversales del modelo de flujo en HEC-RAS. A partir de ahí, se puede proceder con

el análisis hidráulico, como la simulación de niveles de agua, caudales y la evaluación de riesgos de inundación.

3.2.1.1. Caracterización de la geometría

Al abrir un archivo de geometría en HEC-RAS, el sistema importa de forma automática dicha geometría al entorno cartográfico de RAS Mapper. Esta integración permite una visualización inmediata y georreferenciada de los elementos del modelo hidráulico, como el eje del cauce, secciones transversales, estructuras hidráulicas y límites del modelo. (U.S. Army Corps of Engineers, 2021)

Esta sincronización es parte del funcionamiento interno de HEC-RAS a partir de versiones recientes (5.0 en adelante), donde cualquier modificación o apertura de la geometría en el editor principal del modelo queda reflejada en RAS Mapper, sin necesidad de procedimientos adicionales de importación. Como resultado, se garantiza la consistencia espacial entre la geometría y las capas base cargadas en el entorno cartográfico. (U.S. Army Corps of Engineers, 2021)

3.2.1.2. Coeficiente de rugosidad de Manning

Se utilizarán coeficientes de rugosidad de Manning dividiendo por sectores según la tabla 1, de la cual se utiliza el valor mínimo que se refiere al método **Meyer-Peter y Muller** y el valor máximo con el método **Limerinos**; así como también, utilizará el valor de la **media**.

Tabla 9*Tabla de numero de Manning seg\xfian cada puente analizado*

	FORMULAS EMPIRICA ESTACI\xd3N	Meyer- Peter y Muller	Raudkin	Garde y Raju	Limerinos	HEC-RAS	Jarret	Media
1	Puente Monse\xf1or Leonidas Proa\xf1o y Av. Ordo\xf1ez Lasso	0.034	0.033	0.036	0.083	0.033	0.1	0.053
2	Puente Campus Balzay - U. de Cuenca	0.031	0.029	0.031	0.048	0.026	0.097	0.044
3	Puente Puertas del Sol	0.021	0.026	0.032	0.029	0.027	0.088	0.037
4	Puente Av. De las Am\xe9ricas	0.032	0.031	0.034	0.06	0.03	0.083	0.045
5	Puente Av. 3 de Noviembre y Unidad Nacional	0.032	0.031	0.033	0.046	0.028	0.09	0.043
6	Puente Colegio Sagrados Corazones	0.033	0.03	0.031	0.045	0.025	0.068	0.039
7	Puente Peatonal Otorongo	0.034	0.034	0.037	0.055	0.031	0.104	0.049
8	Puente del Vado	0.034	0.033	0.036	0.051	0.03	0.089	0.046
9	Puente Peatonal U. de Cuenca	0.033	0.033	0.035	0.052	0.03	0.083	0.044
10	Puente del Centenario	0.034	0.033	0.036	0.053	0.031	0.06	0.041
11	Puente Peatonal Hospital Militar	0.035	0.034	0.036	0.061	0.031	0.077	0.046
12	Puente Escalinata - Parque de la Madre	0.033	0.031	0.034	0.051	0.028	0.088	0.044
13	Puente Todos Santos	0.033	0.031	0.034	0.053	0.029	0.086	0.044
14	Puente Vergel	0.033	0.031	0.034	0.057	0.029	0.101	0.048
15	Puente Hospital Vicente Corral	0.032	0.031	0.034	0.064	0.031	0.09	0.047
16	Puente Peatonal Facultad Medicina	0.034	0.034	0.036	0.065	0.032	0.064	0.044
	Media	0.032	0.032	0.034	0.055	0.029	0.086	

Nota.(Mart\xednez Ram\xedrez & Solano Gonz\xf3lez, 2020)

3.2.1.3. Introducción de datos de los bancos

Durante el proceso de definición de secciones transversales en un modelo hidráulico dentro de HEC-RAS, RAS Mapper permite generar automáticamente las líneas de sección a partir de un modelo digital de elevación (DEM). Como parte de esta digitalización, el sistema detecta la topografía del terreno a lo largo de cada sección y estima la ubicación de los márgenes izquierdo y derecho del cauce (left bank station y right bank station, respectivamente). (U.S. Army Corps of Engineers, 2021)

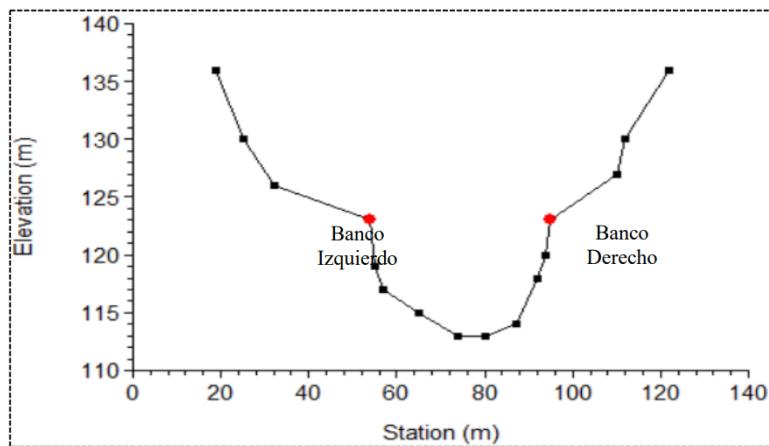
Estos puntos de quiebre, que separan el canal principal de las llanuras de inundación, se importan automáticamente al editor de geometría como parte de cada sección transversal. La identificación se realiza en función del perfil topográfico y de la morfología del cauce presente en

el DEM, aunque pueden ajustarse manualmente si se requiere mayor precisión. (U.S. Army Corps of Engineers, 2021)

Esta importación automatizada permite:

- ~ Establecer correctamente los límites del canal principal.
- ~ Mejorar la asignación de rugosidades (coeficientes de Manning) por zonas.
- ~ Contribuir a una representación hidráulica más precisa del flujo en canales naturales.

Ilustración 15
Representación gráfica de datos de los bancos



Nota. (U.S. Army Corps of Engineers, 2021)

3.2.1.4. Introducir datos de los coeficientes de contracción y expansión

El software asigna por defecto un valor de 0.1 para el coeficiente de contracción y 0.3 para el coeficiente de expansión, lo cual representa una transición progresiva, tal como se ilustra en la Ilustración 24. (Córdova Mendoza et al., 2022)

3.2.1.5. Obtención de caudales mediante hidrogramas – Estación Tomebamba

Para la presente tesis los datos fueron proporcionados por la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones (ETAPA-EP) que opera una red de monitorio hidrometeorológico automáticas que registran datos cada 5 minutos, en nuestro caso obtuvieron los datos de la **estación Quinta Balzay** ubicada en la cuenca alta del río Tomebamba

Los hidrogramas analizados corresponden a los años **2014, 2015, 2016, 2017 y 2019**, seleccionados por su calidad de registro, continuidad temporal y representatividad de eventos hidrológicos relevantes. Estos datos permitieron extraer los **valores característicos de caudal** necesarios para la modelación hidráulica, a saber:

- ~ **Caudal máximo**, que representa los valores pico asociados a eventos extremos o de diseño.
- ~ **Caudal medio**, útil para describir condiciones normales de escurrimiento.
- ~ **Caudal mínimo**, representativo de situaciones de estiaje o caudal base.

Los datos fueron procesados y analizados considerando su frecuencia, duración y magnitud. Los hidrogramas seleccionados serán utilizados como insumo fundamental en el modelado hidráulico con el software **HEC-RAS**. Esta herramienta permitirá simular el comportamiento del flujo a lo largo del cauce, evaluar niveles de inundación y analizar distintas condiciones de operación con base en los caudales obtenidos.

Caudal Máximo

El caudal máximo se define como el valor más alto registrado durante el período analizado. Su identificación se realiza mediante la verificación gráfica, ubicándolo en el punto donde se presenta el pico más elevado. Para garantizar precisión en el análisis, se recomienda

complementar la observación visual con el cálculo exacto obtenido directamente del conjunto de datos, aplicando la función max() sobre la columna correspondiente al caudal.(Carpio Álvarez, 2018)

Caudal Mínimo

El caudal mínimo se define como el valor más bajo registrado durante el período de análisis, siempre que no corresponda a errores de medición o a ceros generados por ausencia de datos. Su identificación se realiza mediante la verificación gráfica, destacando los tramos en los que los valores se aproximan a cero. Para asegurar la validez de la información, se recomienda confirmar que dichos valores no correspondan a registros erróneos o a desconexiones del sensor. (Carpio Álvarez, 2018)

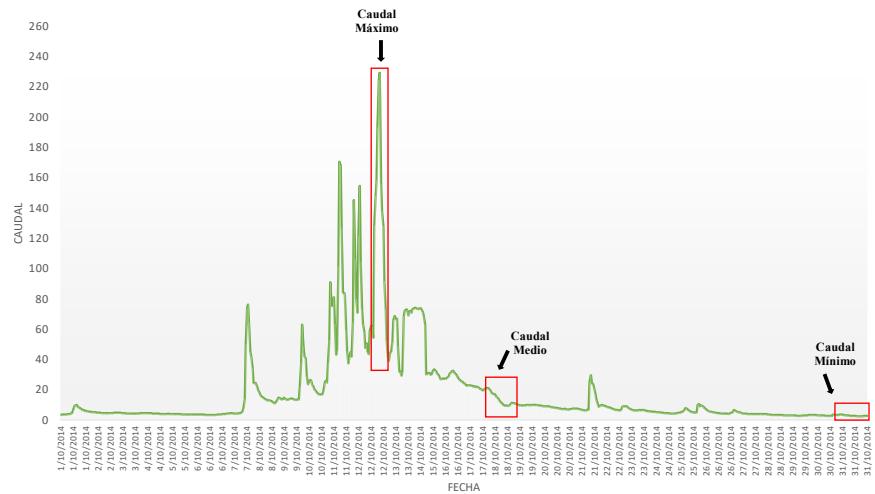
Caudal Medio

El caudal medio se define como el valor representativo del flujo de agua durante el período de análisis, obtenido al promediar todos los registros disponibles. Su cálculo permite caracterizar el comportamiento general del río o canal, proporcionando un parámetro útil para estudios hidrológicos y diseño hidráulico.

Para efectos de representación gráfica en el hidrograma, se seleccionó el valor medido más cercano al promedio, de modo que el gráfico refleje un registro real observado en la estación de monitoreo. aplicando la diferencia absoluta entre cada registro y el promedio calculado. De esta forma, se asegura que el valor utilizado sea representativo del promedio, pero a la vez corresponda a un dato medido y verificable, evitando introducir valores teóricos que no existen en la serie histórica.(Neurite Blog, 2024)

Ilustración 16
Hidrograma Octubre 2014

Histograma Octubre 2014



Nota. Realizado por el autor.

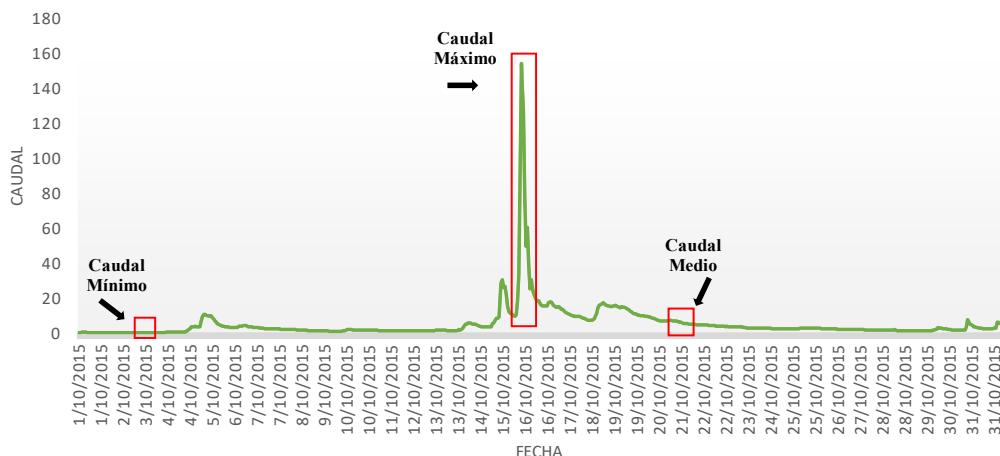
Tabla 10
Tabla de caudales Octubre 2014

	Caudal Máximo	Caudal Mínimo	Caudal Medio
Octubre 2014	229.0442116	2.315730871	17.99890667

Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 17
Hidrograma Octubre 2015

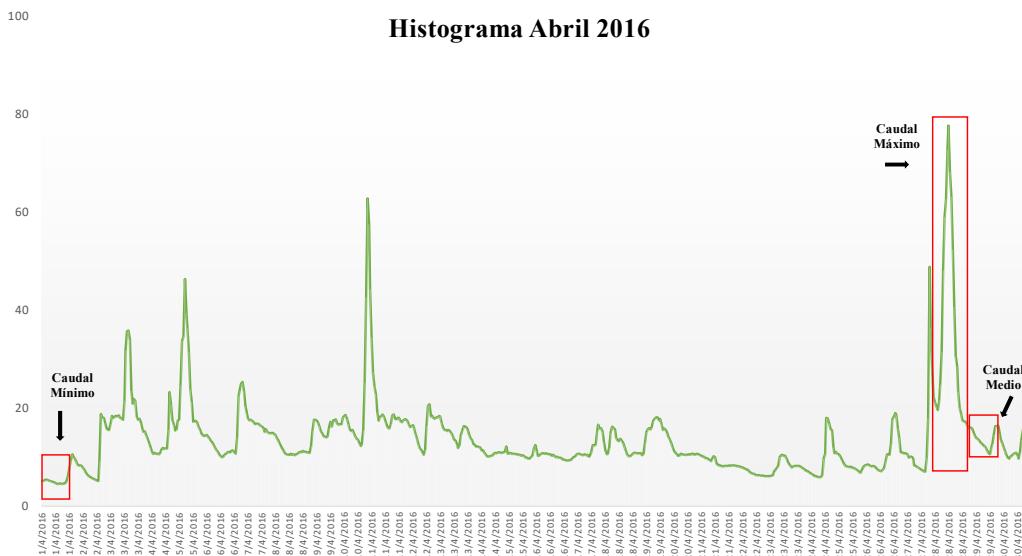
Histograma Octubre 2015



Nota. Realizado por el autor

Tabla 11*Tabla de caudales Octubre 2015*

	Caudal Máximo	Caudal Mínimo	Caudal Medio
Octubre 2015	154.3985318	154.3985318	154.3985318

*Nota. Realizado por el autor.***Ilustración 18***Hidrograma Abril 2016**Nota. Realizado por el autor.***Tabla 12***Tabla de caudales Abril 2016*

	Caudal Máximo	Caudal Mínimo	Caudal Medio
Abril 2016	77.60244488	4.473360378	13.701071

Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 19
Hidrograma Mayo 2016



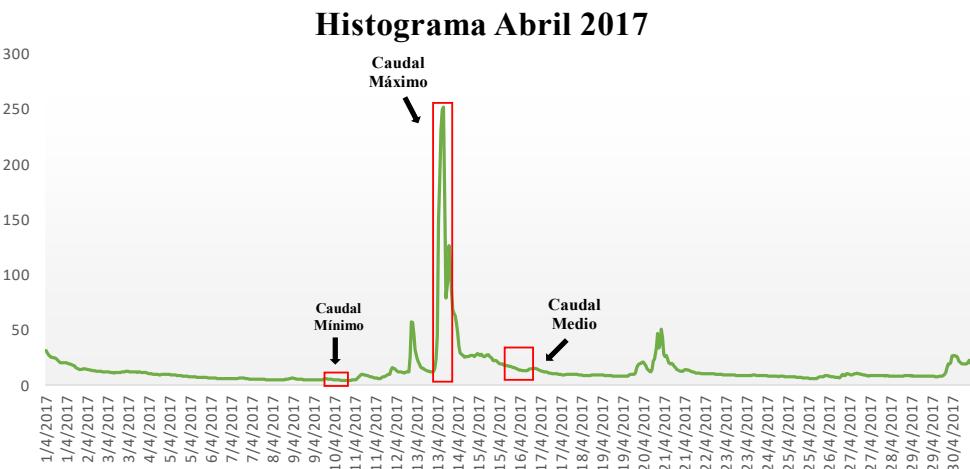
Nota. Realizado por el autor

Tabla 13
Tabla de caudales Mayo 2016

	Caudal Máximo	Caudal Mínimo	Caudal Medio
Mayo 2016	53.13961482	3.833600017	8.415307118

Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 20
Histograma Abril 2017



Nota. Realizado por el autor.

Tabla 14

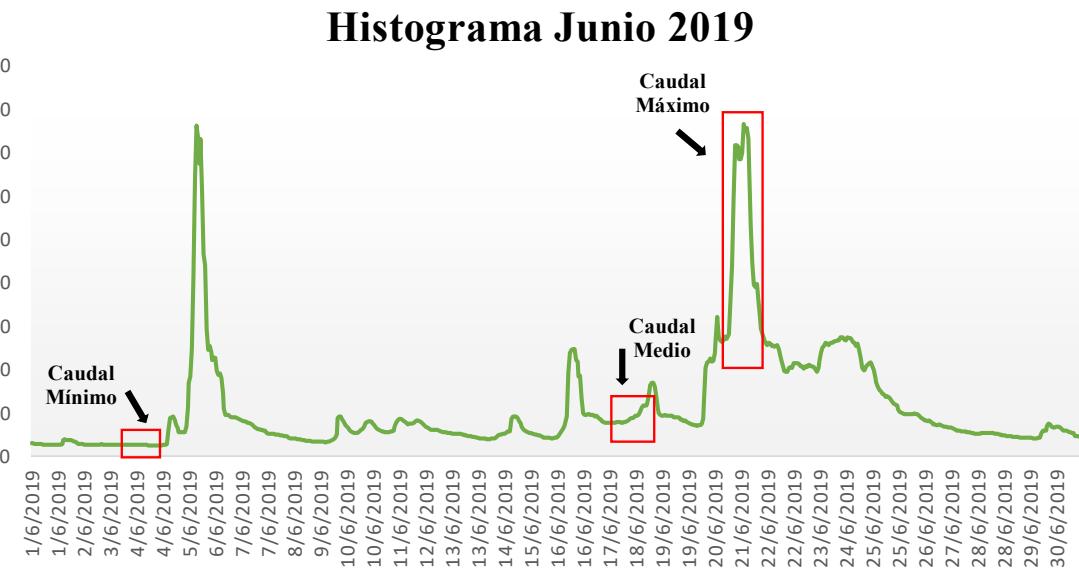
Tabla de caudales Abril 2017

	Caudal Máximo	Caudal Mínimo	Caudal Medio
Abril 2017	251.7628106	4.27955932	14.15491969

Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 21

Histograma Junio 2019



Nota. Realizado por el autor

Tabla 15

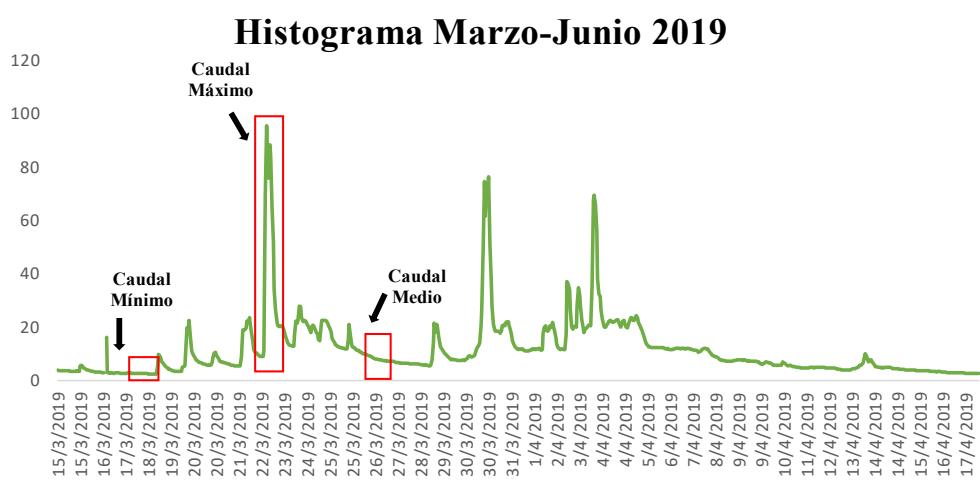
Tabla de caudales Junio 2019

	Caudal Máximo	Caudal Mínimo	Caudal Medio
Junio 2019	76.65069952	2.53523263	11.24180764

Nota. Realizado por el autor.

Ilustración 22

Histograma Marzo-Junio 2019



Nota. Realizado por el autor.

Tabla 16

Tabla de caudales Junio 2019

	Caudal Máximo	Caudal Mínimo	Caudal Medio
Marzo - Abril 2019	95.55361263	2.355980835	12.32839339

Nota. Realizado por el autor.

Tabla 17

Tabla con los caudales seleccionados

	Caudal Máximo	Caudal Mínimo	Caudal Medio
Octubre 2014	229.0442116	2.3157309	17.9989067
Octubre 2015	154.3985318	154.3985318	154.3985318
Abril 2016	77.6024449	4.4733604	13.7010710
Mayo 2016	53.1396148	3.8336000	8.4153071
Abril 2017	251.7628106	4.2795593	14.1549197
Junio 2019	76.6506995	2.5352326	11.2418076
Marzo - Abril 2019	95.5536126	2.3559808	11.3062742

Nota. Realizado por el autor.

De los hidrogramas analizados, se presenta la **tabla 10** con los valores seleccionados, donde se pueden visualizar los caudales utilizados como insumo para la modelación hidráulica en HEC-RAS correspondientes a diferentes eventos entre 2014 y 2019, se seleccionaron los valores representativos de caudal para el presente estudio. En particular, se escogió el caudal máximo

registrado en el mes de **Abril del 2017** de **251.762 l/s**, el caudal medio correspondiente al mes de

Octubre del 2014 de **17.998 l/s**, y el caudal mínimo en el mes de **Octubre del 2014** de **3.315 l/s**.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

Para la modelación hidráulica del tramo urbano del río Tomebamba (7,88 km) se empleó el software HEC-RAS en configuración 1D–2D acoplada, lo que permitió representar con mayor detalle el comportamiento del flujo tanto en el cauce principal como en las zonas de inundación aledañas. El modelo reproduce condiciones de flujo en canales abiertos y se ejecutó bajo régimen transitorio (unsteady flow) para analizar la evolución temporal de los eventos hidrológicos.

4.1. Parámetros Hidráulicos

4.1.1. Escenarios de simulación

Se consideraron tres escenarios de caudal y tres escenarios de rugosidad (n máxima, n mínima y n media) representativos de las condiciones extremas e intermedias observadas históricamente:

- **Escenario máximo:** 251.762 L/s ($\approx 251.76 \text{ m}^3/\text{s}$) — Abril de 2017.
- **Escenario medio:** 17.998 L/s ($\approx 17.998 \text{ m}^3/\text{s}$) — Octubre de 2014.
- **Escenario mínimo:** 3.315 L/s ($\approx 3.315 \text{ m}^3/\text{s}$) — Octubre de 2014.

Las simulaciones se ejecutaron para un periodo temporal suficiente para cubrir la fase de ascenso, pico y descenso del hidrograma.

4.1.2. Pendiente promedio

El análisis de la pendiente del fondo del cauce se realizó a partir de los levantamientos topográficos y fotogramétricos del tramo urbano del río Tomebamba. Para su representación en el modelo hidráulico se dividió el río en seis tramos principales, considerando la variación morfológica, el tipo de recubrimiento del lecho y la ubicación de los puentes.

En cada tramo se calcularon las pendientes parciales entre secciones consecutivas y posteriormente se obtuvo un valor promedio representativo, utilizado como condición de frontera interna en el modelo unidimensional (1D) y bidimensional (2D) en HEC-RAS.

La pendiente promedio de fondo del tramo urbano del río Tomebamba se encuentra en un rango entre **0.89 %** y **2.33 %**, con un valor medio general de aproximadamente **1.6 %**, lo que corresponde a un cauce con pendiente moderada típica de ríos urbanos con energía suficiente para mantener un flujo subcrítico en condiciones normales y una rápida respuesta frente a eventos de crecida.

La Tabla 18 resume los valores de pendiente promedio determinados para cada tramo:

Tabla 18
Tabla de pendientes de cada tramo

Tramo	Pendiente promedio
1.1	0.0233
1.2	0.0170
2	0.0185
3	0.0174
4	0.0089
5	0.0135
6	0.0134

Nota. Realizado por el autor.

4.1.3. Coeficientes de rugosidad (Manning's n)

La estimación del coeficiente de rugosidad de Manning (n) se realizó mediante la aplicación de la **tabla 9**. Los cálculos se efectuaron en 16 estaciones de control, correspondientes a los principales puentes del tramo urbano del río Tomebamba. En cada punto se determinó el valor de n por cada método y posteriormente se calculó un promedio aritmético, obteniendo así un valor representativo del coeficiente de rugosidad para el tramo correspondiente.

La Tabla 9 representa los resultados de los distintos métodos y el valor medio adoptado en cada estación. Estos valores fueron incorporados en el modelo hidráulico de HEC-RAS, asignando a

cada tramo su respectivo coeficiente promedio y se utiliza el valor mínimo que se refiere al método Meyer-Peter, además el método Muller y el valor máximo con el método Limerinos, con el fin de representar con mayor precisión las condiciones reales del cauce y sus márgenes.

4.1.4. Variación de secciones transversales

Las secciones transversales del cauce presentan variaciones significativas a lo largo de los tramos analizado debido a la presencia de estructuras (puentes, muros de encauzamiento, ensanchamientos y contracciones). Estas secciones fueron generadas a partir del modelo digital del terreno, asegurando una representación geométrica realista del cauce y sus márgenes.

4.1.5. Condiciones de frontera

Para garantizar la estabilidad numérica y la correcta representación hidráulica, se establecieron las siguientes condiciones de frontera:

- Aguas arriba (Upstream) y Aguas abajo (Downstream): Se utilizó la condición de flujo normal (Normal Depth) calculada a partir de dicha pendiente promedio.

Estas condiciones permitieron la correcta propagación del flujo a lo largo del tramo y la estabilidad del cálculo hidráulico en los tres escenarios evaluados.

4.1.6. Criterios numéricos y de estabilidad

- ~ **Tipo de simulación:** Steady, 1D–2D coupled
- ~ **Tolerancia de convergencia:** 1×10^{-3}
- ~ **Condición inicial:** Flujo uniforme, definido por pendiente promedio.
- ~ **Validación:** Comparación de niveles simulados con observaciones y análisis del número de Froude, velocidad y ancho superior en secciones críticas.

4.1.7. Criterio de evaluación de resultados

Los resultados del modelo incluyen tablas donde se observan valores de velocidades, numero de Froude y ancho superior adjuntando imágenes de las zonas de inundación. Se verificó el régimen de flujo (subcrítico y supercrítico) y se identificaron zonas críticas de desbordamiento en función de todo lo mencionado.

Tabla 19
Tabla resumen de parámetros hidráulicos

Parámetro	Valor empleado o rango	Unidad	Observación / Justificación
Longitud del tramo modelado	7.88	km	Tramo urbano del río Tomebamba
Tipo de modelo	1D–2D acoplado	—	1D para cauce principal, 2D para zonas de inundación
Régimen de flujo	Estático (Stady)	—	Reproduce evolución del evento
Pendiente promedio de fondo	1.78 – 2.33	%	Derivada del levantamiento fotogramétrico
Caudal máximo (Abril 2017)	251.76	L/s (m^3/s)	Escenario histórico
Caudal medio (Octubre 2014)	18	L/s (m^3/s)	Escenario medio
Caudal mínimo (Octubre 2014)	2.32	L/s (m^3/s)	Escenario base
Coef. rugosidad	Variable	—	Ver tabla 9
Condición de frontera aguas arriba	Nivel de agua / pendiente promedio	m	Condición de flujo normal
Condición de frontera aguas abajo	Nivel de agua / pendiente promedio	m	Condición de flujo normal
Paso de tiempo	0	s	Ajustado por estabilidad
Tolerancia de convergencia	1×10^{-3}	—	Residual numérico objetivo

Tipo de flujo dominante	Subcrítico/Supercrítico	—	Determinado por número de Froude
Variación de secciones transversales	Sí	—	Derivadas del MDT fotogramétrico
Validación del modelo	Comparación de niveles simulados	m	Calibración visual o analítica

Nota. Realizado por el autor.

4.2. Análisis gráfico del modelo hidráulico

A partir de este punto, se presentan únicamente los resultados correspondientes al caudal máximo de 251.76 m³/s, utilizando los valores de n medio, máximo y mínimo para cada tramo del río. Esta selección se realiza debido a que, con dicho caudal, se evidencian los eventos de inundación en el área de estudio. No obstante, en el **Anexo 1** se incluyen los resultados obtenidos para los caudales medio y mínimo, igualmente considerando los valores de n medio, máximo y mínimo, con el fin de complementar el análisis.

4.2.1. Tramo 1.1 n mínimo

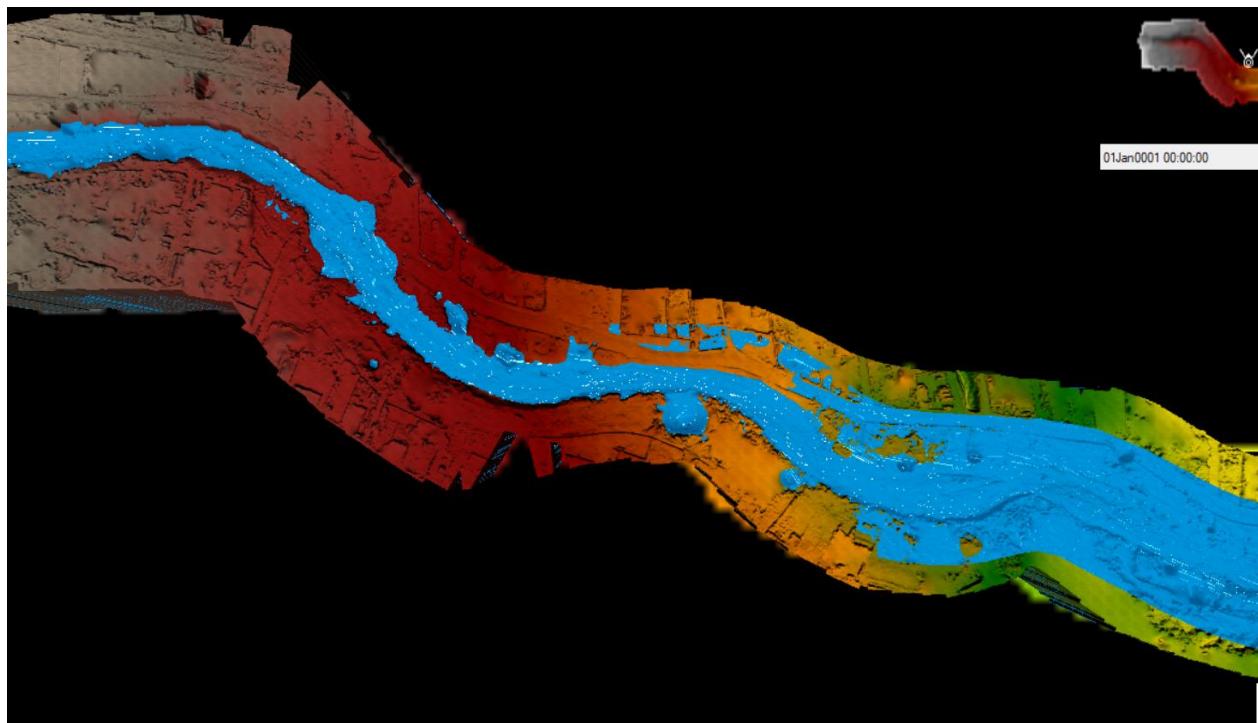
Caudal: 251.76 m³/s

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0233

Ilustración 23

Tramo 1.1 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)



Nota. Realizado por el autor.

En base al modelo con un valor mínimo de rugosidad se prueba una zona de inundación considerable en la Av. Paseo Tres de Noviembre y la Av. General Escandón. En estos sectores existen grandes planicies a lo largo del cauce sin domicilio que ayuda a estabilizar el caudal del río; sin embargo, se debe considerar la implementación de estructuras que aseguren la estabilidad del cauce.

4.2.2. Tramo 1.1 n medio

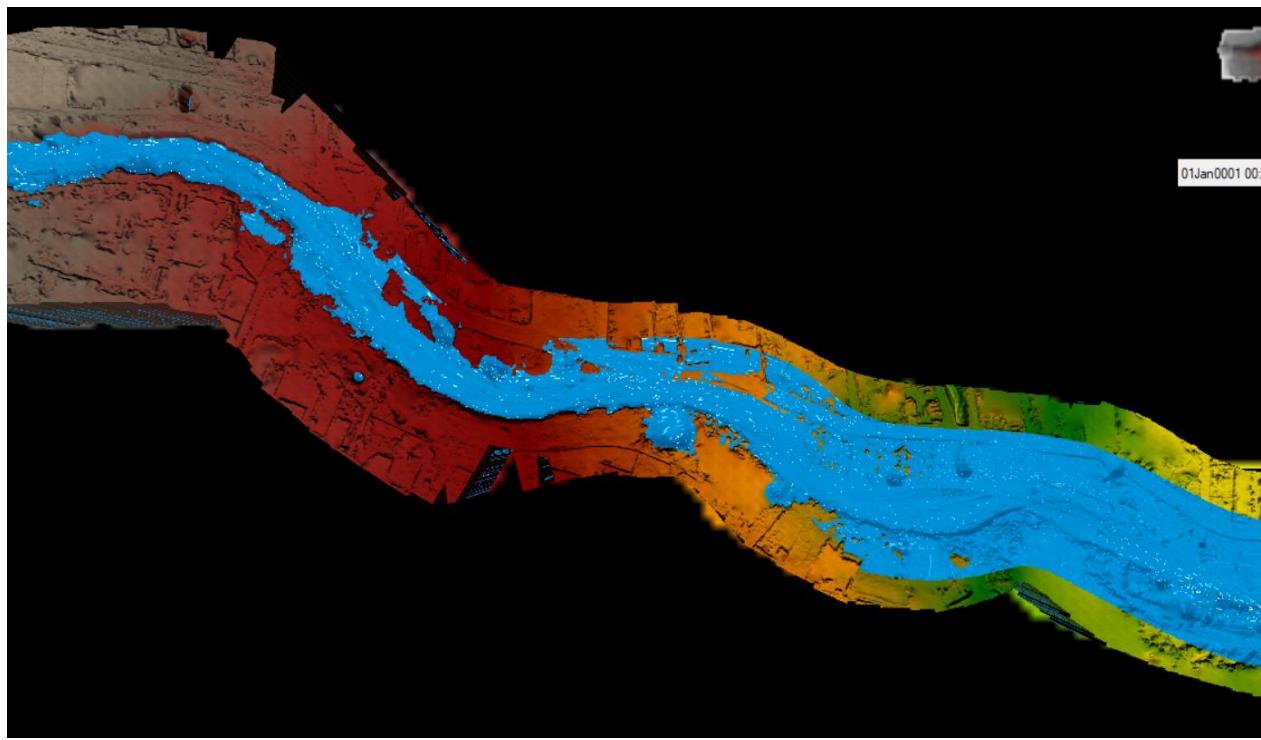
Caudal máximo: 251.76 m³/s.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0233

Ilustración 24

Tramo 1.1 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med)



Nota. Realizado por el autor.

Con el valor medio de rugosidad existe zonas de inundación más extendidas que en el apartado anterior; en los mismos lugares. Esto muestra gráficamente la afección que causa en el tramo el aumento del valor de rugosidad; y, por lo tanto, es necesario tomar medidas de encausamiento en el área afectada.

4.2.3. Tramo 1.1 n máximo

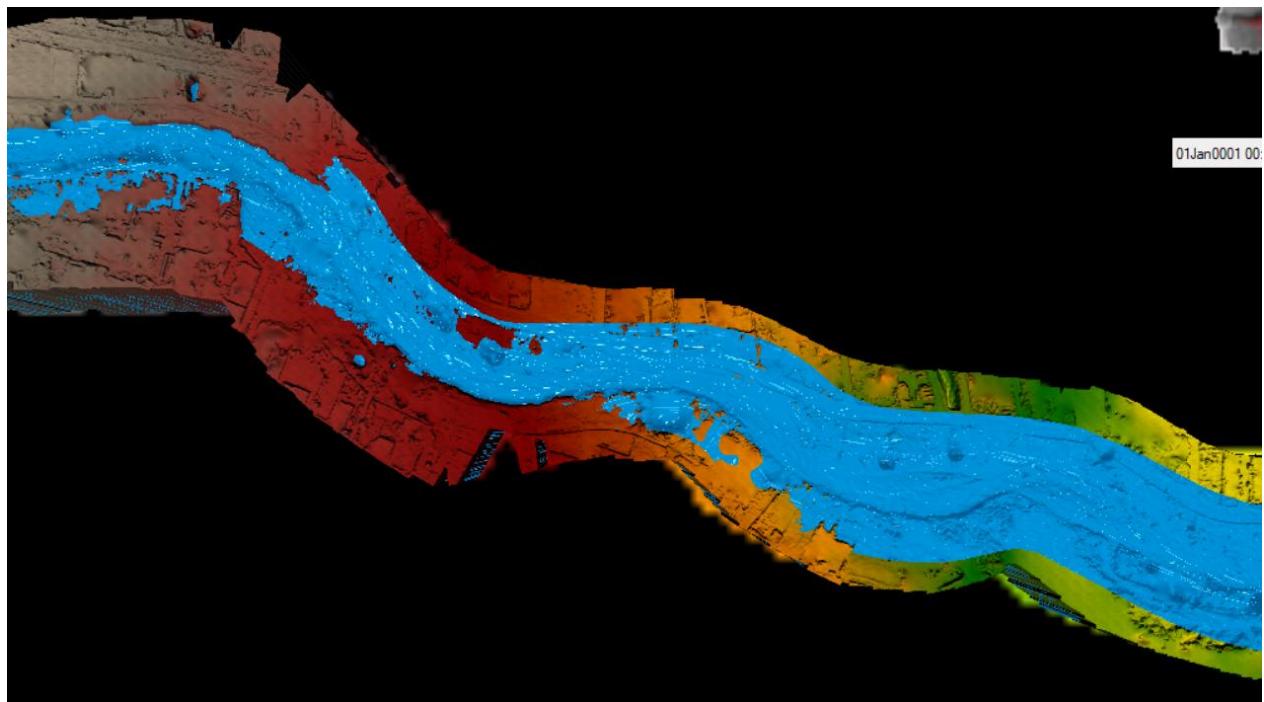
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0233

Ilustración 25

Tramo 1.1 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max)



Nota. Realizado por el autor.

En el momento de considerar el valor máximo de rugosidad en la zona de estudio se presentan una mayor zona de inundación; únicamente en planicies continuas a lo largo del cauce. Esto se debe al aumentar el valor de Manning la velocidad disminuye, el área de flujo aumenta y el ancho superior es el mayor en el análisis del tramo.

4.2.4. Tramo 1.2 n mínimo

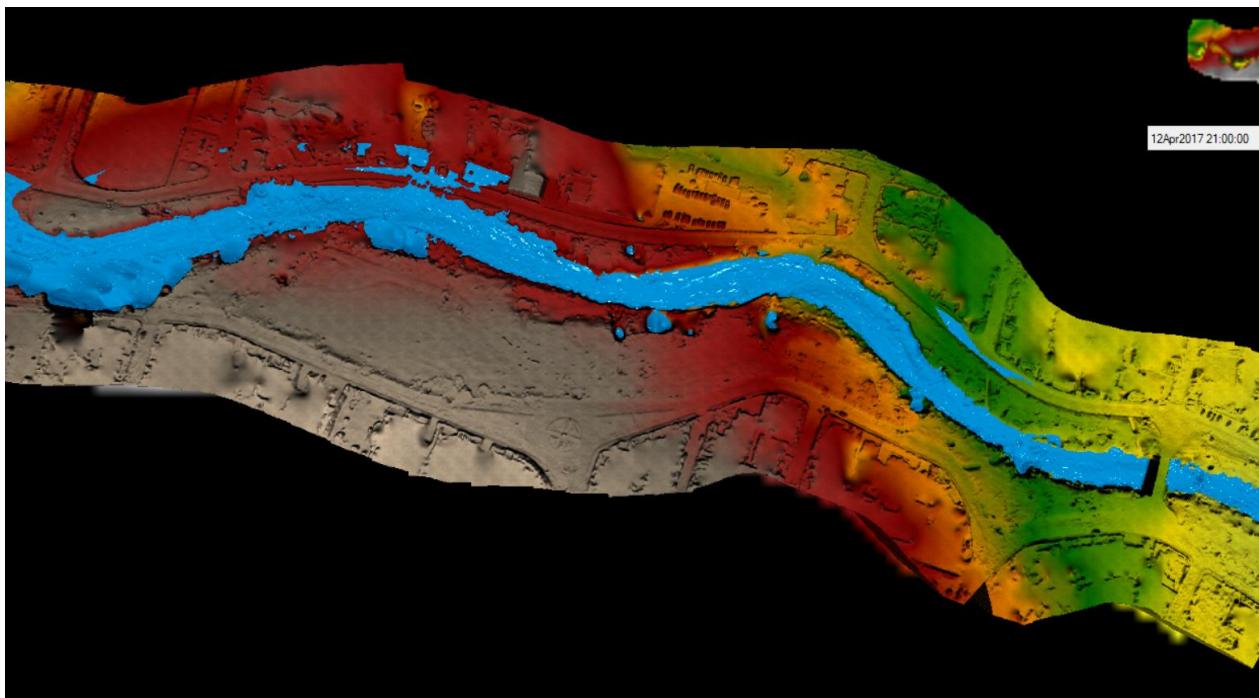
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0170

Ilustración 26

Tramo 1.2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)



Nota. Realizado por el autor.

Con el valor mínimo de rugosidad en el tramo 1.2, se presentan zonas de inundación detrás del hotel Oro Verde; Av. Paseo Tres de Noviembre; estos lugares se acercan peligrosamente a zonas urbanas por lo que es necesario tomar medidas de encausamiento en el área afectada.

4.2.5. Tramo 1.2 n medio

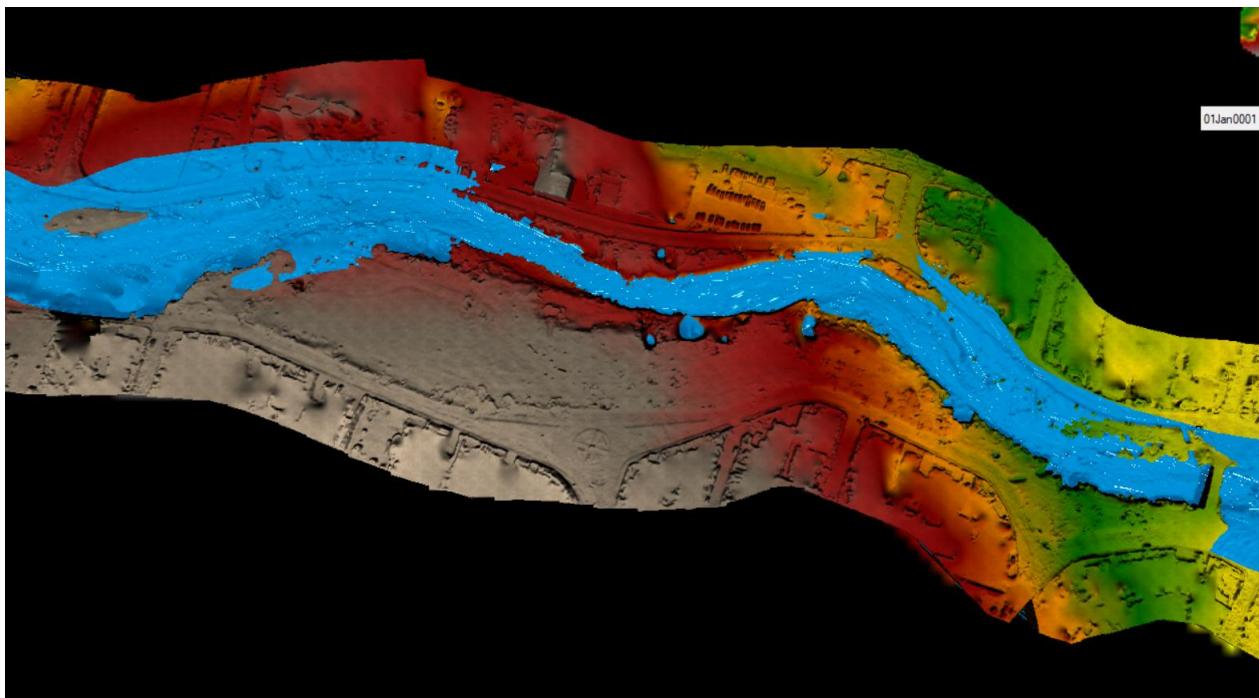
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0170

Ilustración 27

Tramo 1.2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med)



Nota. Realizado por el autor.

Tomando un valor medio de rugosidad se amplía el área de inundación en la parte alta del tramo; considerando un valor mayor del número de Manning disminuye la velocidad; sin embargo, aumenta el ancho superior; lo que se debe considerar en el momento de colocar estructuras de contingencia para emergencias de inundación.

4.2.6. Tramo 1.2 n máximo

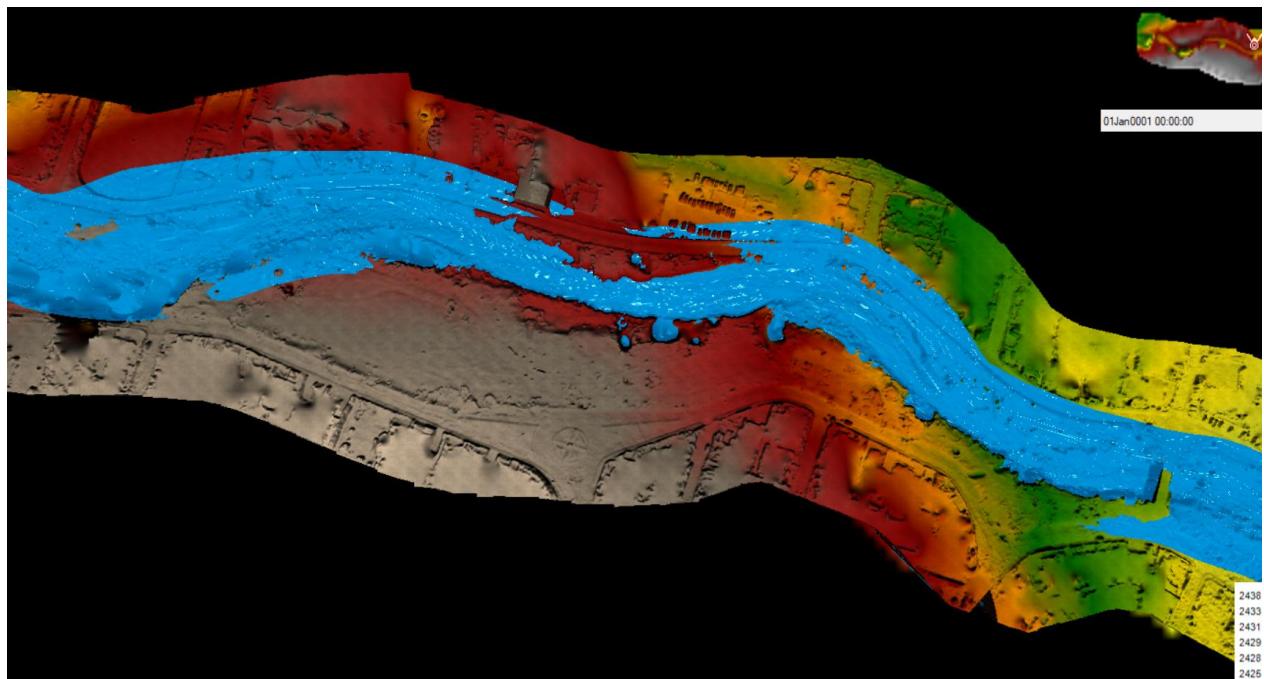
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0170

Ilustración 28

Tramo 1.2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max)



Nota. Realizado por el autor.

El mayor crecimiento del área de inundación se produce con el valor más alto de rugosidad; esto aumenta en ancho superior de la lámina de agua y genera problemas en todo el largo del tramo de estudio.

4.2.7. Tramo 2 n mínimo

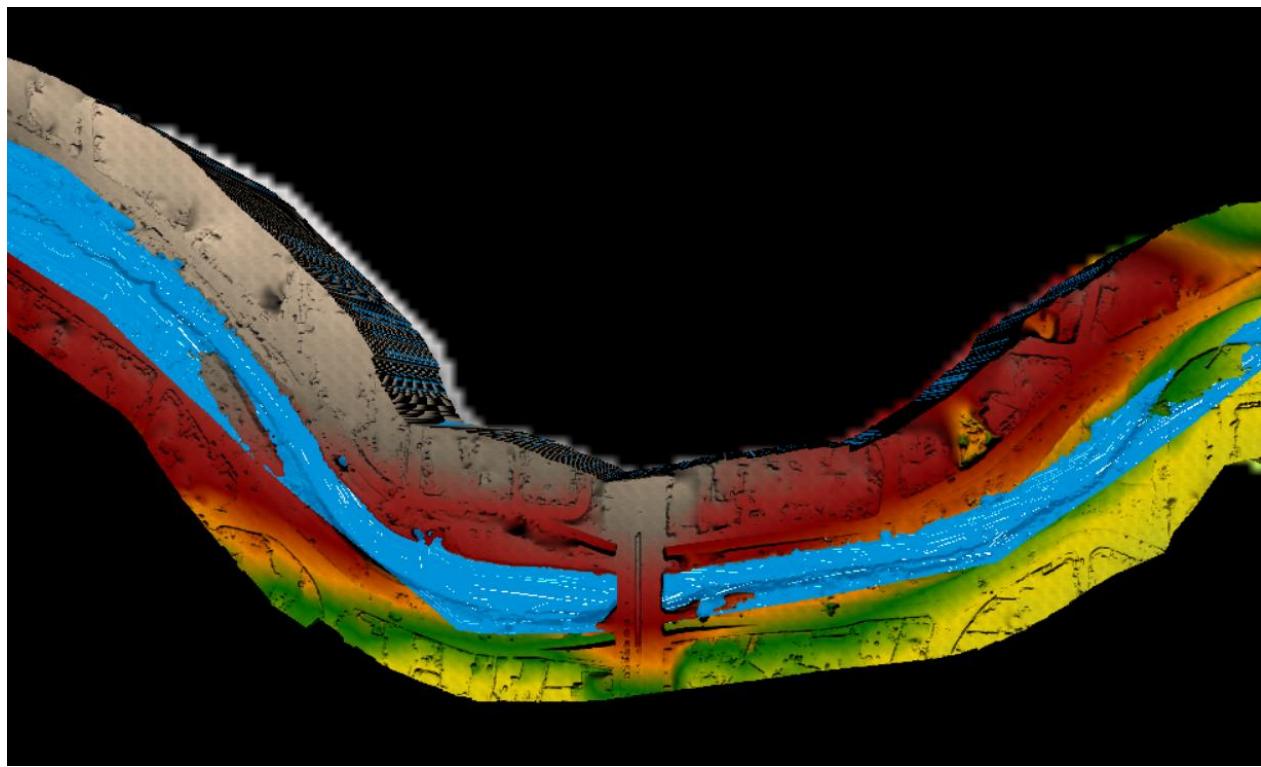
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0185

Ilustración 29

Tramo 2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)



Nota. Realizado por el autor.

En este tramo, al considerar el caudal máximo y el valor de rugosidad mínimo no se presentan zonas de inundación considerables; únicamente en planicies deshabitadas. Esto se debe a que el cauce se encuentra en óptimas condiciones para su recorrido natural.

4.2.8. *Tramo 2 n medio*

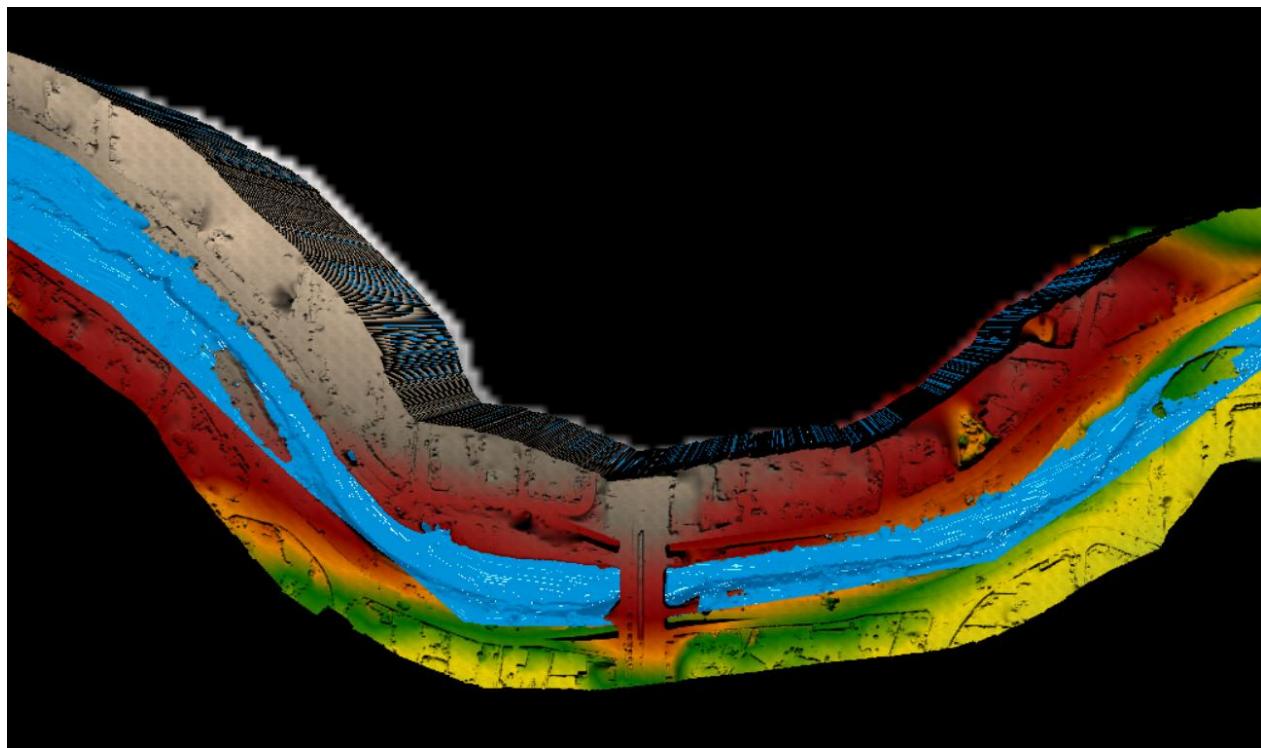
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0185

Ilustración 30

Tramo 2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med)



Nota. Realizado por el autor.

No se presencian cambios significativos en los niveles del cauce comparados al apartado anterior; únicamente se presenta un nivel más elevado en el sector de Puertas del Sol, producido por el aumento del número de Manning en el modelo.

4.2.9. Tramo 2 n máximo

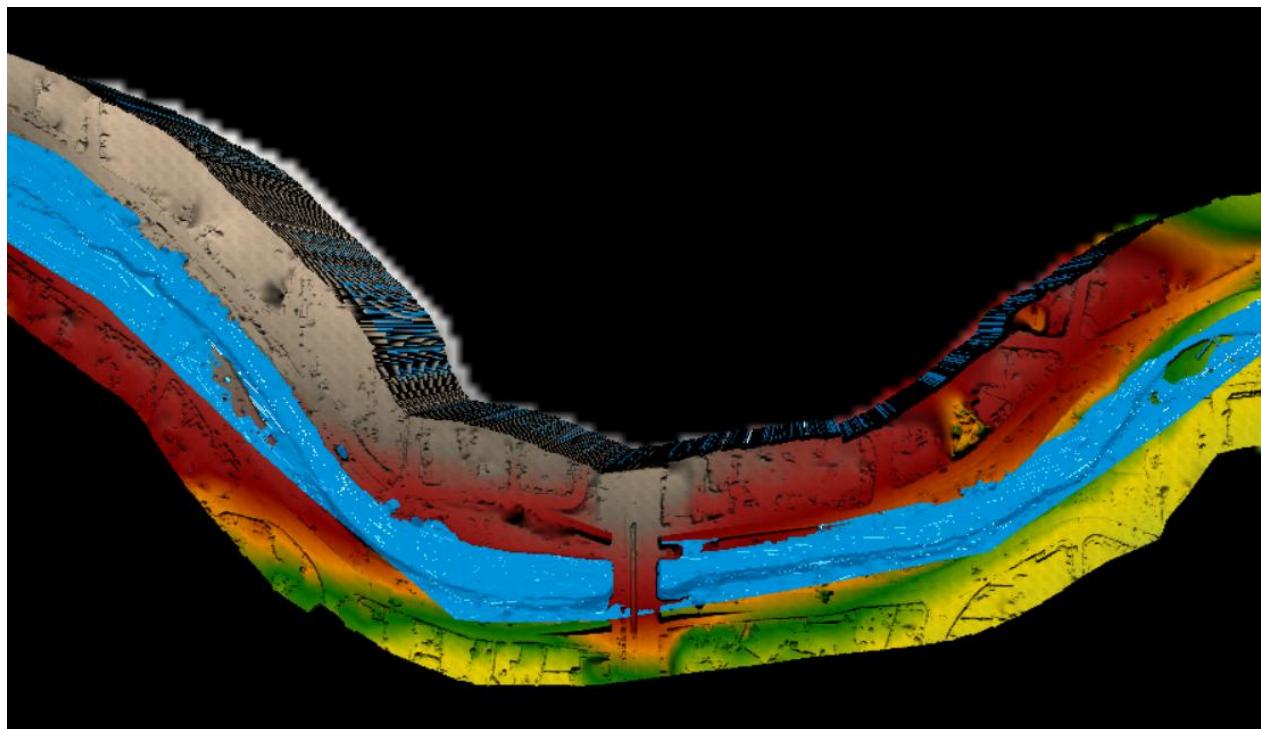
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0185

Ilustración 31

Tramo 2 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max)



Nota. Realizado por el autor.

Este escenario es el más considerable del tramo 2; representando una elevación en el nivel del agua en todo el tramo y representando peligro en las viviendas y vías aledañas al tramo de estudio que engloba la zona de Puertas del Sol.

4.2.10. Tramo 3 n mínimo

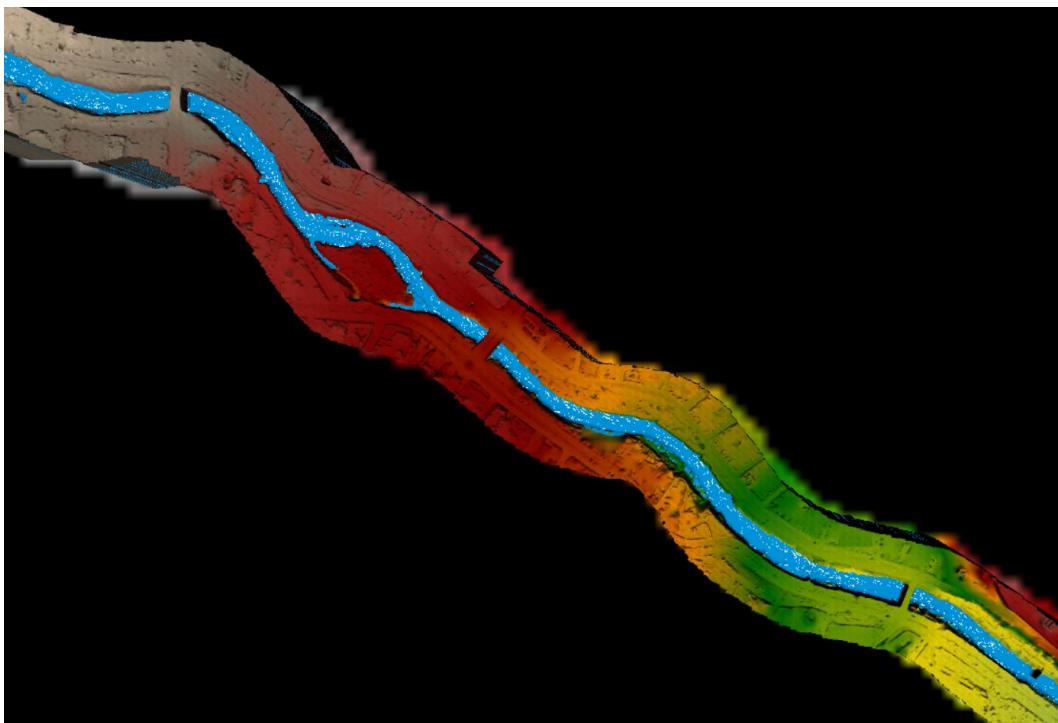
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0174

Ilustración 32

Tramo 3 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)



Nota. Realizado por el autor.

Este tramo representa la sección del cauce desde el Coliseo Jefferson Pérez hasta el cruce con la Av. Loja. Se puede observar un claro desbordamiento en los bordes del cauce en tramos medios; sin embargo, no representa un peligro directo a la zona urbanística de la ciudad debido a la topografía del tramo de estudio.

4.2.11. Tramo 3 n medio

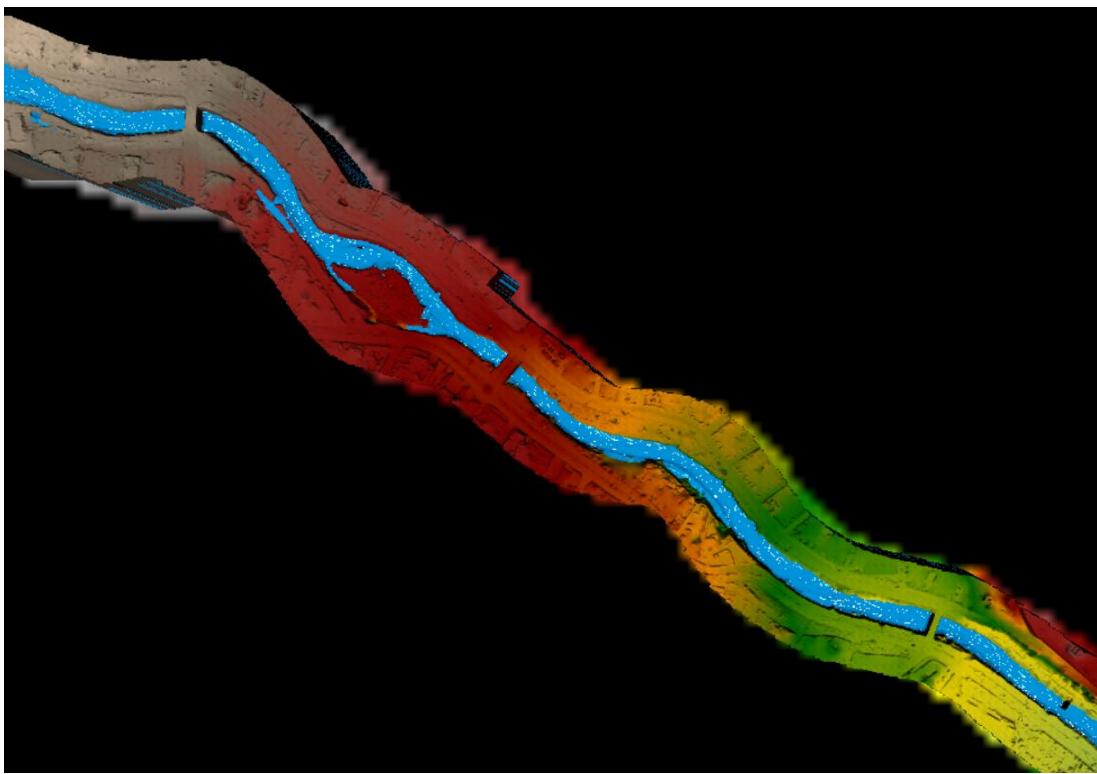
Caudal máximo: 251.76 m³/s.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0174

Ilustración 33

Tramo 3 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med)



Nota. Realizado por el autor.

Con el aumento de la rugosidad, se presenta un ancho mayor de la lámina de agua en la parte superior del tramo (zona Coliseo Jefferson Pérez); no obstante, se el río se mantiene en su topografía la mayoría del tiempo, sin un cambio considerable en la parte inferior del modelo.

4.2.12. Tramo 3 n máximo

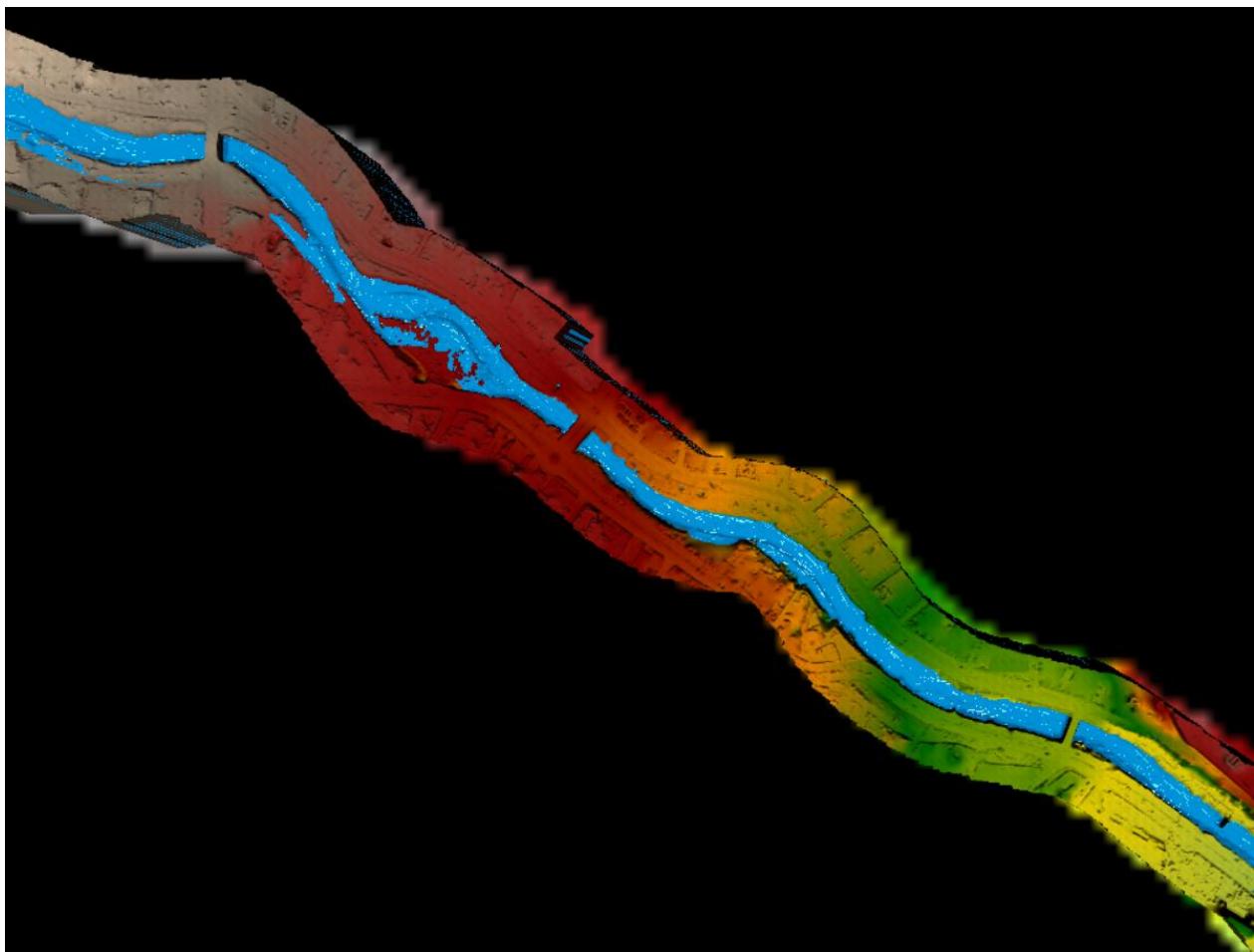
Caudal máximo: 251.76 m³/s.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0174

Ilustración 34

Tramo 3 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max)



Nota. Realizado por el autor.

Cuando se considera un valor mayor de rugosidad, aumenta el desbordamiento en la parte superior; aunque se mantiene sin un cambio considerable el tramo restante del modelo.

4.2.13. Tramo 4 n mínimo

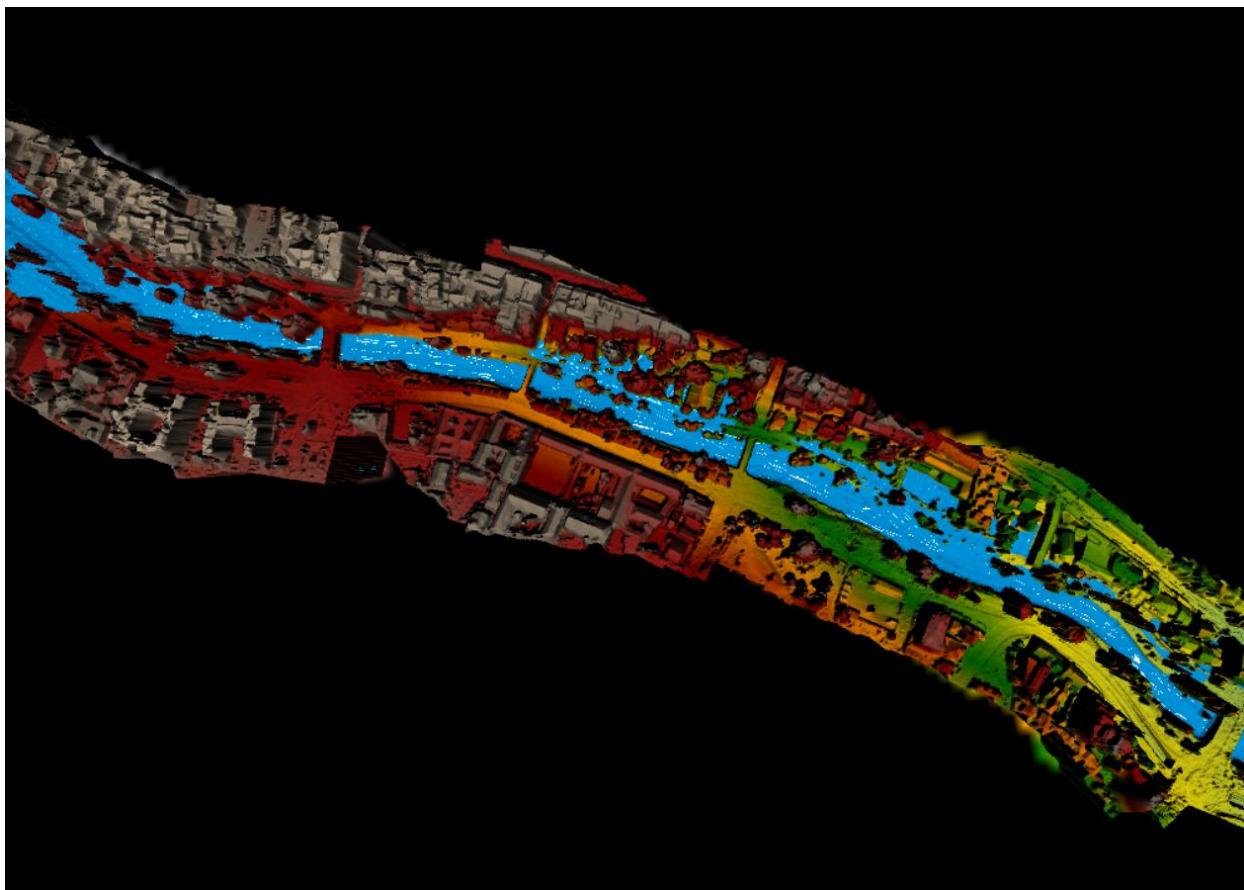
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0089

Ilustración 35

Tramo 4 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)



Nota. Realizado por el autor.

En base al análisis del valor mínimo de rugosidad; se han identificado áreas con una marcada propensión a inundaciones, siendo especialmente críticas las zonas ubicadas en las inmediaciones del Puente Roto y en el área que rodea al Teatro Carlos Cueva Tamariz. Estas regiones presentan una acumulación significativa de agua durante este evento de lluvia intensa.

4.2.14. Tramo 4 n medio

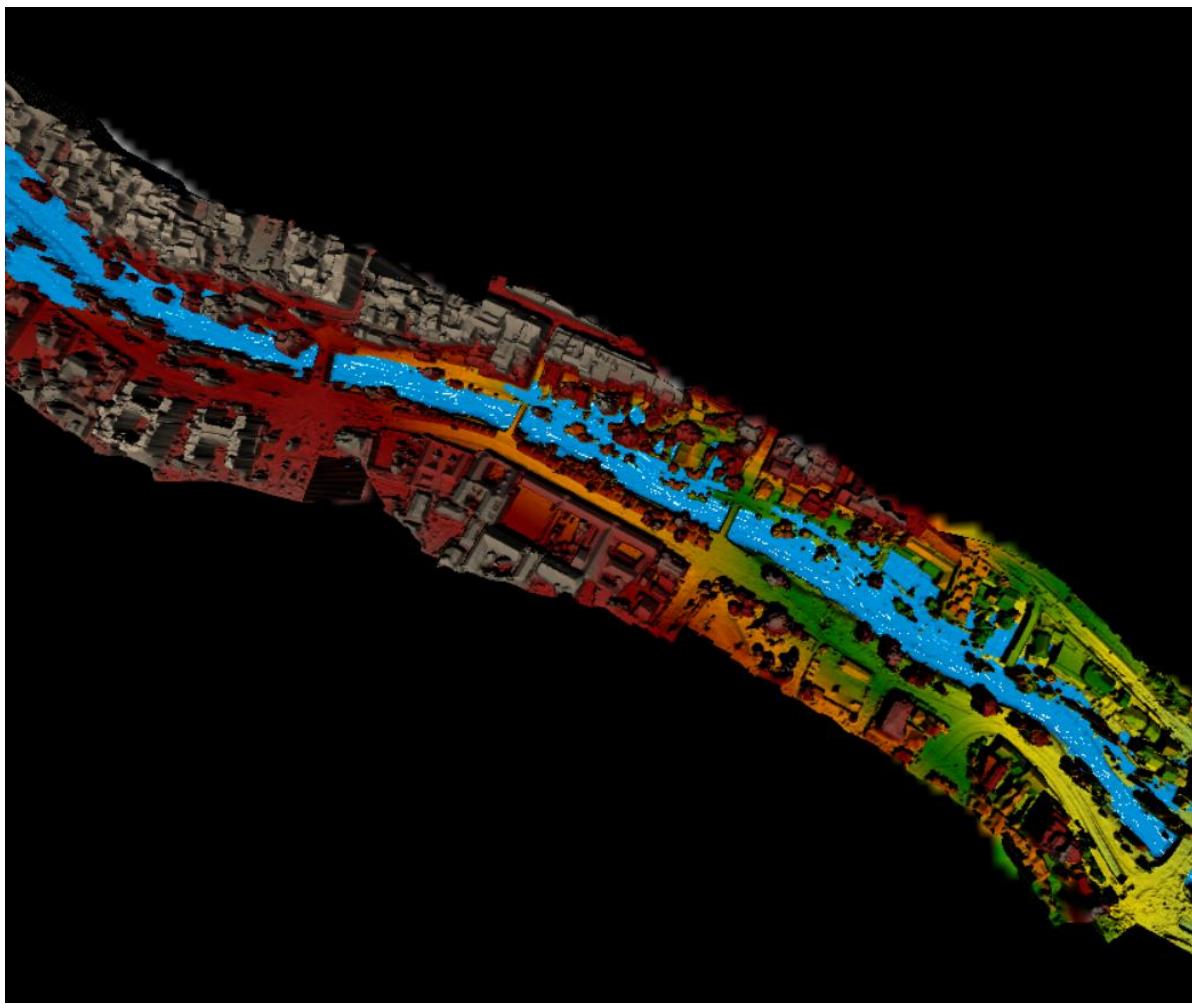
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0089

Ilustración 36

Tramo 4 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med)



Nota. Realizado por el autor.

Al igual que en el caso anterior; con un valor de caudal máximo y aumento de rugosidad se incrementan los problemas de acumulación de agua en las áreas anteriormente señaladas; siendo afectadas algunas áreas urbanas de la ciudad.

4.2.15. Tramo 4 n máximo

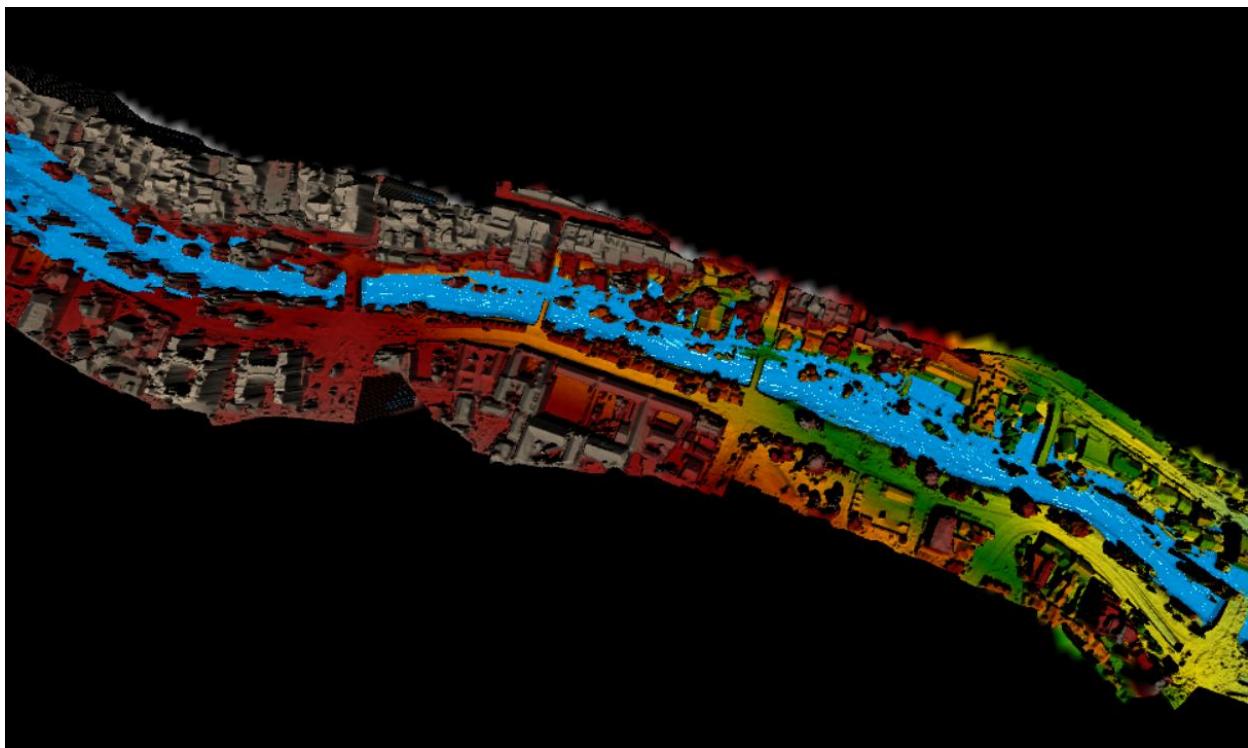
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0089

Ilustración 37

Tramo 4 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max)



Nota. Realizado por el autor.

Con el valor de rugosidad máximo; el inconveniente de áreas inundadas se extiende hasta llegar al redondel de los tres puentes en el extremo izquierdo del tramo. Se debe considerar este análisis como el resultado con más afecciones a lo largo del cauce.

4.2.16. Tramo 5 n mínimo

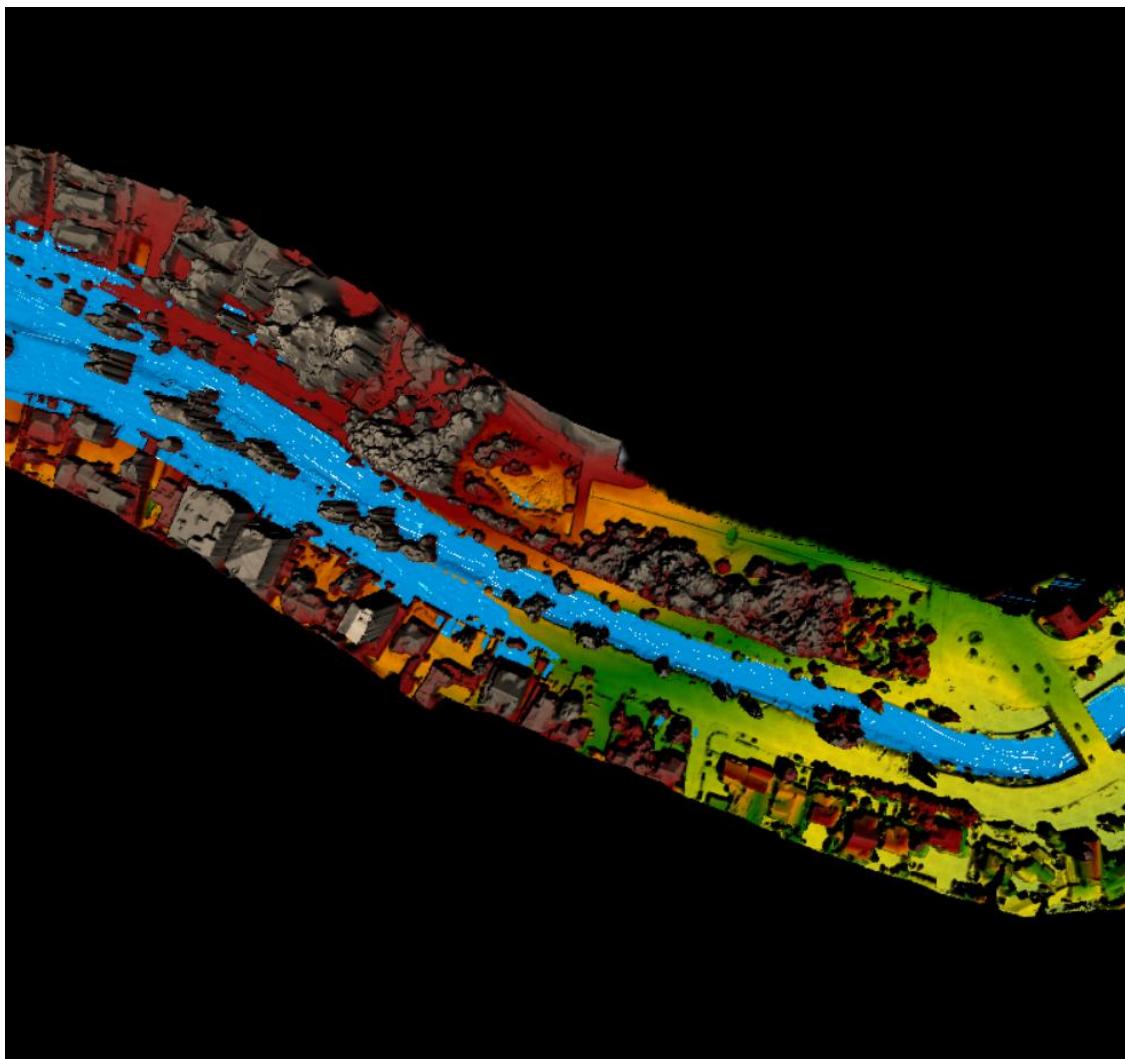
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0135

Ilustración 38

Tramo 5 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)



Nota. Realizado por el autor.

El valor de caudal máximo es el que genera los inconvenientes en la modelación de todos los tramos del río Tomebamba; en este caso, se asume un valor mínimo de rugosidad y el área de interés es una amplia zona de inundación en la Av. Doce de Abril y la Av. Paseo 3 de Noviembre; desde la intersección vehicular de Todos Santos, hasta la intersección con la calle Arirumba.

4.2.17. Tramo 5 n medio

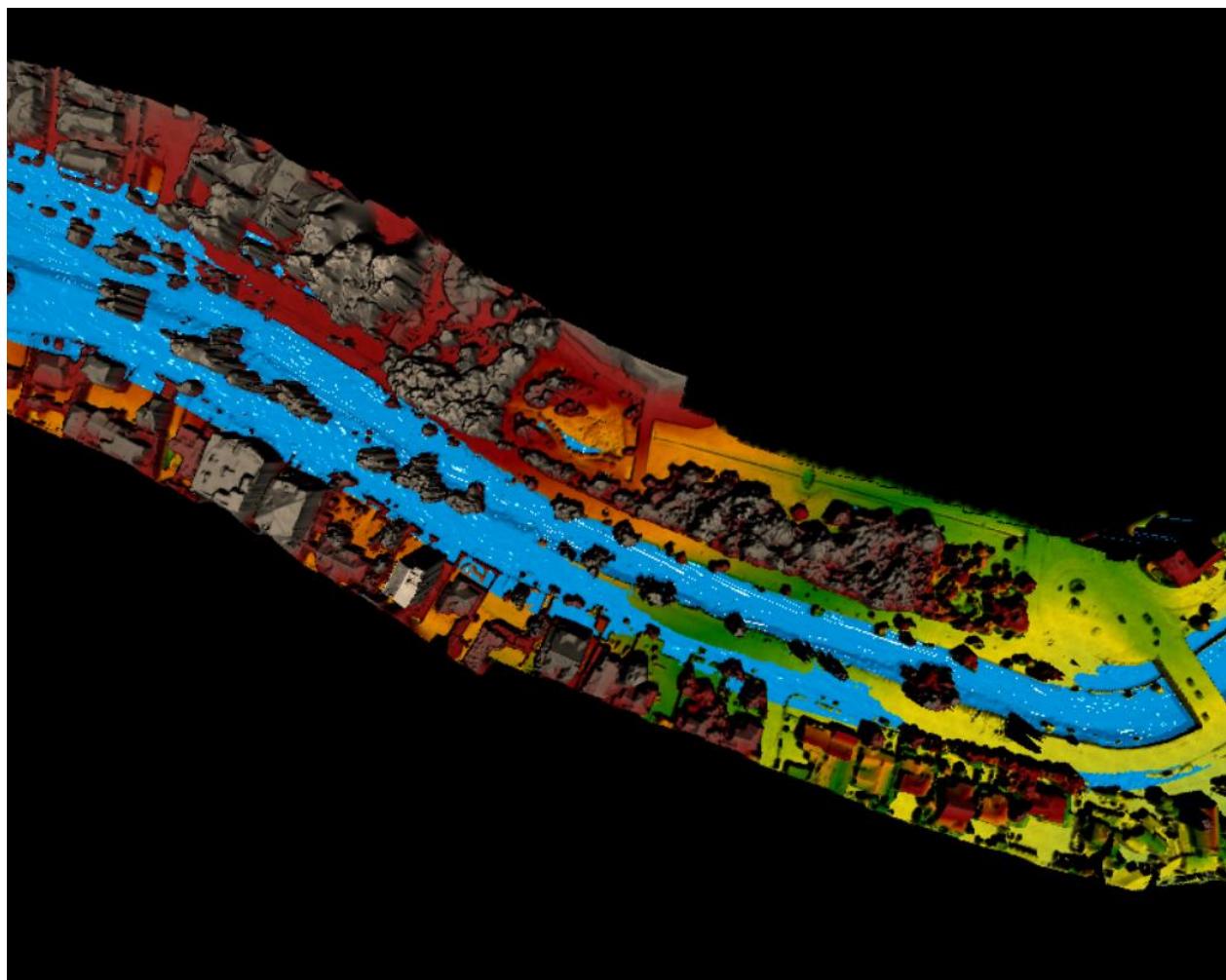
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0135

Ilustración 39

Tramo 5 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med)



Nota. Realizado por el autor.

Existe un incremento en el área de inundación a lo largo del cauce en el momento de aumentar la rugosidad del modelo. Este caso se repite en todos los tramos y demuestra que el aumento del

número de Manning en el sistema aumente al ancho superficial de la lámina de agua y eleva el nivel del río, causando inundaciones de mayor magnitud.

4.2.18. Tramo 5 n máximo

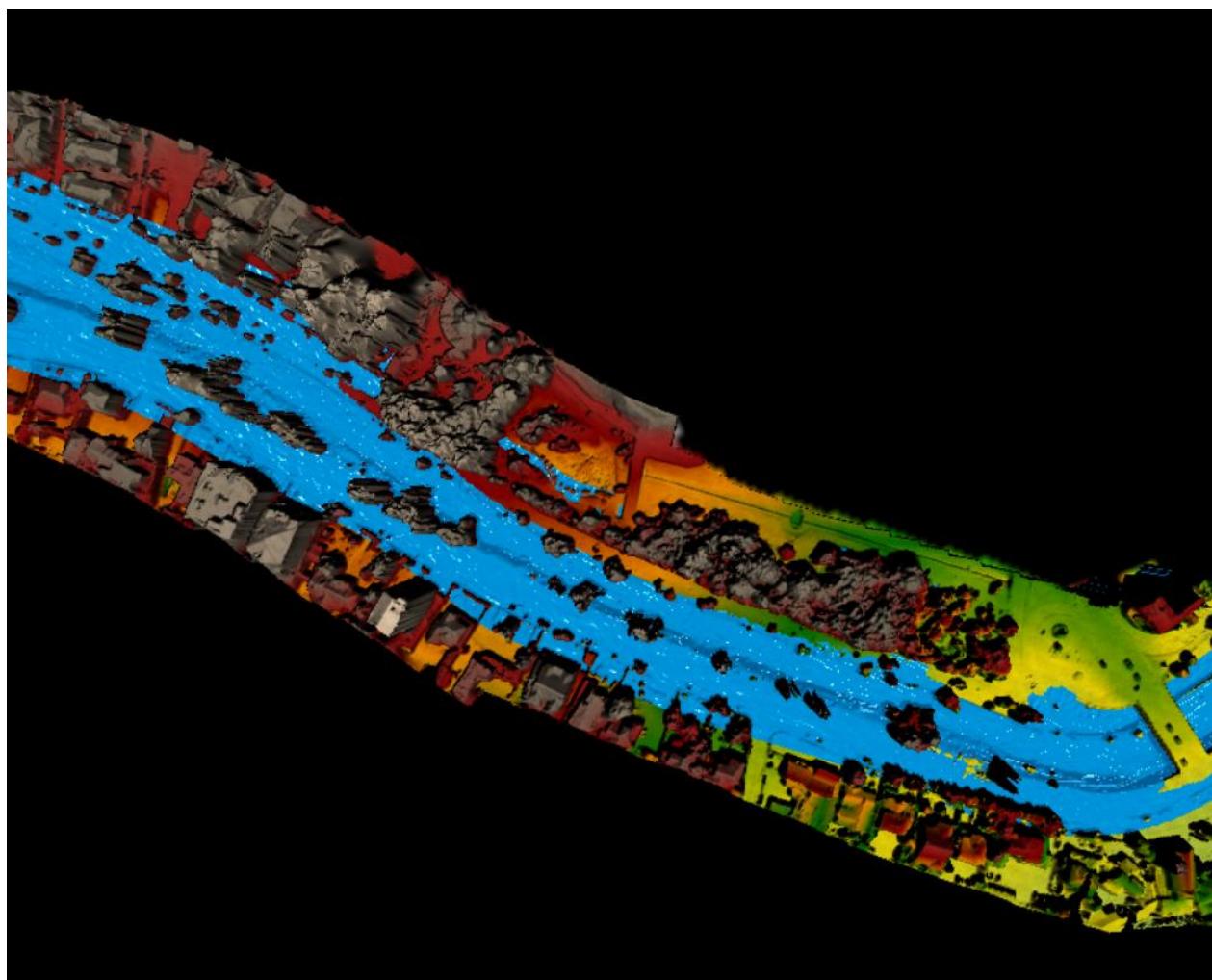
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0135

Ilustración 40

Tramo 5 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max)



Nota. Realizado por el autor.

El ingresar al sistema el valor máximo de rugosidad; combinado al caudal máximo tomado de los datos de las estaciones de ETAPA, se obtiene un colapso casi en la totalidad de los bordes del tramo. Es de las secciones más alarmantes del río y en la que se presenta un nivel considerable de aumento en las cotas de los niveles de agua.

4.2.19. Tramo 6 n mínimo

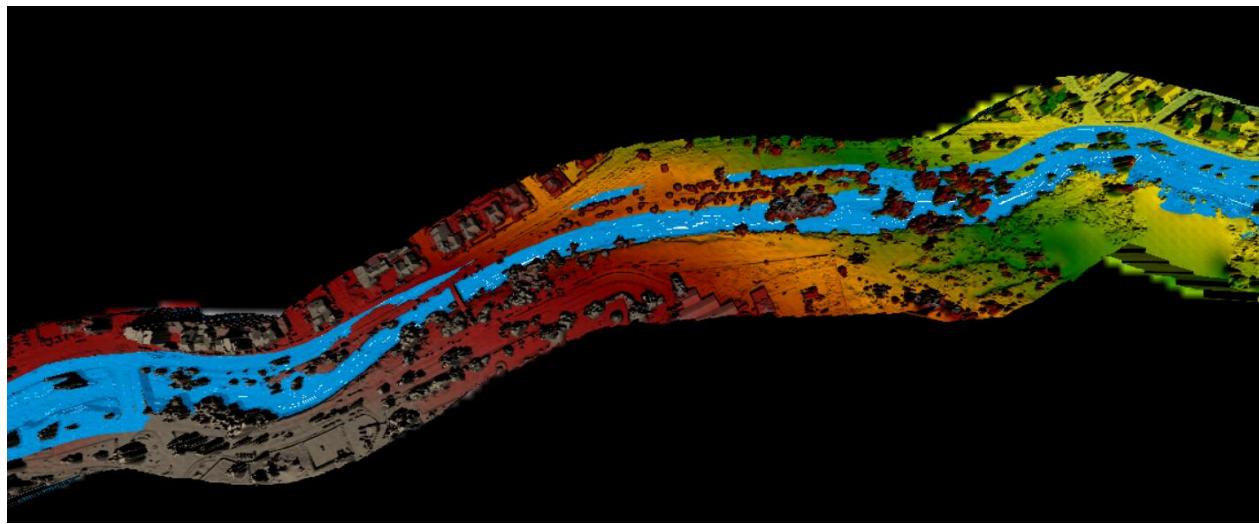
Caudal máximo: 251.76 m³/s.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0134

Ilustración 41

Tramo 6 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n min)



Nota. Realizado por el autor.

En el escenario del caudal máximo y rugosidad mínima; presentado en Abril de 2017, se puede notar un desbordamiento del cauce del río en el sector del Banco Pichincha de la Av. Solano y del parque el paraíso; estas son zonas críticas dentro de la ciudad al momento del analizar las inundaciones que ocurren en el río Tomebamba; se debe considerar que estos sectores no están diseñados para soportar un caudal tan considerable como el analizado en el modelamiento.

4.2.20. Tramo 6 n medio

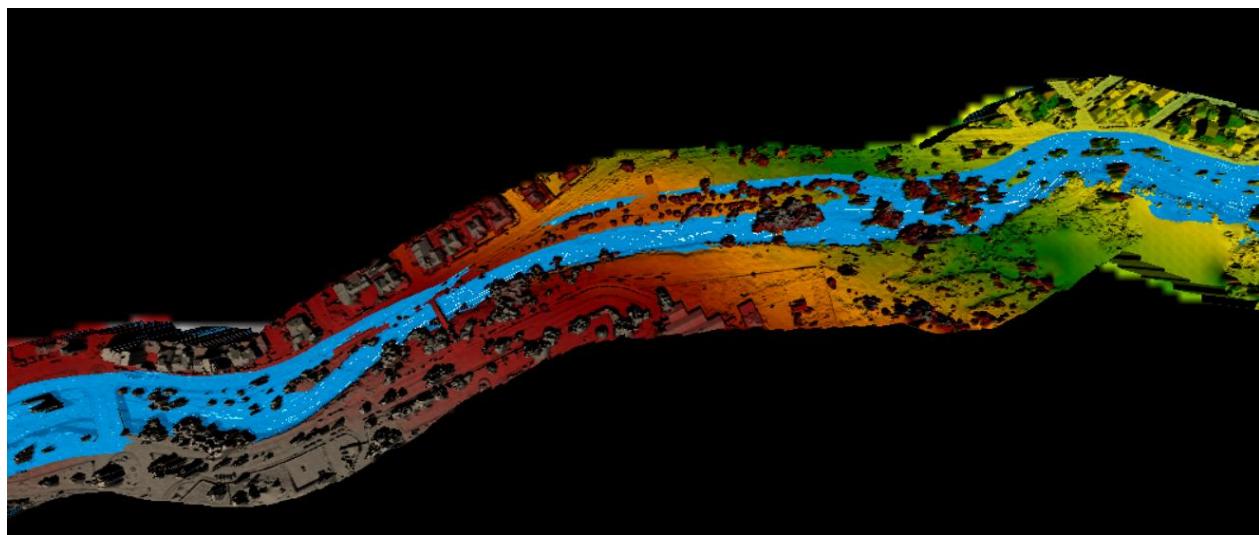
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0134

Ilustración 42

Tramo 6 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n med)



Nota. Realizado por el autor.

Se presenta un escenario similar en la simulación con Manning medio; demostrando que, en este caso, no afecta de manera considerable la variación de la rugosidad a lo largo del cauce del río Tomebamba.

4.2.21. Tramo 6 n máximo

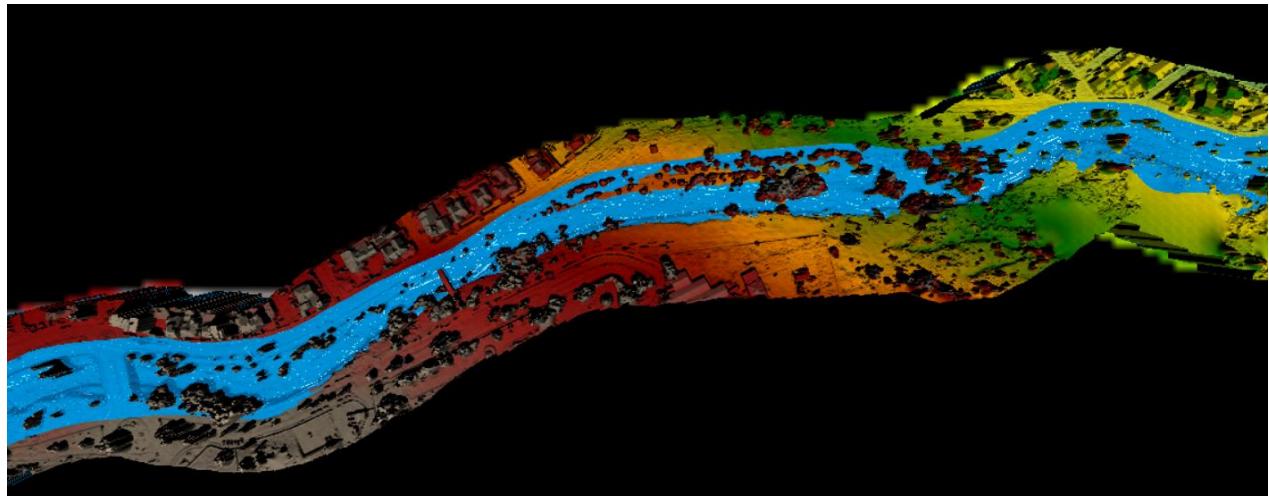
Caudal máximo: $251.76 \text{ m}^3/\text{s}$.

n: variable (ver tabla 9)

s: 0.0134

Ilustración 43

Tramo 6 RAS 3D Viewer periodo de escenario sobresaliente (caudal max y n max)



Nota. Realizado por el autor.

A diferencia del modelamiento anterior, en este escenario si se aprecia un aumento del área de inundación, sobre todo al inicio de la zona del parque el paraíso. Esto se debe a valores elevados de rugosidad que se presentan en la misma.

4.3. Comparación analítica de los resultados del modelo hidráulico

En este apartado se ofrece una comparación analítica entre los valores sobresalientes de los resultados de la modelación hidráulica, teniendo en cuenta los datos de cada uno de los tramos. Así como también, detallando los cambios significativos que se reflejan en las tablas de las diferentes zonas de la simulación computacional de flujo. La totalidad de los resultados se encuentra señalado en el anexo 2.

- **Tramo 1.1**

Tabla 20

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (1.1)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
1.1	6	Qmin	4.23	2449.78	2449.84	1.98	2.14	14.48	1.65
1.1	6	Qmed	25.28	2450.05	2450.22	3.35	7.59	22.19	1.83
1.1	6	Qmax	251.76	2451.20	2452.03	7.45	34.72	24.62	1.95

1.1	2	Qmin	4.23	2433.95	2433.88	1.31	3.24	9.95	0.73
1.1	2	Qmed	25.28	2434.25	2434.49	4.01	6.33	10.60	1.64
1.1	2	Qmax	251.76	2439.85	2436.90	1.07	342.79	97.10	0.14

Nota. Realizado por el autor.

Tabla 21

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (1.1)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
1.1	6	Qmin	4.23	2449.97	2449.84	0.75	5.65	21.57	0.47
1.1	6	Qmed	25.28	2450.41	2450.22	1.62	15.83	23.23	0.62
1.1	6	Qmax	251.76	2451.59	2452.04	5.88	44.34	25.30	1.37
1.1	2	Qmin	4.23	2434.06	2433.88	0.97	4.38	10.33	0.47
1.1	2	Qmed	25.28	2435.13	2434.49	1.47	17.56	15.78	0.43
1.1	2	Qmax	251.76	2439.99	2436.90	0.89	356.42	97.10	0.12

Nota. Realizado por el autor.

Tabla 22

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (1.1)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
1.1	6	Qmin	4.23	2450.12	2449.84	0.47	9.10	22.67	0.24
1.1	6	Qmed	25.28	2450.78	2450.22	1.06	24.35	23.87	0.33
1.1	6	Qmax	251.76	2452.86	2452.51	3.36	81.48	36.29	0.61
1.1	2	Qmin	4.23	2434.27	2433.88	0.64	6.59	10.64	0.26
1.1	2	Qmed	25.28	2435.70	2434.49	0.94	29.82	28.61	0.23
1.1	2	Qmax	251.76	2441.16	2440.95	0.48	469.66	97.10	0.06

Nota. Realizado por el autor.

El análisis comparativo de los escenarios de rugosidad (n mínima, n media y n máxima) evidencia diferencias sustanciales en el comportamiento hidráulico del cauce. En relación con la elevación del nivel de agua, se observa que con valores bajos de rugosidad los tirantes son menores, mientras que al aumentar n se incrementa progresivamente el nivel del agua, alcanzando sus máximos en el escenario de n elevada. Este fenómeno se explica porque la resistencia hidráulica mayor conlleva mayores pérdidas de energía, lo que obliga al flujo a aumentar su sección transversal para evacuar el mismo caudal (Chow, 1994).

La velocidad del flujo muestra una tendencia inversa. Con n mínima se presentan las velocidades más altas, que en condiciones de caudal máximo superan los 7 m/s en algunos tramos,

lo que representa un potencial riesgo de erosión en márgenes y lecho. En contraste, el escenario con n máxima reduce significativamente la velocidad, registrando valores inferiores a 1 m/s en caudales bajos y moderados, y valores moderados en condiciones de caudal máximo. El escenario intermedio (n media) presenta velocidades más equilibradas, que permiten un tránsito hidráulico adecuado sin alcanzar los extremos de erosión o estancamiento (USACE, 2021).

El área de flujo y el ancho superior también reflejan el efecto de la rugosidad. En el escenario de n mínima, el flujo ocupa áreas reducidas y mantiene un ancho superficial más estrecho. Sin embargo, en n máxima el área hidráulica crece de manera considerable, especialmente en condiciones de caudal máximo, donde en ciertos tramos se superan los 90 m de ancho, lo que evidencia un alto riesgo de desbordamiento. En el caso de n media, los valores se ubican en un rango intermedio, con áreas y anchos superiores a n mínima, pero sin llegar a los extremos de n máxima.

Respecto al número de Froude, los resultados confirman la transición de un régimen más inestable hacia uno más estable a medida que aumenta la rugosidad. En el escenario con n mínima, varios tramos bajo caudales elevados alcanzan valores supercríticos ($Fr > 1$), lo que refleja un flujo rápido y con mayor capacidad erosiva. Con n media, los valores de Froude disminuyen y tienden a mantenerse en régimen subcrítico, mientras que con n máxima los valores son en su mayoría muy inferiores a 1, consolidando un régimen subcrítico más lento y estable, aunque acompañado de mayores niveles de agua que comprometen la capacidad hidráulica del cauce (Arcement & Schneider, 1989).

En síntesis, el análisis demuestra que la rugosidad del cauce influye de manera decisiva en el equilibrio entre velocidad y tirante. Valores bajos de n favorecen altas velocidades y riesgo de erosión, mientras que valores altos incrementan significativamente los niveles de agua,

aumentando la probabilidad de desbordamientos. En este contexto, el escenario de n media ofrece un comportamiento más balanceado, constituyéndose en una condición intermedia entre la eficiencia hidráulica y la seguridad hidráulica del sistema (Chow, 1994; USACE, 2021).

• Tramo 1.2

Tabla 23

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (1.2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
1.2	9	Qmin	2.32	2430.1	2429.77	0.33	3.59	7.63	0.46
1.2	9	Qmed	18	2430.81	2430.56	1.18	17.27	29.79	0.61
1.2	9	Qmax	251.76	2433.16	2432.32	2.77	140.26	75.82	0.57
<hr/>									
1.2	2	Qmin	2.32	2419	2419	1.24	1.87	12.08	0.95
1.2	2	Qmed	18	2419.37	2419.45	2.68	6.71	13.9	0.97
1.2	2	Qmax	251.76	2421.01	2421.76	6.87	36.67	23.35	1.01

Nota. Realizado por el autor.

En base al análisis de los datos obtenidos por el programa, se pueden resaltar escenarios en los cotes 2 y 9; siendo estos los que producen anchos superiores y velocidades mayores a los demás. En el caso de la rugosidad mínima, se obtiene un ancho superior de la lámina de agua de 75.82 m y una velocidad máxima de 6.81 m/s; en ambos casos los valores mayores se producen con el caudal máximo.

Tabla 24

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (1.2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
1.2	9	Qmin	2.32	2430.16	2429.77	0.24	4.04	8.04	0.25
1.2	9	Qmed	18	2430.95	2430.83	0.78	21.65	30.8	0.34
1.2	9	Qmax	251.76	2433.39	2432.19	2.1	158.5	80.03	0.41
<hr/>									
1.2	2	Qmin	2.32	2419	2419	1.22	1.89	12.09	0.99
1.2	2	Qmed	18	2419.45	2419.45	2.32	7.75	14.27	1.01
1.2	2	Qmax	251.76	2421.75	2421.76	4.58	54.93	26.42	1.02

Nota. Realizado por el autor.

Con base en el mismo análisis; con una rugosidad mínima el ancho superior alcanza los 80.03 m, y la velocidad 4.58 m/s. Cuando el número de Manning aumenta genera un aumento en el ancho superior de la lámina de agua y reduce la velocidad; al ser inversamente proporcional a la misma.

Tabla 25

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (1.2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
1.2	9	Qmin	2.32	2430.20	2429.77	0.11	4.35	8.28	0.10
1.2	9	Qmed	18	2431.13	3431.12	0.42	27.17	32.02	0.16
1.2	9	Qmax	251.76	2433.75	2433.68	1.19	187.35	80.97	0.22
1.2	2	Qmin	2.32	2419.10	2418.85	0.74	3.13	12.58	0.47
1.2	2	Qmed	18	2419.73	2419.45	1.51	11.91	15.63	0.55
1.2	2	Qmax	251.76	2422.11	2421.76	3.84	65.95	34.11	0.82

Nota. Realizado por el autor.

Tomando el número de Manning máximo, se presentan los cambios más significativos. El valor del ancho superior llega a 80.97 m y la velocidad máxima se reduce a 3.84 m/s; por lo tanto, cuando la rugosidad se eleva se genera más fricción, reduciendo la velocidad y aumentando el nivel del agua en el cauce.

• Tramo 2

Tabla 26

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
2	7	Qmin	2.32	2424.37	2424.37	1.60	1.44	5.61	1.01
2	7	Qmed	18	2425.01	2425.01	2.40	7.49	12.90	1.01
2	7	Qmax	251.76	2426.67	2426.67	4.11	67.68	44.91	1.01
2	6	Qmin	2.32	2419.06	2419.25	4.13	0.56	3.68	1.08
2	6	Qmed	18	2419.41	2419.80	6.37	2.82	10.53	1.15
2	6	Qmax	251.76	2420.75	2421.93	9.08	27.72	22.92	1.12

Nota. Realizado por el autor.

El valor de rugosidad mínima tiene como resultado valores de ancho superior 44.91 m, y velocidad de 9.08 m/s. Esta velocidad es bastante considerable y demuestra que, con poca rugosidad en el cauce, se obtienen valores considerables de velocidad en la simulación.

Tabla 27*Tabla comparativa parámetros de estudio n media (2)*

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m3/s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m2)	Ancho Superior (m)	# Froude
2	7	Qmin	2.32	2424.37	2424.37	1.60	1.44	5.61	1.01
2	7	Qmed	18	2425.00	2425.00	2.41	7.48	12.90	1.01
2	7	Qmax	251.76	2426.63	2426.63	3.78	65.82	44.83	0.93
2	6	Qmin	2.32	2419.18	2419.25	2.14	1.08	5.30	1.05
2	6	Qmed	18	2419.56	2419.80	3.91	4.60	12.70	1.17
2	6	Qmax	251.76	2420.95	2421.93	7.74	32.69	25.78	1.10

Nota. Realizado por el autor.

Incrementando el valor de rugosidad existe una variación en el ancho superior de la lámina de agua 44.83 m; sin embargo, es muy parecido al mostrado anteriormente. Por otra parte, el valor de velocidad si disminuye considerablemente, pasando de 9.08 m/s a 7.74 m/s. Los niveles de la lámina de agua se mantienen estables en el sistema; obviando los que se producen con caudal máximo.

Tabla 28*Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (2)*

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m3/s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m2)	Ancho Superior (m)	# Froude
2	7	Qmin	2.32	2424.44	2424.37	1.26	1.83	6.41	0.76
2	7	Qmed	18	2425.31	2425.27	1.51	11.96	16.43	0.56
2	7	Qmax	251.76	2426.87	2426.87	2.03	76.80	45.33	0.47
2	6	Qmin	2.32	2419.45	2419.25	0.70	3.33	11.12	0.41
2	6	Qmed	18	2419.95	2420.00	1.69	10.62	18.55	0.72
2	6	Qmax	251.76	2421.41	2421.82	5.48	46.23	33.79	1.03

Nota. Realizado por el autor.

Como se muestra en la tabla; conforme se aumenta el número de Manning en la simulación, también aumentan los valores en los anchos superiores. El tramo 2, aumenta el ancho superior y disminuye la velocidad en todos los cortes comparando con ambos casos de rugosidad anteriores al mismo (Qmin-Qmed-Qmax); llega a valores de 45.33 m y disminuye a 5.48 m/s.

• Tramo 3

Tabla 20

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (3)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
3	12	Qmin	2.32	2387.46	2387.46	1.50	1.61	7.13	0.98
3	12	Qmed	18	2387.98	2387.98	2.10	8.64	20.26	1.01
3	12	Qmax	251.76	2388.79	2389.36	6.22	41.42	51.45	2.19
3	5	Qmin	2.32	2372.82	2372.86	1.68	1.38	12.11	1.59
3	5	Qmed	18	2373.08	2373.26	3.49	5.16	15.61	1.94
3	5	Qmax	251.76	2374.65	2375.52	7.57	33.62	21.28	1.89

Nota. Realizado por el autor.

En el tramo 3 con valores de rugosidad mínima, el ancho superior del escenario más sobresaliente ocurre en el corte 12, con un valor de 51.45 m. También, se observa un valor de velocidad máxima en el tramo en el corte 5, llegando a 7.57 m/s; todos estos valores introduciendo un caudal máximo en el modelo.

Tabla 21

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (3)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
3	12	Qmin	2.32	2387.45	2387.45	1.44	1.56	6.95	0.94
3	12	Qmed	18	2387.99	2387.99	1.88	8.93	20.59	0.89
3	12	Qmax	251.76	2388.89	2389.38	5.08	46.41	52.58	1.70
3	5	Qmin	2.32	2372.98	2372.86	0.63	3.66	14.89	0.41
3	5	Qmed	18	2373.46	2373.26	1.58	11.39	16.59	0.61
3	5	Qmax	251.76	2375.08	2375.52	5.89	43.60	24.20	1.36

Nota. Realizado por el autor.

Cuando aumenta el valor de rugosidad, se eleva el ancho superior de la lámina de agua a 52.58 m y la velocidad máxima disminuye a 5.89 m/s. Al igual que en el caso anterior, se produce con valores de Qmax.

Tabla 22

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (3)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
3	12	Qmin	2.32	2387.48	2387.45	1.00	1.75	7.86	0.67
3	12	Qmed	18	2388.15	2388.15	1.09	12.64	26.93	0.48
3	12	Qmax	251.76	2389.69	2389.68	2.07	91.35	62.52	0.53

3	5	Qmin	2.32	2373.08	2372.86	0.45	5.11	15.59	0.25
3	5	Qmed	18	2373.69	2373.26	1.17	15.32	17.01	0.40
3	5	Qmax	251.76	2375.99	2375.56	3.89	66.38	25.89	0.74

Nota. Realizado por el autor.

Con valores máximos de rugosidad se presenta el mayor valor en la lámina de agua superior (62.52 m); y la velocidad se reduce a 3.89 m/s. Comparando los modelos, se puede concluir que el aumento en la rugosidad del modelo infiere en el área de inundación aumentándola y disminuyendo la velocidad en el cauce.

• Tramo 4

Tabla 29

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (4)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
4	15	Qmin	2.32	2531.41	2524.65	0.02	93.83	15.27	0.45
4	15	Qmed	18	2532.10	2525.23	0.17	104.43	15.39	0.20
4	15	Qmax	251.76	2535.16	2527.93	1.45	221.32	75.04	0.15
<hr/>									
4	6	Qmin	2.32	2522.68	2522.73	1.83	1.27	8.92	1.05
4	6	Qmed	18	2522.99	2523.22	3.89	4.63	12.24	0.98
4	6	Qmax	251.76	2524.35	2525.24	7.85	34.23	27.81	1.01

Nota. Realizado por el autor.

En el tramo 4, el ancho superior con rugosidad mínima tiene un valor máximo de 75.04 m y velocidad de 7.85 m/s. Aunque el número de Froude muestra que entre los cortes 15 y 6 pasa de ser pasa de tener un flujo subcrítico o calmado a un flujo supercrítico o turbulento.

Tabla 30

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (4)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
4	15	Qmin	2.32	2531.46	2524.65	0.02	94.55	15.27	0.22
4	15	Qmed	18	2532.22	2525.23	0.17	106.29	15.42	0.25
4	15	Qmax	251.76	2535.43	2527.93	1.24	241.51	76.41	0.94
<hr/>									
4	6	Qmin	2.32	2522.77	2522.73	1.10	2.11	10.44	0.78
4	6	Qmed	18	2523.29	2523.22	2.06	8.72	14.56	0.85
4	6	Qmax	251.76	2524.52	2525.21	6.80	39.15	28.67	1.06

Nota. Realizado por el autor.

En el caso de la rugosidad media, igual que en el caso anterior, aumenta el ancho a 76.41 m y disminuye la velocidad a 6.80 m/s. A diferencia del anterior, el flujo entre los dos cortes no representa un cambio significativo.

Tabla 31
Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (4)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
4	15	Qmin	2.32	2531.59	2524.65	0.02	96.63	15.30	0.19
4	15	Qmed	18.00	2532.55	2525.23	0.16	111.29	15.48	0.28
4	15	Qmax	251.76	2536.21	2527.93	0.74	301.92	78.87	0.72
4	6	Qmin	2.32	2522.80	2522.73	0.93	2.48	10.72	0.62
4	6	Qmed	18.00	2523.51	2523.22	1.47	12.40	21.39	0.59
4	6	Qmax	251.76	2525.74	2525.21	3.35	76.11	31.28	0.65

Nota. Realizado por el autor.

El caso difiere con valores máximos de Manning; ya que se presenta un flujo estable en los cortes; sin embargo, el ancho de la lámina aumenta a 78.87 m y la velocidad disminuye considerablemente a 3.35 m/s. Esto demuestra el cambio que existe en los niveles de agua al presentar un valor de rugosidad mayor.

• Tramo 5

Tabla 32
Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (5)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
5	10	Qmin	2.32	2381.18	2380.19	0.14	16.14	16.02	0.05
5	10	Qmed	18	2381.90	2380.65	0.63	31.58	26.13	0.15
5	10	Qmax	251.76	2385.23	2382.79	2.13	218.82	92.34	0.30
5	3	Qmin	2.32	2373.65	2373.67	1.40	1.66	12.98	0.85
5	3	Qmed	18	2373.95	2374.07	2.95	6.10	16.01	0.88
5	3	Qmax	251.76	2375.32	2376.25	7.82	32.21	20.56	0.93

Nota. Realizado por el autor.

En el caso del tramo 5, los valores que muestra la tabla con rugosidad mínima son máximos de 92.34 m y la velocidad escala hasta los 7.82 m/s; mientras que el flujo en base al número de Froude es subcrítico en ambos cortes analizados.

Tabla 33*Tabla comparativa parámetros de estudio n media (5)*

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
5	10	Qmin	2.32	2381.24	2380.20	0.13	17.17	16.07	0.04
5	10	Qmed	18	2382.05	2380.65	0.56	35.56	27.10	0.13
5	10	Qmax	251.76	2385.42	2382.76	1.71	237.04	93.28	0.24
5	3	Qmin	2.32	2373.67	2373.67	1.22	1.90	13.11	1.02
5	3	Qmed	18	2374.06	2374.07	2.27	7.95	16.45	1.04
5	3	Qmax	251.76	2375.65	2376.24	6.41	39.29	21.92	1.53

Nota. Realizado por el autor.

Al momento de analizar los datos con rugosidad media los valores del ancho escalan levemente hasta los 93.28 m y la velocidad disminuye levemente a 6.41 m/s; se observa que no existe una variación considerable entre estos apartados; no obstante, el flujo en el corte 3 se vuelve supercrítico, mostrando turbiedad en el cauce.

Tabla 34*Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (5)*

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
5	10	Qmin	2.32	2381.40	2380.19	0.12	19.72	16.37	0.30
5	10	Qmed	18	2382.46	2380.65	0.41	47.08	28.77	0.89
5	10	Qmax	251.76	2385.68	2382.81	1.09	262.09	95.04	0.15
5	3	Qmin	2.32	2373.65	2373.67	1.40	1.66	12.98	0.85
5	3	Qmed	18	2373.95	2374.07	2.95	6.10	16.01	0.88
5	3	Qmax	251.76	2375.32	2376.25	7.82	32.21	20.56	0.93

Nota. Realizado por el autor.

Con valores de rugosidad máxima el ancho aumenta (95.04 m) y la velocidad iguala a la presentada con rugosidad mínima (7.82 m/s). El flujo en este caso se mantiene en subcrítico y muestra estabilidad en la lámina de agua.

- **Tramo 6**

Tabla 35*Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (6)*

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
6	5	Qmin	2.32	2378.57	2378.64	2.24	1.03	10.15	0.99
6	5	Qmed	18	2378.86	2379.08	3.83	4.70	14.59	0.96
6	5	Qmax	251.8	2380.42	2381.29	7.40	34.88	32.41	0.84

6	3	Qmin	2.32	2375.96	2375.79	0.68	3.40	11.74	0.40
6	3	Qmed	18	2376.70	2376.29	1.25	15.50	20.44	0.41
6	3	Qmax	251.8	2378.96	2378.49	3.88	90.63	60.71	0.69

Nota. Realizado por el autor.

En el tramo 6, el valor de Manning mínimo nos da como resultado un ancho superior de 60.71 m, una velocidad de 7.40 m/s y un número de Froude que demuestra un flujo subcrítico en los cortes.

Tabla 36

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (6)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
6	5	Qmin	2.32	2378.63	2378.64	1.37	1.69	11.07	0.92
6	5	Qmed	18	2378.95	2379.08	3.01	5.97	15.51	0.85
6	5	Qmax	251.8	2380.51	2381.25	6.91	38.07	36.98	0.98
6	3	Qmin	2.32	2376.02	2375.79	0.56	4.14	12.03	0.30
6	3	Qmed	18	2376.79	2376.29	1.10	17.43	21.26	0.35
6	3	Qmax	251.8	2379.16	2378.43	3.11	104.01	67.08	0.54

Nota. Realizado por el autor.

Con el valor medio de rugosidad, el valor del ancho se eleva a 67.08 m y la velocidad disminuye a 6.91 m/s en el caso más representativo de la tabla; mientras que el flujo se mantiene en subcrítico para todas las variaciones de caudal.

Tabla 37

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (6)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
6	5	Qmin	2.32	2378.65	2378.64	1.18	1.96	11.42	0.91
6	5	Qmed	18	2379.09	2379.09	2.19	8.23	16.92	1.00
6	5	Qmax	251.8	2380.78	2381.18	5.46	48.94	46.36	1.04
6	3	Qmin	2.32	2376.12	2376.21	0.43	5.37	14.30	0.22
6	3	Qmed	18	2376.94	2376.92	0.90	20.62	21.60	0.26
6	3	Qmax	251.8	2379.36	2379.56	2.32	117.45	67.08	0.39

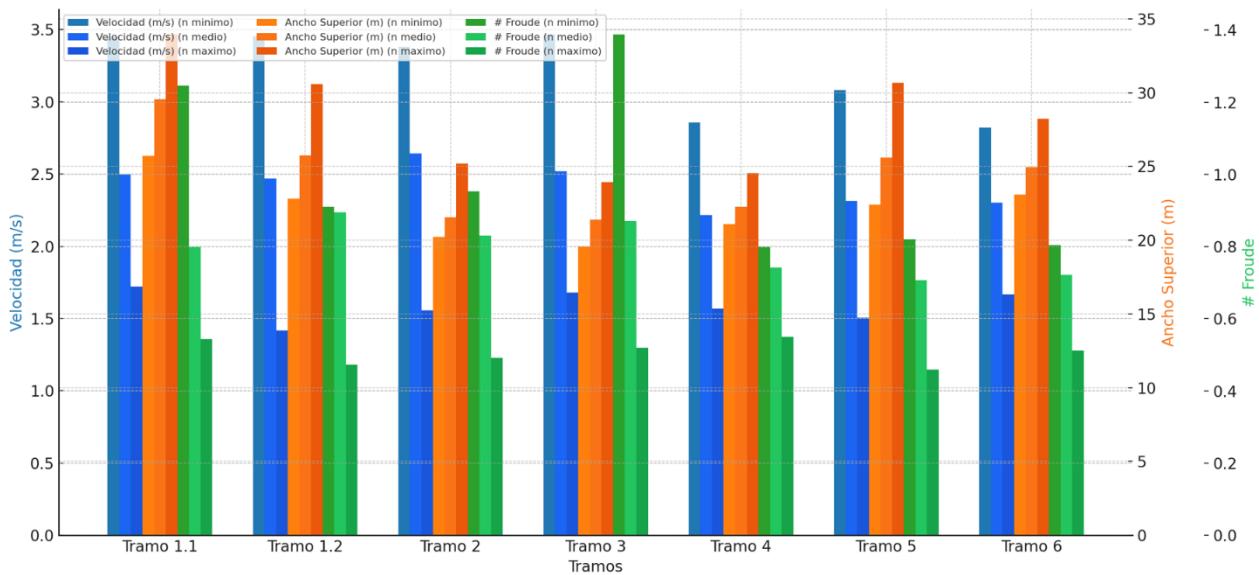
Nota. Realizado por el autor.

Cuando se analiza el valor máximo de rugosidad, el ancho se mantiene en 67.08 m, al igual que en el análisis anterior. Mientras que la velocidad disminuye y se presenta un flujo supercrítico en el corte 5.

4.4. Resumen comparativo de parámetros hidráulicos en los diferentes escenarios

Ilustración 44

Análisis comparativo de valores promedio por tramo



Nota. Realizado por el autor.

El análisis comparativo realizado entre los distintos tramos del cauce modelado permite identificar variaciones notables en los tres parámetros hidráulicos evaluados: velocidad media del flujo, ancho superior y número de Froude; considerando los escenarios de rugosidad mínima, media y máxima (n mínimo, n medio y n máximo).

En términos generales, la velocidad media del flujo presenta los valores más altos bajo el escenario de rugosidad mínima, condición que corresponde a una menor fricción en el cauce y, por tanto, a una transmisión más eficiente de energía cinética. A medida que se incrementa la rugosidad hidráulica, la velocidad disminuye de forma progresiva, lo que evidencia el efecto disipativo del coeficiente de Manning sobre la energía específica del flujo. Este comportamiento es especialmente perceptible en los tramos con mayor pendiente y confinamiento (por ejemplo, los tramos 1.1 y 1.2).

El ancho superior del espejo de agua, por su parte, exhibe una tendencia inversa: a mayores valores del coeficiente de rugosidad, el flujo tiende a expandirse lateralmente debido al incremento del tirante hidráulico y a la reducción de la energía de transporte (Arcement & Schneider, 1989). Este fenómeno es más notorio en los tramos medios del cauce (como los tramos 3 y 4), donde la morfología transversal favorece la dispersión del flujo bajo condiciones de menor velocidad.

Respecto al número de Froude, los resultados muestran valores predominantemente subcríticos ($Fr < 1$), lo que sugiere un régimen estable y controlado por la gravedad en la mayor parte de los tramos. No obstante, en el escenario de n mínimo se identifican incrementos puntuales del número de Froude, indicando una tendencia hacia regímenes de transición ($Fr \approx 1$) en sectores con mayores pendientes o secciones reducidas (French, 1985).

En conjunto, estos resultados confirman la relación inversa entre rugosidad y velocidad, así como la relación directa entre rugosidad y expansión del flujo superficial, mientras que el número de Froude refleja de forma coherente la interacción entre ambas variables. Tales hallazgos son consistentes con los principios clásicos de la hidráulica fluvial y permiten caracterizar de manera más precisa el comportamiento del flujo en las diferentes condiciones de rugosidad simuladas.

CONCLUSIONES

El desarrollo del modelo hidráulico del río Tomebamba en su tramo urbano de 7.88 km, comprendido entre el sector de Balzay y el Parque El Paraíso, permitió caracterizar con precisión el comportamiento hidráulico del cauce bajo distintos escenarios de caudal, aportando una base técnica sólida para la gestión del riesgo de inundaciones en la ciudad de Cuenca.

Mediante la modelación efectuada en el software HEC-RAS, se analizaron tres escenarios hidrológicos representativos: un caudal máximo de 251.762 l/s correspondiente al evento registrado en abril de 2017, un caudal medio de 17.998 l/s y un caudal mínimo de 3.315 l/s, ambos registrados en octubre de 2014. Los resultados obtenidos evidencian que, bajo condiciones extremas, el cauce del Tomebamba supera su capacidad hidráulica en varios tramos urbanos, provocando desbordamientos especialmente en los sectores del Puente Roto, Av. Doce de Abril, Puertas del Sol, Teatro Carlos Cueva Tamariz y Parque El Paraíso, lo cual coincide con los registros históricos de inundaciones recopilados por ETAPA-EP y por estudios anteriores.

El análisis de los parámetros geométricos y de resistencia hidráulica permitió determinar que las pendientes promedio del cauce varían entre 0.0089 % y 0.0233 %, presentando las mayores inclinaciones en los tramos altos y una tendencia a disminuir hacia la zona baja del río. Este gradiente influye directamente en la velocidad del flujo, generando variaciones significativas en la energía específica y en la capacidad de transporte de sedimentos.

Asimismo, el coeficiente de rugosidad de Manning (n), calculado a partir de métodos empíricos (Meyer-Peter y Müller, Limerinos, Raudkine, Garde y Raju, entre otros), presentó valores que oscilan entre 0.029 y 0.055. Dichos valores reflejan las condiciones naturales del lecho y la cobertura vegetal existente en las márgenes, siendo determinantes para la distribución de

velocidades y los niveles de lámina de agua. Se comprobó que un incremento en el valor de n produce mayores niveles de tirante y menor velocidad del flujo, incrementando el riesgo de inundación en las zonas aledañas.

El uso de levantamientos fotogramétricos con drones, combinados con el procesamiento de modelos digitales del terreno (DTM) y ortomosaicos georreferenciados, permitió obtener información topográfica de alta precisión, optimizando la definición de secciones transversales cada 25 a 50 m y garantizando la confiabilidad del modelo. Esta metodología integró tecnologías avanzadas con herramientas de simulación hidráulica, estableciendo un precedente para futuros estudios fluviales en entornos urbanos.

La elaboración del modelo evidenció una alta correspondencia entre las simulaciones y los registros reales de caudales observados, lo cual valida la capacidad predictiva del modelo hidráulico desarrollado. El comportamiento del flujo mostró condiciones de régimen subcrítico en la mayor parte del tramo, aunque con transiciones localizadas a flujo supercrítico en zonas de pendiente pronunciada o presencia de estructuras como puentes.

De forma general, se concluye que el modelo hidráulico constituye una herramienta fundamental para la gestión integral del riesgo hídrico en Cuenca, ya que permite identificar con precisión las zonas vulnerables, planificar medidas de mitigación estructurales y no estructurales, y orientar las políticas de ordenamiento territorial hacia la prevención de desastres. La investigación demuestra la importancia de incorporar la modelación.

RECOMENDACIONES

En función de los resultados obtenidos y del análisis técnico desarrollado, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a fortalecer la gestión integral del río Tomebamba y reducir su vulnerabilidad ante crecidas:

Se recomienda la actualización continua del modelo hidráulico, incorporando nuevos registros de caudales, niveles, precipitaciones y geometrías topográficas obtenidas mediante levantamientos fotogramétricos o tecnología LIDAR. Esto permitirá ajustar los parámetros hidráulicos y mantener vigente la herramienta como base de monitoreo y planificación. Se sugiere realizar recalibraciones anuales o posteriores a eventos extremos que modifiquen el lecho del cauce.

Asimismo, se plantea la integración de los resultados del modelo en la planificación territorial, incorporándolos en los instrumentos de ordenamiento territorial y en los planes de desarrollo del GAD Municipal de Cuenca. Es indispensable establecer zonas de restricción para construcciones dentro de los márgenes de inundación identificados, especialmente en sectores como Puertas del Sol y el Parque El Paraíso, priorizando la recuperación ecológica de riberas y la ampliación del espacio hidráulico del río.

En los tramos donde la capacidad de conducción se ve superada por caudales superiores a 250 m³/s, se recomienda la ejecución de medidas estructurales de mitigación, tales como muros de contención, encauzamientos controlados, diques y canales de alivio. Estas obras deben diseñarse considerando los valores promedio de rugosidad ($n \approx 0,043$) y las pendientes del fondo, a fin de garantizar un funcionamiento hidráulico eficiente y estable. Paralelamente, se deben impulsar medidas no estructurales y acciones de gestión del riesgo,

fortaleciendo los sistemas de alerta temprana mediante la ampliación y modernización de la red hidrometeorológica de ETAPA-EP, integrando sensores en tiempo real y plataformas digitales de monitoreo.

También es fundamental promover programas de educación comunitaria y protocolos de emergencia que involucren a la ciudadanía en la prevención y respuesta ante inundaciones. Se sugiere fomentar la investigación y cooperación académica entre universidades, entidades públicas y organismos ambientales para realizar estudios comparativos en los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara, con el fin de construir una visión integral del sistema hídrico urbano de Cuenca. Además, se recomienda incorporar análisis de transporte de sedimentos, erosión de márgenes y efectos del cambio climático en los futuros modelos.

De igual manera, se propone la restauración ecológica y el manejo ambiental del cauce, impulsando proyectos de revegetación con especies nativas y recuperación de las riberas degradadas. Estas acciones no solo mejoran la estabilidad hidráulica y reducen la erosión, sino que también aportan beneficios ambientales y paisajísticos. La restauración fluvial debe integrarse como una medida sostenible dentro de los planes de gestión del riesgo. Finalmente, se plantea la implementación de políticas de desarrollo sostenible, considerando los resultados de este estudio como referencia técnica para el diseño de políticas públicas orientadas a un desarrollo urbano resiliente, sustentado en la planificación del recurso hídrico y en la reducción de la exposición a amenazas naturales.

BIBLIOGRAFÍA

Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains (USGS Water-Supply Paper 2339). United States Government Printing Office.

Espinoza, P., & Vintimilla, G. (2013). Caracterización del comportamiento hidráulico de un tramo del río Calabí en el sector de toma utilizando un modelo matemático. Universidad de Cuenca, 33-34.

Córdova Diaz, C. J. (2017). *Modelación hidráulica del río "La Leche" con el programa HEC-RAS en un tramo de 4km. En el distrito de Íllimo, y departamento de Lambayeque.*

Encalada Guachún, J. R., & Jara Jara, R. D. (2010). *Implementación del modelo hidráulico HEC GeoRAS en la modelación hidráulica del sistema para el control de inundaciones de los ríos de Cañar y Bulubulu.*

Pinos, J., Timbe, L., & Orellana, D. (2017). *Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador. MASKANA*, 8(2), 147–162. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.02.11>

Santana, H. R., & Lima, P. R. (2021). *Propuesta de obra para el control de inundaciones en la cuenca baja del río Portoviejo, sector Horcón - Ceibal, cantón Rocafuerte - Manabí -Ecuador. Polo Del Conocimiento*, 6(9).

Calle Chuqui, T. C. (2021). *Establecimiento de la calidad de agua mediante Diatomeas epilíticas durante la época lluviosa en el río Tarqui.*

Cedillo Galarza, J. S., Timbre Castro, L. M., Samaniego Alvarado, E. P., & Alvarado Martínez, A. O. (2021). *Efecto del refinamiento de la rugosidad usando una aproximación 2d para un río de montaña: un caso de estudio. La granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 33(1), 92-102.

Flores Rengifo, L. A. (s. f.). *Evaluación de la calidad del agua del río Tomebamba basado en un análisis jerárquico para identificar los pesos de los parámetros de un índice propio de calidad del agua.*

La, R. F. A. (2009). *Morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales*. VIII Congreso Internacional de Obras de Infraestructura Vial. Lima.

Tapia Rodríguez, G., Molina Aguilar, J., PEREZ MORALES, G., & Torres Acosta, A. (2012). *Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico*. Publicación Técnica, 356.

Muñoz, P., Orellana-Alvear, J., Bendix, J., & Céller, R. (2021). *Flood Early Warning Systems using Machine Learning techniques. Application to a catchment located in the Tropical Andes of Ecuador*. ResearchSquare. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-395457/v1>

Naranjo Martínez, D. P. (2018). *Elaboración de hidrogramas de crecidas de las cuencas de los ríos Tomebamba, Tarqui y Yanuncay desde el año 1997 - 2017*. Universidad de Cuenca.

Aldana, M, G., L. (2006). *Hidráulica de canales*.

Astudillo, G. (2014). *El Río Yanuncay se desbordó, el Tomebamba y Tarqui están crecidos. El Comercio*.

Brunner, G. W. (2016). CEIWR-HEC," HEC-RAS, River Analysis System User's Manual; CPD-68, Version 5.0.," Davis, CA, USA. *US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center*.

Carpio Álvarez, A. (2018). *Determinación de caudales máximos, mínimos y medios en la cuenca del río Paute* [Tesis de Ingeniería, Universidad de Cuenca].

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30201>

Chanson, H. (2004). The hydraulics of open channel flow: An introduction. Butterworth-Heinemann.

Chow, Ven Te, C., Ven Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos* (2^a). McGraw-Hill Interamericana.

Córdova Mendoza, P., Barrios Mendoza, T. O., Zuzunaga Morales, R., Córdova Barrios, I. C., Pardo Moran, E. E., & Zuzunaga Concha, E. (2022). *Ánálisis hidráulico del flujo de cuencas naturales y canales artificiales mediante el programa HEC-RAS*. Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2016). *Hydraulics: One-Dimensional Analysis* (U.S. Department of Homeland Security).

French, R. H. (1985). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill.

Guzmán, M. (2014). Análisis de Seguridad vial de las zonas pobladas de cuatro tramos de la carretera IIRSA Norte. *Piura: Universidad de Piura*.

Henderson, F. M. (1966). Open channel flow. Macmillan.

Limerinos, J. T. (1970). *Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels*. U.S. Geological Survey.

Luna Reyes, A. (2014). *Modelación de flujo no permanente en sistemas hidráulicos con HEC-RAS: aplicación al sistema de canales y lagos de Texcoco* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].

<https://repositorio.unam.mx/contenidos/85936>

Martínez Macancela, J. S., & Bermeo Cabrera, V. F. (2023). *Ánálisis comparativo de precisión y eficiencia de tecnologías topográficas para levantamientos: Fotogrametría y LIDAR aerotransportado con Dron y receptor GNSS (modo RTK), aplicado al parque El Paraíso de la ciudad de Cuenca*. [B.S. thesis].

Martínez Ramírez, D. X., & Solano González, H. A. (2020). *Determinación del coeficiente de rugosidad del río Tomebamba mediante fórmulas empíricas* [Tesis de grado]. Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología, Escuela de Ingeniería Civil y Gerencia de Construcciones.

Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1948). *Formulas for bed-load transport*.

Neurite Blog. (2024). *Caudal de agua de un río: Clasificación y definiciones*.

https://neuriteblog.com/2024/06/10/caudal-de-agua-de-un-rio-clasificacion-y-definiciones/?utm_source=chatgpt.com

Sturm, T. W. (2010). Open channel hydraulics. McGraw-Hill.

U.S. Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS River Analysis System: User's Manual (Version 6.0)*. Hydrologic Engineering Center (HEC).

https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_UsersManual.pdf

Vallejo, C. (2014). *Analisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011*.

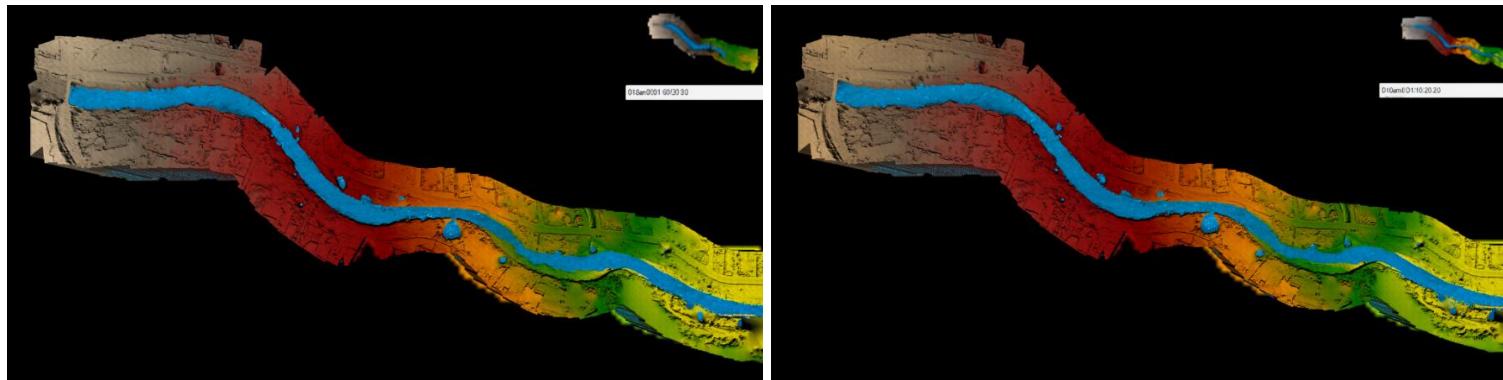
Villón Béjar, M. (2014). HEC-RAS: Ejemplos. Editorial Tecnológica Costa Rica.

ANEXOS

8.1. Anexo 1. RAS 3D viewer de todos los escenarios presentes en el modelo

Ilustración I

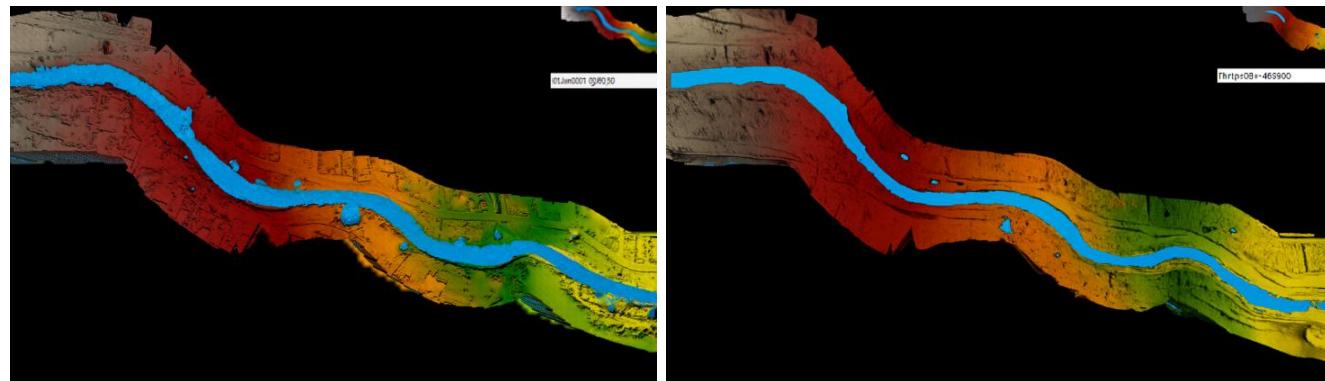
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmin 1.1)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración II

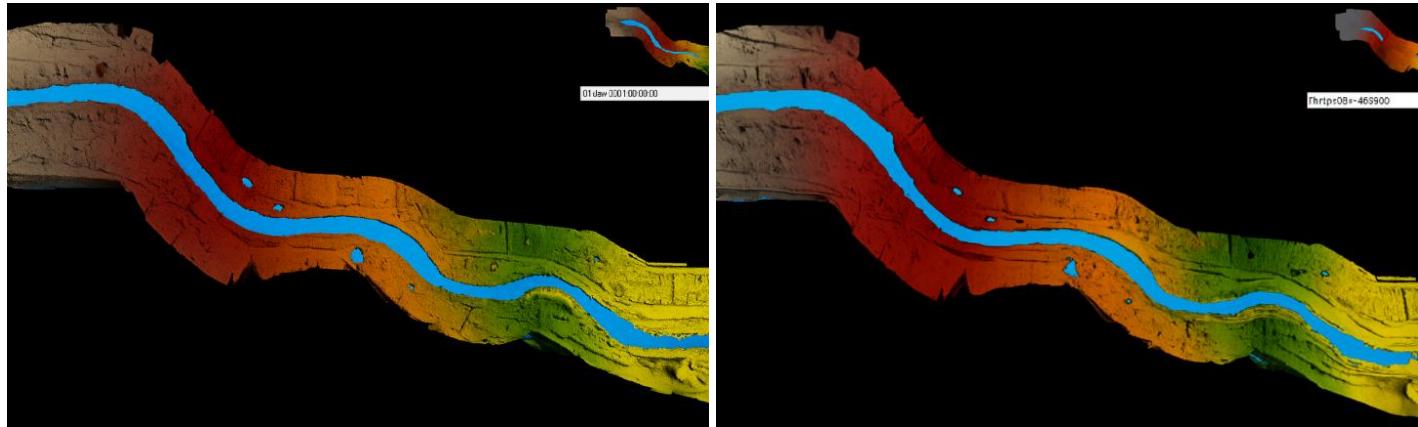
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmed 1.1)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración III

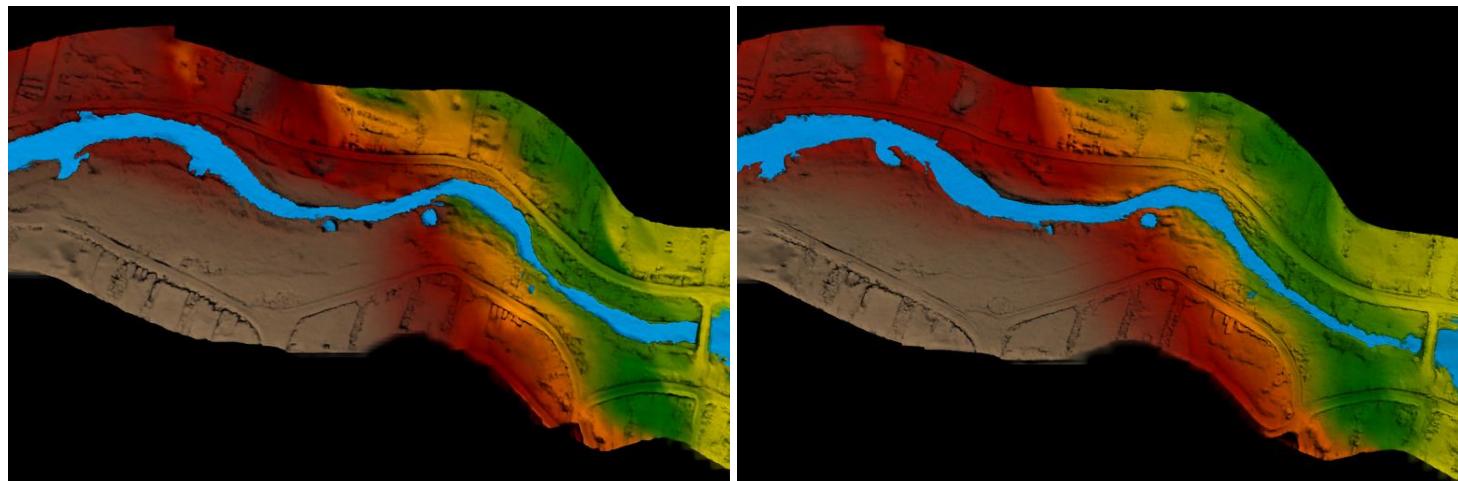
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmax 1.1)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración IV

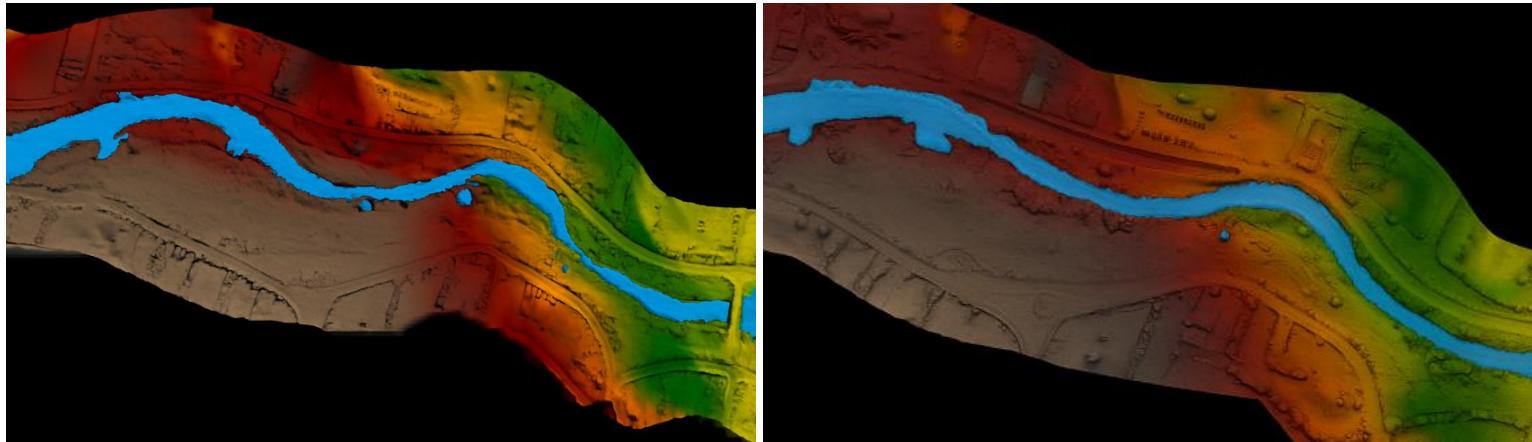
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmin 1.2)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración V

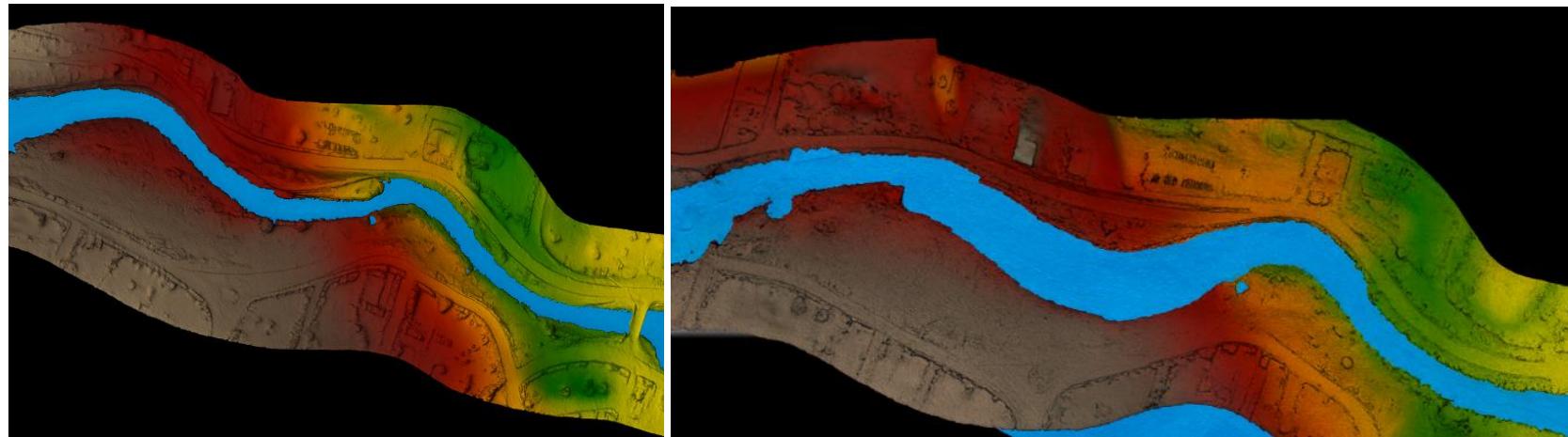
RAS 3D Viewer periodo de escenario $Q_{min}-Q_{med}$ (nmed 1.2)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración VI

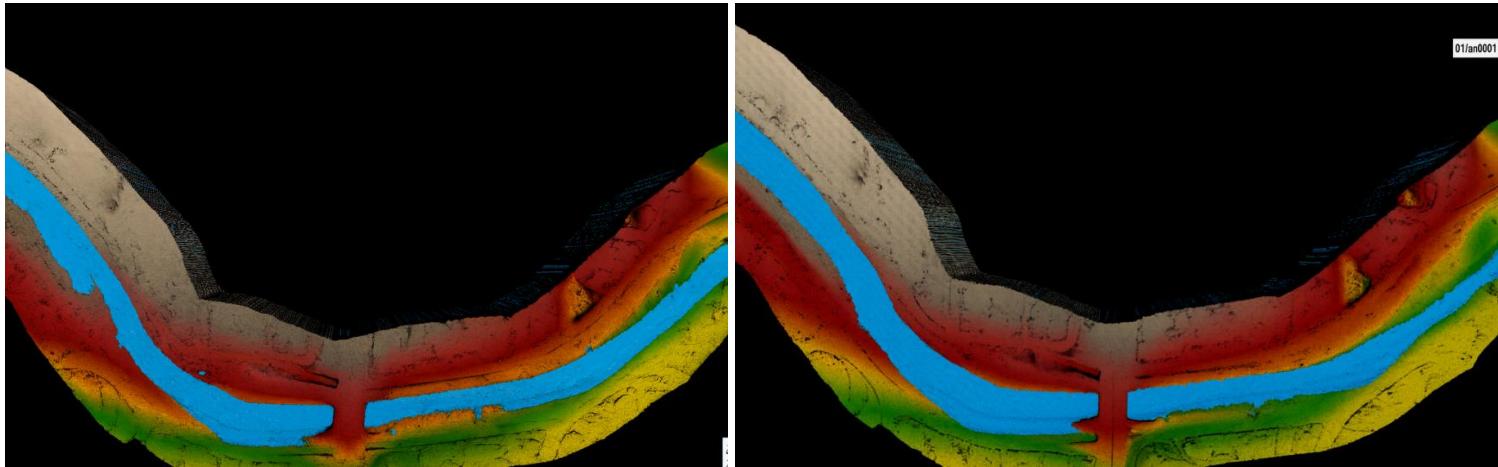
RAS 3D Viewer periodo de escenario $Q_{min}-Q_{med}$ (nmax 1.2)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración VII

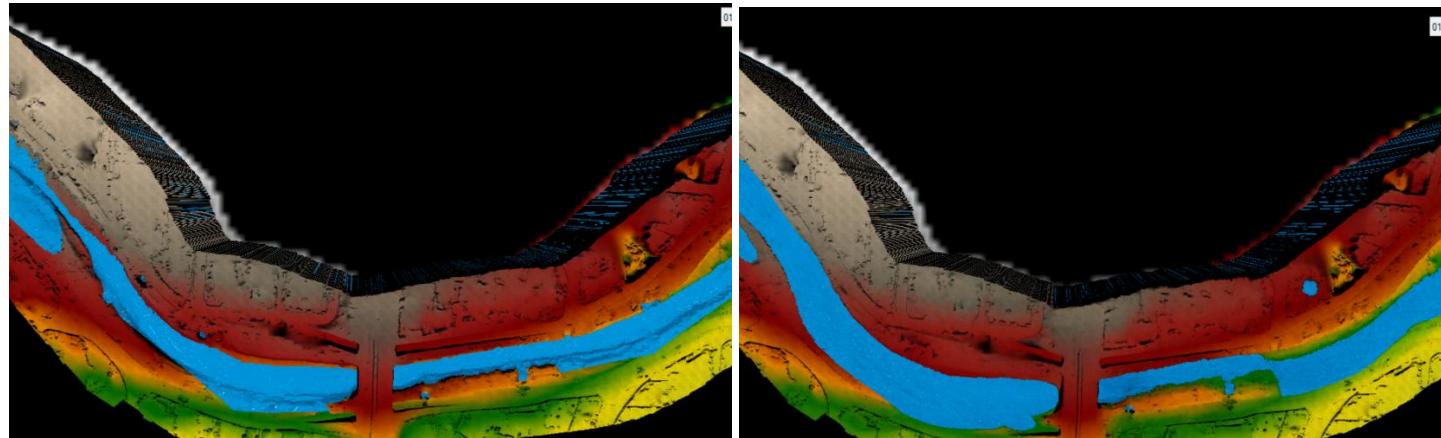
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmin 2)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración VIII

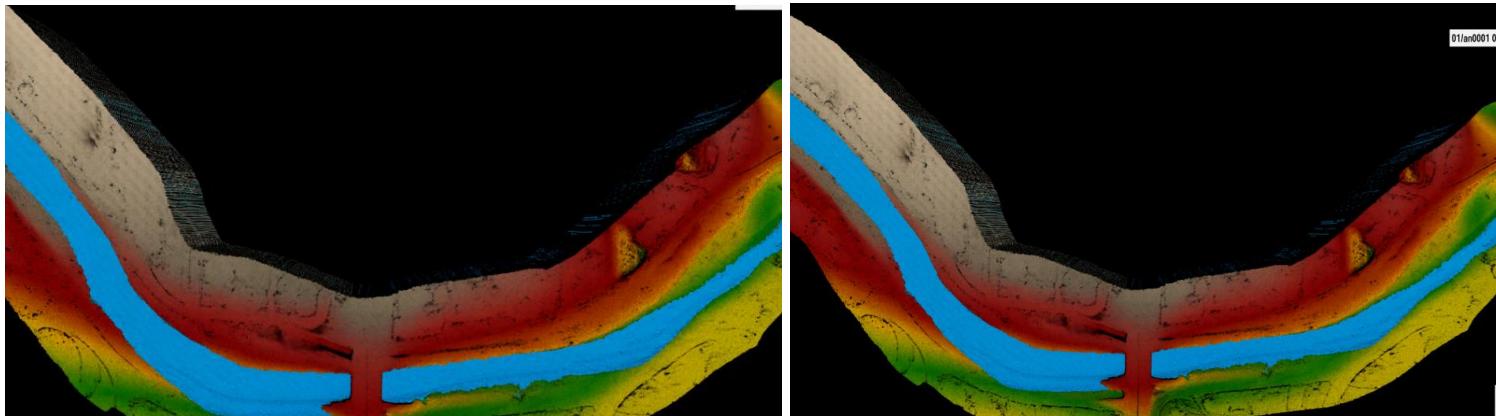
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmed 2)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración IX

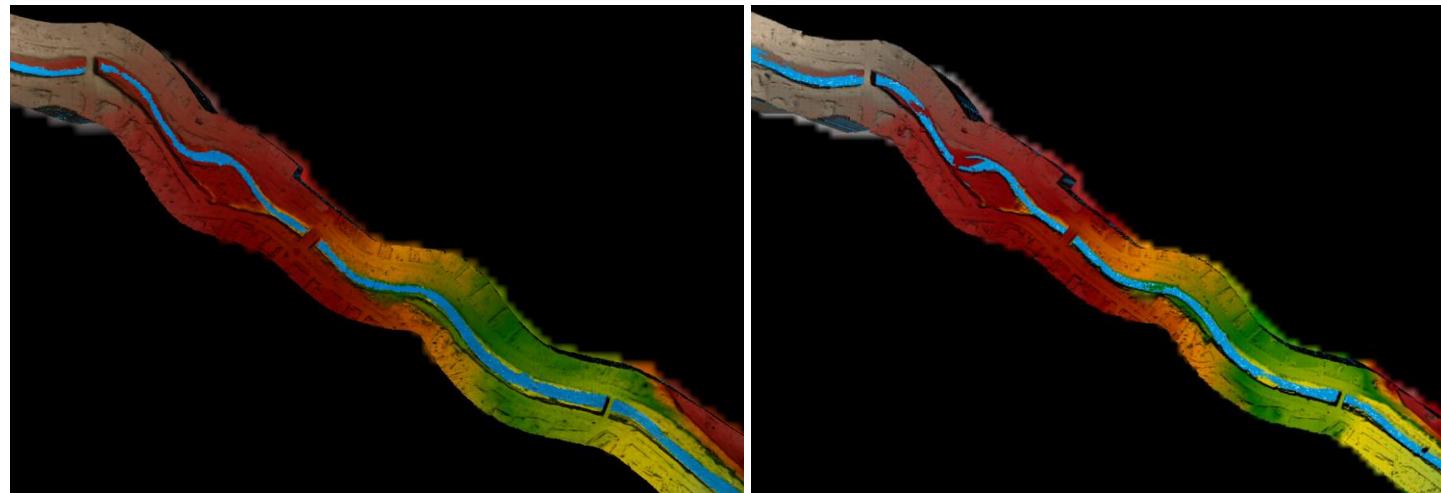
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmax 2)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración X

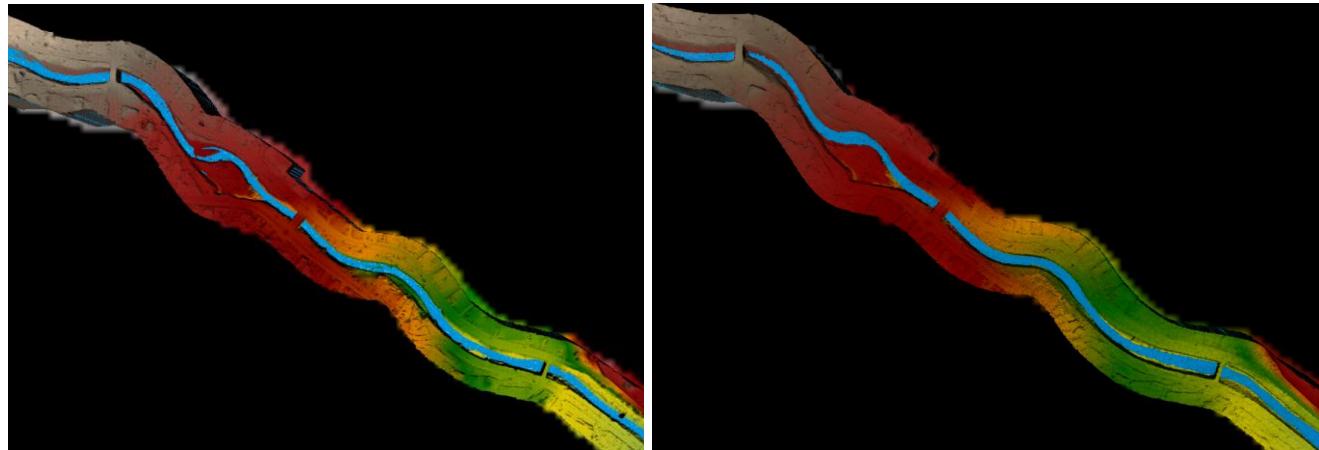
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmin 3)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XI

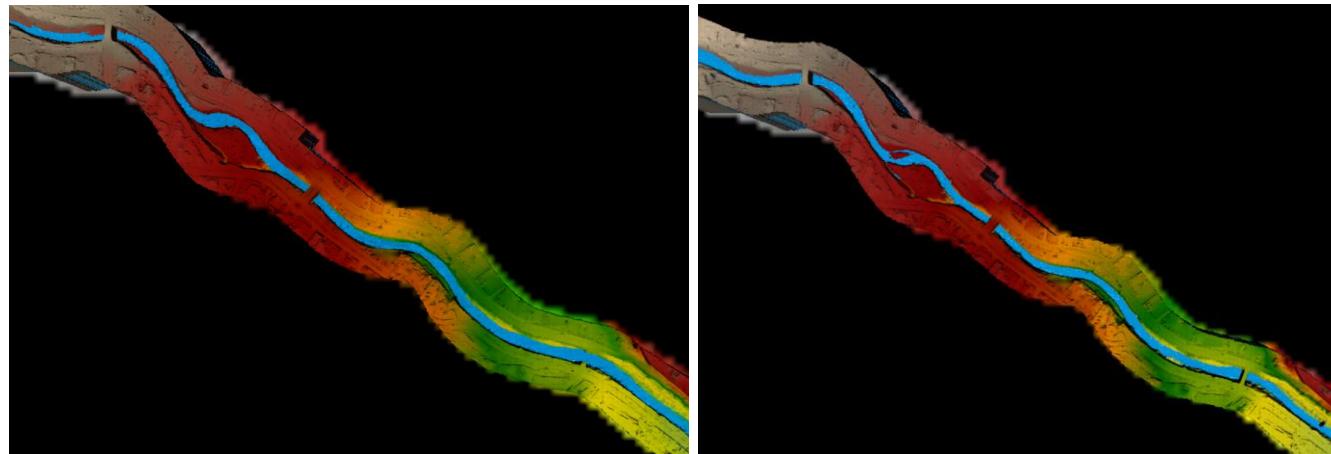
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmed 3)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XII

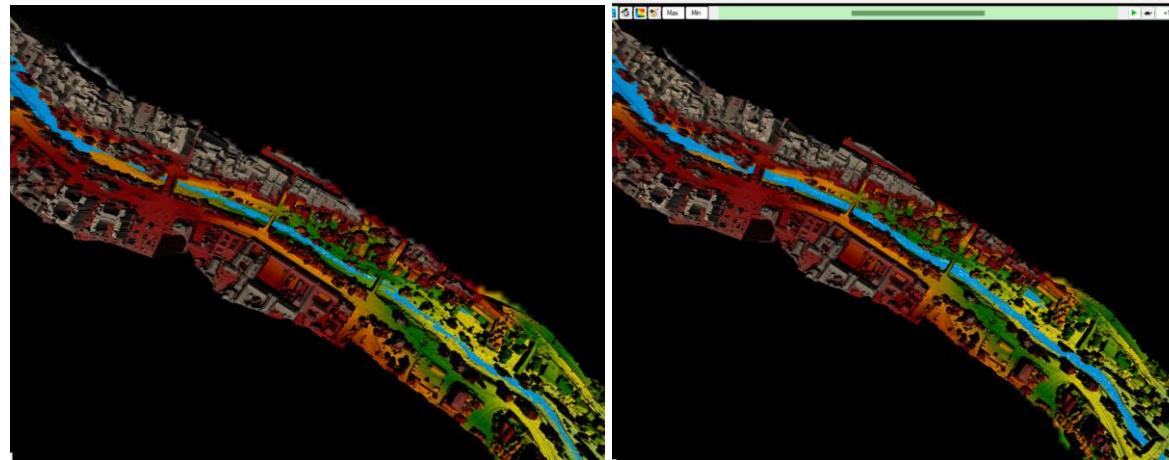
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmax 3)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XIII

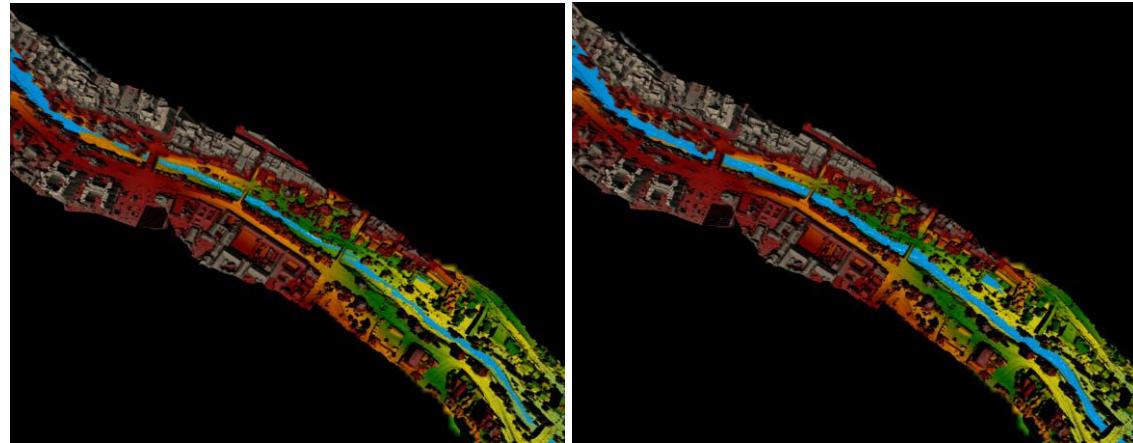
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmin 4)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XIV

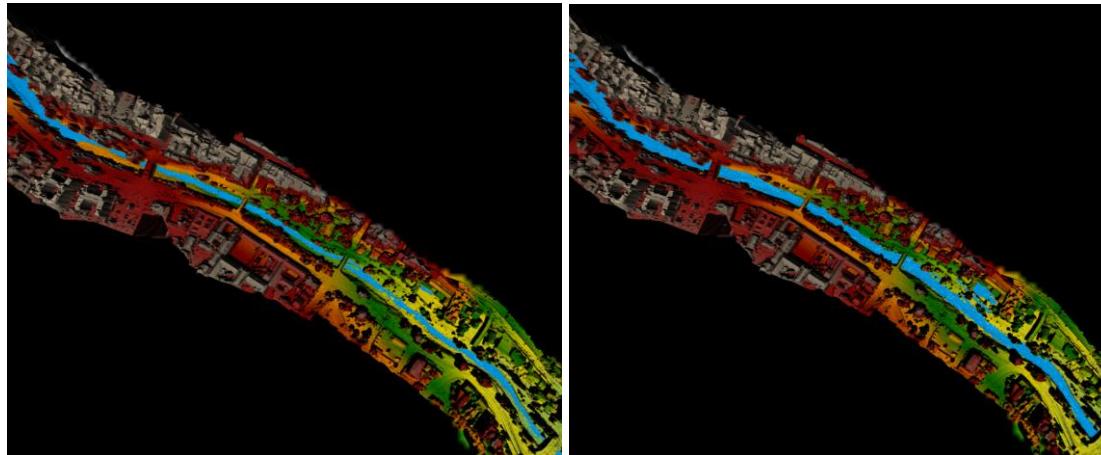
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmed 4)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XV

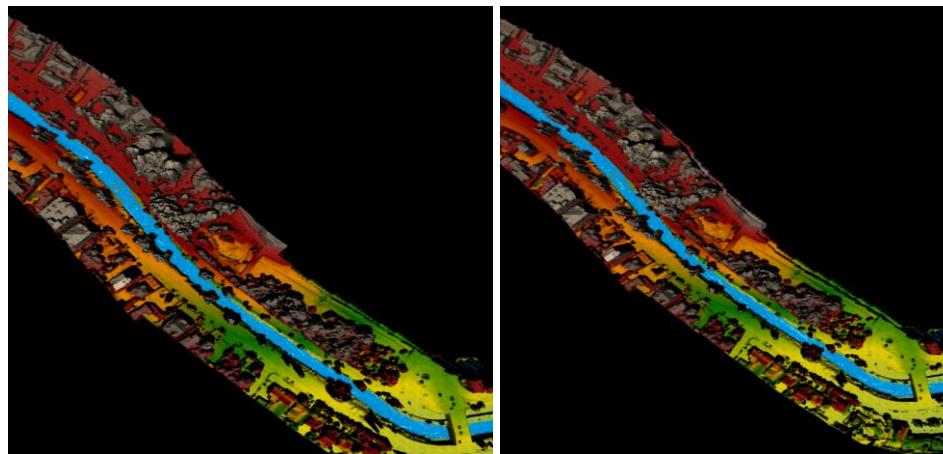
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmax 4)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XVI

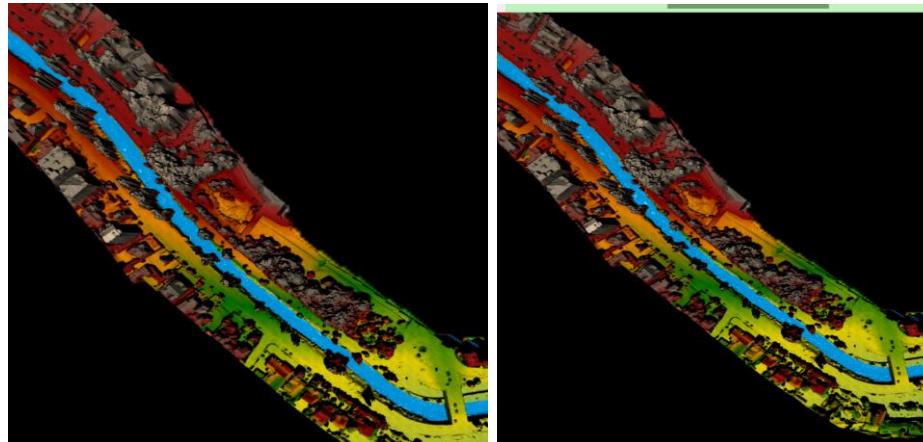
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmin 5)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XVII

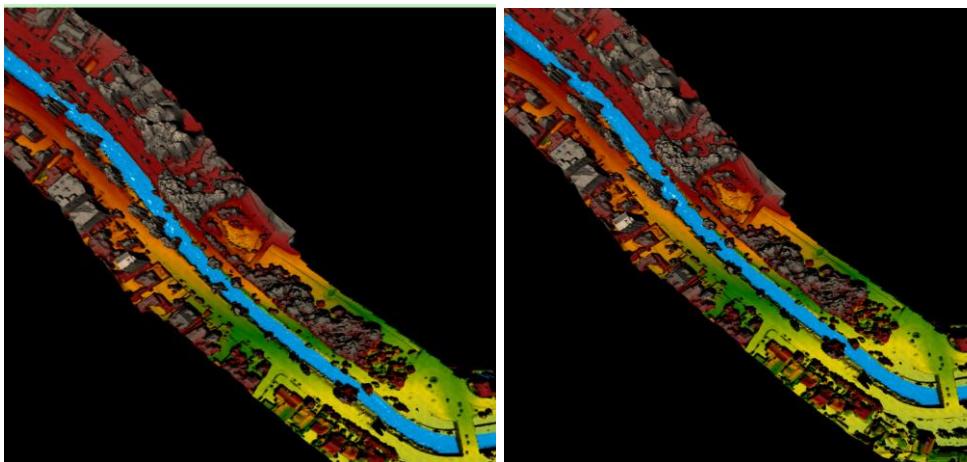
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmed 5)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XVIII

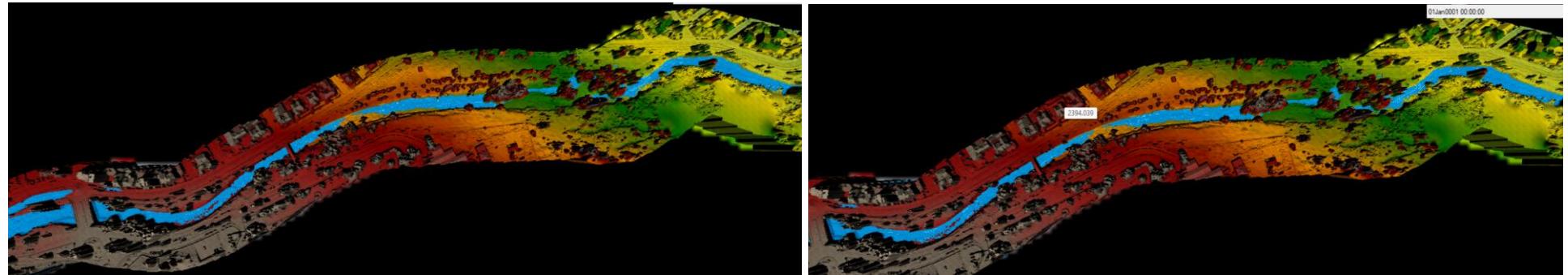
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmax 5)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XIX

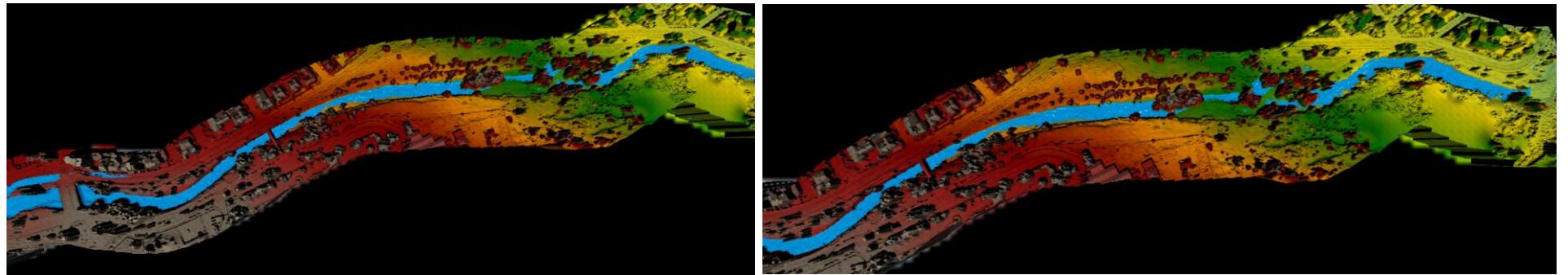
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmin 6)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XX

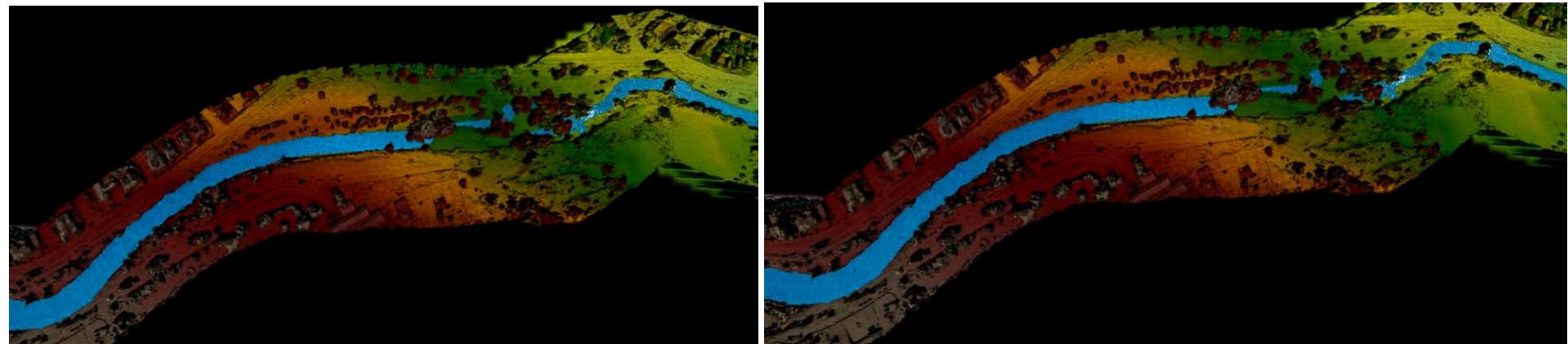
RAS 3D Viewer periodo de escenario Q_{min} - Q_{med} (nmed 6)



Nota. Realizado por el autor.

Ilustración XXI

RAS 3D Viewer periodo de escenario $Q_{min}-Q_{med}$ (nmax 6)



Nota. Realizado por el autor.

8.2. Anexo 2. Tablas comparativas de parámetros de estudio

Tabla I

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (1.1)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Aqua (m)	Nivel Crítico Aqua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
1.1	7	Qmin	4.23	2454.49	2454.50	1.28	3.32	22.92	1.07
1.1	7	Qmed	25.28	2454.76	2454.83	2.54	10.04	25.06	1.27
1.1	7	Qmax	251.76	2455.94	2456.50	6.28	41.99	30.12	1.59
1.1	6	Qmin	4.23	2449.78	2449.84	1.98	2.14	14.48	1.65
1.1	6	Qmed	25.28	2450.05	2450.22	3.35	7.59	22.19	1.83
1.1	6	Qmax	251.76	2451.20	2452.03	7.45	34.72	24.62	1.95
1.1	5	Qmin	4.23	2446.86	2446.86	1.22	3.47	22.60	0.99
1.1	5	Qmed	25.28	2447.21	2447.21	2.21	11.61	24.18	0.99
1.1	5	Qmax	251.76	2448.50	2448.98	5.52	50.70	37.33	1.31
1.1	4	Qmin	4.23	2442.84	2442.86	1.55	2.76	14.66	1.12
1.1	4	Qmed	25.28	2443.15	2443.32	3.43	7.67	17.54	1.55
1.1	4	Qmax	251.76	2444.56	2445.20	6.87	43.71	34.50	1.59
1.1	3	Qmin	4.23	2439.21	2439.21	1.26	3.36	21.45	1.02
1.1	3	Qmed	25.28	2439.55	2439.55	1.96	13.00	34.50	1.01
1.1	3	Qmax	251.76	2440.37	2440.87	5.58	48.21	59.66	1.65
1.1	2	Qmin	4.23	2433.95	2433.88	1.31	3.24	9.95	0.73
1.1	2	Qmed	25.28	2434.25	2434.49	4.01	6.33	10.60	1.64
1.1	2	Qmax	251.76	2439.85	2436.90	1.07	342.79	97.10	0.14
1.1	1	Qmin	4.23	2431.33	2431.33	2.47	1.78	3.04	1.04
1.1	1	Qmed	25.28	2432.56	2432.56	4.06	6.66	4.42	1.04
1.1	1	Qmax	251.76	2437.42	2437.42	7.05	39.75	9.37	0.99

Nota. Realizado por el autor.

Tabla II

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (1.1)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Aqua (m)	Nivel Crítico Aqua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
1.1	7	Qmin	4.23	2454.50	2454.50	1.22	3.49	23.49	1.01
1.1	7	Qmed	25.28	2454.83	2454.83	2.17	11.76	25.21	1.00
1.1	7	Qmax	251.76	2456.42	2456.50	4.67	57.27	32.71	1.04
1.1	6	Qmin	4.23	2449.97	2449.84	0.75	5.65	21.57	0.47
1.1	6	Qmed	25.28	2450.41	2450.22	1.62	15.83	23.23	0.62
1.1	6	Qmax	251.76	2451.59	2452.04	5.88	44.34	25.30	1.37
1.1	5	Qmin	4.23	2446.85	2446.85	1.24	3.43	22.59	1.01
1.1	5	Qmed	25.28	2447.21	2447.21	2.21	11.61	24.18	0.99
1.1	5	Qmax	251.76	2448.98	2448.98	4.11	70.45	46.89	0.87
1.1	4	Qmin	4.23	2442.97	2442.86	0.91	4.75	15.91	0.51
1.1	4	Qmed	25.28	2443.49	2443.32	1.92	14.13	20.69	0.67
1.1	4	Qmax	251.76	2444.91	2445.21	5.28	59.65	53.80	1.12

1.1	3	Qmin	4.23	2439.21	2439.21	1.26	3.37	21.49	1.01
1.1	3	Qmed	25.28	2439.55	2439.55	1.96	13.00	34.50	1.01
1.1	3	Qmax	251.76	2440.70	2440.83	3.70	73.14	87.00	0.97
1.1	2	Qmin	4.23	2434.06	2433.88	0.97	4.38	10.33	0.47
1.1	2	Qmed	25.28	2435.13	2434.49	1.47	17.56	15.78	0.43
1.1	2	Qmax	251.76	2439.99	2436.90	0.89	356.42	97.10	0.12
1.1	1	Qmin	4.23	2431.56	2431.33	1.71	2.56	3.71	0.66
1.1	1	Qmed	25.28	2433.02	2432.56	3.12	8.73	4.74	0.71
1.1	1	Qmax	251.76	2438.42	2437.39	5.40	49.61	10.41	0.71

Nota. Realizado por el autor.

Tabla III

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (1.1)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m3/s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m2)	Ancho Superior (m)	# Froude
1.1	7	Qmin	4.23	2454.50	2454.50	1.22	3.49	23.49	1.01
1.1	7	Qmed	25.28	2454.83	2454.83	2.17	11.76	25.21	1.00
1.1	7	Qmax	251.76	2456.86	2456.50	3.59	79.22	58.65	0.72
1.1	6	Qmin	4.23	2450.12	2449.84	0.47	9.10	22.67	0.24
1.1	6	Qmed	25.28	2450.78	2450.22	1.06	24.35	23.87	0.33
1.1	6	Qmax	251.76	2452.86	2452.51	3.36	81.48	36.29	0.61
1.1	5	Qmin	4.23	2446.87	2446.85	1.14	3.74	22.63	0.89
1.1	5	Qmed	25.28	2447.33	2447.31	1.75	14.76	24.92	0.70
1.1	5	Qmax	251.76	2449.62	2449.62	2.71	109.89	71.75	0.51
1.1	4	Qmin	4.23	2443.16	2443.12	0.56	7.93	17.68	0.25
1.1	4	Qmed	25.28	2443.96	2443.32	1.14	25.18	27.19	0.32
1.1	4	Qmax	251.76	2445.47	2445.21	3.37	90.20	55.45	0.64
1.1	3	Qmin	4.23	2439.21	2439.21	1.26	3.37	21.49	1.01
1.1	3	Qmed	25.28	2439.55	2439.55	1.96	13.00	34.50	1.01
1.1	3	Qmax	251.76	2441.00	2441.00	2.09	99.58	88.43	0.50
1.1	2	Qmin	4.23	2434.27	2433.88	0.64	6.59	10.64	0.26
1.1	2	Qmed	25.28	2435.70	2434.49	0.94	29.82	28.61	0.23
1.1	2	Qmax	251.76	2441.16	2440.95	0.48	469.66	97.10	0.06
1.1	1	Qmin	4.23	2431.91	2431.33	1.14	3.91	3.96	0.36
1.1	1	Qmed	25.28	2433.98	2432.56	1.96	13.71	5.69	0.38
1.1	1	Qmax	251.76	2440.33	2437.31	3.14	71.48	12.40	0.38

Nota. Realizado por el autor.

Tabla IV

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (1.2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m3/s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m2)	Ancho Superior (m)	# Froude
1.2	10	Qmin	2.32	2431.13	2431.14	1.24	1.87	15.1	0.92
1.2	10	Qmed	18	2431.44	2431.53	2.7	6.66	16.41	0.87
1.2	10	Qmax	251.76	2432.87	2433.64	6.74	38.6	26.2	1.02
1.2	9	Qmin	2.32	2430.1	2429.77	0.33	3.59	7.63	0.46
1.2	9	Qmed	18	2430.81	2430.56	1.18	17.27	29.79	0.61

1.2	9	Qmax	251.76	2433.16	2432.32	2.77	140.26	75.82	0.57
1.2	8	Qmin	2.32	2429.38	2429.38	1.63	1.42	5.22	0.95
1.2	8	Qmed	18	2430.04	2430.04	2.43	7.41	12.6	0.97
1.2	8	Qmax	251.76	2432.45	2432.45	3.93	77.25	57.95	0.86
1.2	7	Qmin	2.32	2427.87	2427.9	1.33	1.75	16.25	0.98
1.2	7	Qmed	18	2428.06	2428.24	3.44	5.23	19.12	1
1.2	7	Qmax	251.76	2429.31	2430.16	7.41	35.36	35.87	0.89
1.2	6	Qmin	2.32	2426.4	2426.4	1.2	1.93	13.55	0.98
1.2	6	Qmed	18	2426.75	2426.75	2.01	8.94	22.22	0.95
1.2	6	Qmax	251.76	2428.09	2428.68	5.73	51.99	47.04	1.02
1.2	5	Qmin	2.32	2424.39	2424.44	1.96	1.18	5.83	0.93
1.2	5	Qmed	18	2424.88	2425.06	3.34	5.38	11.26	1.02
1.2	5	Qmax	251.76	2426.72	2427.14	5.54	45.45	29.77	0.87
1.2	4	Qmin	2.32	2423.5	2423.5	1.18	1.95	13.92	0.98
1.2	4	Qmed	18	2423.9	2423.9	2.22	8.11	16.55	1.01
1.2	4	Qmax	251.76	2425.52	2426.05	5.69	47.71	39.6	0.99
1.2	3	Qmin	2.32	2420.28	2420.35	2.24	1.04	15.73	0.78
1.2	3	Qmed	18	2420.43	2420.71	5.1	3.53	17.11	0.99
1.2	3	Qmax	251.76	2421.69	2422.83	8.23	31.3	27.03	0.86
1.2	2	Qmin	2.32	2419	2419	1.24	1.87	12.08	0.95
1.2	2	Qmed	18	2419.37	2419.45	2.68	6.71	13.9	0.97
1.2	2	Qmax	251.76	2421.01	2421.76	6.87	36.67	23.35	1.01
1.2	1	Qmin	2.32	2417.36	2417.41	1.92	1.21	11.77	1.02
1.2	1	Qmed	18	2417.63	2417.83	3.62	4.98	15.09	0.95
1.2	1	Qmax	251.76	2419.01	2419.89	7.67	35.33	30.99	0.94

Nota. Realizado por el autor.

Tabla V

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (1.2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m ³ /s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m ²)	Ancho Superior (m)	# Froude
1.2	10	Qmin	2.32	2431.14	2431.14	1.15	2.01	15.1	1
1.2	10	Qmed	18	2431.56	2431.53	2.06	8.76	17.79	0.94
1.2	10	Qmax	251.76	2433.46	2433.69	4.81	55.5	36.86	1.04
1.2	9	Qmin	2.32	2430.16	2429.77	0.24	4.04	8.04	0.25
1.2	9	Qmed	18	2430.95	2430.83	0.78	21.65	30.8	0.34
1.2	9	Qmax	251.76	2433.39	2432.19	2.1	158.5	80.03	0.41
1.2	8	Qmin	2.32	2429.38	2429.38	1.63	1.42	5.22	1
1.2	8	Qmed	18	2430.04	2430.04	2.43	7.41	12.6	1.01
1.2	8	Qmax	251.76	2432.41	2432.41	3.78	74.88	57.2	0.83
1.2	7	Qmin	2.32	2427.98	2427.9	0.63	3.66	18.65	0.46
1.2	7	Qmed	18	2428.42	2428.24	1.45	12.43	21.18	0.6
1.2	7	Qmax	251.76	2429.68	2430.13	5.44	51.04	48.69	1.45
1.2	6	Qmin	2.32	2426.4	2426.4	1.2	1.94	13.58	1.01
1.2	6	Qmed	18	2426.75	2426.75	2	9.03	22.93	1.01

1.2	6	Qmax	251.76	2428.9	2428.45	3	102.98	65.79	0.68
1.2	5	Qmin	2.32	2424.63	2424.44	0.78	2.96	8.57	0.42
1.2	5	Qmed	18	2425.33	2425.05	1.55	11.59	16.26	0.59
1.2	5	Qmax	251.76	2427.16	2427.14	4.25	59.22	32.09	0.99
1.2	4	Qmin	2.32	2423.5	2423.5	1.17	1.97	13.99	1
1.2	4	Qmed	18	2423.9	2423.9	2.21	8.16	16.56	1
1.2	4	Qmax	251.76	2426	2426	3.9	70.19	47.62	0.83
1.2	3	Qmin	2.32	2420.38	2420.35	0.88	2.64	16.73	0.7
1.2	3	Qmed	18	2420.65	2420.71	2.46	7.33	18.75	1.25
1.2	3	Qmax	251.76	2421.87	2422.56	7.08	36.23	27.9	1.88
1.2	2	Qmin	2.32	2419	2419	1.22	1.89	12.09	0.99
1.2	2	Qmed	18	2419.45	2419.45	2.32	7.75	14.27	1.01
1.2	2	Qmax	251.76	2421.75	2421.76	4.58	54.93	26.42	1.02
1.2	1	Qmin	2.32	2417.46	2417.41	0.94	2.47	13.65	0.71
1.2	1	Qmed	18	2417.9	2417.83	1.93	9.31	17.28	0.84
1.2	1	Qmax	251.76	2419.25	2419.81	6.07	43.13	36.35	1.58

Nota. Realizado por el autor.

Tabla VI

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (1.2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
1.2	10	Qmin	2.32	2431.14	2431.14	1.15	2.01	15.10	1.00
1.2	10	Qmed	18	2431.86	2431.53	1.22	14.77	21.36	0.47
1.2	10	Qmax	251.76	2434.30	2433.69	2.67	91.06	51.86	0.55
1.2	9	Qmin	2.32	2430.20	2429.77	0.11	4.35	8.28	0.10
1.2	9	Qmed	18	2431.13	3431.12	0.42	27.17	32.02	0.16
1.2	9	Qmax	251.76	2433.75	2433.68	1.19	187.35	80.97	0.22
1.2	8	Qmin	2.32	2429.44	2429.40	1.32	1.75	5.78	0.77
1.2	8	Qmed	18	2430.39	2430.21	1.46	12.30	15.98	0.53
1.2	8	Qmax	251.76	2432.62	2432.24	2.61	87.31	61.04	0.55
1.2	7	Qmin	2.32	2428.13	2428.50	0.36	6.45	19.48	0.20
1.2	7	Qmed	18	2428.72	2428.71	0.94	19.06	23.03	0.33
1.2	7	Qmax	251.76	2430.75	2430.73	2.15	111.08	59.20	0.48
1.2	6	Qmin	2.32	2426.42	2426.40	1.02	2.27	14.71	0.83
1.2	6	Qmed	18	2427.07	2427.12	1.11	16.22	23.95	0.43
1.2	6	Qmax	251.76	2429.58	2429.55	1.72	141.84	67.84	0.34
1.2	5	Qmin	2.32	2424.86	2424.76	0.44	5.23	11.11	0.21
1.2	5	Qmed	18	2425.83	2425.71	0.83	21.62	23.06	0.27
1.2	5	Qmax	251.76	2428.55	2428.52	2.00	127.53	57.42	0.38
1.2	4	Qmin	2.32	2423.56	2423.50	0.83	2.78	14.99	0.62
1.2	4	Qmed	18	2424.02	2424.00	1.78	10.11	17.22	0.74
1.2	4	Qmax	251.76	2425.84	2425.84	3.77	62.61	47.50	0.83
1.2	3	Qmin	2.32	2420.48	2420.03	0.54	4.25	17.44	0.35
1.2	3	Qmed	18	2421.09	2421.01	1.10	16.31	22.14	0.41

1.2	3	Qmax	251.76	2423.62	2422.73	1.95	104.88	55.46	0.38
1.2	2	Qmin	2.32	2419.10	2418.85	0.74	3.13	12.58	0.47
1.2	2	Qmed	18	2419.73	2419.45	1.51	11.91	15.63	0.55
1.2	2	Qmax	251.76	2422.11	2421.76	3.84	65.95	34.11	0.82
1.2	1	Qmin	2.32	2417.57	2417.41	0.57	4.07	14.59	0.34
1.2	1	Qmed	18	2418.24	2417.83	1.14	15.79	20.58	0.41
1.2	1	Qmax	251.76	2420.29	2419.57	2.05	90.77	52.56	0.46

Nota. Realizado por el autor.

Tabla VII

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m3/s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m2)	Ancho Superior (m)	# Froude
2	8	Qmin	2.32	2425.11	2424.96	0.34	2.40	9.45	0.44
2	8	Qmed	18	2425.74	2425.53	1.11	15.24	29.00	0.52
2	8	Qmax	251.76	2427.45	2427.01	3.01	83.36	43.13	0.72
2	7	Qmin	2.32	2424.37	2424.37	1.60	1.44	5.61	1.01
2	7	Qmed	18	2425.01	2425.01	2.40	7.49	12.90	1.01
2	7	Qmax	251.76	2426.67	2426.67	4.11	67.68	44.91	1.01
2	6	Qmin	2.32	2419.06	2419.25	4.13	0.56	3.68	1.08
2	6	Qmed	18	2419.41	2419.80	6.37	2.82	10.53	1.15
2	6	Qmax	251.76	2420.75	2421.93	9.08	27.72	22.92	1.12
2	5	Qmin	2.32	2414.42	2414.43	1.69	1.37	5.42	1.07
2	5	Qmed	18	2415.00	2415.10	2.79	6.45	12.82	1.16
2	5	Qmax	251.76	2416.32	2417.05	7.01	38.93	36.64	1.20
2	4	Qmin	2.32	2413.06	2412.89	0.74	3.12	10.46	0.43
2	4	Qmed	18	2413.76	2413.43	1.46	12.31	15.36	0.52
2	4	Qmax	251.76	2415.84	2415.84	4.43	60.65	31.70	0.92
2	3	Qmin	2.32	2412.34	2412.33	1.53	1.51	5.88	0.97
2	3	Qmed	18	2413.02	2413.02	2.07	8.78	20.64	0.99
2	3	Qmax	251.76	2414.45	2414.74	5.04	52.07	36.47	1.03
2	2	Qmin	2.32	2410.49	2410.49	1.65	1.41	5.29	1.02
2	2	Qmed	18	2411.07	2411.21	2.76	6.88	19.81	1.07
2	2	Qmax	251.76	2412.44	2412.78	5.12	49.69	37.20	1.12
2	1	Qmin	2.32	2406.59	2406.68	2.32	1.00	6.85	1.07
2	1	Qmed	18	2406.95	2407.17	3.65	4.93	15.22	1.13
2	1	Qmax	251.76	2407.93	2408.55	6.71	38.96	43.54	1.12

Nota. Realizado por el autor.

Tabla VIII

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m3/s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m2)	Ancho Superior (m)	# Froude
2	8	Qmin	2.32	2425.14	2424.96	0.26	2.71	10.24	0.30
2	8	Qmed	18	2425.82	2425.56	0.80	17.63	31.93	0.37
2	8	Qmax	251.76	2427.59	2427.06	2.42	89.43	43.57	0.56

2	7	Qmin	2.32	2424.37	2424.37	1.60	1.44	5.61	1.01
2	7	Qmed	18	2425.00	2425.00	2.41	7.48	12.90	1.01
2	7	Qmax	251.76	2426.63	2426.63	3.78	65.82	44.83	0.93
2	6	Qmin	2.32	2419.18	2419.25	2.14	1.08	5.30	1.05
2	6	Qmed	18	2419.56	2419.80	3.91	4.60	12.70	1.17
2	6	Qmax	251.76	2420.95	2421.93	7.74	32.69	25.78	1.10
2	5	Qmin	2.32	2414.43	2414.43	1.63	1.42	5.52	1.02
2	5	Qmed	18	2415.09	2415.10	2.33	7.73	14.37	1.01
2	5	Qmax	251.76	2416.64	2417.04	5.39	50.94	38.44	1.14
2	4	Qmin	2.32	2413.12	2412.89	0.60	3.85	11.62	0.33
2	4	Qmed	18	2413.94	2413.43	1.18	15.21	16.23	0.39
2	4	Qmax	251.76	2416.26	2415.83	3.49	74.18	32.02	0.67
2	3	Qmin	2.32	2412.48	2412.33	0.94	2.47	7.52	0.52
2	3	Qmed	18	2413.12	2413.12	1.68	10.75	21.53	0.75
2	3	Qmax	251.76	2414.71	2414.71	4.05	61.80	37.04	0.98
2	2	Qmin	2.32	2410.49	2410.49	1.65	1.41	5.29	1.02
2	2	Qmed	18	2411.20	2411.20	1.98	9.92	25.40	0.78
2	2	Qmax	251.76	2412.78	2412.86	3.41	62.61	38.91	0.86
2	1	Qmin	2.32	2406.73	2406.68	1.07	2.16	10.07	0.74
2	1	Qmed	18	2407.01	2407.18	3.00	6.00	16.80	1.06
2	1	Qmax	251.76	2407.96	2408.56	5.97	40.32	43.57	1.15

Nota. Realizado por el autor.

Tabla IX

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (2)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
2	8	Qmin	2.32	2425.19	2424.96	0.12	3.27	12.27	0.11
2	8	Qmed	18	2425.96	2425.61	0.33	22.41	38.07	0.15
2	8	Qmax	251.76	2428.03	2427.40	1.20	108.71	44.35	0.25
2	7	Qmin	2.32	2424.44	2424.37	1.26	1.83	6.41	0.76
2	7	Qmed	18	2425.31	2425.27	1.51	11.96	16.43	0.56
2	7	Qmax	251.76	2426.87	2426.87	2.03	76.80	45.33	0.47
2	6	Qmin	2.32	2419.45	2419.25	0.70	3.33	11.12	0.41
2	6	Qmed	18	2419.95	2420.00	1.69	10.62	18.55	0.72
2	6	Qmax	251.76	2421.41	2421.82	5.48	46.23	33.79	1.03
2	5	Qmin	2.32	2414.52	2414.52	1.17	1.98	6.50	0.68
2	5	Qmed	18	2415.49	2415.51	1.23	14.69	21.20	0.46
2	5	Qmax	251.76	2418.40	2416.96	1.90	126.69	47.70	0.37
2	4	Qmin	2.32	2413.28	2413.28	0.41	5.68	12.20	0.19
2	4	Qmed	18	2414.25	2414.25	0.88	20.51	17.95	0.26
2	4	Qmax	251.76	2416.96	2416.98	2.28	96.56	33.69	0.40
2	3	Qmin	2.32	2412.65	2412.45	0.58	3.96	9.53	0.29
2	3	Qmed	18	2413.48	2413.28	0.92	19.16	25.15	0.33
2	3	Qmax	251.76	2415.26	2414.81	2.67	82.46	38.24	0.57

2	2	Qmin	2.32	2410.59	2410.58	1.17	1.99	6.27	0.66
2	2	Qmed	18	2411.19	2411.18	1.91	9.46	25.32	0.76
2	2	Qmax	251.76	2413.18	2413.18	1.97	78.50	40.85	0.44
2	1	Qmin	2.32	2406.84	2406.68	0.68	3.41	12.67	0.42
2	1	Qmed	18	2407.39	2407.18	1.06	16.26	37.76	0.46
2	1	Qmax	251.76	2408.11	2408.85	4.18	47.15	43.74	1.05

Nota. Realizado por el autor.

Tabla X

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (3)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
3	17	Qmin	2.32	2396.16	2396.16	1.15	2.01	14.75	1.00
3	17	Qmed	18	2396.45	2396.48	2.08	8.63	25.80	1.15
3	17	Qmax	251.76	2397.68	2398.13	5.44	49.21	45.46	1.44
3	16	Qmin	2.32	2393.88	2393.92	1.74	1.33	8.89	1.44
3	16	Qmed	18	2394.29	2394.39	2.69	6.69	19.74	1.48
3	16	Qmax	251.76	2395.98	2396.44	5.84	44.97	26.99	1.33
3	15	Qmin	2.32	2392.59	2392.59	1.27	1.82	11.01	1.00
3	15	Qmed	18	2392.99	2392.99	2.02	8.90	21.94	1.01
3	15	Qmax	251.76	2394.48	2394.89	5.65	45.92	27.38	1.34
3	14	Qmin	2.32	2390.52	2390.52	1.22	1.89	12.74	1.01
3	14	Qmed	18	2390.80	2390.88	2.47	7.30	21.00	1.34
3	14	Qmax	251.76	2392.15	2392.66	5.96	42.57	30.39	1.58
3	13	Qmin	2.32	2388.16	2388.06	0.91	2.53	9.66	0.57
3	13	Qmed	18	2388.45	2388.57	2.98	6.04	13.36	1.42
3	13	Qmax	251.76	2390.68	2391.27	6.11	43.33	20.20	1.26
3	12	Qmin	2.32	2387.46	2387.46	1.50	1.61	7.13	0.98
3	12	Qmed	18	2387.98	2387.98	2.10	8.64	20.26	1.01
3	12	Qmax	251.76	2388.79	2389.36	6.22	41.42	51.45	2.19
3	11	Qmin	2.32	2383.84	2383.89	1.79	1.29	12.76	1.79
3	11	Qmed	18	2384.08	2384.30	3.82	4.71	15.25	2.20
3	11	Qmax	251.76	2386.06	2386.41	5.55	47.62	26.51	1.24
3	10	Qmin	2.32	2382.25	2382.25	1.38	1.68	9.40	1.04
3	10	Qmed	18	2382.74	2382.74	2.28	7.96	15.20	1.00
3	10	Qmax	251.76	2384.78	2385.02	5.60	46.87	20.60	1.15
3	9	Qmin	2.32	2380.95	2380.95	1.21	1.91	13.27	1.02
3	9	Qmed	18	2381.22	2381.34	2.88	6.24	17.08	1.52
3	9	Qmax	251.76	2382.79	2383.51	6.88	37.60	24.86	1.67
3	8	Qmin	2.32	2378.64	2378.70	1.88	1.23	10.06	1.72
3	8	Qmed	18	2379.00	2379.13	3.01	5.98	14.62	1.50
3	8	Qmax	251.76	2380.62	2381.50	7.32	35.18	25.92	1.73
3	7	Qmin	2.32	2377.13	2377.13	1.11	2.09	17.84	1.03
3	7	Qmed	18	2377.41	2377.45	2.23	8.14	23.40	1.19
3	7	Qmax	251.76	2378.57	2379.37	7.23	35.79	24.33	1.88

3	6	Qmin	2.32	2375.52	2375.54	1.41	1.65	13.35	1.28
3	6	Qmed	18	2375.82	2375.93	2.86	6.30	15.80	1.45
3	6	Qmax	251.76	2377.34	2377.95	6.56	41.39	29.67	1.61
3	5	Qmin	2.32	2372.82	2372.86	1.68	1.38	12.11	1.59
3	5	Qmed	18	2373.08	2373.26	3.49	5.16	15.61	1.94
3	5	Qmax	251.76	2374.65	2375.52	7.57	33.62	21.28	1.89
3	4	Qmin	2.32	2372.35	2372.35	1.13	2.14	18.41	1.05
3	4	Qmed	18	2372.65	2372.65	1.91	9.93	28.44	1.03
3	4	Qmax	251.76	2373.65	2374.35	6.89	38.97	29.66	1.91
3	3	Qmin	2.32	2370.04	2370.11	2.04	1.14	8.84	1.82
3	3	Qmed	18	2370.32	2370.55	3.85	4.67	15.18	2.22
3	3	Qmax	251.76	2372.01	2372.65	6.47	39.21	23.18	1.58
3	2	Qmin	2.32	2368.11	2368.11	1.29	1.79	11.03	1.02
3	2	Qmed	18	2368.54	2368.54	2.23	8.11	16.54	1.01
3	2	Qmax	251.76	2370.32	2370.71	5.76	44.37	23.57	1.29
3	1	Qmin	2.32	2366.06	2366.05	1.18	1.96	12.65	0.96
3	1	Qmed	18	2366.36	2366.44	2.55	7.07	18.71	1.32
3	1	Qmax	251.76	2367.84	2368.45	6.33	40.19	25.63	1.55

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XI

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (3)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
3	17	Qmin	2.32	2396.16	2396.16	1.12	2.06	15.24	0.98
3	17	Qmed	18	2396.48	2396.48	1.91	9.42	26.14	1.02
3	17	Qmax	251.76	2398.01	2398.13	4.16	64.85	48.69	1.00
3	16	Qmin	2.32	2393.97	2393.92	1.04	2.24	10.12	0.70
3	16	Qmed	18	2394.49	2394.39	1.67	10.75	20.72	0.74
3	16	Qmax	251.76	2396.60	2396.45	4.27	62.95	32.91	0.86
3	15	Qmin	2.32	2392.69	2392.68	0.77	3.01	13.46	0.52
3	15	Qmed	18	2393.13	2393.11	1.51	11.91	22.77	0.67
3	15	Qmax	251.76	2394.89	2394.89	4.54	57.34	28.02	0.97
3	14	Qmin	2.32	2390.52	2390.52	1.22	1.90	12.78	1.01
3	14	Qmed	18	2390.88	2390.88	2.03	8.88	21.38	1.00
3	14	Qmax	251.76	2392.55	2392.67	4.60	55.25	31.91	1.08
3	13	Qmin	2.32	2388.28	2388.06	0.61	3.80	12.18	0.35
3	13	Qmed	18	2388.94	2388.57	1.40	12.89	14.50	0.47
3	13	Qmax	251.76	2391.44	2391.44	4.38	63.99	35.42	0.79
3	12	Qmin	2.32	2387.45	2387.45	1.44	1.56	6.95	0.94
3	12	Qmed	18	2387.99	2387.99	1.88	8.93	20.59	0.89
3	12	Qmax	251.76	2388.89	2389.38	5.08	46.41	52.58	1.70
3	11	Qmin	2.32	2383.93	2383.89	0.92	2.53	14.14	0.69
3	11	Qmed	18	2384.43	2384.30	1.74	10.36	17.17	0.71
3	11	Qmax	251.76	2386.98	2386.38	3.45	73.53	29.83	0.66

3	10	Qmin	2.32	2382.34	2382.32	0.90	2.58	10.33	0.57
3	10	Qmed	18	2382.88	2382.73	1.79	10.14	16.00	0.71
3	10	Qmax	251.76	2385.00	2385.00	5.05	51.46	21.02	0.99
3	9	Qmin	2.32	2380.96	2380.95	1.10	2.11	13.43	0.89
3	9	Qmed	18	2381.34	2381.34	2.16	8.33	17.57	1.00
3	9	Qmax	251.76	2383.24	2383.51	5.38	49.09	26.55	1.17
3	8	Qmin	2.32	2378.72	2378.75	1.08	2.14	12.40	0.83
3	8	Qmed	18	2379.10	2379.12	2.41	7.46	15.00	1.09
3	8	Qmax	251.76	2381.03	2381.49	5.69	47.08	31.32	1.22
3	7	Qmin	2.32	2377.18	2377.13	0.76	3.05	19.40	0.61
3	7	Qmed	18	2377.52	2377.46	1.70	10.69	23.54	0.79
3	7	Qmax	251.76	2379.13	2379.36	5.16	49.78	25.67	1.15
3	6	Qmin	2.32	2375.54	2375.54	1.18	1.96	14.30	1.02
3	6	Qmed	18	2375.93	2375.93	2.24	8.04	16.08	1.01
3	6	Qmax	251.76	2377.73	2377.92	4.81	53.64	31.96	1.09
3	5	Qmin	2.32	2372.98	2372.86	0.63	3.66	14.89	0.41
3	5	Qmed	18	2373.46	2373.26	1.58	11.39	16.59	0.61
3	5	Qmax	251.76	2375.08	2375.52	5.89	43.60	24.20	1.36
3	4	Qmin	2.32	2372.36	2372.36	1.08	2.20	18.53	0.99
3	4	Qmed	18	2372.65	2372.65	1.91	9.76	28.44	1.04
3	4	Qmax	251.76	2374.20	2374.32	4.79	55.41	30.12	1.12
3	3	Qmin	2.32	2370.17	2370.11	0.90	2.57	13.07	0.65
3	3	Qmed	18	2370.66	2370.55	1.71	10.50	19.18	0.74
3	3	Qmax	251.76	2372.89	2372.65	4.19	60.74	25.65	0.86
3	2	Qmin	2.32	2368.18	2368.11	0.90	2.58	12.77	0.64
3	2	Qmed	18	2368.63	2368.61	1.85	9.71	16.83	0.77
3	2	Qmax	251.76	2370.71	2370.71	4.67	53.83	24.58	0.96
3	1	Qmin	2.32	2366.12	2366.05	0.82	2.83	15.80	0.62
3	1	Qmed	18	2366.55	2366.44	1.68	10.70	19.96	0.73
3	1	Qmax	251.76	2368.33	2368.43	4.66	53.41	28.11	1.00

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XII

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (3)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
3	17	Qmin	2.32	2396.27	2396.16	0.56	4.12	23.59	0.43
3	17	Qmed	18	2396.68	2396.48	1.21	14.88	28.83	0.54
3	17	Qmax	251.76	2398.60	2398.07	2.54	94.79	53.87	0.53
3	16	Qmin	2.32	2394.04	2394.04	0.81	2.86	10.44	0.49
3	16	Qmed	18	2394.66	2394.67	1.26	14.32	21.10	0.49
3	16	Qmax	251.76	2397.45	2397.41	2.66	97.79	47.98	0.46
3	15	Qmin	2.32	2392.85	2392.88	0.40	5.79	20.46	0.24
3	15	Qmed	18	2393.48	2393.50	0.89	20.15	23.58	0.31
3	15	Qmax	251.76	2395.75	2395.75	3.13	83.11	35.03	0.58

3	14	Qmin	2.32	2390.52	2390.52	1.22	1.90	12.78	1.01
3	14	Qmed	18	2390.88	2390.88	2.03	8.88	21.38	1.00
3	14	Qmax	251.76	2393.69	2393.69	2.65	92.93	34.20	0.49
3	13	Qmin	2.32	2388.47	2388.06	0.37	6.33	13.38	0.17
3	13	Qmed	18	2389.36	2388.57	0.94	19.08	15.67	0.26
3	13	Qmax	251.76	2391.74	2391.35	3.28	75.15	38.15	0.56
3	12	Qmin	2.32	2387.48	2387.45	1.00	1.75	7.86	0.67
3	12	Qmed	18	2388.15	2388.15	1.09	12.64	26.93	0.48
3	12	Qmax	251.76	2389.69	2389.68	2.07	91.35	62.52	0.53
3	11	Qmin	2.32	2384.07	2383.95	0.52	4.49	15.01	0.30
3	11	Qmed	18	2384.80	2384.30	1.04	17.41	20.84	0.35
3	11	Qmax	251.76	2387.69	2387.50	2.30	95.67	33.67	0.40
3	10	Qmin	2.32	2382.42	2382.42	0.66	3.50	12.29	0.39
3	10	Qmed	18	2383.08	2383.10	1.32	13.55	17.22	0.47
3	10	Qmax	251.76	2385.83	2385.83	3.66	69.44	22.76	0.63
3	9	Qmin	2.32	2381.07	2381.01	0.64	3.61	16.11	0.43
3	9	Qmed	18	2381.59	2381.33	1.41	12.81	18.24	0.54
3	9	Qmax	251.76	2383.79	2383.51	4.10	64.28	28.60	0.80
3	8	Qmin	2.32	2378.76	2378.70	0.89	2.60	13.28	0.64
3	8	Qmed	18	2379.27	2379.13	1.79	10.08	15.87	0.72
3	8	Qmax	251.76	2381.68	2381.66	3.59	67.98	33.13	0.68
3	7	Qmin	2.32	2377.27	2377.27	0.47	4.94	21.23	0.31
3	7	Qmed	18	2377.78	2377.78	1.05	16.90	23.74	0.39
3	7	Qmax	251.76	2379.99	2379.94	3.38	73.87	29.20	0.63
3	6	Qmin	2.32	2375.54	2375.54	1.19	1.94	14.26	1.03
3	6	Qmed	18	2375.93	2375.93	2.24	8.03	16.08	1.01
3	6	Qmax	251.76	2378.03	2377.96	3.58	63.33	32.73	0.76
3	5	Qmin	2.32	2373.08	2372.86	0.45	5.11	15.59	0.25
3	5	Qmed	18	2373.69	2373.26	1.17	15.32	17.01	0.40
3	5	Qmax	251.76	2375.99	2375.56	3.89	66.38	25.89	0.74
3	4	Qmin	2.32	2372.39	2372.36	0.81	2.87	20.22	0.68
3	4	Qmed	18	2372.75	2372.64	1.42	12.66	28.60	0.68
3	4	Qmax	251.76	2375.19	2375.20	3.01	85.49	30.49	0.57
3	3	Qmin	2.32	2370.30	2370.28	0.54	4.32	14.96	0.32
3	3	Qmed	18	2370.99	2370.84	1.07	16.86	20.11	0.37
3	3	Qmax	251.76	2374.16	2374.11	2.65	95.39	29.08	0.44
3	2	Qmin	2.32	2368.31	2368.33	0.53	4.39	15.83	0.32
3	2	Qmed	18	2368.97	2368.99	1.14	15.56	18.08	0.39
3	2	Qmax	251.76	2371.70	2371.72	2.94	79.44	27.37	0.51
3	1	Qmin	2.32	2366.23	2366.05	0.50	4.67	17.69	0.31
3	1	Qmed	18	2366.86	2366.44	1.05	17.22	21.25	0.37
3	1	Qmax	251.76	2369.29	2368.66	2.55	83.40	36.51	0.46

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XIII

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (4)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
4	15	Qmin	2.32	2531.41	2524.65	0.02	93.83	15.27	0.45
4	15	Qmed	18	2532.10	2525.23	0.17	104.43	15.39	0.20
4	15	Qmax	251.76	2535.16	2527.93	1.45	221.32	75.04	0.15
4	14	Qmin	2.32	2531.41	2531.27	0.03	96.37	33.31	0.32
4	14	Qmed	18	2532.10	2532.15	0.17	122.12	41.94	0.22
4	14	Qmax	251.76	2535.19	2535.19	1.03	312.15	74.20	0.12
4	13	Qmin	2.32	2531.41	2531.47	0.07	35.46	23.77	0.22
4	13	Qmed	18	2532.10	2532.10	0.34	53.03	27.42	0.58
4	13	Qmax	251.76	2535.06	2535.16	1.78	164.27	55.71	0.25
4	12	Qmin	2.32	2531.37	2531.31	0.85	2.71	15.17	0.65
4	12	Qmed	18	2532.02	2532.00	1.15	15.71	23.44	0.45
4	12	Qmax	251.76	2534.76	2534.75	2.73	92.34	29.44	0.49
4	11	Qmin	2.32	2530.72	2530.72	1.27	1.83	5.54	0.70
4	11	Qmed	18	2531.44	2531.44	2.24	8.04	16.13	1.01
4	11	Qmax	251.76	2533.60	2533.60	4.85	54.31	24.65	0.98
4	10	Qmin	2.32	2529.71	2529.71	1.34	1.73	9.58	1.00
4	10	Qmed	18	2530.20	2530.21	2.23	8.06	16.44	1.02
4	10	Qmax	251.76	2532.01	2532.43	5.95	45.09	24.02	1.03
4	9	Qmin	2.32	2527.85	2527.89	1.71	1.35	7.68	1.03
4	9	Qmed	18	2528.23	2528.42	3.42	5.27	11.98	1.06
4	9	Qmax	251.76	2530.16	2530.80	6.64	37.93	20.05	0.95
4	8	Qmin	2.32	2526.84	2526.80	1.13	2.05	8.94	0.75
4	8	Qmed	18	2527.33	2527.33	2.34	7.69	14.07	1.01
4	8	Qmax	251.76	2529.40	2529.89	5.99	42.04	20.81	1.05
4	7	Qmin	2.32	2525.65	2525.65	1.37	1.69	8.78	0.99
4	7	Qmed	18	2526.14	2526.14	2.34	7.70	14.26	1.02
4	7	Qmax	251.76	2528.30	2528.56	5.50	45.75	21.02	0.91
4	6	Qmin	2.32	2522.68	2522.73	1.83	1.27	8.92	1.05
4	6	Qmed	18	2522.99	2523.22	3.89	4.63	12.24	0.98
4	6	Qmax	251.76	2524.35	2525.24	7.85	34.23	27.81	1.01
4	5	Qmin	2.32	2520.45	2520.45	1.43	1.62	8.27	0.92
4	5	Qmed	18	2521.03	2521.03	2.47	7.29	12.69	0.87
4	5	Qmax	251.76	2522.60	2523.11	5.95	43.08	28.38	1.01
4	4	Qmin	2.32	2518.15	2518.21	2.08	1.11	8.76	1.08
4	4	Qmed	18	2518.43	2518.68	4.23	4.26	14.36	0.98
4	4	Qmax	251.76	2519.93	2520.70	7.14	35.24	25.57	0.96
4	3	Qmin	2.32	2514.70	2514.66	1.25	1.85	8.33	0.85
4	3	Qmed	18	2515.12	2515.22	2.87	6.28	13.38	1.04
4	3	Qmax	251.76	2516.61	2517.50	7.56	33.32	20.33	1.18

4	2	Qmin	2.32	2513.58	2513.58	1.69	1.37	4.78	1.00
4	2	Qmed	18	2514.18	2514.19	2.34	7.69	14.20	0.99
4	2	Qmax	251.76	2515.96	2516.38	5.47	49.89	38.60	0.98

4	1	Qmin	2.32	2511.36	2511.42	2.01	1.15	7.51	0.64
4	1	Qmed	18	2511.69	2511.92	3.88	4.64	11.78	0.97
4	1	Qmax	251.76	2513.39	2514.05	6.57	38.34	29.01	0.82

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XIV

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (4)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
4	15	Qmin	2.32	2531.46	2524.65	0.02	94.55	15.27	0.22
4	15	Qmed	18	2532.22	2525.23	0.17	106.29	15.42	0.25
4	15	Qmax	251.76	2535.43	2527.93	1.24	241.51	76.41	0.94
4	14	Qmin	2.32	2531.46	2531.27	0.03	97.95	33.65	0.23
4	14	Qmed	18	2532.22	2532.15	0.15	127.27	43.62	0.26
4	14	Qmax	251.76	2535.44	2535.19	0.82	330.99	75.96	0.92
4	13	Qmin	2.32	2531.46	2531.47	0.06	36.59	24.07	0.42
4	13	Qmed	18	2532.22	2532.10	0.32	56.36	28.00	0.37
4	13	Qmax	251.76	2535.34	2535.16	1.55	179.80	56.09	0.22
4	12	Qmin	2.32	2531.43	2531.31	0.62	3.74	16.20	0.41
4	12	Qmed	18	2532.15	2532.00	0.95	18.90	24.12	0.34
4	12	Qmax	251.76	2535.02	2534.75	2.52	100.07	29.53	0.44
4	11	Qmin	2.32	2530.81	2530.72	0.98	2.35	5.92	0.50
4	11	Qmed	18	2531.65	2531.44	1.54	11.68	18.23	0.62
4	11	Qmax	251.76	2534.00	2533.60	4.11	64.10	25.36	0.78
4	10	Qmin	2.32	2529.77	2529.71	1.01	2.30	10.33	0.68
4	10	Qmed	18	2530.27	2530.21	1.97	9.12	16.83	0.86
4	10	Qmax	251.76	2532.42	2532.42	4.84	55.38	25.36	0.98
4	9	Qmin	2.32	2527.89	2527.89	1.42	1.63	8.11	1.01
4	9	Qmed	18	2528.42	2528.42	2.32	7.75	14.35	1.01
4	9	Qmax	251.76	2530.60	2530.82	5.40	47.00	21.50	1.12
4	8	Qmin	2.32	2526.91	2526.80	0.87	2.68	9.28	0.51
4	8	Qmed	18	2527.51	2527.33	1.74	10.32	14.66	0.66
4	8	Qmax	251.76	2530.04	2529.89	4.46	56.45	23.36	0.92
4	7	Qmin	2.32	2525.65	2525.65	1.37	1.69	8.78	0.99
4	7	Qmed	18	2526.14	2526.14	2.32	7.76	14.27	1.01
4	7	Qmax	251.76	2528.56	2528.56	4.90	51.44	21.50	1.00
4	6	Qmin	2.32	2522.77	2522.73	1.10	2.11	10.44	0.78
4	6	Qmed	18	2523.29	2523.22	2.06	8.72	14.56	0.85
4	6	Qmax	251.76	2524.52	2525.21	6.80	39.15	28.67	1.06
4	5	Qmin	2.32	2520.48	2520.45	1.25	1.86	8.42	0.85
4	5	Qmed	18	2521.03	2521.03	2.43	7.40	12.73	1.02
4	5	Qmax	251.76	2523.11	2523.11	4.42	58.45	30.96	0.99

4	4	Qmin	2.32	2518.21	2518.21	1.38	1.68	9.37	0.87
4	4	Qmed	18	2518.61	2518.68	2.53	7.11	16.30	0.98
4	4	Qmax	251.76	2520.14	2520.70	6.16	40.88	27.25	1.06
4	3	Qmin	2.32	2514.80	2514.66	0.84	2.76	9.09	0.49
4	3	Qmed	18	2515.47	2515.22	1.55	11.63	16.24	0.58
4	3	Qmax	251.76	2517.19	2517.51	5.59	45.42	22.73	1.02
4	2	Qmin	2.32	2513.58	2513.58	1.69	1.37	4.78	1.00
4	2	Qmed	18	2514.18	2514.18	2.34	7.69	14.20	1.02
4	2	Qmax	251.76	2516.38	2516.38	4.17	67.12	42.36	0.93
4	1	Qmin	2.32	2511.53	2511.42	0.83	2.79	11.03	0.53
4	1	Qmed	18	2512.18	2511.92	1.64	11.01	15.04	0.61
4	1	Qmax	251.76	2513.69	2514.06	5.30	47.55	32.09	1.08

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XV

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (4)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
4	15	Qmin	2.32	2531.59	2524.65	0.02	96.63	15.30	0.19
4	15	Qmed	18.00	2532.55	2525.23	0.16	111.29	15.48	0.28
4	15	Qmax	251.76	2536.21	2527.93	0.74	301.92	78.87	0.72
4	14	Qmin	2.32	2531.59	2531.27	0.02	102.60	34.84	0.62
4	14	Qmed	18.00	2532.54	2532.15	0.12	142.52	52.72	0.85
4	14	Qmax	251.76	2536.20	2535.19	0.46	390.74	81.29	0.95
4	13	Qmin	2.32	2531.59	2531.47	0.06	39.92	24.72	0.22
4	13	Qmed	18.00	2532.54	2532.10	0.28	65.65	29.56	0.36
4	13	Qmax	251.76	2536.14	2535.16	1.00	225.00	57.11	0.17
4	12	Qmin	2.32	2531.58	2531.31	0.37	6.30	18.49	0.20
4	12	Qmed	18.00	2532.48	2532.00	0.66	27.09	25.79	0.21
4	12	Qmax	251.76	2535.88	2534.75	2.00	127.15	35.60	0.31
4	11	Qmin	2.32	2531.00	2530.72	0.64	3.63	7.47	0.29
4	11	Qmed	18.00	2531.93	2531.44	1.04	17.26	20.43	0.36
4	11	Qmax	251.76	2534.92	2533.60	2.90	88.43	27.07	0.48
4	10	Qmin	2.32	2529.89	2529.71	0.65	3.57	11.04	0.36
4	10	Qmed	18.00	2530.56	2530.21	1.27	14.22	18.41	0.45
4	10	Qmax	251.76	2533.25	2532.42	3.34	77.42	27.73	0.59
4	9	Qmin	2.32	2527.97	2527.89	0.99	2.34	9.06	0.62
4	9	Qmed	18.00	2528.62	2528.42	1.68	10.71	15.46	0.65
4	9	Qmax	251.76	2531.64	2530.82	3.55	74.74	33.62	0.61
4	8	Qmin	2.32	2526.96	2526.80	0.73	3.15	9.52	0.41
4	8	Qmed	18.00	2527.70	2527.33	1.38	13.07	15.02	0.47
4	8	Qmax	251.76	2530.84	2529.89	3.34	75.83	25.27	0.60
4	7	Qmin	2.32	2525.75	2525.65	0.87	2.67	11.33	0.57
4	7	Qmed	18.00	2526.25	2526.14	1.92	9.35	14.58	0.77
4	7	Qmax	251.76	2528.57	2528.56	4.90	51.50	21.50	1.00

4	6	Qmin	2.32	2522.80	2522.73	0.93	2.48	10.72	0.62
4	6	Qmed	18.00	2523.51	2523.22	1.47	12.40	21.39	0.59
4	6	Qmax	251.76	2525.74	2525.21	3.35	76.11	31.28	0.65
4	5	Qmin	2.32	2520.61	2520.05	0.77	3.03	9.01	0.42
4	5	Qmed	18.00	2521.37	2521.03	1.41	12.75	18.50	0.54
4	5	Qmax	251.76	2523.57	2523.11	3.51	73.05	33.23	0.73
4	4	Qmin	2.32	2518.21	2518.21	1.38	1.68	9.37	1.04
4	4	Qmed	18.00	2518.68	2518.68	2.19	8.21	16.79	1.00
4	4	Qmax	251.76	2520.70	2520.70	4.47	56.30	28.13	1.01
4	3	Qmin	2.32	2514.96	2514.66	0.53	4.35	11.15	0.27
4	3	Qmed	18.00	2515.78	2515.22	1.06	16.99	18.45	0.35
4	3	Qmax	251.76	2518.25	2517.54	3.52	71.13	25.42	0.62
4	2	Qmin	2.32	2513.58	2513.58	1.69	1.37	4.78	1.00
4	2	Qmed	18.00	2514.23	2514.18	2.15	8.38	14.30	0.90
4	2	Qmax	251.76	2516.59		3.49	76.41	43.65	0.74
4	1	Qmin	2.32	2511.66	2511.42	0.53	4.34	11.70	0.28
4	1	Qmed	18.00	2512.65	2511.92	0.92	19.54	22.02	0.31
4	1	Qmax	251.76	2515.52	2514.08	2.22	113.46	37.96	0.39

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XVI

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (5)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
5	10	Qmin	2.32	2381.18	2380.19	0.14	16.14	16.02	0.05
5	10	Qmed	18	2381.90	2380.65	0.63	31.58	26.13	0.15
5	10	Qmax	251.76	2385.23	2382.79	2.13	218.82	92.34	0.30
5	9	Qmin	2.32	2381.17	2380.01	0.37	6.27	15.20	0.18
5	9	Qmed	18	2381.83	2380.56	1.06	16.97	16.32	0.33
5	9	Qmax	251.76	2384.57	2383.69	3.77	81.66	68.71	0.63
5	8	Qmin	2.32	2381.02	2380.99	1.04	2.22	13.03	0.81
5	8	Qmed	18	2381.42	2381.41	2.21	8.15	15.13	0.96
5	8	Qmax	251.76	2384.12	2384.12	4.24	78.37	56.80	0.83
5	7	Qmin	2.32	2379.94	2379.94	1.42	1.63	7.88	1.00
5	7	Qmed	18	2380.48	2380.48	2.42	7.44	12.51	1.00
5	7	Qmax	251.76	2382.45	2383.01	5.86	43.50	24.75	1.05
5	6	Qmin	2.32	2378.93	2378.93	1.30	1.78	11.06	1.04
5	6	Qmed	18	2379.25	2379.39	3.09	5.82	13.02	1.08
5	6	Qmax	251.76	2381.78	2382.32	5.91	53.36	48.28	1.01
5	5	Qmin	2.32	2377.15	2377.19	1.89	1.23	6.15	1.05
5	5	Qmed	18	2377.67	2377.75	2.89	6.24	11.58	1.01
5	5	Qmax	251.76	2379.41	2380.49	7.53	33.49	18.67	0.78
5	4	Qmin	2.32	2375.62	2375.65	1.52	1.52	9.87	0.98
5	4	Qmed	18	2375.99	2376.11	3.03	5.93	13.66	0.95
5	4	Qmax	251.76	2377.78	2378.83	7.26	35.23	20.08	0.99

5	3	Qmin	2.32	2373.65	2373.67	1.40	1.66	12.98	0.85
5	3	Qmed	18	2373.95	2374.07	2.95	6.10	16.01	0.88
5	3	Qmax	251.76	2375.32	2376.25	7.82	32.21	20.56	0.93
5	2	Qmin	2.32	2371.44	2371.48	1.65	1.40	10.21	0.96
5	2	Qmed	18	2371.76	2371.90	2.97	6.06	17.73	0.94
5	2	Qmax	251.76	2373.00	2373.92	7.68	32.78	22.47	0.99
5	1	Qmin	2.32	2370.84	2370.83	1.11	2.08	14.17	0.93
5	1	Qmed	18	2371.23	2371.23	2.28	7.89	15.19	1.01
5	1	Qmax	251.76	2373.61	2373.62	4.82	53.42	25.82	0.94

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XVII

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (5)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total (m3/s)	Elev. Nivel Agua (m)	Nivel Crítico Agua (m)	Velocidad (m/s)	Área de Flujo (m2)	Ancho Superior (m)	# Froude
5	10	Qmin	2.32	2381.24	2380.20	0.13	17.17	16.07	0.04
5	10	Qmed	18	2382.05	2380.65	0.56	35.56	27.10	0.13
5	10	Qmax	251.76	2385.42	2382.76	1.71	237.04	93.28	0.24
5	9	Qmin	2.32	2381.23	2381.23	0.32	7.24	15.55	0.15
5	9	Qmed	18	2381.98	2381.98	0.93	19.33	16.52	0.27
5	9	Qmax	251.76	2384.94	2384.94	3.14	110.95	87.85	0.50
5	8	Qmin	2.32	2381.06	2381.06	0.82	2.82	13.74	0.58
5	8	Qmed	18	2381.61	2381.61	1.63	11.01	15.14	0.61
5	8	Qmax	251.76	2384.12	2384.12	4.04	78.74	56.87	0.79
5	7	Qmin	2.32	2380.02	2380.05	1.01	2.29	8.90	0.64
5	7	Qmed	18	2380.60	2380.65	2.00	9.01	13.05	0.77
5	7	Qmax	251.76	2383.01	2383.04	4.28	68.28	46.44	0.87
5	6	Qmin	2.32	2378.96	2378.90	1.07	2.17	11.40	0.78
5	6	Qmed	18	2379.40	2379.39	2.31	7.79	13.28	0.96
5	6	Qmax	251.76	2382.15	2382.31	4.74	71.43	50.50	0.84
5	5	Qmin	2.32	2377.23	2377.19	1.32	1.75	6.81	0.83
5	5	Qmed	18	2377.82	2377.75	2.23	8.08	12.13	0.87
5	5	Qmax	251.76	2379.82	2380.61	6.13	41.41	19.88	1.01
5	4	Qmin	2.32	2375.69	2375.64	1.04	2.22	10.73	0.73
5	4	Qmed	18	2376.11	2376.11	2.34	7.69	14.06	1.01
5	4	Qmax	251.76	2378.42	2378.86	5.34	51.28	45.00	1.06
5	3	Qmin	2.32	2373.67	2373.67	1.22	1.90	13.11	1.02
5	3	Qmed	18	2374.06	2374.07	2.27	7.95	16.45	1.04
5	3	Qmax	251.76	2375.65	2376.24	6.41	39.29	21.92	1.53
5	2	Qmin	2.32	2371.57	2371.48	0.79	2.93	14.18	0.56
5	2	Qmed	18	2372.07	2371.90	1.47	12.28	21.41	0.62
5	2	Qmax	251.76	2374.81	2373.92	3.23	78.04	27.93	0.62
5	1	Qmin	2.32	2370.89	2370.83	0.81	2.85	14.52	0.59
5	1	Qmed	18	2371.38	2371.23	1.77	10.14	15.45	0.70
5	1	Qmax	251.76	2373.76	2373.56	4.36	57.38	28.53	0.83

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XVIII

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (5)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
5	10	Qmin	2.32	2381.40	2380.19	0.12	19.72	16.37	0.30
5	10	Qmed	18	2382.46	2380.65	0.41	47.08	28.77	0.89
5	10	Qmax	251.76	2385.68	2382.81	1.09	262.09	95.04	0.15
5	9	Qmin	2.32	2381.38	2381.23	0.24	9.65	15.97	0.21
5	9	Qmed	18	2382.38	2381.98	0.69	26.08	17.14	0.18
5	9	Qmax	251.76	2385.43	2384.94	2.03	154.01	87.85	0.31
5	8	Qmin	2.32	2381.19	2381.06	0.49	4.71	15.07	0.28
5	8	Qmed	18	2381.99	2381.61	1.08	16.69	15.20	0.33
5	8	Qmax	251.76	2384.76	2384.12	2.29	123.13	84.58	0.40
5	7	Qmin	2.32	2380.12	2380.05	0.70	3.29	10.52	0.40
5	7	Qmed	18	2380.90	2380.65	1.37	13.15	14.63	0.46
5	7	Qmax	251.76	2383.61	2383.04	2.85	96.25	48.48	0.52
5	6	Qmin	2.32	2379.10	2378.90	0.60	3.85	12.74	0.35
5	6	Qmed	18	2379.80	2379.39	1.37	13.12	13.75	0.45
5	6	Qmax	251.76	2382.58	2382.31	3.14	93.46	54.71	0.52
5	5	Qmin	2.32	2377.32	2377.19	0.93	2.50	9.72	0.58
5	5	Qmed	18	2378.06	2377.75	1.59	11.34	14.63	0.58
5	5	Qmax	251.76	2380.82	2380.71	3.68	78.47	51.52	0.65
5	4	Qmin	2.32	2375.85	2375.56	0.56	4.13	12.64	0.31
5	4	Qmed	18	2376.56	2376.11	1.26	14.29	15.18	0.41
5	4	Qmax	251.76	2379.03	2378.91	3.53	81.12	50.92	0.63
5	3	Qmin	2.32	2373.67	2373.67	1.22	1.90	13.11	1.02
5	3	Qmed	18	2374.07	2374.07	2.21	8.15	16.55	1.00
5	3	Qmax	251.76	2376.65	2376.23	3.93	68.69	51.29	0.77
5	2	Qmin	2.32	2371.68	2371.48	0.49	4.68	16.53	0.30
5	2	Qmed	18	2372.39	2371.90	0.94	19.20	21.89	0.32
5	2	Qmax	251.76	2375.89	2375.78	2.32	109.18	35.87	0.38
5	1	Qmin	2.32	2371.00	2370.83	0.51	4.51	14.90	0.30
5	1	Qmed	18	2371.76	2371.23	1.11	16.21	15.85	0.35
5	1	Qmax	251.76	2374.67	2373.32	2.48	93.21	48.79	0.41

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XIX

Tabla comparativa parámetros de estudio n mínima (6)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
6	21	Qmin	2.32	2392.74	2390.61	0.06	40.21	22.47	0.26
6	21	Qmed	18	2393.40	2391.09	0.36	55.65	29.25	0.17
6	21	Qmax	251.76	2396.45	2393.29	1.44	195.82	61.55	0.19
6	20	Qmin	2.32	2392.74	2391.72	0.06	38.82	21.13	0.12

6	20	Qmed	18	2393.40	2393.22	0.35	53.32	22.89	0.25
6	20	Qmax	251.76	2396.42	2396.35	1.64	197.16	66.24	0.22
6	19	Qmin	2.32	2392.74	2392.72	0.06	39.29	25.61	0.10
6	19	Qmed	18	2393.40	2393.39	0.32	57.16	27.85	0.17
6	19	Qmax	251.76	2396.41	2396.36	1.54	202.08	66.04	0.21
6	18	Qmin	2.32	2392.74	2392.74	0.14	16.03	16.64	0.25
6	18	Qmed	18	2393.38	2393.34	0.65	28.02	20.33	0.17
6	18	Qmax	251.76	2396.22	2396.21	2.37	124.16	47.99	0.37
6	17	Qmin	2.32	2392.64	2392.64	1.29	1.80	10.88	1.01
6	17	Qmed	18	2393.09	2393.09	2.12	8.47	18.82	1.01
6	17	Qmax	251.76	2394.98	2394.98	4.97	53.10	28.72	1.07
6	16	Qmin	2.32	2391.31	2391.34	1.54	1.50	11.77	0.99
6	16	Qmed	18	2391.61	2391.78	3.37	5.34	13.75	0.97
6	16	Qmax	251.76	2394.09	2394.36	5.70	44.36	18.57	0.94
6	15	Qmin	2.32	2390.32	2390.32	1.29	1.80	10.85	1.01
6	15	Qmed	18	2390.77	2390.78	2.34	7.69	14.75	0.94
6	15	Qmax	251.76	2392.41	2393.14	7.01	35.93	18.30	0.96
6	14	Qmin	2.32	2389.45	2389.47	1.46	1.58	11.11	0.98
6	14	Qmed	18	2389.78	2389.93	3.19	5.64	12.37	1.02
6	14	Qmax	251.76	2392.40	2392.78	5.95	48.53	28.81	1.10
6	13	Qmin	2.32	2388.57	2388.57	1.40	1.65	8.56	1.02
6	13	Qmed	18	2389.09	2389.09	2.36	7.64	13.72	1.01
6	13	Qmax	251.76	2390.82	2391.76	7.11	35.71	18.94	1.09
6	12	Qmin	2.32	2386.31	2386.39	2.20	1.05	7.48	0.87
6	12	Qmed	18	2386.60	2386.86	4.24	4.24	13.14	1.02
6	12	Qmax	251.76	2388.17	2389.14	7.98	31.53	19.18	0.99
6	11	Qmin	2.32	2385.93	2385.88	0.98	2.37	12.64	0.72
6	11	Qmed	18	2386.40	2386.30	1.93	9.32	15.25	0.79
6	11	Qmax	251.76	2388.68	2388.68	5.08	50.32	20.16	0.98
6	10	Qmin	2.32	2385.20	2385.17	1.11	2.10	10.50	0.79
6	10	Qmed	18	2385.64	2385.64	2.20	8.19	16.82	1.01
6	10	Qmax	251.76	2387.29	2387.81	6.00	41.98	22.74	1.04
6	9	Qmin	2.32	2384.48	2384.46	1.04	2.23	15.18	0.87
6	9	Qmed	18	2384.84	2384.85	2.15	8.35	18.42	1.02
6	9	Qmax	251.76	2386.50	2386.91	5.60	45.08	25.13	1.01
6	8	Qmin	2.32	2383.30	2383.30	1.02	2.27	19.45	0.95
6	8	Qmed	18	2383.56	2383.61	2.34	7.70	21.25	0.98
6	8	Qmax	251.76	2385.00	2385.70	6.10	43.40	30.61	1.02
6	7	Qmin	2.32	2382.09	2382.10	1.26	1.84	13.45	1.09
6	7	Qmed	18	2382.46	2382.50	2.38	7.56	16.76	1.13
6	7	Qmax	251.76	2384.00	2384.55	6.01	49.07	48.86	1.09
6	6	Qmin	2.32	2380.93	2380.93	1.15	2.02	15.08	1.00
6	6	Qmed	18	2381.25	2381.32	2.47	7.30	17.72	1.03
6	6	Qmax	251.76	2382.86	2383.34	5.82	43.64	27.88	1.02

6	5	Qmin	2.32	2378.57	2378.64	2.24	1.03	10.15	0.99
6	5	Qmed	18	2378.86	2379.08	3.83	4.70	14.59	0.96
6	5	Qmax	251.76	2380.42	2381.29	7.40	34.88	32.41	0.84
6	4	Qmin	2.32	2376.40	2376.41	1.68	1.38	5.26	1.05
6	4	Qmed	18	2376.91	2377.01	2.93	6.14	11.66	0.98
6	4	Qmax	251.76	2378.68	2379.48	7.68	38.77	42.88	1.09
6	3	Qmin	2.32	2375.96	2375.79	0.68	3.40	11.74	0.40
6	3	Qmed	18	2376.70	2376.29	1.25	15.50	20.44	0.41
6	3	Qmax	251.76	2378.96	2378.49	3.88	90.63	60.71	0.69
6	2	Qmin	2.32	2375.75	2375.63	0.97	2.40	7.74	0.55
6	2	Qmed	18	2376.28	2376.26	2.31	7.80	12.99	0.95
6	2	Qmax	251.76	2378.57	2378.57	4.23	75.93	53.84	0.82
6	1	Qmin	2.32	2375.36	2375.34	0.95	2.43	18.05	0.83
6	1	Qmed	18	2375.69	2375.69	2.01	8.96	21.70	1.00
6	1	Qmax	251.76	2376.59	2377.15	6.67	41.38	54.34	1.07

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XX

Tabla comparativa parámetros de estudio n media (6)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	
6	21	Qmin	2.32	2392.75	2390.62	0.05	40.38	22.49	0.29
6	21	Qmed	18	2393.47	2391.11	0.32	58.08	36.85	0.62
6	21	Qmax	251.76	2396.50	2393.59	1.06	198.99	61.55	0.14
6	20	Qmin	2.32	2392.75	2392.82	0.06	38.98	21.15	0.17
6	20	Qmed	18	2393.47	2393.51	0.33	54.88	23.10	0.65
6	20	Qmax	251.76	2396.49	2396.67	1.33	201.88	66.24	0.18
6	19	Qmin	2.32	2392.75	2392.78	0.06	39.49	25.69	0.15
6	19	Qmed	18	2393.47	2393.51	0.31	59.00	27.95	0.26
6	19	Qmax	251.76	2396.47	2396.53	1.33	205.96	66.04	0.18
6	18	Qmin	2.32	2392.75	2392.72	0.14	16.15	16.70	0.25
6	18	Qmed	18	2393.44	2393.45	0.62	29.26	20.50	0.16
6	18	Qmax	251.76	2396.27	2396.28	2.12	126.56	48.33	0.33
6	17	Qmin	2.32	2392.64	2392.64	1.29	1.80	10.88	1.01
6	17	Qmed	18	2393.09	2393.09	2.13	8.46	18.82	1.01
6	17	Qmax	251.76	2395.78	2395.78	3.24	94.73	55.02	0.60
6	16	Qmin	2.32	2391.41	2391.34	0.85	2.71	12.45	0.58
6	16	Qmed	18	2391.89	2391.78	1.94	9.27	14.33	0.77
6	16	Qmax	251.76	2394.38	2394.38	5.11	49.82	20.17	0.97
6	15	Qmin	2.32	2390.32	2390.32	1.29	1.80	10.85	1.01
6	15	Qmed	18	2390.78	2390.78	2.29	7.88	14.83	1.00
6	15	Qmax	251.76	2392.78	2393.14	5.87	42.90	18.98	1.04
6	14	Qmin	2.32	2389.55	2389.47	0.83	2.77	11.94	0.55
6	14	Qmed	18	2390.09	2389.93	1.88	9.56	13.19	0.71
6	14	Qmax	251.76	2392.81	2392.81	4.96	60.68	32.61	0.86

6	13	Qmin	2.32	2388.57	2388.57	1.40	1.65	8.56	1.02
6	13	Qmed	18	2389.09	2389.09	2.37	7.61	13.71	1.01
6	13	Qmax	251.76	2391.13	2391.74	6.10	42.04	21.95	1.07
6	12	Qmin	2.32	2386.48	2386.39	0.84	2.75	11.38	0.55
6	12	Qmed	18	2387.04	2386.86	1.64	11.01	16.73	0.64
6	12	Qmax	251.76	2388.46	2389.15	6.75	37.27	19.71	1.07
6	11	Qmin	2.32	2385.99	2385.92	0.73	3.16	13.90	0.49
6	11	Qmed	18	2386.52	2386.27	1.61	11.16	15.48	0.61
6	11	Qmax	251.76	2388.73	2388.69	4.98	51.31	20.26	0.96
6	10	Qmin	2.32	2385.22	2385.22	1.00	2.31	10.74	0.69
6	10	Qmed	18	2385.74	2385.74	1.79	10.03	17.81	0.76
6	10	Qmax	251.76	2387.83	2387.83	4.61	55.18	27.71	0.96
6	9	Qmin	2.32	2384.53	2384.62	0.75	3.07	15.61	0.54
6	9	Qmed	18	2384.95	2385.00	1.74	10.35	19.15	0.76
6	9	Qmax	251.76	2386.80	2386.91	4.81	53.04	28.15	1.04
6	8	Qmin	2.32	2383.30	2383.30	1.02	2.27	19.45	0.95
6	8	Qmed	18	2383.63	2383.61	1.98	9.10	21.53	0.97
6	8	Qmax	251.76	2385.28	2385.70	5.17	53.55	48.02	1.07
6	7	Qmin	2.32	2382.16	2382.10	0.82	2.83	14.30	0.59
6	7	Qmed	18	2382.59	2382.50	1.86	9.69	17.52	0.80
6	7	Qmax	251.76	2384.23	2384.53	4.95	60.73	50.12	1.05
6	6	Qmin	2.32	2380.93	2380.93	1.15	2.02	15.08	1.00
6	6	Qmed	18	2381.32	2381.32	2.12	8.48	18.55	1.00
6	6	Qmax	251.76	2383.35	2383.35	4.46	59.05	34.36	0.96
6	5	Qmin	2.32	2378.63	2378.64	1.37	1.69	11.07	0.92
6	5	Qmed	18	2378.95	2379.08	3.01	5.97	15.51	0.85
6	5	Qmax	251.76	2380.51	2381.25	6.91	38.07	36.98	0.98
6	4	Qmin	2.32	2376.41	2376.41	1.63	1.42	5.37	1.01
6	4	Qmed	18	2377.01	2377.01	2.45	7.33	12.17	1.01
6	4	Qmax	251.76	2378.91	2379.41	6.07	49.37	48.58	1.07
6	3	Qmin	2.32	2376.02	2375.79	0.56	4.14	12.03	0.30
6	3	Qmed	18	2376.79	2376.29	1.10	17.43	21.26	0.35
6	3	Qmax	251.76	2379.16	2378.43	3.11	104.01	67.08	0.54
6	2	Qmin	2.32	2375.81	2375.63	0.81	2.87	8.18	0.44
6	2	Qmed	18	2376.40	2376.32	1.92	9.39	13.36	0.73
6	2	Qmax	251.76	2378.50	2378.50	4.03	71.87	52.70	0.79
6	1	Qmin	2.32	2375.39	2375.34	0.78	2.98	18.53	0.62
6	1	Qmed	18	2375.78	2375.69	1.65	10.95	22.59	0.75
6	1	Qmax	251.76	2376.67	2377.14	5.48	45.55	55.27	1.09

Nota. Realizado por el autor.

Tabla XXI

Tabla comparativa parámetros de estudio n máxima (6)

Tramo	Corte	Perfil	Q Total	Elev. Nivel Agua	Nivel Crítico Agua	Velocidad	Área de Flujo	Ancho Superior	# Froude
			(m3/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m2)	(m)	

6	21	Qmin	2.32	2392.79	2390.63	0.04	41.40	22.59	0.15
6	21	Qmed	18	2393.72	2391.34	0.20	67.06	36.85	0.43
6	21	Qmax	251.76	2396.84	2393.44	0.55	219.77	61.55	0.72
6	20	Qmin	2.32	2392.79	2392.82	0.06	39.93	21.26	0.15
6	20	Qmed	18	2393.71	2393.51	0.27	60.54	23.95	0.16
6	20	Qmax	251.76	2396.84	2396.67	0.77	224.79	66.24	0.10
6	19	Qmin	2.32	2392.79	2392.78	0.06	40.63	26.11	0.11
6	19	Qmed	18	2393.70	2393.51	0.27	65.62	28.50	0.15
6	19	Qmax	251.76	2396.81	2396.53	0.85	228.22	66.04	0.11
6	18	Qmin	2.32	2392.79	2392.72	0.14	16.86	17.09	0.14
6	18	Qmed	18	2393.66	2393.45	0.53	33.79	21.11	0.13
6	18	Qmax	251.76	2396.59	2396.28	1.47	144.38	58.94	0.22
6	17	Qmin	2.32	2392.70	2392.64	0.96	2.41	11.42	0.67
6	17	Qmed	18	2393.34	2393.09	1.35	13.33	20.45	0.53
6	17	Qmax	251.76	2396.26	2395.78	2.21	121.22	57.88	0.38
6	16	Qmin	2.32	2391.53	2391.34	0.55	4.19	13.23	0.31
6	16	Qmed	18	2392.16	2391.78	1.37	13.12	14.65	0.46
6	16	Qmax	251.76	2395.13	2394.38	3.66	75.93	49.54	0.62
6	15	Qmin	2.32	2390.38	2390.32	0.93	2.50	11.76	0.64
6	15	Qmed	18	2391.09	2390.78	1.40	12.85	16.53	0.51
6	15	Qmax	251.76	2394.16	2393.14	3.34	81.65	43.39	0.56
6	14	Qmin	2.32	2389.68	2389.47	0.53	4.38	12.21	0.28
6	14	Qmed	18	2390.46	2389.93	1.23	14.59	13.65	0.38
6	14	Qmax	251.76	2393.20	2392.76	3.87	75.31	39.78	0.63
6	13	Qmin	2.32	2388.57	2388.57	1.40	1.65	8.56	1.02
6	13	Qmed	18	2389.10	2389.10	2.35	7.65	13.72	1.01
6	13	Qmax	251.76	2391.67	2391.67	4.41	58.00	32.11	0.83
6	12	Qmin	2.32	2386.55	2386.39	0.65	3.56	12.37	0.39
6	12	Qmed	18	2387.23	2386.86	1.26	14.23	17.43	0.45
6	12	Qmax	251.76	2390.33	2389.15	3.08	85.38	43.98	0.51
6	11	Qmin	2.32	2386.04	2386.00	0.58	4.02	14.69	0.35
6	11	Qmed	18	2386.69	2385.97	1.30	13.86	16.05	0.45
6	11	Qmax	251.76	2389.30	2388.70	4.04	63.33	22.12	0.71
6	10	Qmin	2.32	2385.29	2385.18	0.74	3.12	12.63	0.48
6	10	Qmed	18	2385.91	2385.78	1.37	13.12	19.43	0.53
6	10	Qmax	251.76	2388.43	2387.98	3.52	72.70	30.96	0.66
6	9	Qmin	2.32	2384.58	2384.08	0.61	3.81	15.99	0.40
6	9	Qmed	18	2385.08	2384.98	1.40	12.86	19.89	0.56
6	9	Qmax	251.76	2387.02	2386.93	4.30	59.73	35.52	0.89
6	8	Qmin	2.32	2383.33	2383.30	0.79	2.93	20.31	0.66
6	8	Qmed	18	2383.74	2382.71	1.56	11.61	22.01	0.68
6	8	Qmax	251.76	2385.69	2385.69	3.75	77.58	58.77	0.77
6	7	Qmin	2.32	2382.20	2381.97	0.68	3.42	14.70	0.45
6	7	Qmed	18	2382.75	2382.71	1.42	12.68	18.58	0.55
6	7	Qmax	251.76	2385.00	2384.48	2.86	104.11	71.15	0.56

6	6	Qmin	2.32	2380.98	2380.98	0.85	2.73	15.44	0.64
6	6	Qmed	18	2381.40	2381.40	1.80	10.02	19.18	0.79
6	6	Qmax	251.76	2383.37	2383.37	4.39	59.76	34.76	0.94
6	5	Qmin	2.32	2378.65	2378.64	1.18	1.96	11.42	0.91
6	5	Qmed	18	2379.09	2379.09	2.19	8.23	16.92	1.00
6	5	Qmax	251.76	2380.78	2381.18	5.46	48.94	46.36	1.04
6	4	Qmin	2.32	2376.53	2376.15	1.03	2.25	7.52	0.60
6	4	Qmed	18	2377.26	2377.01	1.71	10.55	13.00	0.60
6	4	Qmax	251.76	2379.67	2379.33	2.88	90.98	61.37	0.52
6	3	Qmin	2.32	2376.12	2376.21	0.43	5.37	14.30	0.22
6	3	Qmed	18	2376.94	2376.92	0.90	20.62	21.60	0.26
6	3	Qmax	251.76	2379.36	2379.56	2.32	117.45	67.08	0.39
6	2	Qmin	2.32	2375.89	2375.63	0.65	3.54	8.86	0.33
6	2	Qmed	18	2376.57	2376.52	1.55	11.63	13.72	0.54
6	2	Qmax	251.76	2378.43	2378.43	3.67	68.49	51.98	0.73
6	1	Qmin	2.32	2375.43	2375.34	0.61	3.78	19.14	0.44
6	1	Qmed	18	2375.90	2375.68	1.30	13.85	23.71	0.53
6	1	Qmax	251.76	2376.90	2377.21	3.37	58.49	57.03	0.85

Nota. Realizado por el autor.