PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Trabajo de Integración Curricular

# Tema: Análisis Comparativo de la Amenaza por Flujos de Detritos en la Quebrada El Tejado: Evaluación de Escenarios Pre y Post-Implementación de Obras de Mitigación Mediante Modelación en HEC-RAS 2D

AUTOR:

David Ariel Jaya Troncoso

TUTOR:

ING. Jorge Alexander Bucheli García

QUITO DM, JUNIO 2026

## DEDICATORIA

A mis padres, quienes me acompañaron durante toda mi carrera y estuvieron presentes en cada etapa de este proceso.

A ellos, por enseñarme con su ejemplo el valor del trabajo, la responsabilidad y la importancia de realizar cada acción con conciencia y sabiduría. Los admiro profundamente por las personas y profesionales que son y por haberme guiado siempre con amor.

Les dedico este trabajo por cada oportunidad que me brindaron, por sus consejos, por estar siempre pendientes de mí y por ofrecerme su apoyo y cariño incondicional. Gracias por creer en mí, impulsarme a seguir adelante y acompañarme hasta alcanzar esta meta.

## AGRADECIMIENTO

A mis padres, por estar siempre presentes, por acompañarme durante toda mi formación universitaria y por brindarme su amor y apoyo incondicional. Gracias por creer en mí, por orientarme con sus consejos y por darme las oportunidades necesarias para continuar avanzando.

A mi familia, por su cariño y respaldo. De manera especial, a mi tía Adry y a mi tío Alex, por abrirme nuevas oportunidades y acercarme al mundo de la geotecnia, los relaves y la minería; y a mi tía Lore, por su constante preocupación, ayuda y cariño. A mis abuelitas, por su amor y apoyo, y a mis abuelitos, que en paz descansen, por sus enseñanzas y el ejemplo que dejaron en mi vida.

A Amira, mi pareja, por haber sido una parte importante durante el cierre de esta etapa. Gracias por acompañarme, escucharme, animarme y permanecer a mi lado.

A mis amigos, por su apoyo en las distintas etapas de la carrera; por cada consejo, cada lectura, cada conversación y cada gesto de ayuda. También les agradezco por los buenos momentos compartidos durante estos años, que hicieron de mi paso por la universidad una experiencia más alegre y significativa.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, estuvieron presentes durante este camino y aportaron con su tiempo, sus palabras, su compañía o sus conocimientos para que pudiera culminar esta etapa.

## RESUMEN

La quebrada El Tejado es una microcuenca de montaña localizada en el flanco occidental urbano del Distrito Metropolitano de Quito. Los aluviones ocurridos en 2022 y 2024 evidencian la interacción entre la pendiente del cauce, sedimentos, precipitaciones intensas en la zona, infraestructura de captación e intervención urbana. Esta investigación compara la amenaza hidrodinámica de un flujo de detritos mediante modelación bidimensional en HEC-RAS 2D para dos escenarios: la condición preobras de 2024 y la condición posobras proyectada para 2027, que incorpora las medidas de mitigación propuestas por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). La parametrización se sustentó en registros pluviométricos, información topográfica y estudios geológicos, sedimentológicos, geotécnicos e hidráulicos disponibles, junto con literatura técnica sobre flujos no newtonianos.

El hidrograma de diseño se estimó a partir de máximos diarios anuales de precipitación, la distribución de Gumbel y el método SCS-CN. Para la estación P28-Cruz Loma se obtuvo una precipitación de diseño de 83.01 mm, una precipitación efectiva de 44.51 mm y un caudal pico de 15.20 $m^3/s$. La simulación adoptó un número de curva CN = 84.17, un coeficiente de Manning n = 0.148 y una concentración volumétrica operativa Cv = 0.55.

Los resultados muestran que las obras modifican la propagación del flujo al concentrar la acumulación de lodo en las zonas de retención, reducir la velocidad y retrasar la llegada hacia el área urbana. Los calados máximos posobras alcanzaron 5.30 m en el cuenco superior, 7.00 m en la malla 1, 6.30 m en la malla 2 y 10.54 m en el cuenco inferior. Los volúmenes posobras estimados fueron 4,056.00 $m^3$ en el cuenco superior, 850.00 $m^3$ en la malla 1, 1,500.00 $m^3$ en la malla 2 y 21,812.00 $m^3$ en el cuenco inferior. Las velocidades máximas en la entrada urbana se redujeron de 1.20 a 0.20 m/s, equivalente a 83.33%. El tiempo de llegada a este punto aumentó de 60 a 165 min, con un retardo de 105 min. Asimismo, el indicador de amenaza hidráulica, expresado mediante el producto profundidad–velocidad (D × V), disminuyó de 1.02 a 0.10 $m^2/s$, lo que representa una reducción de 90.20% y un cambio en la clasificación de amenaza, de la categoría H5 a la categoría H1. Se concluye que el sistema de obras evaluado atenúa la movilidad del flujo y reduce su amenaza hidrodinámica, además de ampliar el tiempo de respuesta operativa. Sin embargo, los resultados dependen de los supuestos y parámetros adoptados en la modelación, por lo que no sustituyen una evaluación integral del riesgo.


*Palabras clave: Flujo de Detritos, HEC-RAS 2D, Amenaza Hidrodinámica, Quebrada El Tejado.*

**ABSTRACT**

El Tejado Ravine is a mountainous micro-watershed located on the urban western flank of the Metropolitan District of Quito. The debris-flow events that occurred in 2022 and 2024 demonstrate the interaction among channel slope, sediment availability, intense local rainfall, water-intake infrastructure, and urban intervention. This study compares the hydrodynamic hazard associated with a debris flow through two-dimensional HEC-RAS 2D modeling under two scenarios: the 2024 pre-works condition and the projected 2027 post-works condition, which incorporates the mitigation measures proposed by the Metropolitan Public Company for Drinking Water and Sanitation of Quito (EPMAPS). Model parameterization was based on rainfall records, topographic information, and available geological, sedimentological, geotechnical, and hydraulic studies, together with technical literature on non-Newtonian flows.

The design hydrograph was estimated from annual maximum daily precipitation records using the Gumbel distribution and the SCS-CN method. For the P28–Cruz Loma station, the estimated design precipitation was 83.01 mm, the effective precipitation was 44.51 mm, and the peak discharge was 15.20 $m^3/s$. The simulation adopted a curve number of CN = 84.17, a Manning roughness coefficient of $n = 0.148$, and an operational volumetric sediment concentration of $Cv = 0.55$.

The results show that mitigation works modify flow propagation by concentrating mud accumulation within the designated retention areas, reducing flow velocity, and delaying its arrival at the urban area. Maximum post-works flow depths reached 5.30 m in the upper retention basin, 7.00 m at Mesh Barrier 1, 6.30 m at Mesh Barrier 2, and 10.54 m in the lower retention basin. The estimated post-works volumes were 4,056.00 $m^3$ in the upper retention basin, 850.00 $m^3$ at Mesh Barrier 1, 1,500.00 $m^3$ at Mesh Barrier 2, and 21,812.00 $m^3$ in the lower retention basin. Maximum velocities at the entrance to the urban area decreased from 1.20 to 0.20 m/s, corresponding to an 83.33% reduction. The arrival time at this location increased from 60 to 165 min, representing a delay of 105 min. Likewise, the hydraulic hazard indicator, expressed as the depth–velocity product ($D \times V$), decreased from 1.02 to 0.10 $m^2/s$, corresponding to a 90.20% reduction and a change in hazard classification from category H5 to category H1. It is concluded that the evaluated mitigation system attenuates flow mobility, reduces the associated hydrodynamic hazard, and increases the available operational response time. However, the results depend on the assumptions and parameters adopted in numerical modeling and therefore do not replace a comprehensive risk assessment.

*Keywords: Debris Flow, HEC-RAS 2D, Hydrodynamic Hazard, El Tejado Ravine.*

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

**DEDICATORIA** ..... **2**

**AGRADECIMIENTO** ..... **3**

**RESUMEN** ..... **4**

**ABSTRACT** ..... **5**

**CAPÍTULO 1: Introducción** ..... **12**

1.1 Introducción ..... 12

1.2 Planteamiento del problema ..... 14

1.3 Objetivos de la investigación ..... 15

1.3.1 Objetivo general ..... 15

1.3.2 Objetivos específicos ..... 15

1.4 Justificación ..... 16

1.5 Alcance ..... 17

**CAPÍTULO 2: Marco teórico y contextual** ..... **19**

2.1 Caracterización del área de estudio ..... 19

2.1.1 Ubicación geográfica y delimitación de la cuenca de la quebrada El Tejado ..... 19

2.1.2 Características topográficas y geomorfológicas ..... 21

2.2 Antecedentes aluvionales y evento del 31 de enero de 2022 ..... 22

2.3 Obras de mitigación implementadas (plan 2024-2027) ..... 23

2.4 Modelo teórico de flujo de detritos en microcuencas de montaña andinas ..... 25

2.4.1 Precipitación extrema y distribución de Gumbel ..... 27

2.4.2 Método SCS-CN y precipitación efectiva ..... 29

2.4.3 Tiempo de concentración ..... 30

2.4.4 Hidrograma unitario triangular SCS/NRCS ....31

2.4.5 Rugosidad hidráulica y método de Cowan ....32

2.4.6 Fenomenología de flujos: agua clara y flujos no newtonianos ....34

2.4.7 Modelos reológicos en flujos no newtonianos....35

2.4.8 Formulación cuadrática de O'Brien ....40

2.4.9 Concentración volumétrica y tamaño representativo de partícula ....41

2.4.10 Esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica efectiva ....42

2.5 Producto profundidad–velocidad como indicador de amenaza hidráulica ....43

**CAPÍTULO 3: Marco metodológico y parametrización numérica ....46**

3.1 Sistematización de información base ....46

3.1.1 Información hidrológica y pluviométrica ....46

3.1.2 Información topográfica y modelo digital de elevación ....47

3.1.3 Información geológica, geotécnica y sedimentológica ....49

3.2 Determinación del hidrograma de diseño....50

3.3 Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning (Cowan-Chow) ....52

3.4 Parametrización de datos reológicos ....53

3.5 Construcción de los modelos en HEC-RAS 2D ....54

3.5.1 Estructuras incorporadas en el modelo geométrico ....58

**CAPÍTULO 4: Análisis de resultados ....59**

4.1 Criterio de análisis comparativo....59

4.2 Zonas y puntos de control ....59

4.3 Acumulación y calados máximos....61

4.3.1 Volumen de acumulación estimado en cuencos ....63

4.4 Velocidades máximas ..... 65

4.5 Tiempo de progresión del flujo ..... 68

4.6 Mapa de Amenaza Hidráulica ..... 71

**CAPÍTULO 5: Conclusiones y recomendaciones ..... 73**

5.1 Conclusiones ..... 73

5.2 Recomendaciones ..... 75

**CAPÍTULO 6: Referencias bibliográficas ..... 77**

**ÍNDICE DE TABLAS**

*Tabla 2.1* ..... *22*

*Tabla 2.2* ..... *23*

*Tabla 2.3* ..... *24*

*Tabla 2.4* ..... *27*

*Tabla 2.5* ..... *33*

*Tabla 2.6* ..... *38*

*Tabla 2.7* ..... *39*

*Tabla 2.8* ..... *40*

*Tabla 2.9* ..... *42*

*Tabla 2.10* ..... *44*

*Tabla 2.11* ..... *44*

*Tabla 3.1* ..... *47*

*Tabla 3.2* ..... *50*

*Tabla 3.3* ..... *51*

*Tabla 3.4* ..... *53*

*Tabla 3.5* ..... *54*

*Tabla 3.6* ..... *55*

*Tabla 3.7* ..... *56*

*Tabla 4.1* ..... *59*

*Tabla 4.2* ..... *61*

*Tabla 4.3* ..... *63*

*Tabla 4.4* ..... *65*

*Tabla 4.5* ..... *68*

*Tabla 4.6* ..... *70*

**ÍNDICE DE FIGURAS**

*Figura 2.1* ..... *20*

*Figura 2.2* ..... *21*

*Figura 2.3* ..... *24*

*Figura 2.4* ..... *26*

*Figura 2.5* ..... *32*

*Figura 2.6* ..... *35*

*Figura 2.7* ..... *36*

*Figura 2.8* ..... *37*

*Figura 2.9* ..... *43*

*Figura 3.1* ..... *48*

*Figura 3.2* ..... *49*

*Figura 3.3* ..... *51*

*Figura 3.4* ..... *52*

*Figura 3.5* ..... *57*

*Figura 3.6* ..... *58*

*Figura 4.1* ..... *60*

*Figura 4.2* ..... *62*

*Figura 4.3* ..... *62*

*Figura 4.4* ..... *64*

*Figura 4.5* ..... *66*

*Figura 4.6* ..... *67*

*Figura 4.7* ..... *69*

*Figura 4.8* ..... *70*

*Figura 4.9* ..... *71*

*Figura 4.10* ..... *72*

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

*Ecuación 2.1* ..... *27*

*Ecuación 2.2* ..... *28*

*Ecuación 2.3* ..... *28*

*Ecuación 2.4* ..... *28*

*Ecuación 2.5* ..... *28*

*Ecuación 2.6* ..... *29*

*Ecuación 2.7* ..... *29*

*Ecuación 2.8* ..... *30*

*Ecuación 2.9* ..... *30*

*Ecuación 2.10* ..... *31*

*Ecuación 2.11* ..... *31*

*Ecuación 2.12* ..... *31*

*Ecuación 2.13* ..... *32*

*Ecuación 2.14* ..... *33*

*Ecuación 2.15* ..... *40*

*Ecuación 2.16* ..... *43*

*Ecuación 2.17* ..... *43*

# CAPÍTULO 1: Introducción

## 1.1 Introducción

Los flujos de lodo y detritos en quebradas urbanas de montaña son procesos hidrológico-geomorfológicos complejos ya que combinan factores como: escorrentía, carga sólida, pendiente del cauce, confinamiento del cauce, obstrucciones e intervención urbana. Estos procesos son particularmente peligrosos por: el desarrollo urbano porque se desplazan rápidamente desde la de cabecera de un drenaje, transportar sedimentos, bloques, material vegetal (troncos) y elementos antrópicos (escombros), y lo que genera daños cuando la exposición de viviendas, vías, infraestructura y población se incrementa (Gibson et al., 2022).

En Quito, las quebradas del flanco oriental del Complejo Volcánico Pichincha cumplen con estas condiciones, además de presentar modificaciones por rellenos, alcantarillado, obras de captación y ocupación urbana, lo que influye y condiciona la conectividad del drenaje (Rondal Viscaíno, 2022; Troncoso et al., 2024).

La quebrada El Tejado es un drenaje de montaña, con pendiente elevada y trayectoria de propagación hacia sectores urbanos. La exposición que existe al pie aumenta la probabilidad de afectación de población e infraestructura ante flujos de detritos, como se evidenció en los antecedentes históricos (1975), en el evento de 2022, y en el evento de abril del 2024. Esto indicó que la amenaza no puede considerarse un episodio aislado (EPMAPS, 2024).

El aluvión del 31 de enero de 2022, que afectó los sectores de La Comuna, La Gasca, Santa Clara y La Mariscal, con 28 fallecidos, 52 heridos y 1 persona desaparecida (Rondal Viscaíno, 2022; Troncoso et al., 2024), remarcó la importancia de analizar este tipo de eventos.

Además, se mostró que la dinámica del flujo no puede analizarse solo como flujo newtoniano. La carga sólida debe considerarse como una mezcla con resistencia interna no newtoniana. Por esta razón, la modelación requiere herramientas capaces de representar el efecto de la concentración sólida sobre la propagación del flujo.

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) es un sistema de modelación hidráulica desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers y distribuido sin costo de licencia (U.S. Army Corps of Engineers [USACE], 2026). El módulo de lodo y detritos de HEC-RAS incorpora modelos no newtonianos mediante pérdidas internas asociadas a la concentración volumétrica, el esfuerzo de cedencia y la viscosidad aparente, por lo que resulta aplicable para evaluar flujos con alta carga sólida (USACE, 2023).

La modelación numérica de flujos de detritos es relevante porque permite estimar, la distribución espacial de calados, velocidades, tiempos de progresión y extensión de afectación. En términos de gestión del riesgo de desastres, estos resultados permiten analizar si las obras de mitigación reducen la energía del flujo, favorecen la retención temporal de sedimentos, retrasan la llegada hacia sectores urbanos o disminuyen la probabilidad de que el fenómeno alcance zonas de alta exposición.

Para El Tejado, donde la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito EPMAPS (2024) plantea obras de retención (mallas y ampliación de cuencos) el estudio comparativo preobras y posobras aporta evidencia técnica para valorar la función hidráulica de dichas intervenciones y sustentar decisiones de diseño futuras, o priorizar medidas complementarias, en esta u otras quebradas con condiciones similares.

## 1.2 Planteamiento del problema

La información disponible caracteriza el fenómeno desde varias dimensiones. Rondal Viscaíno (2022) se enfocó en el depósito y sus componentes; Troncoso et al. (2024) analizaron el área de impacto y velocidades con apoyo de registros multimedia; y Orosco-Tacuri et al. (2024) evaluaron escenarios hidrológicos e hidráulicos de inundación. Sin embargo, ningún estudio previo disponibles al público, aborda el comportamiento de un flujo de detritos modelado como mezcla no newtoniana o una comparación explícita entre escenarios pre y posobras de mitigación ante esta amenaza.

El problema central es la falta de una evaluación comparativa sistemática que cuantifique, dentro del dominio no newtoniano modelado, cómo varían las principales variables hidrodinámicas del flujo de detritos antes y después de la implementación de las obras.

La pregunta de la presente investigación es: ¿en qué medida la implementación de obras de mitigación modifica el comportamiento hidrodinámico de un flujo de detritos en la quebrada El Tejado, bajo un escenario crítico plausible?

## 1.3 Objetivos de la investigación

### *1.3.1 Objetivo general*

Evaluar comparativamente la amenaza hidrodinámica por flujos de detritos en la quebrada El Tejado, mediante modelación numérica bidimensional que contraste el comportamiento del flujo entre el escenario pre-implementación (línea base 2024) y el escenario pos-implementación (proyección 2027) de las obras de control propuestas por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS).

### *1.3.2 Objetivos específicos*

- Sistematizar la información topográfica, hidrológica, geológica, geotécnica, sedimentológica, hidráulica y técnica disponible para la quebrada El Tejado como base para la construcción de los escenarios de modelación pre y post obras de mitigación.
- Definir los parámetros de entrada y ejecutar la modelación bidimensional en HEC-RAS 2D para representar el comportamiento del flujo de detritos bajo un escenario crítico plausible, considerando las condiciones hidráulicas, geométricas y reológicas requeridas para cada escenario.
- Cuantificar la variación del nivel de amenaza mediante álgebra de mapas, comparando los resultados de las variables hidrodinámicas espaciotemporales (como calado, velocidad y tiempo de progresión del flujo) de ambos escenarios para determinar la variación espacial y temporal de las variables de amenaza física.

## 1.4 Justificación

Los antecedentes en la quebrada El Tejado, muestran que los flujos de lodo constituyen una amenaza para la zona urbana debido a que han producido pérdidas humanas, daños materiales y graves afectaciones a la infraestructura; en eventos como los ocurridos en 1975, 2022 y 2024. La comparación preobras y posobras permitió pasar de una descripción del evento a una evaluación comparativa de su comportamiento hidrodinámico.

Este estudio permite evaluar si las medidas de retención modifican la energía y la velocidad del flujo, reduciendo la amenaza. La simulación bidimensional no newtoniana permite analizar espacialmente variables que no pueden inferirse solo a partir del caudal pico o del volumen total. Además, generan evidencia técnica que permite valorar el objetivo de las obras, apoyar decisiones en el campo de la gestión del riesgo del desastre, orientar mejoras al diseño y establecer una base para futuros análisis de calibración y sensibilidad.

La justificación metodológica se apoya en tres criterios: la recurrencia histórica de procesos aluvionales en El Tejado (EPMAPS, 2024), la evidencia sedimentológica de transporte de agua, sedimentos, bloques, material orgánico y componentes antrópicos durante el evento de 2022 y 2024 (Rondal Viscaíno, 2022; Troncoso et al., 2024), y la aplicabilidad de la modelación no newtoniana en HEC-RAS para flujos con alta concentración sólida, (Gibson et al., 2022; USACE, 2023; Zegers et al., 2020).

## 1.5 Alcance

El alcance se ajusta a la modelación hidrodinámica bidimensional de un flujo de detritos. El dominio computacional comprende la zona alta de aportación de la quebrada El Tejado, el cauce principal, la zona de captación y el tramo inicial de conexión con la matriz urbana. El análisis compara calados, velocidades y tiempos de progresión en condiciones preobras y posobras.

La modelación se ejecuta con un escenario crítico plausible con supuestos conservadores sobre el funcionamiento hidráulico de las obras. Si bien el modelo no combina de manera simultánea todos los parámetros extremos posibles, sí incorpora condiciones desfavorables que permiten evaluar el comportamiento del flujo bajo una condición severa. En particular, de las obras de mitigación, las mallas de retención no se modelan considerando deformación, elasticidad, disipación dinámica ni interacción fluido-estructura. Se representaron como barreras rígidas bajo una condición colmatada, es decir, como si hubiesen retenido previamente el material grueso y funcionaran hidráulicamente como un muro. De forma equivalente, la torre o estructura de captación se consideró en condición de saturación operativa o colmatación, con capacidad funcional limitada dentro del modelo (similar a lo ocurrido en el evento del 2022).

La modelación numérica de flujos de detritos introdujo incertidumbres asociadas a la resolución del modelo digital de elevación, geometría del cauce, condiciones de frontera, concentración volumétrica de sólidos, selección del modelo reológico y rugosidad hidráulica. Zegers et al. (2020) señalan que las incertidumbres en topografía, parámetros físicos y forzantes hidrológicos pueden modificar variables relevantes como área de inundación, profundidad máxima, velocidad y volumen depositado; por ello, la interpretación de resultados debe alinearse a los supuestos de la simulación.

No se realizaron ensayos reológicos propios, muestreos adicionales ni calibración física de laboratorio. Por tanto, la concentración volumétrica, la rugosidad, el tamaño representativo de partícula y los criterios de retención se sustentan en estudios previos, documentación técnica de obras y literatura especializada. Esta condición definió el carácter comparativo y no predictivo absoluto de la simulación.

El estudio no evalúa la estabilidad estructural, diseño geotécnico detallado ni desempeño constructivo de las obras. Tampoco desarrolló una evaluación integral del riesgo, debido a que no incorpora de manera completa variables de exposición, vulnerabilidad, daño esperado o pérdidas. El análisis se limita a la amenaza física representada por las variables hidrodinámicas de la modelación.

# CAPÍTULO 2: Marco teórico y contextual

## 2.1 Caracterización del área de estudio

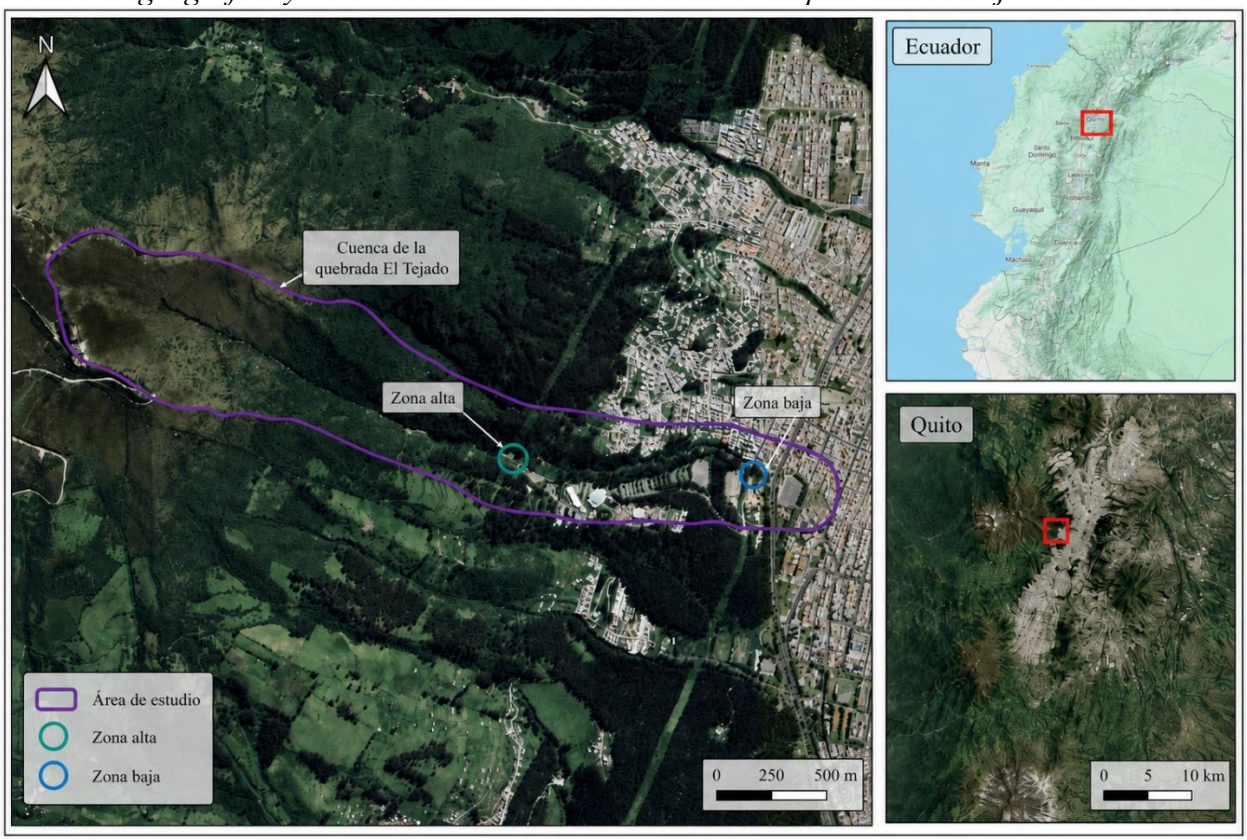
### *2.1.1 Ubicación geográfica y delimitación de la cuenca de la quebrada El Tejado*

La quebrada El Tejado forma parte del sistema de drenajes del flanco occidental del Distrito Metropolitano de Quito, asociado al Complejo Volcánico Pichincha. Este sistema de quebradas desciende desde zonas de alta pendiente hacia el borde urbano occidental de la ciudad, donde varios drenajes han sido históricamente intervenidos, canalizados o modificados por el crecimiento urbano. En este contexto, el dominio de análisis considerado en la presente investigación comprende la zona alta de aportación, el cauce principal, la zona de captación y el inicio del eje urbano, donde los aluviones del 2022 y 2024 generaron depósitos, desbordamientos y afectación a infraestructura urbana (Rondal Viscaíno, 2022; Troncoso et al., 2024).

La **Figura 2.1** presenta la delimitación espacial del área de estudio de la quebrada El Tejado, ubicada en el sector occidental de Quito y permite reconocer la zona alta de la microcuenca, la zona baja donde se encuentra la torre de captación y el borde urbano próximo al cauce.

**Figura 2.1**

*Ubicación geográfica y delimitación del área de estudio de la quebrada El Tejado*

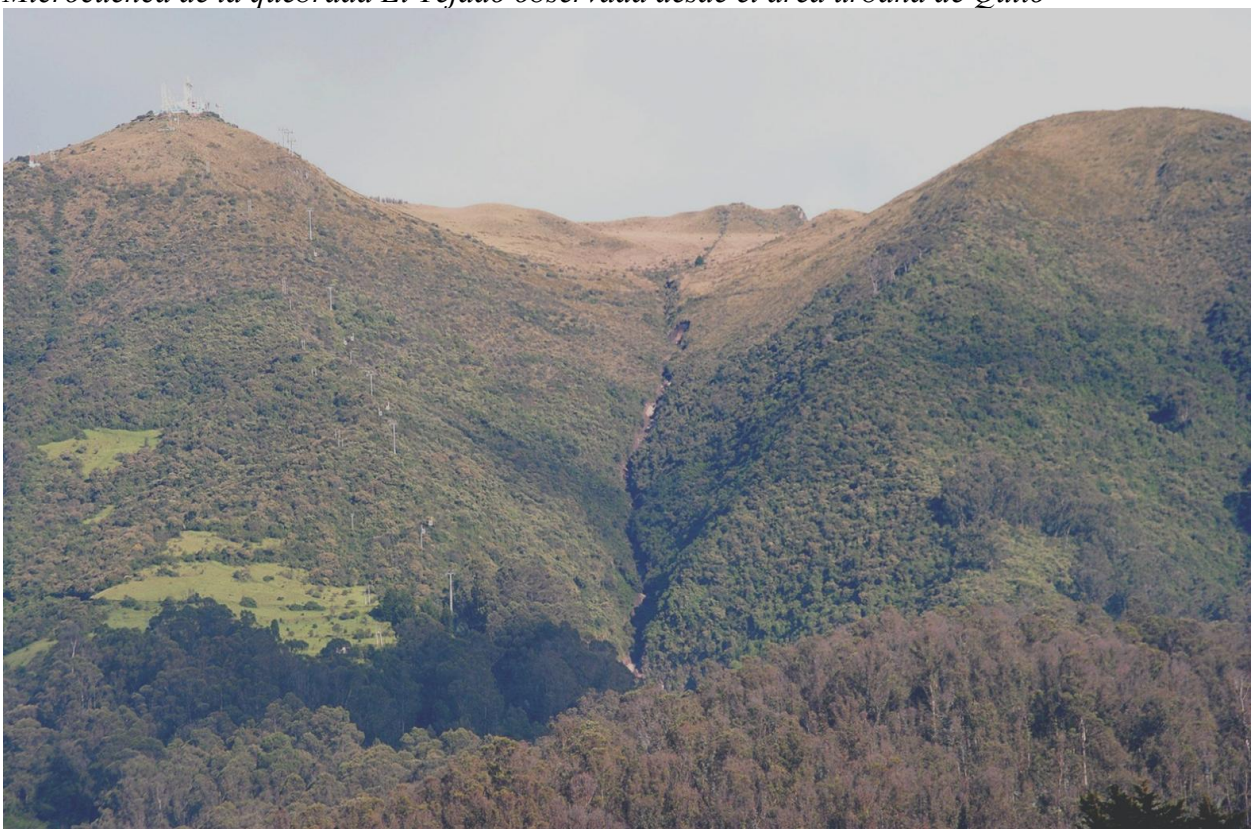



*Nota. Elaboración propia con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2026). La base visual corresponde a imágenes de Google Satellite, integradas con la información de ubicación presentada por Rondal Viscaíno (2022, p. 5) y la cartografía de referencia de Troncoso et al. (2024, Figuras 1 y 7).*

La quebrada presenta laderas de pendiente pronunciada, cobertura vegetal en los sectores alto y medio, y un cauce encajado que desciende hacia el borde urbano. Estas condiciones controlan la concentración del escurrimiento superficial, el encauzamiento del flujo y la conexión entre la zona de aporte y la zona de captación. La **Figura 2.2** complementa la lectura cartográfica mediante una vista panorámica de la microcuenca observada desde el área urbana de Quito.

**Figura 2.2**

*Microcuenca de la quebrada El Tejado observada desde el área urbana de Quito*



*Nota. Se observa la configuración morfológica de la microcuenca de la quebrada El Tejado, con énfasis en la cobertura vegetal de las zonas alta y media, el cauce encajado y la inclinación general de las laderas. Fotografía de J. Bustillos, FIGEMPA (2024).*

### *2.1.2 Características topográficas y geomorfológicas*

La **Tabla 2.1** presenta los principales parámetros morfométricos e hidrológicos de la quebrada El Tejado. El área de drenaje de 1.65 km², la longitud del cauce principal de 2.50 km y la diferencia altitudinal comprendida entre los 3800 y 2500 m s. n. m. caracterizan una microcuenca pequeña, de relieve pronunciado y con una elevada capacidad para transformar rápidamente la precipitación en escorrentía. Esta condición se ve reforzada por la pendiente media del cauce principal, de 0.33 m/m (Chow et al., 1988). Adicionalmente, la forma de la microcuenca se evaluó mediante el factor de forma de Horton, parámetro también descrito por Monsalve Sáenz (1999) y se obtuvo un valor de 0.264, consistente con una configuración alargada. De manera complementaria, el número de curva adoptado, igual a 84.17, refleja una

capacidad de infiltración relativamente limitada y una tendencia importante a la generación de escorrentía superficial durante eventos de precipitación intensa (Córdova et al., 2017).

**Tabla 2.1**

*Parámetros morfométricos e hidrológicos base de la quebrada El Tejado*

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---|---|---|
| **Área de drenaje (A)** | 1.65 | km² |
| **Longitud del cauce principal (L)** | 2.50 | km |
| **Pendiente media del cauce principal (J)** | 0.33 | m/m |
| **Factor de forma de Horton (Kf)** | 0.264 | - |
| **Configuración geométrica de la microcuenca** | Alargada Alargada | - |
| **Número de Curva adoptado (CN)** | 84.17 | - |
| **Cota máxima de cabecera** | 3800 | m s.n.m. |
| **Cota mínima en captación** | 2500 | m s.n.m. |

*Nota. El valor del número de curva CN fue adoptado a partir del estudio de Córdova et al. (2017). Los demás parámetros fueron determinados mediante herramientas SIG y topografía utilizada para la modelación.*

La configuración topográfica de El Tejado combina tramos confinados de quebrada, laderas con aporte sedimentario (cicatrices de movimientos en masa) y una zona de captación que controla la transición entre cauce natural e infraestructura urbana. Desde el punto de vista geomorfológico, la alta pendiente media y la existencia de material suelto en el lecho y laderas favorecen condiciones de transporte de sedimentos cuando la escorrentía supera la capacidad de retención local. La memoria técnica de EPMAPS (2024) señala que en la zona alta y media existen procesos erosivos y disponibilidad de material.

## 2.2 Antecedentes aluvionales y evento del 31 de enero de 2022

EPMAPS (2024) compila eventos desde 1917, incluyendo los nuevos aluviones en 2022 y 2024, lo que confirma que la amenaza no corresponde a un episodio aislado, sino a un proceso recurrente. El antecedente de 1975 es relevante por su volumen estimado superior a 50,000 m³, altura reportada de 7 m, caudal de 130 m³/s y su trayectoria sobre La Gasca según la síntesis de la memoria técnica.

El evento del 3 de abril de 2024 (el más reciente) evidencia la continuidad de las condiciones críticas en la quebrada. EPMAPS (2024) reporta que el evento de precipitación

asociado al aluvión de 2024 tuvo una duración de 15 h 15 min y una precipitación acumulada de 73.8 mm. Además, señala que los recorridos de campo permitieron observar material suelto en el lecho y en las laderas, por lo que la posibilidad de nuevos eventos aluvionales se consideró alta.

La **Tabla 2.2** sintetiza los tres eventos más relevantes y muestra que el evento de 2022 no fue el mayor en volumen histórico reportado, pero produjo la mayor afectación en la matriz urbana y en pérdidas humanas (28 fallecidos, 52 heridos y 1 desaparecido). Rondal Viscaíno (2022) calculó 46,219 m³ para el flujo de lodo, con un área de 122,791 m²; además, reportó 7,163 m³ de depósito sólido, contenido de agua de 45.67% y densidad húmeda de 1.547 g/cm³. Estos datos justifican un flujo con criterios reológicos y no solo como escorrentía líquida.

**Tabla 2.2**

*Síntesis de antecedentes y magnitudes reportadas para eventos en El Tejado-La Gasca*

| Año/periodo | Evento | Magnitud reportada | Afectación humana | Fuente y ubicación |
|---|---|---|---|---|
| **25 de febrero de 1975** | Aluvión La Gasca-Pambachupa | Volumen estimado > 50,000 m³; altura 7 m; caudal 130 m³/s | 2 fallecidos reportados en síntesis de estudios previos | EPMAPS (2024), p. 2; Rondal Viscaíno (2022) |
| **31 de enero de 2022** | Flujo de lodo/detritos originados en El Tejado | Volumen de flujo 46,219 m³; depósito sólido 7,163 m³; área 122,791 m² | 28 fallecidos, 52 heridos y 1 desaparecido | Rondal Viscaíno (2022), pp. 57-59, 72; Troncoso et al. (2024) |
| **03 de abril de 2024** | Nuevo evento La Gasca-La Comuna | Aproximadamente 15,000 m³ transitados por calles; lluvia acumulada 73.8 mm en 15 h 15 min | 2 fallecidos | EPMAPS (2024), pp. 5-6 |

*Nota. Las magnitudes corresponden a variables distintas según cada fuente; por tanto, se utilizan como antecedentes de escala y no como series homogéneas de calibración.*

## 2.3 Obras de mitigación implementadas (plan 2024-2027)

EPMAPS (2024) plantea un esquema de mitigación con intervenciones de corto, mediano y largo plazo. El plan combina ampliación del reservorio en la zona de captación, instalación de dos mallas flexibles aguas arriba y aumento de la capacidad de retención en la zona alta de la quebrada. La **Tabla 2.3** permite interpretar la función hidráulica esperada.

**Tabla 2.3**

*Obras de mitigación consideradas para la comparación pre y post implementación*

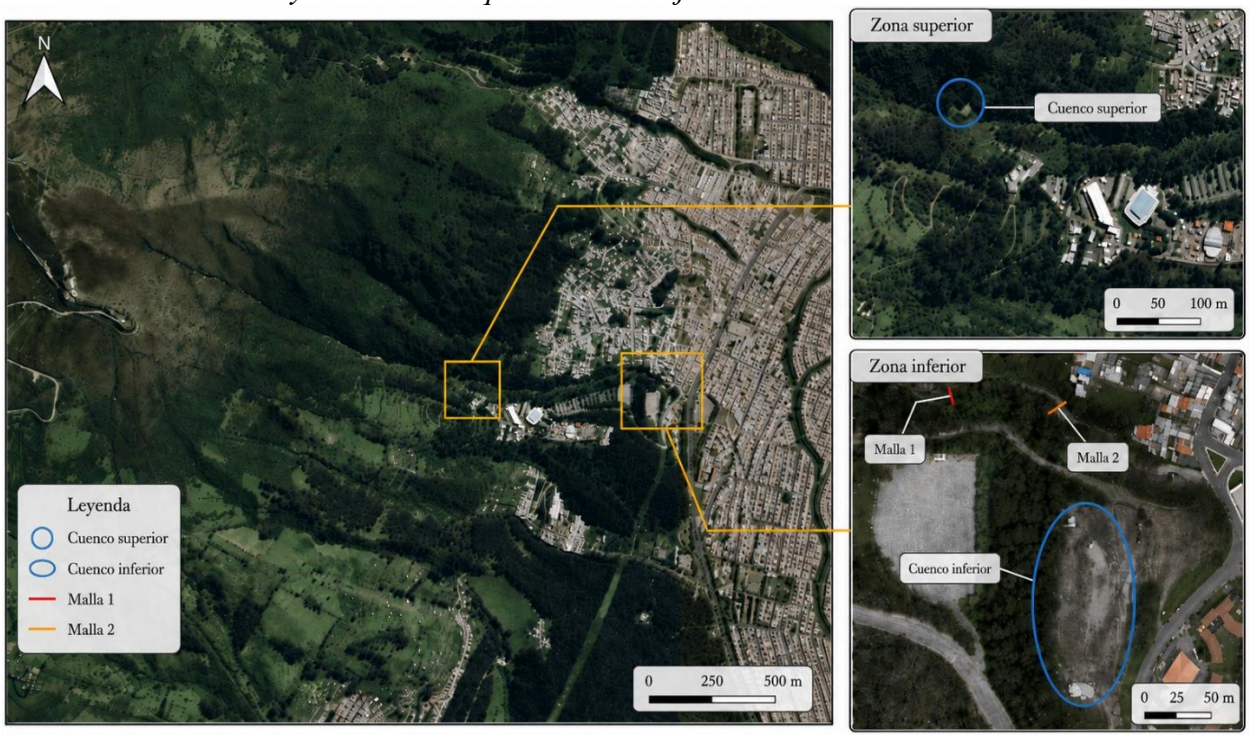
| Componente | Magnitud reportada | Función hidráulica esperada | Fuente |
|---|---|---|---|
| **Reservorio o presa de retención en captación** | Ampliación de 4,000 m³ a 20,000 m³ | Aumentar almacenamiento temporal y retención del flujo en captación | EPMAPS (2024), p. 8 |
| **Dos mallas flexibles aguas arriba** | Retención conjunta estimada de 2,756 m³ | Retener material grueso (bloques de roca), madera y ramas que pueden taponar la captación y dar seguridad durante la construcción del reservorio. | EPMAPS (2024), p. 8 |
| **Retención alta sector Vulqano Park** | Capacidad adicional hasta 8,000 m³ | Disminuir carga sólida y energía antes de la captación | EPMAPS (2024), p. 8 |

*Nota. Las capacidades reportadas corresponden a valores de diseño o planificación contenidos en la documentación técnica.*

La **Figura 2.3** presenta la localización general de las obras de control en la quebrada El Tejado. En la vista general, se identifica la ubicación de los elementos de intervención a lo largo del cauce. El detalle superior muestra el cuenco localizado en la parte alta, en el sector de Vulqano Park. El detalle inferior corresponde a la ortofoto provista por EPMAPS, en la que se observan las dos mallas de retención y el cuenco en construcción en la zona de captación.

**Figura 2.3**

*Ubicación de cuencos y mallas en la quebrada El Tejado*




*Nota. Elaboración propia con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2026). Basada en fotografía de Google Satellite y ortofoto provista por EPMAPS.*

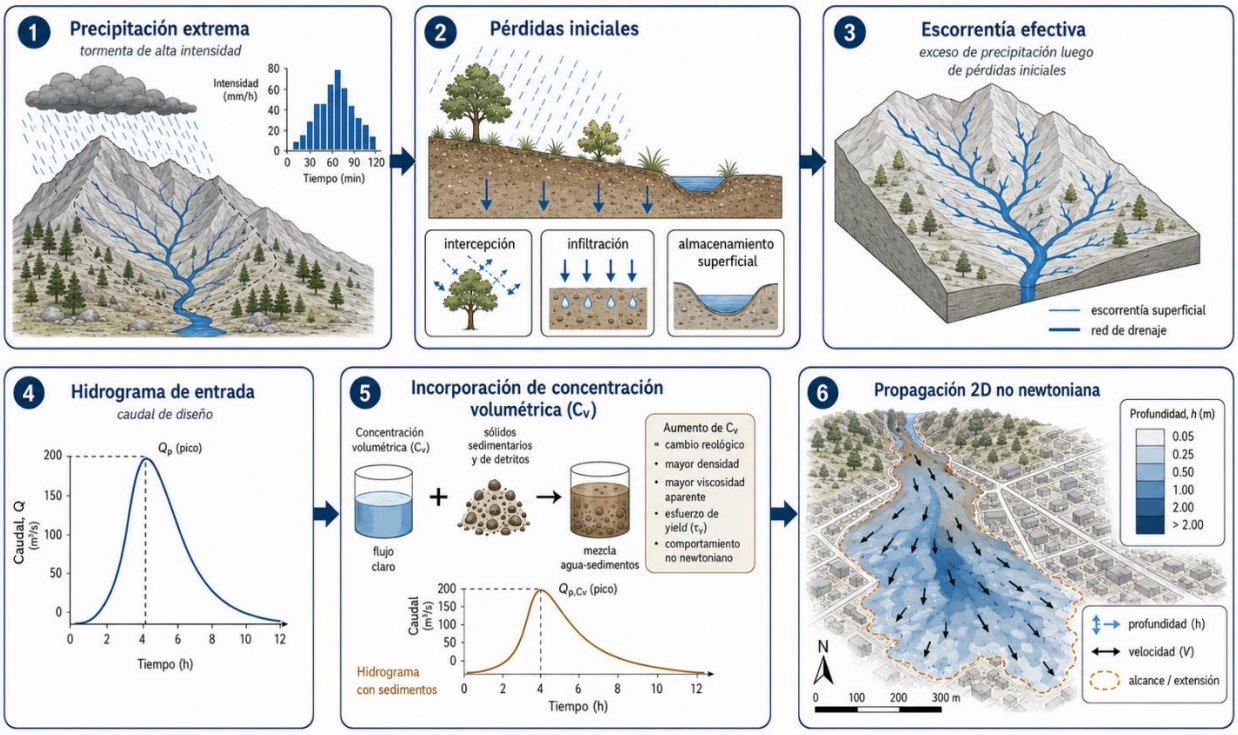
## 2.4 Modelo teórico de flujo de detritos en microcuencas de montaña andinas

Las microcuencas de montaña andinas presentan respuestas hidrológicas rápidas por la combinación de pendientes del cauce elevadas, longitudes de escurrimiento reducidas, cauces encajonados, variabilidad de cobertura vegetal y sensibilidad a la humedad antecedente. En este tipo de sistema, una lluvia intensa se transforma en escorrentía superficial y si se desprende material de las laderas, puede convertirse en flujo de detritos. En ciudades andinas de alta montaña, la caracterización de eventos extremos exige considerar un régimen hidrometeorológico condicionado por la elevación y la complejidad topográfica (Escobar-González et al., 2022).

La **Figura 2.4** sintetiza este tipo de eventos y lo vincula con su modelación, en donde la precipitación extrema no ingresa directamente al modelo como flujo no newtoniano: primero se convierte en precipitación efectiva (escorrentía), que en conjunto con la topografía entrega un hidrograma y finalmente se incorpora la parte sólida, por medio de la concentración volumétrica.

**Figura 2.4**

*Relación conceptual entre precipitación extrema, escorrentía efectiva y flujo no newtoniano en microcuencas de montaña*




*Nota. Elaboración propia con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2026). Basada en Escobar-González et al. (2022), NRCS (2019) y USACE (2023). La figura sintetiza el encadenamiento metodológico usado en la tesis: precipitación extrema, pérdidas iniciales, escorrentía efectiva, hidrograma de entrada, incorporación de concentración volumétrica y propagación bidimensional no newtoniana.*

La **Tabla 2.4** organiza la secuencia conceptual. Las primeras tres etapas corresponden al dominio lluvia-escorrentía; la cuarta produce el hidrograma de entrada; y las dos últimas incorporan la concentración volumétrica y la propagación bidimensional del flujo.

**Tabla 2.4**

*Secuencia conceptual del proceso lluvia-escorrentía-propagación no newtoniana.*

| Etapa | Proceso dominante | Variable resultante | Función dentro de la tesis | Fuentes base |
|---|---|---|---|---|
| **1. Precipitación extrema** | Estimación probabilística de un evento extremo | Precipitación de diseño | Define la magnitud de entrada del análisis hidrológico | Escobar-González et al. (2022); Orosco-Tacuri et al. (2024) |
| **2. Pérdidas iniciales** | Intercepción, infiltración y almacenamiento superficial | Abstracción inicial | Separa precipitación total de exceso de lluvia | Córdova et al. (2017); NRCS (2019) |
| **3. Escorrentía efectiva** | Transformación lluvia-escorrentía | Precipitación efectiva o neta | Cuantifica la lámina disponible para escurrimiento directo | Córdova et al. (2017); NRCS (2019) |
| **4. Hidrograma de entrada** | Distribución temporal del volumen de escorrentía | Caudal en función del tiempo | Establece la condición de borde aguas arriba | NRCS (2019) |
| **5. Incorporación de Cv** | Definición de propiedades efectivas del flujo | Condición reológica no newtoniana | Permite transformar el flujo de entrada en una mezcla agua-sedimento | USACE (2023) |
| **6. Propagación 2D no newtoniana** | Solución hidrodinámica bidimensional | Calado, velocidad, alcance y tiempo de avance | Permite comparar escenarios pre y postobras | Gibson et al. (2022); USACE (2023) |

*Nota. Elaboración propia con base en Escobar-González et al. (2022), Córdova et al. (2017), NRCS (2019), Orosco-Tacuri et al. (2024), Gibson et al. (2022) y USACE (2023).*

### *2.4.1 Precipitación extrema y distribución de Gumbel*

La estimación de la lluvia de diseño requiere analizar estadísticamente los valores extremos de precipitación. En este estudio se emplearon series de máximos diarios anuales, construidas mediante la selección del mayor valor registrado en cada año. Estos datos constituyeron la base del análisis de frecuencia hidrológica.

La metodología aplicada corresponde al procedimiento descrito por Chow et al. (1994) para la distribución de valores extremos Tipo I, también denominada distribución de Gumbel. A partir de los registros hidrometeorológicos disponibles, esta distribución permite estimar precipitaciones asociadas con periodos de retorno definidos.

Con este propósito se utiliza la distribución de Gumbel tipo I. Su función de distribución acumulada se presenta en la **Ecuación 2.1**.

$$F(x) = e^{-e^{\left(\frac{-(x-u)}{\alpha}\right)}}$$

**Ecuación 2.1**

*Función de distribución acumulada de Gumbel*

En la Ecuación 2.1, F(x) es la probabilidad acumulada de no excedencia, x es la precipitación máxima diaria anual, u es el parámetro de posición y α es el parámetro de escala. Los estimadores empleados a partir de la media aritmética y la desviación estándar se presentan en la **Ecuación 2.2** y la **Ecuación 2.3**.

$$\alpha = \frac{S_x \cdot \sqrt{6}}{\pi}$$

**Ecuación 2.2**
*Parámetro de escala*

$$u = X_{med} - 0.577216 \cdot \alpha$$

**Ecuación 2.3**
*Parámetro de posición*

Estos parámetros permiten extrapolar la precipitación hacia un periodo de retorno específico mediante la variable reducida de Gumbel. La variable reducida se define en la **Ecuación 2.4.**

$$Y_t = -ln\left(ln\left(\frac{Tr}{Tr-1}\right)\right)$$

**Ecuación 2.4**
*Variable reducida para periodo de retorno*

Finalmente, la precipitación de diseño asociada al periodo de retorno se obtiene mediante la relación entre la variable reducida, el parámetro de posición y el parámetro de escala, como se muestra en la **Ecuación 2.5**.

$$P_{Tr} = u + \alpha \cdot Y_t$$

**Ecuación 2.5**
*Precipitación de diseño*

Las ecuaciones anteriores se derivan de la formulación de Gumbel aplicada en hidrología de frecuencia conforme al desarrollo presentado por Chow et al. (1994).

### *2.4.2 Método SCS-CN y precipitación efectiva*

El método SCS-CN relaciona la precipitación de diseño con la escorrentía directa mediante un parámetro adimensional, el número de curva CN. Este parámetro integra condiciones de cobertura, uso de suelo, grupo hidrológico y humedad antecedente. Córdova et al. (2017) aplicaron el enfoque de número de curva en la quebrada El Batán, en Quito, combinando uso de suelo, cobertura vegetal, grupos hidrológicos del suelo y pendiente; ese antecedente local respalda el uso del método en drenajes urbanos andinos. La relación empleada para la abstracción inicial se presenta en la **Ecuación 2.6**.

$$I_a = \left(\frac{5080}{CN}\right) - 50.8$$

**Ecuación 2.6**
*Abstracción inicial SCS-CN*

La **Ecuación 2.6** define la abstracción inicial Ia en milímetros, en función del CN. La **Ecuación 2.7** transforma la precipitación de diseño PTr en precipitación efectiva Pe. Si PTr ≤ Ia, la precipitación efectiva se considera nula.

$$P_e = \frac{(P_{Tr} - I_a)^2}{P_{Tr} + 4 \cdot I_a}; \quad para\ P > I_a$$

**Ecuación 2.7**
*Precipitación efectiva*

### *2.4.3 Tiempo de concentración*

El tiempo de concentración representa el intervalo requerido para que la escorrentía generada en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca alcance la sección de salida. Este parámetro es fundamental en la transformación lluvia-escorrentía, porque condiciona la rapidez de respuesta de la cuenca y la estimación del caudal máximo.

En esta investigación se emplean las formulaciones empíricas de Kirpich y Témez. La ecuación de Kirpich fue desarrollada para cuencas pequeñas con cauces definidos y alta pendiente; su forma en unidades del Sistema Internacional considera L en metros, J como pendiente adimensional y Tc en minutos (Kirpich, 1940; Chow et al., 1994). La formulación de Témez se emplea como método complementario, con L expresada en kilómetros, J como pendiente media adimensional y Tc en horas (Témez, 1978; Orosco-Tacuri et al., 2024). La formulación empleada se presenta en la **Ecuación 2.8** y la **Ecuación 2.9**.

$$T_{c_{Kir}} = 0.0195 \cdot \frac{L^{0.77}}{J^{0.385}}$$

**Ecuación 2.8**
*Tiempo de concentración de Kirpich*

$$T_{c_{Tem}} = 0.3 \cdot \left(\frac{\mathrm{L}}{J^{0.25}}\right)^{0.76}$$

**Ecuación 2.9**
*Tiempo de concentración de Témez*

El tiempo de concentración adoptado para la modelación hidrológica se calculó como el promedio operativo de ambos métodos, como se presenta en la **Ecuación 2.10**. Esta decisión reduce la dependencia de una sola formulación empírica y permite incorporar dos

aproximaciones con distinta sensibilidad frente a la longitud y pendiente del cauce (Orosco-Tacuri et al., 2024).

$$Tc = \frac{Tc_{Kir} + Tc_{Tem}}{2}$$

**Ecuación 2.10**
*Tiempo de concentración adoptado*

### *2.4.4 Hidrograma unitario triangular SCS/NRCS*

El hidrograma unitario triangular simplifica la respuesta temporal de la cuenca mediante tres puntos: inicio, pico y final. El tiempo pico se define en la Ecuación 2.11, con base en su relación con el Tc (Córdova et al., 2017).

$$T_p = \sqrt{Tc} + \frac{2}{3} \cdot T_c$$

**Ecuación 2.11**
*Tiempo pico*

NRCS (2019) indica que el hidrograma triangular conserva el criterio de que 37.5% del volumen de escorrentía ocurre antes del pico, lo que permite estimar el tiempo base como 2.67 veces el tiempo pico. La relación de tiempo base se presenta en la **Ecuación 2.12**.

$$T_b = \frac{8}{3} \cdot T_p$$

**Ecuación 2.12**
*Tiempo base*

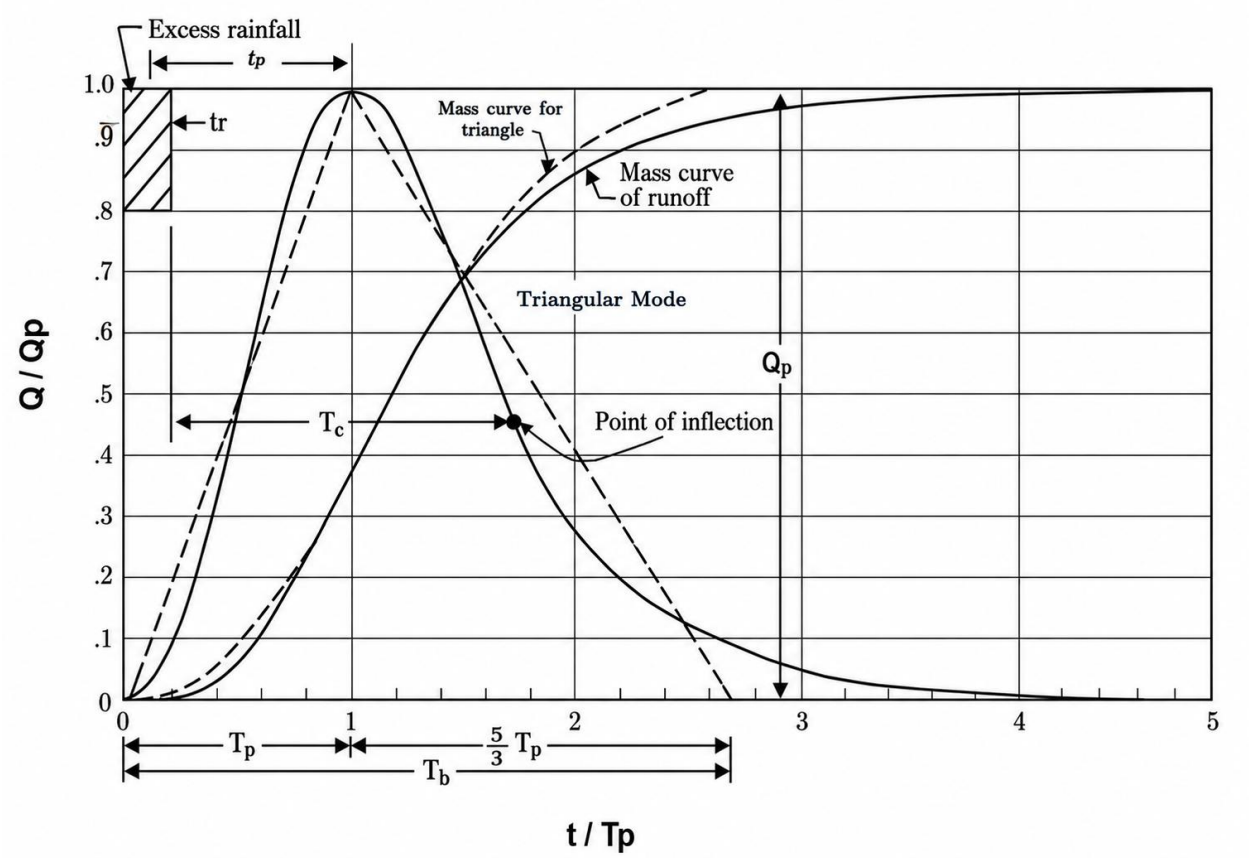
La **Ecuación 2.13** estima el caudal pico Qp en $m^3/s$, con A en $km^2$, Pe en mm y Tp en horas. El factor 0.208 corresponde a la forma simplificada del hidrograma triangular SCS (Córdova et al., 2017).

$$Q_p = \frac{0.208 \cdot P_e \cdot A}{T_p}$$

**Ecuación 2.13**
*Caudal pico*

La **Figura 2.5** permite interpretar la forma triangular del hidrograma de agua clara, especialmente la relación entre tiempo al pico, tiempo base, caudal pico y la distribución temporal de la escorrentía.

**Figura 2.5**
*Hidrograma unitario sintético de diseño.*




*Nota. Adaptada de NRCS (2019), sección SCS Dimensionless Unit Hydrograph y SCS Triangular Unit Hydrograph*.

### *2.4.5 Rugosidad hidráulica y método de Cowan*

La rugosidad de Manning representa la resistencia al flujo debida a material del lecho, irregularidad, variaciones de sección, obstrucciones, vegetación y sinuosidad (Chow, 1994). En

cauces naturales con heterogeneidad morfológica, el método de Cowan permite descomponer el coeficiente n en contribuciones físicas. Chow (1994) sistematiza esta aproximación para canales naturales, por lo que se usa como referencia para estimar la rugosidad del cauce de El Tejado. La formulación de Cowan usada en la investigación se presenta en la **Ecuación 2.14**.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$

**Ecuación 2.14**
*Coeficiente de Manning por Cowan*

En la Ecuación 2.14, n0 representa el material del lecho, n1 la irregularidad, n2 la variación de sección, n3 las obstrucciones, n4 la vegetación y m5 el factor por meandros. La **Tabla 2.5** presenta los valores base sistematizados por Chow (1994).

**Tabla 2.5**
*Valores base para la determinación de n mediante el método de Cowan.*

| Condición morfológica | Descripción del parámetro | Valor teórico |
|---|---|---|
| **Material del lecho (n0)** | Tierra | 0.020 |
| | Roca cortada | 0.025 |
| | Grava fina | 0.024 |
| | Grava gruesa | 0.028 |
| **Grado de irregularidad (n1)** | Suave | 0.000 |
| | Menor | 0.005 |
| | Moderado | 0.010 |
| | Severo | 0.020 |
| **Variaciones en la sección (n2)** | Gradual | 0.000 |
| | Ocasionalmente alternante | 0.005 |
| | Frecuentemente alternante | 0.010-0.015 |
| **Efecto relativo de obstrucciones (n3)** | Insignificante | 0.000 |
| | Menor | 0.010-0.015 |
| | Apreciable | 0.020-0.030 |
| | Severo | 0.040-0.060 |
| **Vegetación (n4)** | Baja | 0.005-0.010 |
| | Media | 0.010-0.025 |
| | Alta | 0.025-0.050 |
| | Muy alta | 0.050-0.100 |
| **Grado de los efectos por meandros (m5)** | Menor | 1.000 |
| | Apreciable | 1.150 |
| | Severo | 1.300 |

*Nota. Valores transcritos desde Chow (1994, Tabla 5-5, p. 105)*

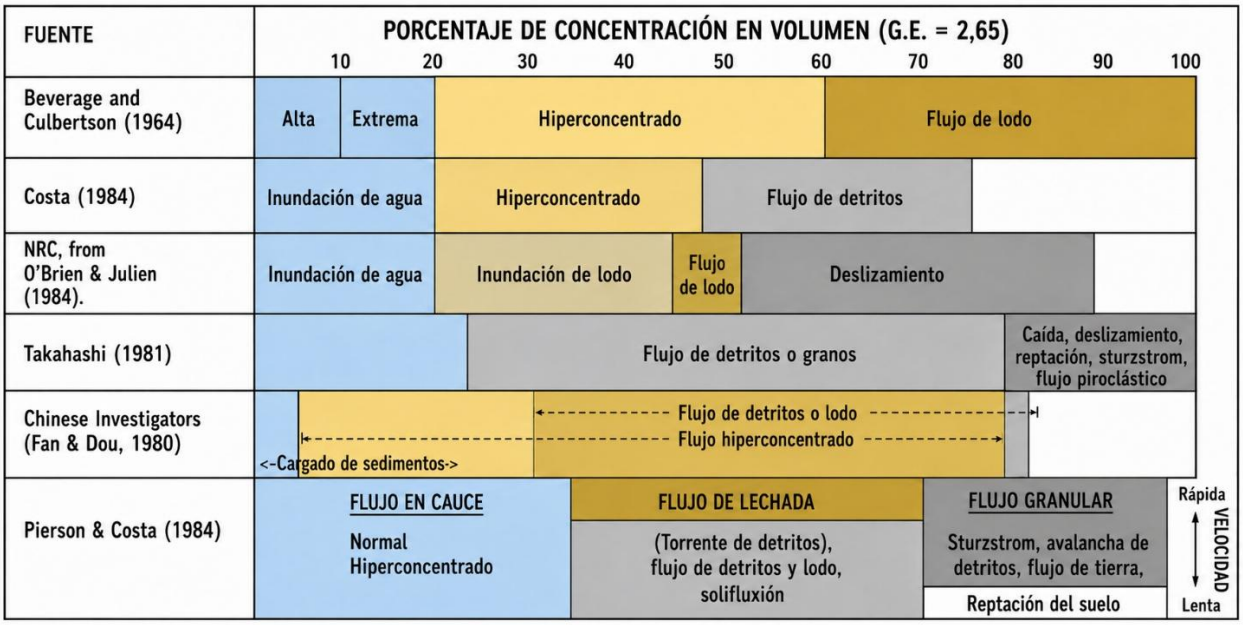
### *2.4.6 Fenomenología de flujos: agua clara y flujos no newtonianos*

USACE (2023) indica que, a altas concentraciones sólidas, las hipótesis newtonianas utilizadas en HEC-RAS para flujo claro dejan de ser apropiadas. Un flujo de agua clara puede representarse mediante las ecuaciones hidráulicas convencionales con una viscosidad equivalente a la del agua y sin esfuerzo de cedencia. En cambio, los flujos con alta concentración de **sólidos** desarrollan resistencia interna adicional por viscosidad aparente, cohesión, interacción entre partículas y, en algunos casos, fricción interparticular.

La **Figura 2.6** sintetiza distintas clasificaciones taxonómicas de flujos geofísicos no newtonianos en función de la concentración volumétrica de sólidos (Cv). Muestra que no existe un umbral único para diferenciar flujo hiperconcentrado, flujo de lodo, flujo de detritos, flujo granular o deslizamiento, ya que cada autor establece rangos distintos según el comportamiento dominante del material. En general, al aumentar Cv, el flujo deja de comportarse como agua con sedimentos en suspensión y pasa progresivamente a presentar mayor viscosidad aparente, esfuerzo de cedencia, interacción entre partículas y resistencia interna. Por ello, estas categorías deben entenderse como un continuo reológico y no como límites rígidos.

**Figura 2.6**

*Clasificaciones taxonómicas de flujos geofísicos no newtonianos según Cv*




*Nota. Adoptada de USACE (2023).*

### *2.4.7 Modelos reológicos en flujos no newtonianos*

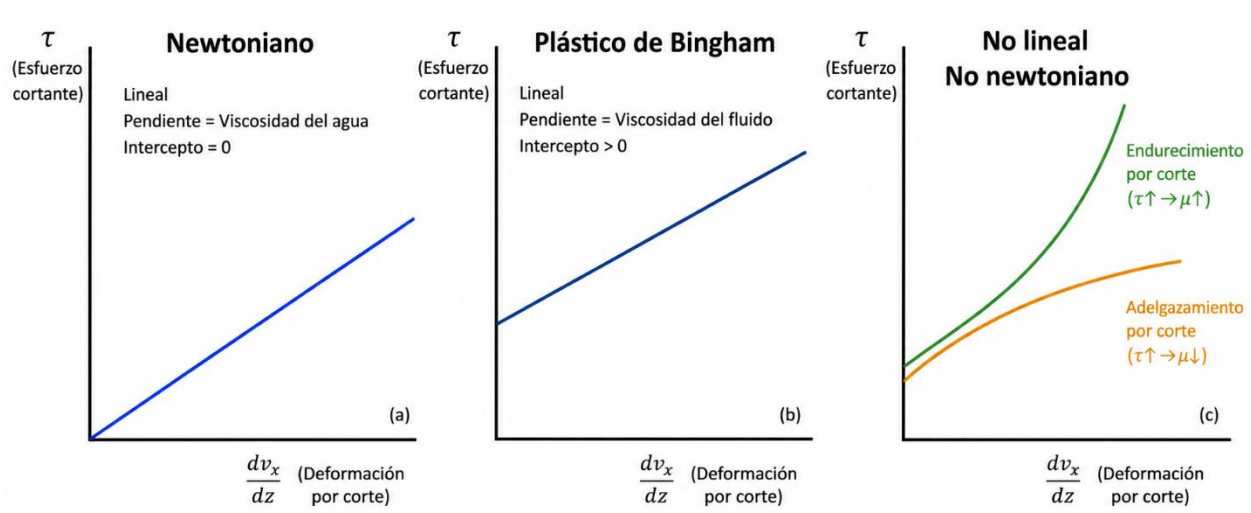
La modelación no newtoniana en HEC-RAS se fundamenta en un enfoque monofásico, en el cual la mezcla agua-sedimento se representa como un fluido equivalente mediante relaciones reológicas esfuerzo-deformación. La concentración sólida modifica la física del flujo y las hipótesis newtonianas de agua clara dejan de ser representativas. En HEC-RAS, las pérdidas internas del flujo denso se incorporan como una pendiente adicional de resistencia dentro de la ecuación de momento, sin resolver de forma separada la fase líquida y la fase sólida (USACE, 2023).

La **Figura 2.7** presenta la base conceptual de los modelos reológicos utilizados para diferenciar el comportamiento newtoniano y no newtoniano. En el flujo newtoniano, la relación entre esfuerzo cortante y tasa de deformación es lineal y pasa por el origen, por lo que cualquier esfuerzo produce deformación. En el modelo plástico de Bingham, la mezcla requiere superar un esfuerzo de cedencia antes de fluir, y luego mantiene una relación lineal entre esfuerzo y

deformación. En los modelos no lineales, la resistencia interna varía con la tasa de deformación, lo que permite representar procesos como adelgazamiento o espesamiento por corte, colisión interparticular y turbulencia interna (USACE, 2023; Kostynick et al., 2022; Lima et al., 2025).

**Figura 2.7**

*Relaciones esfuerzo cortante-tasa de deformación para agua clara, Bingham y modelos no lineales*




*Nota. Adaptada de USACE (2023).*

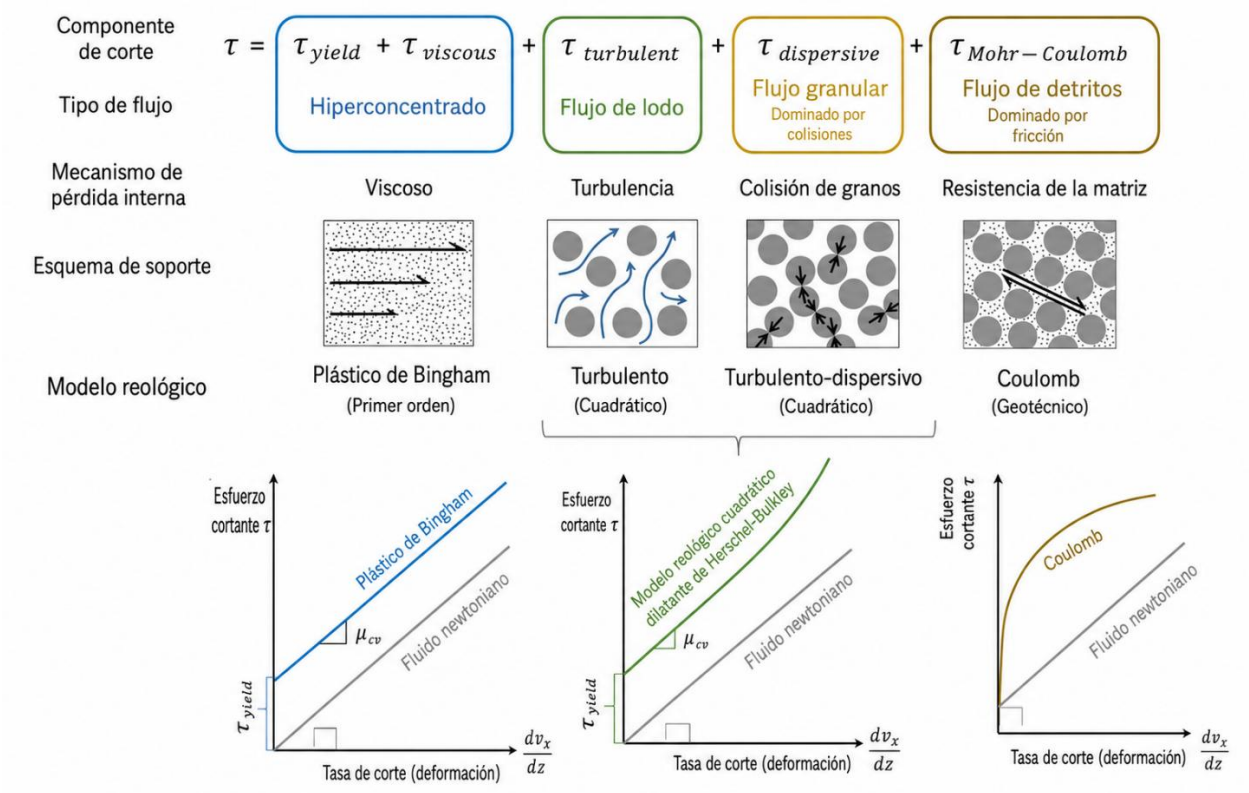
La relación entre los componentes del esfuerzo cortante total, los mecanismos de disipación interna y los modelos reológicos asociados se presenta en la **Figura 2.8**. Cuando aumenta la concentración de sólidos, la resistencia del flujo deja de depender únicamente de la componente viscosa y comienza a incorporar efectos de turbulencia, colisión entre granos y fricción interna de la matriz.

Bajo esta interpretación, los flujos hiperconcentrados pueden aproximarse mediante un comportamiento tipo Bingham, en el que predominan el esfuerzo de cedencia y la viscosidad. Los flujos de lodo y detritos incorporan además componentes turbulentas, mientras que los flujos granulares incluyen efectos dispersivos y de colisión, por lo que pueden representarse mediante modelos reológicos cuadráticos. En los flujos de detritos con un comportamiento fuertemente

friccional pueden emplearse formulaciones tipo Mohr-Coulomb (USACE, 2023; Kostynick et al., 2022). La selección del modelo, por tanto, no depende únicamente de la denominación del fenómeno, sino del mecanismo físico que controla la resistencia interna de la mezcla.

**Figura 2.8**

*Componentes del esfuerzo cortante, mecanismos de pérdida interna y modelos reológicos asociados a distintos tipos de flujo denso*




*Nota. Adaptada de USACE (2023).*

En este contexto, HEC-RAS organiza de manera operativa los regímenes no newtonianos según la concentración volumétrica de sólidos y el proceso dominante. Los flujos hiperconcentrados suelen asociarse a formulaciones tipo Bingham, mientras que los flujos de lodo y detritos admiten formulaciones turbulentas, cuadráticas (O'Brien) o Herschel-Bulkley. Adicionalmente, el sistema contempla modelos como Voellmy para avalanchas y Mohr-Coulomb para flujos clásticos o friccionales. Estos umbrales deben entenderse como guías operativas y no como fronteras físicas rígidas, ya que la transición entre regímenes es continua y

depende de la concentración, la granulometría, la cohesión y el grado de interacción entre partículas (USACE, 2023; Kostynick et al., 2022; Lima et al., 2025). Esta clasificación se resume en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6**

*Taxonomía de flujos no newtonianos en HEC-RAS.*

| Clasificación | Modelo | Condición |
|---|---|---|
| **Hiperconcentrado** | Bingham | Cv>30% |
| **Flujo de lodo y detritos** | Turbulento, cuadrático y Herschel-Bulkley | Cv>60% |
| **Avalancha de nieve** | Voellmy | |
| **Clástico** | Mohr-Coulomb | Ns>0.1 |

*Nota. Fuente: USACE (2023), Non-Newtonian Technical Reference Manual, sección 2.4, tabla de clasificaciones, umbrales y modelos de flujo no newtoniano. Los umbrales son operativos y no fronteras físicas absolutas.*

Las diferencias entre los modelos se relacionan con los mecanismos que representan y con la cantidad de parámetros necesarios para su aplicación. El modelo de Bingham constituye una aproximación conveniente cuando se requiere una formulación sencilla y el comportamiento del flujo está dominado por una mezcla viscosa con esfuerzo de cedencia. Herschel-Bulkley ofrece mayor flexibilidad porque permite representar relaciones no lineales y comportamientos de shear thinning o shear thickening. Sin embargo, sus parámetros son difíciles de estimar sin ensayos reométricos, lo que puede aumentar la incertidumbre y la equifinalidad del modelo (Zegers et al., 2020).

El modelo de Mohr-Coulomb resulta conceptualmente más adecuado cuando el material se comporta como un medio granular o friccional, aunque no representa de forma directa una mezcla hidráulica homogénea durante su propagación. Frente a estas alternativas, la formulación cuadrática de O'Brien ocupa una posición intermedia, ya que incorpora componentes de cohesión, viscosidad, turbulencia y colisión granular mediante variables que pueden parametrizarse de forma operativa en HEC-RAS (USACE, 2023; Gibson et al., 2022). La **Tabla 2.7** presenta la comparación técnica entre estos modelos.

**Tabla 2.7**

*Comparación técnica de modelos reológicos aplicables a flujos densos en HEC-RAS*

| Modelo | Relación esfuerzo-deformación | Parámetros principales | Ventaja metodológica | Limitación principal |
|---|---|---|---|---|
| **Newtoniano** | Lineal, con intercepto igual a cero | Viscosidad del agua y rugosidad hidráulica | Adecuado para flujo claro y baja concentración de sedimentos | No representa esfuerzo de cedencia ni pérdidas internas por matriz sedimentaria densa. |
| **Bingham** | Lineal, con intercepto $\tau_\gamma$ | $\tau_\gamma$ y $\mu_m$ | Requiere pocos parámetros y reduce problemas de equifinalidad | Agrupa en términos lineales procesos que pueden ser no lineales en flujos con colisión granular. |
| **O'Brien cuadrático** | Lineal + términos cuadráticos | $\tau_\gamma$, $\mu_m$, Cv, $d_s$, Cv,max | Incorpora efectos de turbulencia y colisión interparticular mediante variables físicas interpretables | Los resultados pueden ser sensibles a Cv y $d_s$; la formulación introduce error si los procesos dominantes del flujo no corresponden al supuesto cuadrático. |
| **Herschel-Bulkley** | No lineal con exponente n | $\tau_\gamma$, K y n | Permite representar shear thinning o shear thickening | K y n son difíciles de estimar sin ensayos reométricos; mayor riesgo de sobreparametrización. |
| **Mohr-Coulomb** | Modelo geotécnico de resistencia | Cohesión, esfuerzo normal y ángulo de fricción | Representa procesos con dominio de fricción interparticular | No corresponde a una mezcla hidráulica homogénea cuando el proceso se aproxima a falla o deslizamiento. |

*Nota. Elaboración propia con base en USACE (2023), Gibson et al. (2022), Zegers et al. (2020) y Lima et al. (2025).*

La clasificación basada en la concentración volumétrica presenta traslapes entre autores y mecanismos de flujo, como se observa en la **Figura 2.6**. Por esta razón, los rangos de Cv deben utilizarse como una guía conceptual para seleccionar el régimen de modelación y no como límites absolutos. En concentraciones bajas, el comportamiento se aproxima al de un flujo newtoniano; en intervalos intermedios ocurre una transición hacia flujos hiperconcentrados; y en concentraciones altas predominan los comportamientos no newtonianos asociados con flujos de lodo y detritos. La **Tabla 2.8** resume esta interpretación.

**Tabla 2.8**

Clasificación reológica en función de la concentración volumétrica.

| Rango de Cv | Fuente/síntesis | Clasificación | Régimen en modelo |
|---|---|---|---|
| **Cv < 20%** | Costa (1984) y NRC/O'Brien y Julien ubican este rango como Water Flood. | Flujo de agua / avenida con baja carga sólida | Newtoniano Clásico (Saint-Venant) |
| **20% ≤ Cv ≤ 50%** | Beverage y Culbertson, Costa, NRC y Fan y Dou reconocen aquí condiciones hiperconcentradas, mud flood o transición. | Flujo hiperconcentrado o avenida lodosa | Transicional (Bingham Simplificado) |
| **50% ≤ Cv ≤ 60%** | Costa ubica el inicio de debris flow cerca de 50%; Beverage y Culbertson mantienen hyperconcentrated hasta 60%; existe traslape. | Zona de transición entre flujo hiperconcentrado y flujo de detritos | No Newtoniano (Bingham / O'Brien) |
| **Cv > 60%** | Beverage y Culbertson ubican Mud Flow desde 60%; HEC-RAS señala que al aumentar la concentración y el tamaño de sólidos se transita hacia flujos de lodo, detritos y clásticos. | Flujo de lodo/detritos de alta concentración | No Newtoniano Cuadrático (O'Brien) |

*Nota. Elaboración propia. Los límites son operativos y no fronteras físicas absolutas.*

### *2.4.8 Formulación cuadrática de O'Brien*

El modelo cuadrático de O'Brien incorpora la resistencia interna como suma de componentes asociados a esfuerzo de cedencia, viscosidad, turbulencia e interacción de partículas. A diferencia de Bingham, no limita la resistencia a una relación lineal; añade términos proporcionales al cuadrado de la tasa de deformación. Esta estructura es útil para representar flujos en los que la colisión de partículas y los efectos turbulentos son relevantes, como puede ocurrir en cauces de alta pendiente con mezcla granular heterogénea (USACE, 2023; Lima et al., 2025).

$$\tau = \tau_\gamma + \mu_\mathrm{m}\left(\frac{3\bar{\mathrm{u}}}{h}\right) + \rho_\mathrm{m} {l_\mathrm{m}}^2 \left(\frac{3\bar{\mathrm{u}}}{h}\right)^2 + 0.01\rho_\mathrm{s}\left[\left(\left(\frac{Cv,max}{Cv}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right)^{-2}\right] {d_\mathrm{s}}^2 \left(\frac{3\bar{\mathrm{u}}}{h}\right)^2$$

**Ecuación 2.15**

*Modelo O'Brien cuadrático*

En la **Ecuación 2.15**, τ es el esfuerzo cortante total; τy es el esfuerzo de cedencia; μm es la viscosidad dinámica de la mezcla; ū es la velocidad media; h es el calado; ρm es la densidad de la mezcla; lm es la longitud de mezcla asociada al término turbulento; ρs es la densidad de las partículas sólidas; Cv es la concentración volumétrica de sólidos; Cvmax es la concentración

volumétrica máxima; y ds es el tamaño representativo de partícula. La expresión 3ū/h corresponde a una aproximación de la tasa de deformación empleada en la formulación implementada en HEC-RAS. (USACE, 2023).

### *2.4.9 Concentración volumétrica y tamaño representativo de partícula*

Dentro de la **Ecuación 2.15**, la concentración volumétrica de sólidos, $C_v$, la concentración volumétrica máxima, $C_v$max, y el tamaño representativo de partícula, $d_s$, intervienen de forma directa en el término dispersivo asociado a la colisión granular. Por ello, estos parámetros deben ser definidos con cuidado, ya que condicionan la magnitud de las pérdidas internas no lineales y, en consecuencia, la respuesta hidráulica del modelo no newtoniano (USACE, 2023).

La concentración volumétrica de sólidos, $C_v$, expresa la fracción del volumen total de la mezcla ocupada por partículas sólidas. En el modelo de O'Brien, este parámetro participa en la relación entre el volumen sólido presente y el límite de empaquetamiento considerado por la formulación. A medida que $C_v$ se aproxima a $C_v$max, aumenta la importancia de las interacciones entre partículas y, por tanto, la resistencia dispersiva de la mezcla. En HEC-RAS, $C_v$ se ingresa como un parámetro operativo de simulación; por ello, no debe interpretarse como una descripción completa de la variabilidad espacial y temporal real del flujo, sino como una aproximación representativa para el escenario modelado (USACE, 2023; Zegers et al., 2020).

El tamaño representativo de partícula, $d_s$, resume el efecto granulométrico dentro del término dispersivo de la formulación cuadrática. Debido a que en la **Ecuación 2.15** este parámetro aparece elevado al cuadrado, su selección puede influir de manera significativa en la magnitud de la resistencia calculada. Por esta razón, $d_s$ no debe asumirse automáticamente como

la mediana granulométrica del depósito completo, aunque puede aproximarse mediante $d_{50}$ cuando exista sustento sedimentológico suficiente (USACE, 2023). En mezclas naturales heterogéneas, un único tamaño representativo simplifica una distribución granulométrica compleja; por tanto, su valor debe documentarse como parámetro operativo sensible y, cuando sea posible, evaluarse mediante análisis de sensibilidad (Kostynick et al., 2022; Bonomelli et al., 2025).

La concentración volumétrica máxima, $C_v$max, representa el límite de empaquetamiento de partículas considerado por el término dispersivo tipo Bagnold. En HEC-RAS, el valor por defecto utilizado para este parámetro es 0.615, equivalente a 61.5 %, asociado al empaquetamiento teórico de esferas uniformes. Sin embargo, este valor debe ser mayor que la concentración volumétrica definida para la simulación. En consecuencia, cuando $C_v$ se aproxima a $C_v$max, la parametrización debe revisarse cuidadosamente, debido a que el término dispersivo puede amplificar la resistencia interna calculada. El papel conceptual de $C_v$, $d_s$ y $C_v$max en la formulación cuadrática se resume en la **Tabla 2.9**.

**Tabla 2.9**

*Rol conceptual de los parámetros Cv, d50 y Cv,max en la modelación no newtoniana.*

| Parámetro | Definición conceptual | Papel en el modelo | Advertencia metodológica |
|---|---|---|---|
| **Cv** | Fracción del volumen total de mezcla ocupada por sólidos | Define régimen de flujo y condiciona viscosidad, cedencia e interacción entre partículas | En HEC-RAS se ingresa como valor constante para toda la simulación |
| **ds / tamaño representativo** | Tamaño operativo que resume el efecto granulométrico en la mezcla | Activa el término dispersivo del modelo de O'Brien | El manual indica que solo actúa en O'Brien y que su valor aparece al cuadrado |
| **Cvmax** | Concentración máxima compatible con el empaquetamiento de partículas | Controla la cercanía al máximo empaquetamiento en el término de Bagnold | Debe ser mayor que Cv; el valor por defecto reportado por HEC-RAS es 0.615 |

*Nota. Elaboración propia con base en USACE (2023, secciones 1.3.6 y 1.3.7, pp. 34–36).*

### *2.4.10 Esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica efectiva*

El esfuerzo de cedencia representa el umbral mínimo que debe ser superado para que la mezcla se deforme y fluya. En HEC-RAS puede definirse directamente por el usuario o

estimarse mediante relaciones empíricas dependientes de Cv. Para una formulación exponencial, el esfuerzo de cedencia se expresa en la Ecuación 2.16 y la viscosidad dinámica relativa μr como función exponencial de Cv, en la **Ecuación 2.17**

$$\tau y = ae^{bCv}$$

**Ecuación 2.16**
*Esfuerzo de cedencia*

$$\mu r = 0.001 * e^{BCv}$$

**Ecuación 2.17**
*Viscosidad relativa*

Ambas ecuaciones son función exponencial de Cv, por lo que es un parámetro de sensibilidad. Los parámetros a, b y B son coeficientes empíricos usados por HEC-RAS a partir de valores publicados por Julien (1995, como se cita en USACE, 2023). Los coeficientes para calcular estos parámetros se definen en la **Tabla 2.9**.

**Figura 2.9**
*Parámetros de la ecuación de O'Brien de Julien (1995) (Convertidos a su forma exponencial)*

| Tipo de Suelo Analizado | Límite Líquido (Cv) | α | b | B |
|---|---|---|---|---|
| **Suelo Típico** | 65–80% | 0.005 | 17.2 | 18.4 |
| **Caolinita** | 40–50% | 0.05 | 20.7 | 18.4 |
| **Arcillas Sensitivas** | 35–60% | 0.3 | 23 | 11.5 |
| **Bentonita** | 5–20% | 0.002 | 230.3 | 230.3 |

*Nota. Adaptada del Manual Oficial de HEC-RAS para flujos de lodo y detritos no newtonianos, integra la tabla de parámetros de esfuerzo de cedencia para la ecuación de O'Brien y la tabla de coeficientes del multiplicador exponencial de viscosidad, ambas referidas a Julien (1995) y convertidas a la forma exponencial utilizada por HEC-RAS.*

## 2.5 Producto profundidad–velocidad como indicador de amenaza hidráulica

Para evaluar la amenaza se usó el método de curvas combinadas de amenaza hidráulica integra la profundidad del flujo (D) y la velocidad media (V) para clasificar la vulnerabilidad potencial de personas, vehículos y edificaciones. El indicador se expresa como DxV, con

unidades de m²/s, y se organiza en seis categorías progresivas, H1–H6. Como se sintetiza en la **Tabla 2.10**, estas categorías no equivalen únicamente a niveles genéricos de amenaza, sino a condiciones físicas asociadas con la estabilidad de los elementos expuestos: H1 representa condiciones generalmente seguras, mientras que H4–H6 corresponden a escenarios inseguros para personas y vehículos y, en los niveles superiores, a daño estructural o falla de edificaciones (Smith et al., 2014).

**Tabla 2.10**

*Clasificación de vulnerabilidad asociada con las curvas combinadas de amenaza*

| Clasificación de vulnerabilidad | Descripción |
|---|---|
| **H1** | Generalmente seguro para vehículos, personas y edificaciones. |
| **H2** | Inseguro para vehículos pequeños. |
| **H3** | Inseguro para vehículos, niños y adultos mayores. |
| **H4** | Inseguro para vehículos y personas. |
| **H5** | Inseguro para vehículos y personas. Todas las edificaciones son vulnerables a daño estructural y algunas construcciones menos robustas pueden fallar. |
| **H6** | Inseguro para vehículos y personas. Todos los tipos de edificaciones se consideran vulnerables a falla. |

*Nota. Adaptado de la Tabla 5-1 de Smith et al. (2014, p. 38).*

La asignación de las categorías no depende solamente del producto DxV. Como se observa en la **Tabla 2.11**, la profundidad y la velocidad también se comparan con límites independientes. Esta evaluación combinada evita considerar equivalentes un flujo somero con alta velocidad y otro más profundo con baja velocidad, aun cuando ambos presenten valores semejantes del producto DxV (Smith et al., 2014).

**Tabla 2.11**

*Límites de clasificación de las curvas combinadas de amenaza*

| Clasificación | Límite combinado D × V (m²/s) | Profundidad límite D (m) | Velocidad límite V (m/s) |
|---|---|---|---|
| **H1** | $D \times V \leq 0.30$ | 0.30 | 2.00 |
| **H2** | $D \times V \leq 0.60$ | 0.50 | 2.00 |
| **H3** | $D \times V \geq 0.60$ | 1.20 | 2.00 |
| **H4** | $D \times V \leq 1.00$ | 2.00 | 2.00 |
| **H5** | $D \times V \leq 4.00$ | 4.00 | 4.00 |
| **H6** | $D \times V > 4.00$ | — | — |

*Nota. Adaptado de la Tabla 5-2 de Smith et al. (2014, p. 39). Los límites deben interpretarse de forma combinada; la categoría aplicable corresponde a la condición más restrictiva entre D, V y DxV.*

En esta investigación, las categorías H1–H6 se utilizaron como un indicador comparativo de la amenaza hidrodinámica entre los escenarios preobras y posobras. Su aplicación permitió analizar de manera conjunta los cambios de profundidad y velocidad generados por las estructuras de mitigación a partir de los resultados de la modelación bidimensional.

Sin embargo, en flujos de lodo y detritos esta clasificación debe interpretarse como una aproximación de vulnerabilidad hidráulica y no como una evaluación integral del riesgo. El producto DxV no incorpora de forma explícita la densidad de la mezcla, la concentración de sólidos, el esfuerzo de cedencia ni los impactos asociados con bloques, troncos u otros materiales transportados. Por esta razón, su interpretación se complementó con los mapas individuales de calado y velocidad y con la parametrización reológica adoptada en el modelo (Smith et al., 2014).

# CAPÍTULO 3: Marco metodológico y parametrización numérica

## 3.1 Sistematización de información base

### *3.1.1* Información hidrológica y pluviométrica

Se utilizaron tres estaciones pluviométricas administradas por la EPMAPS, con registros anuales del periodo 2010–2025: P09-Iñaquito, P16-Izobamba y P28-Cruz Loma. La estación P28-Cruz Loma se adoptó como referencia principal porque se ubica sobre la zona alta de aporte de la quebrada El Tejado. P09-Iñaquito se incorporó como referencia urbana cercana, mientras que P16-Izobamba se consideró como estación de contraste debido a la extensión y relevancia de su registro histórico, así como a la disponibilidad de diversas variables meteorológicas. Esta estación también ha sido utilizada como referencia en estudios previos desarrollados en el área de Quito, como el de Orosco-Tacuri et al. (2024), lo que permitió contar con un punto adicional de comparación metodológica. La Tabla 3.1 muestra que P28-Cruz Loma registra los valores máximos más altos de la serie utilizada: 75.10 mm en 2022 y 73.80 mm en 2024.

La **Tabla 3.1** evidencia diferencias temporales entre estaciones: P09-Iñaquito alcanza su máximo en 2017, P16-Izobamba en 2020 y P28-Cruz Loma en 2022. Esta variabilidad confirma que la estación de diseño debe seleccionarse por representatividad espacial, proximidad al área de aporte y magnitud de los máximos observados.

**Tabla 3.1**

*Precipitación máxima diaria anual por estación meteorológica.*

| Año | P09-Iñaquito INAMHI (mm) | P16-Izobamba (mm) | P28-Cruz Loma (mm) |
|---|---|---|---|
| **2010** | 34.90 | 43.10 | 50.64 |
| **2011** | 30.00 | 43.70 | 47.52 |
| **2012** | 30.20 | 40.20 | 47.76 |
| **2013** | 32.90 | 56.40 | 44.16 |
| **2014** | 61.60 | 29.90 | 64.32 |
| **2015** | 24.10 | 22.30 | 39.60 |
| **2016** | 36.00 | 32.30 | 57.36 |
| **2017** | **73.20** | 32.70 | 51.60 |
| **2018** | 45.40 | 35.00 | 41.90 |
| **2019** | 50.80 | 56.00 | 50.20 |
| **2020** | 46.40 | **74.10** | 57.20 |
| **2021** | 47.30 | 49.90 | 55.50 |
| **2022** | 36.00 | 42.40 | **75.10** |
| **2023** | 44.10 | 34.00 | 41.80 |
| **2024** | 45.20 | 41.40 | **73.80** |
| **2025** | 45.00 | 59.00 | 43.40 |

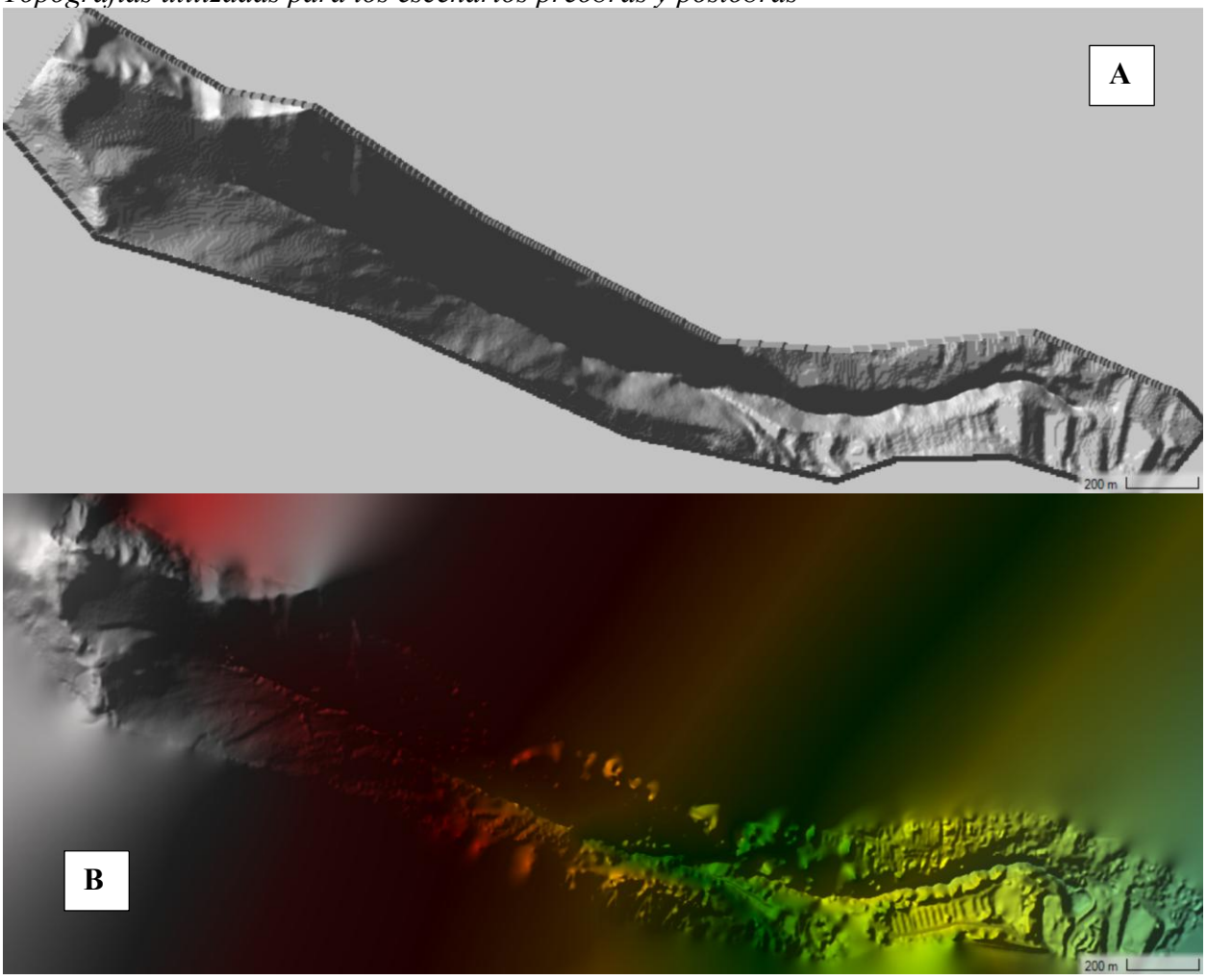
*Nota. Datos obtenidos del sistema ParamH2O de EPMAPS y procesados como máximos diarios anuales. P28-Cruz Loma registra el máximo anual más alto del conjunto: 75.10 mm en 2022.*

### 3.1.2 Información topográfica y modelo digital de elevación

Para el escenario preobras se utilizó una topografía con resolución de 5 m, correspondiente a una escala de trabajo de 1:5 000 y representativa del estado de 2024, mientras que para el escenario posobras se empleó una topografía de 1 m, correspondiente a una escala de trabajo de 1:1 000, que incorpora los cuencos y las dimensiones de diseño previstas para 2027. Ambas topografías fueron proporcionadas por EPMAPS y se presentan en la **Figura 3.1**. La diferencia de resolución se consideró una fuente importante de incertidumbre metodológica, debido a que la discretización de la malla 2D, las líneas de quiebre y la representación de obras de menor tamaño pueden modificar localmente los calados y las velocidades. Esta incertidumbre no pudo eliminarse por la disponibilidad diferenciada de información topográfica; por ello, la comparación se interpretó principalmente a escala de escenarios y zonas de control, evitando atribuir las variaciones puntuales exclusivamente al efecto de las obras.

**Figura 3.1**

*Topografías utilizadas para los escenarios preobras y postobras*




*Nota. Topografía provista por EPMAPS. La topografía A corresponde al estado sin obras 2024; la topografía B representa el escenario con obras 2027.*

La ubicación de las mallas, la zona de captación y las estructuras de control se interpretó con apoyo la ortofoto (georreferenciada) y las memorias técnicas proporcionadas por EPMAPS. **La Figura 3.2** presenta la ortofoto de referencia utilizada para controlar la posición de las obras dentro del modelo.

**Figura 3.2**

*Ortofoto de la zona de diseño*




*Nota. Ortofoto provista por EPMAPS para la zona de diseño y control geométrico de obras.*

### *3.1.3* Información geológica, geotécnica y sedimentológica

Como se observa en la Tabla 3.2, los parámetros reológicos no se obtuvieron mediante ensayos reométricos realizados específicamente para esta investigación. Su definición se apoyó en información indirecta, como la granulometría, la clasificación SUCS, las características de los depósitos de flujo de lodo, el volumen histórico movilizado, el contenido de agua y la presencia de bloques. Por esta razón, los valores adoptados se consideran parámetros operativos y los resultados del modelo se interpretan como una comparación entre escenarios, no como una reproducción exacta del evento ocurrido en 2022.

**Tabla 3.2**

*Evidencia geotécnica y sedimentológica utilizada para la parametrización.*

| Elemento | Dato usado | Función en la parametrización | Fuente |
|---|---|---|---|
| **Clasificación de materiales superficiales** | SM, ML y SM-ML | Define matriz limo-arenosa/arena-limosa para selección de suelo típico. | Estrella (2024), Tabla 5.5 y sondeos |
| **Volumen total del flujo 2022** | 46,218.91 m³; área 122,790.74 m² | Sirve como referencia de magnitud histórica. | Rondal Viscaíno (2022), p. 58 |
| **Volumen del depósito sólido** | 7,162.77 m³ | Diferencia depósito sólido vs el flujo total; útil para concentración e interpretación de evento. | Rondal Viscaíno (2022), p. 72 |
| **Contenido de agua y densidad húmeda** | 45.67%; 1.547 g/cm³ | Indica comportamiento del flujo hiperconcentrado reportado en el depósito. | Rondal Viscaíno (2022), p. 59 |

*Nota. La tabla integra datos de Rondal Viscaíno (2022), Troncoso et al. (2024), Estrella (2024) y EPMAPS (2024).*

## 3.2 Determinación del hidrograma de diseño

El hidrograma se obtuvo mediante una secuencia reproducible: máximos diarios anuales, ajuste Gumbel para Tr = 50 años, abstracción inicial y precipitación efectiva por SCS-CN, tiempo de concentración por Kirpich y Témez, tiempo al pico y caudal pico. El periodo de retorno de 50 años se adoptó por representar el máximo recurrente y mantener coherencia con antecedentes técnicos desarrollados para el área de estudio, en los que se empleó el mismo periodo de retorno (Orosco-Tacuri et al., 2024).

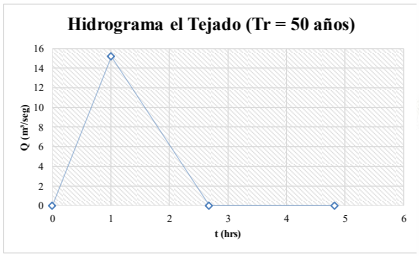
La **Figura 3.3** resume los resultados para las tres estaciones. Los resultados muestran que P28-Cruz Loma presenta la mayor precipitación de diseño y el mayor caudal pico. Con PTr = 83.01 mm, Pe = 44.51 mm y Qp = 15.20 m³/s, esta estación se adoptó para construir el hidrograma de entrada por su ubicación sobre la zona alta de aporte y por representar el escenario hidrológico más exigente entre las estaciones evaluadas.

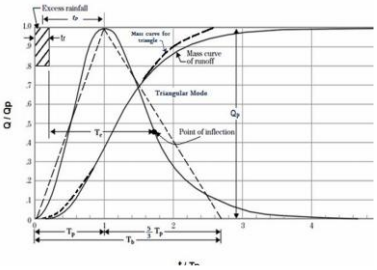
**Figura 3.3**

*Estimadores estadísticos y resultados hidrológicos para Tr = 50 años.*

| | Media Aritmética | Desviación Estándar | Parámetro de Escala | Parámetro de Posición | Variable Reducida | Precipitación de Diseño | Tiempo de Concentración Kirpich (1940) | Tiempo de Concentración Témez (1978)) | Tiempo de Concentración | Tiempo al Pico | Tiempo Base | Abstracción Inicial | Precipitación neta | Caudal Pico |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **X_med** | **Sx** | **α** | **u** | **Yt** | **P_Tr** | **Tc_kir** | **Tc_tem** | **Tc** | **Tp** | **Tb** | **Ia** | **Pe** | **Qp** |
| | $X_{med} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$ | $S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ | $\alpha = \frac{S_x \cdot \sqrt{6}}{\pi}$ | $u = X_{med} - 0.577216 \cdot \alpha$ | $Y_t = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{Tr}\right)\right)$ | $P_{Tr} = u + \alpha \cdot Y_t$ | $T_{c_kir} = 0.0195 \cdot \frac{L^{0.77}}{J^{0.385}}$ | $T_{c_tem} = 0.3 \cdot \left(\frac{L}{J^{0.25}}\right)^{0.76} \cdot 60$ | **Promedio Tc_kir y Tc_tem** | $T_p = \sqrt{Tc} + \frac{2}{3} \cdot T_l$ | $T_b = \frac{8}{3} \cdot T_p$ | $I_a = \left(\frac{5080}{CN}\right) - 50.8$ | $P_e = \frac{(P_{Tr} - I_a)^2}{P_{Tr} + 4 \cdot I_a}$ | $Q_p = \frac{0.208 \cdot P_e \cdot A}{T_p}$ |
| | *mm* | *mm* | - | - | - | *mm* | *hrs* | *hrs* | *hrs* | *hrs* | *hrs* | *mm* | *mm* | *m3/seg* |
| **Max of P09-Iñaquito** | 44.16 | 12.61 | 9.83 | 38.48 | 3.90 | 76.84 | 0.21 | 0.74 | 0.47 | 1.01 | 2.68 | 9.55 | 39.35 | 13.44 |
| **Max of P16-Izobamba** | 43.26 | 14.13 | 11.02 | 36.90 | 3.90 | 79.88 | 0.21 | 0.74 | 0.47 | 1.01 | 2.68 | 9.55 | 41.88 | 14.30 |
| **Max of P28-Cruz Loma** | 53.12 | 11.53 | 8.99 | 47.93 | 3.90 | 83.01 | 0.21 | 0.74 | 0.47 | 1.01 | 2.68 | 9.55 | 44.51 | **15.20** |

| | t | Q |
|---|---|---|
| | *hrs* | *m³/seg* |
| Inicio | 0 | 0 |
| Pico | 1.01 | 15.20 |
| Final | 2.68 | 0 |
| | 4.82 | 0 |




*Nota. Cálculo propio con A = 1.65 km², L = 2.50 km, J = 0.33 m/m y CN = 84.17. La estación P28-Cruz Loma fue adoptada por presentar el mayor Qp y por ubicarse sobre la zona alta de aporte de la quebrada El Tejado.*

La **Tabla 3.3** define la condición de borde aguas arriba. El pico se alcanza a 1.005 h y el flujo retorna a cero a 2.680 h. La forma triangular simplifica la lluvia-escorrentía, pero conserva la magnitud del caudal pico requerida para comparar ambos escenarios bajo la misma condición hidrológica. La **Figura 3.4** representa el hidrograma adoptado.

**Tabla 3.3**

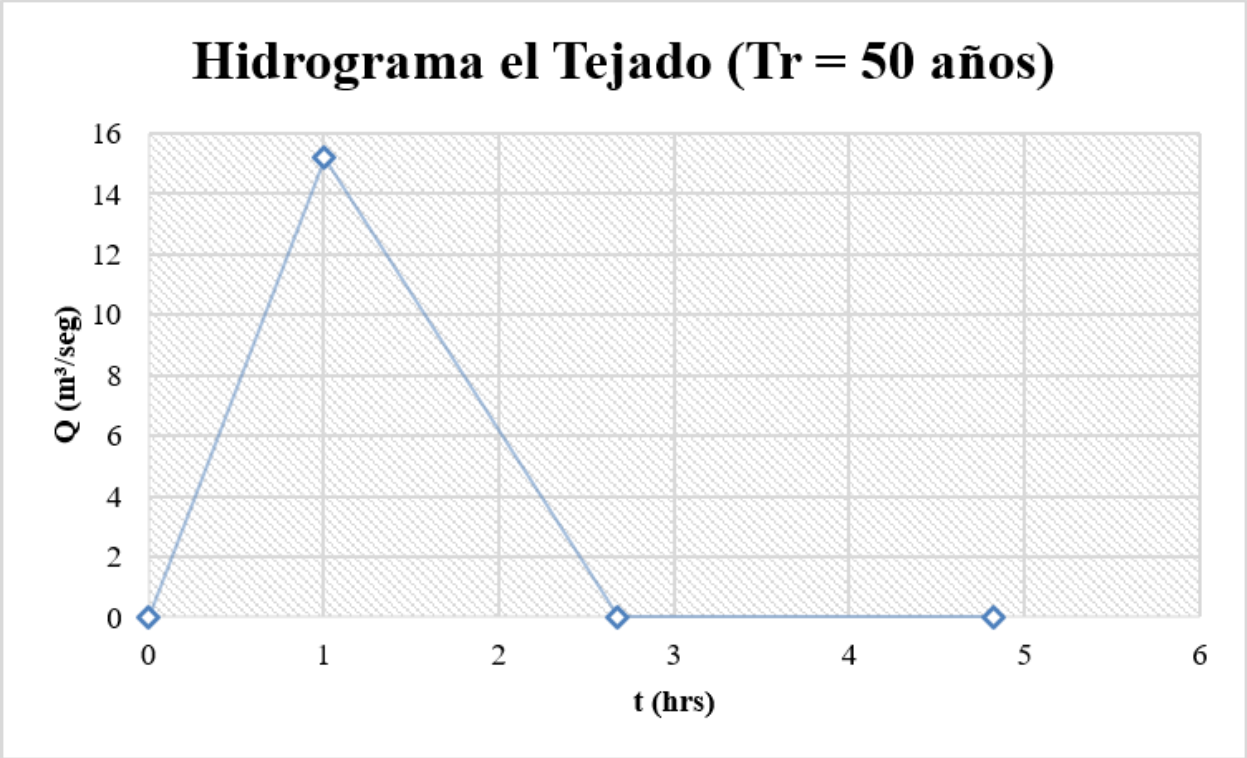
*Coordenadas del hidrograma triangular de diseño adoptado.*

| Punto | Tiempo (h) | Caudal (m³/s) |
|---|---|---|
| **Inicio** | 0.000 | 0.000 |
| **Pico** | 1.005 | 15.196 |
| **Final** | 2.680 | 0.000 |

*Nota. Hidrograma adoptado a partir de P28-Cruz Loma por ser la estación con mayor Qp.*

**Figura 3.4**

*Hidrograma triangular de diseño adoptado.*




*Nota. Elaboración propia. El pico corresponde Qp = 15.20 m³/s, t = 1.005 h.*

## 3.3 Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning (Cowan-Chow)

La rugosidad se calculó mediante Cowan-Chow, considerando lecho natural, irregularidad morfológica, obstrucciones por material grueso y vegetación. Este procedimiento evita seleccionar un valor de n sin trazabilidad física y conecta la parametrización con las condiciones morfológicas de la quebrada.

La **Tabla 3.4** muestra que las mayores contribuciones al valor final de n provienen de obstrucciones y vegetación. El componente n3 = 0.060 refleja obstrucción severa por bloques, troncos y material antrópico; n4 = 0.050 representa vegetación alta en márgenes y laderas. El valor total n = 0.148 es coherente con cauces de alta rugosidad y con la recomendación de iniciar modelos de lodo y detritos con valores de n estables cuando existe sensibilidad numérica (USACE, 2023).

**Tabla 3.4**

*Cuantificación adoptada del coeficiente de Manning para El Tejado.*

| Componente | Código | Valor | Justificación técnica | Referencia base |
|---|---|---|---|---|
| **Material del lecho base** | $n_0$ | 0.028 | Se identificó que el lecho natural contiene predominantemente matrices de rocas y grava no consolidada. | Análisis de Ortofotos y Google Earth |
| **Grado de irregularidad** | $n_1$ | 0.005 | El lecho mantiene una calidad espacial estable y una trayectoria predominantemente rectilínea en el tramo. | Análisis de Ortofotos y Google Earth |
| **Variación de la sección** | $n_2$ | 0.005 | Contracción y expansión paulatina de la geometría del cauce evidenciada en perfiles transversales consecutivos. | Levantamiento Topográfico |
| **Efecto de obstrucciones** | $n_3$ | 0.060 | Nivel de obstrucción severa provocado por el arrastre masivo de bloques métricos, árboles y escombros urbanos documentado tras el evento de 2022. | Kostynick et al. (2022); Troncoso et al. (2024) |
| **Vegetación del cauce** | $n_4$ | 0.050 | Densa cobertura boscosa y arbustiva en las laderas confinantes que interactúa de forma directa con el flujo. | Análisis de Ortofotos y Google Earth |
| **Grado de meandros** | $m_5$ | 1 | Al mantener una trayectoria topográfica rectilínea, la presencia de meandros es mínima, requiriendo un factor escalar neutro. | Análisis de Ortofotos y Google Earth |
| **Coeficiente de Rugosidad de Manning** | n | 0.148 | Resultado de la ecuación de Cowan | |

*Nota. El valor n = 0.148 se obtiene de n = (0.028 + 0.005 + 0.005 + 0.060 + 0.050) × 1.000.*

## 3.4 Parametrización de datos reológicos

La parametrización reológica representa una mezcla agua-sedimento con comportamiento no newtoniano. Debido a la ausencia de ensayos reométricos propios, se adoptó Cv = 0.55 como concentración volumétrica operativa dentro de la transición alta entre flujo hiperconcentrado y flujo de detritos, comportamiento que se evidenció en los aluviones documentados en el 2022 y 2024 (Rondal Viscaíno, 2022; Troncoso et al., 2024; EPMAPS, 2024). Este valor se fundamenta en la evidencia de transporte de sedimento grueso, bloques y material orgánico.

La **Tabla 3.5** presenta los parámetros reológicos adoptados para ejecutar la simulación no newtoniana en HEC-RAS 2D.

**Tabla 3.5**

*Parámetros reológicos adoptados para HEC-RAS 2D.*

| Variable | Magnitud adoptada | Justificación técnica |
|---|---|---|
| **Tipo de suelo adoptado para la selección reológica** | Suelo típico; matriz limo-arenosa a arena-limosa, con gravas | La clasificación SUCS reporta suelos SM, ML y SM-ML, con predominio de arenas limosas y limos arenosos (Estrella, 2024). |
| **Concentración Volumétrica Base de Diseño (Cv)** | 0.550 | El valor 55% se adopta como parámetro operativo conservador por la evidencia del comportamiento como flujo en detrito (EPMAPS, 2024) |
| **a** | 0.005 | Tabla 2.9 (Suelo Típico). |
| **b** | 17.200 | Tabla 2.9 (Suelo Típico). |
| **B** | 18.400 | Tabla 2.9 (Suelo Típico). |
| **Límite de Concentración Máxima (Cv, max)** | 0.615 | Parámetro computacional mayor que Cv, coherente con el límite de empaquetamiento utilizado en HEC-RAS para el término de Bagnold. |
| **Diámetro Representativo (ds)** | 50.0 mm | Representa un tamaño intermedio de la fracción gruesa, mayor que la matriz fina urbana y menor que los cantos y bloques máximos documentados. |
| **Comportamiento Algorítmico de Frontera** | Bulking Fluid Volume | Ajuste numérico exponencial para incorporar el volumen total de sedimentos asimilados y abultar el hidrograma de diseño base. |

*Nota. Parámetros contrastados conceptualmente con USACE (2023) y Estrella (2024).*

## 3.5 Construcción de los modelos en HEC-RAS 2D

La modelación se planteó como un análisis comparativo controlado. En los escenarios preobras 2024 y posobras 2027 se mantuvieron constantes el hidrograma de entrada, la rugosidad de Manning y la parametrización no newtoniana. Las diferencias se limitaron principalmente a la geometría del terreno y a la incorporación de las obras mediante SA/2D Connections. Con este criterio, las variaciones de calado, velocidad, WSE y tiempo de progresión pueden relacionarse con los cambios geométricos y estructurales del escenario posobras, y no con modificaciones simultáneas del forzante hidrológico o de las propiedades reológicas de la mezcla (USACE, 2023).

Para construir los modelos se integraron los insumos espaciales, hidráulicos, geométricos y reológicos dentro de una misma estructura de proyecto. El sistema de referencia espacial se utilizó para mantener la correspondencia entre los terrenos, las ortofotos, las estructuras y las salidas cartográficas. Los terrenos preobras y posobras definieron las condiciones geométricas que debían compararse, mientras que la malla 2D y las líneas de quiebre controlaron la

discretización del dominio. Las condiciones de borde establecieron el ingreso y la salida del flujo, y los parámetros no newtonianos permitieron representar la mezcla agua-sedimento mediante un enfoque monofásico. La **Tabla 3.6** resume los insumos utilizados y su función dentro de la construcción de los modelos.

**Tabla 3.6**

*Insumos técnicos utilizados en la construcción de los modelos HEC-RAS 2D*

| Insumo | Configuración adoptada | Función en la construcción del modelo |
|---|---|---|
| **Sistema de referencia espacial** | WGS84 UTM 17S | Mantiene la consistencia espacial entre terreno, ortofotos, estructuras y salidas cartográficas. |
| **Terreno preobras** | Modelo topográfico correspondiente al estado 2024 | Representa la condición geométrica base sin incorporación de obras de mitigación. |
| **Terreno posobras** | Modelo topográfico correspondiente al estado 2027 con cuencos y obras integradas | Representa la condición geométrica modificada para el análisis comparativo post intervención. |
| **Mapas base y ortofotos** | Imágenes georreferenciadas de apoyo visual | Permiten controlar la alineación del cauce, la posición de estructuras y el límite del área 2D. |
| **Área de flujo 2D** | Dominio computacional delimitado sobre el cauce y zona de influencia hidráulica | Define el espacio donde se resuelven las ecuaciones bidimensionales de flujo. |
| **Malla computacional** | Celdas de 5 × 5 m | Discretiza el dominio de cálculo y permite representar la variación espacial de calados, velocidades y WSE. |
| **Líneas de quiebre** | Breaklines trazadas sobre cauce y cambios geométricos relevantes | Mejoran la alineación de celdas y la representación de discontinuidades topográficas. |
| **Rugosidad de Manning** | n = 0.148 | Representa la resistencia hidráulica del cauce natural dentro del área 2D. |
| **Condición de borde aguas arriba** | Hidrograma triangular de entrada | Define el forzante hidrológico común para los dos escenarios. |
| **Condición de borde aguas abajo** | Condición de salida del dominio. Profundidad Normal. | Permite la evacuación numérica del flujo y la estabilidad de la solución al final del dominio. |
| **Estructuras SA/2D** | Dos barreras de mitigación y puente (túnel). | Incorporan controles hidráulicos locales y discontinuidades geométricas en el escenario postobras. |
| **Parámetros no newtonianos** | Método O'Brien; Parámetros reológicos | Activan la representación monofásica no newtoniana de la mezcla agua-sedimento. |

*Nota. Los valores hidrológicos y reológicos específicos se desarrollan el capítulo 2.*

La secuencia operativa se organizó de manera progresiva, desde la creación del proyecto hasta la ejecución de los planes de simulación, que se resume en la **Tabla 3.7**. En primer lugar, se configuró la base espacial del proyecto y se cargaron los terrenos comparativos. Luego se delimitó el área 2D, se incorporaron líneas de quiebre y se generó la malla computacional, con el fin de representar adecuadamente el cauce y los cambios geométricos relevantes. Una vez definida la geometría, se asignaron las condiciones de borde, las estructuras SA/2D y la parametrización no newtoniana. Se crearon los planes preobras y posobras para obtener los

resultados comparables de profundidad, velocidad y tiempo. Finalmente, por medio de algebra de mapas, se obtuvieron los mapas de amenaza hidráulica.

**Tabla 3.7**

*Secuencia operativa seguida para construir los modelos en HEC-RAS 2D*

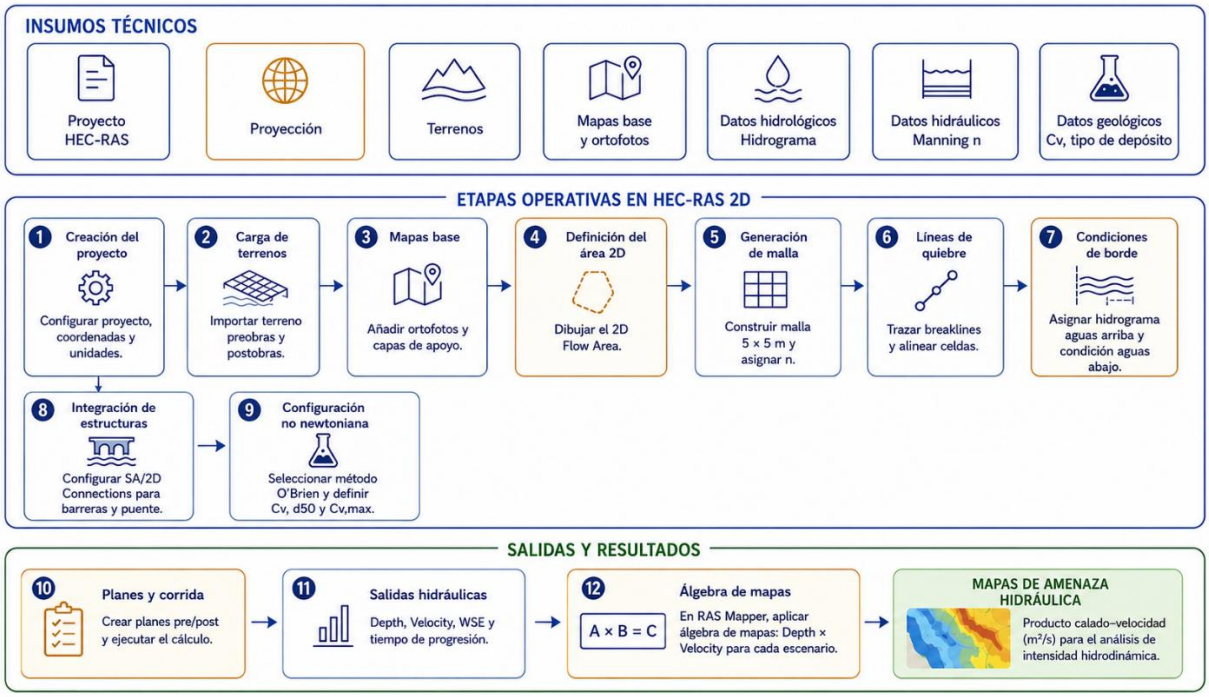
| Etapa operativa | Acción principal en HEC-RAS 2D | Resultado esperado |
|---|---|---|
| **Creación del proyecto** | Configurar proyecto, sistema de coordenadas y sistema de unidades. | Base de trabajo única y georreferenciada. |
| **Carga de terrenos** | Importar el terreno preobras y el terreno postobras. | Superficies topográficas comparables. |
| **Mapas base** | Añadir ortofotos y capas de apoyo. | Control visual del cauce y de la ubicación de obras. |
| **Definición del área 2D** | Dibujar el 2D Flow Area. | Dominio de simulación delimitado. |
| **Generación de malla** | Construir malla 5 × 5 m y asignar n. | Discretización del dominio de cálculo. |
| **Líneas de quiebre** | Trazar breaklines y alinear celdas. | Mejor representación del cauce y cambios geométricos. |
| **Condiciones de borde** | Asignar hidrograma aguas arriba y condición aguas abajo. | Forzamiento hidráulico del modelo. |
| **Integración de estructuras** | Configurar SA/2D Connections para barreras y puente. | Representación explícita de controles hidráulicos. |
| **Configuración no newtoniana** | Seleccionar método O'Brien y definir Cv, d50 y Cv,max. | Activación del módulo de lodo y detritos. |
| **Planes y corrida** | Crear planes pre/post y ejecutar el cálculo. | Resultados comparables de Depth, Velocity, WSE y tiempo. |
| **Álgebra de mapas** | En RAS Mapper, aplicar el álgebra de mapas a los resultados mediante la multiplicación de las capas Depth × Velocity para cada escenario. | Mapas del producto calado–velocidad, expresado en $m^2/s$, para analizar espacialmente la intensidad hidrodinámica del flujo, amenaza hidráulica. |

*Nota. La secuencia resume el flujo de trabajo aplicado en el estudio y es consistente con la organización de proyecto, geometría, flujo no permanente, plan y RAS Mapper descrita por Price (2025)*

La **Figura 3.5** sintetiza la relación entre los insumos técnicos y las etapas seguidas para construir los modelos. El esquema organiza el proceso desde la configuración inicial del proyecto hasta la generación de resultados, y muestra la trazabilidad necesaria para comparar los escenarios preobras y posobras bajo las mismas condiciones hidráulicas y reológicas.

**Figura 3.5**

*Flujo de construcción del modelo HEC-RAS 2D*

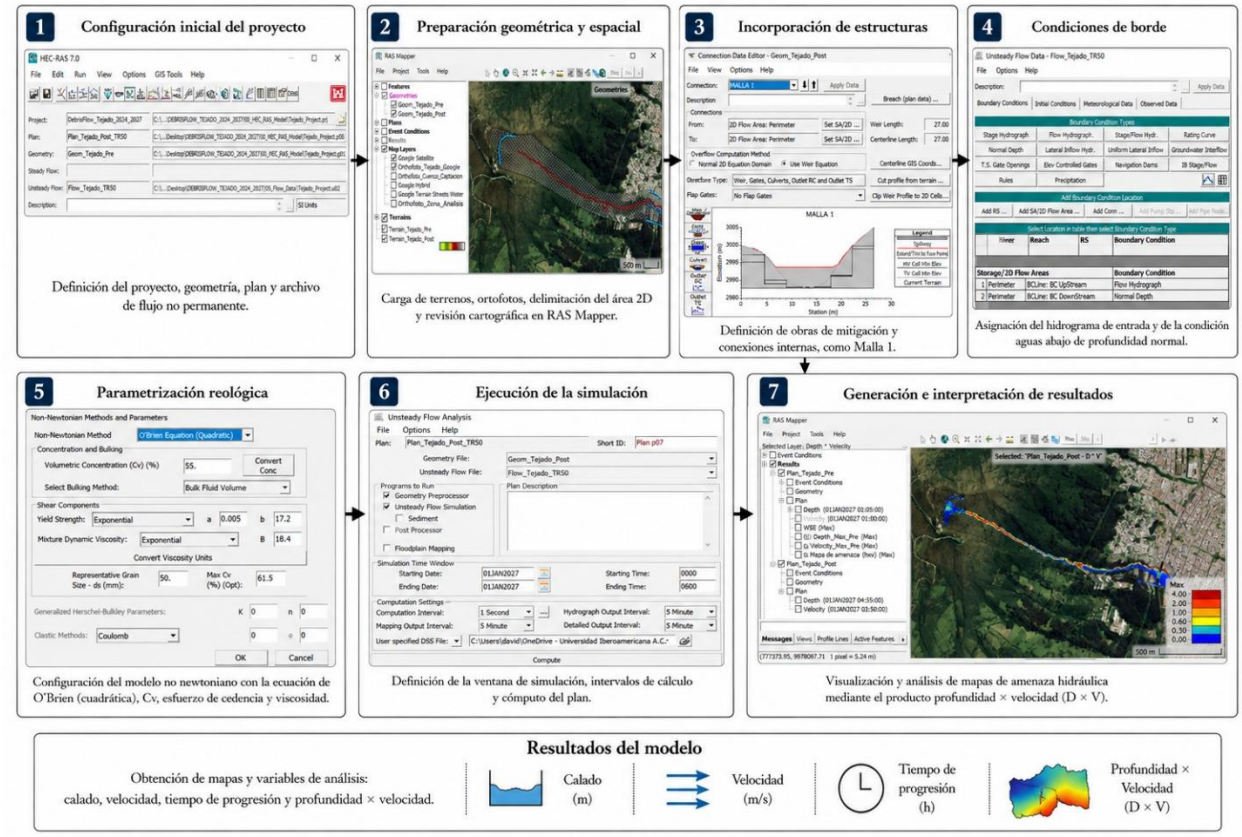



*Nota. Elaboración propia con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2026).*

La aplicación práctica de las etapas descritas previamente dentro del entorno de HEC-RAS 2D, se muestra en la **Figura 3.6**. La secuencia permite visualizar la configuración del modelo, la ejecución de la simulación y la obtención de las variables empleadas en el análisis comparativo de los escenarios.

**Figura 3.6**

*Implementación operativa y generación de resultados del modelo HEC-RAS 2D*




*Nota. Elaboración propia con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2026). A partir del modelo en HEC-RAS 2D de la quebrada El Tejado.*

### *3.5.1 Estructuras incorporadas en el modelo geométrico*

En el escenario posobras se incorporaron dos mallas de retención y la estructura de conducción situada bajo el puente de La Mariscal mediante conexiones SA/2D. Los cuencos se representaron directamente en la topografía proyectada proporcionada por EPMAPS. Las mallas flexibles fueron idealizadas como barreras rígidas y colmatadas; por tanto, los resultados describen la respuesta hidráulica de esa idealización y no permiten evaluar deformación, capacidad estructural, rotura, sobrepaso ni interacción fluido-estructura.

# CAPÍTULO 4: Análisis de resultados

## 4.1 Criterio de análisis comparativo

El análisis comparativo se estructuró a partir de cuatro variables hidrodinámicas obtenidas directamente o derivadas de los resultados de HEC-RAS 2D: calado máximo, velocidad máxima, tiempo de progresión y producto profundidad–velocidad (DxV). Los criterios adoptados y su aplicación específica se presentan en la **Tabla 4.1.**

**Tabla 4.1**

*Variables utilizadas para el análisis comparativo de resultados*

| Variable | Resultado derivado del modelo | Uso en el análisis |
|---|---|---|
| **Calado máximo (h)** | Mapa de calado máximo | Identificar zonas de acumulación y retención controlada dentro de los cuencos y estructuras de mitigación. |
| **Velocidad máxima (v)** | Mapa de velocidad máxima | Evaluar cambios en la movilidad del flujo y en su capacidad de transporte aguas abajo de las obras. |
| **Tiempo de progresión (t)** | Tiempo de llegada o tiempo de tránsito | Cuantificar el retardo o la aceleración del frente del flujo entre puntos de control y hacia la zona urbana. |
| **Producto profundidad–velocidad (DxV)** | Mapa del producto entre profundidad y velocidad, máximos, expresado en $m^2/s$ | Representar la amenaza hidrodinámica combinada, delimitar categorías H1–H6 y comparar su distribución espacial entre los escenarios preobras y postobras. |

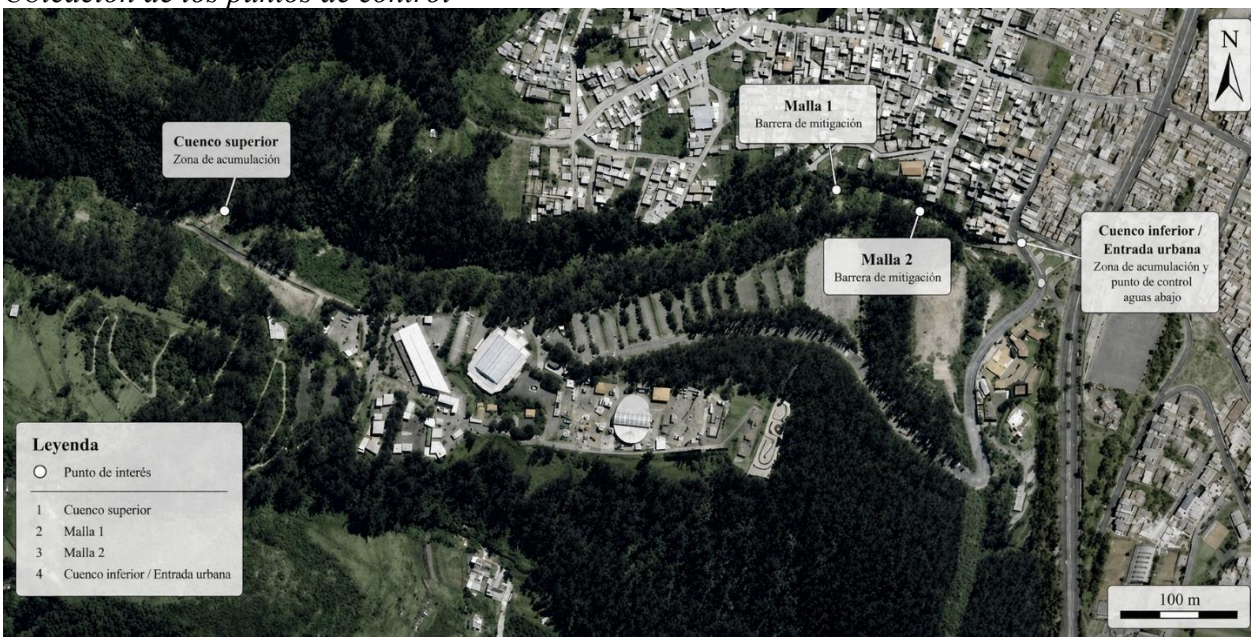
*Nota. El análisis se limita a variables hidrodinámicas directamente obtenidas o derivadas de los resultados de HEC-RAS 2D. No se incorpora evaluación integral de riesgo, exposición ni vulnerabilidad.*

## 4.2 Zonas y puntos de control

La comparación entre los escenarios preobras y posobras se realizó mediante cuatro puntos de control distribuidos a lo largo del cauce de la quebrada El Tejado. Su ubicación se definió en función de las principales obras de mitigación y en conjunto a las zonas donde se esperaban cambios en la acumulación, la velocidad y el tiempo de progresión del flujo. Como se muestra en la **Figura 4.1**, los puntos corresponden al cuenco superior, la malla 1, la malla 2 y el cuenco inferior o entrada urbana, lo que permite analizar de manera secuencial la respuesta hidrodinámica desde la parte alta del dominio hasta el límite previo al ingreso a la zona urbanizada.

**Figura 4.1**

*Ubicación de los puntos de control*




*Nota. Elaboración propia con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2026).*

Los criterios de interpretación asociados con cada zona funcional se presentan en la **Tabla 4.2**. Esta zonificación evitó aplicar una interpretación uniforme a todo el dominio, debido a que el comportamiento esperado depende de la función de cada estructura. En los cuencos, la acumulación y el incremento local del calado pueden constituir una respuesta compatible con el objetivo de almacenamiento; en cambio, aguas abajo de las mallas y en la entrada urbana, la disminución de la velocidad, del DxV y el aumento del tiempo de llegada representan los principales indicadores de atenuación hidrodinámica.

**Tabla 4.2**

*Zonas funcionales y criterios de interpretación hidráulica*

| Punto / sección | Zona funcional | Elemento principal | Criterio de interpretación |
|---|---|---|---|
| **P1** | Cuenco superior | Zona de acumulación | Un mayor calado posobras puede indicar retención controlada si permanece dentro del área prevista. |
| **P2** | Malla 1 | Barrera de mitigación | Se evalúa por cambios locales de calado, reducción de velocidad aguas abajo y posible retardo. |
| **P3** | Malla 2 | Barrera de mitigación | Se evalúa por reducción adicional de velocidad y control del tránsito del flujo. |
| **P4** | Cuenco inferior/Entrada urbana | Zona de acumulación previa al ingreso urbano y punto de control aguas abajo | Se evalúa por almacenamiento, reducción de velocidad de salida y efecto previo a la entrada urbana. También se utiliza como verificación del efecto residual del sistema de retención. |

*Nota. La zonificación funcional permite interpretar los resultados conforme al objetivo hidráulico esperado en cada sector del dominio modelado.*

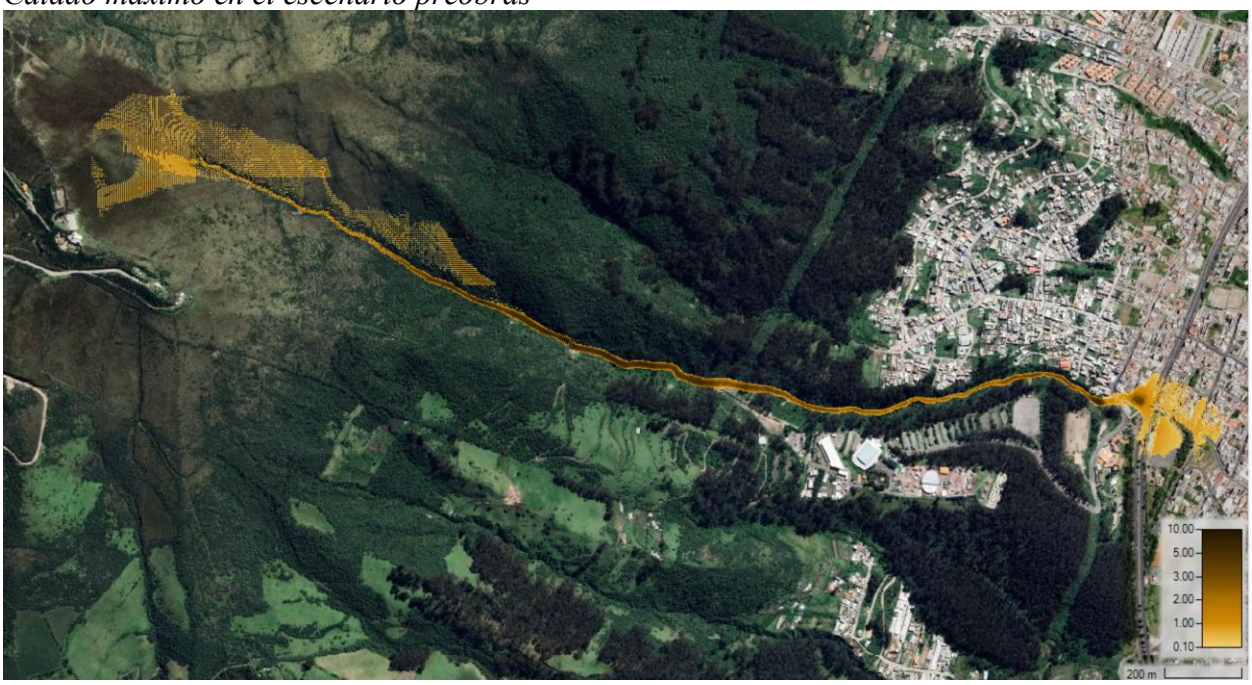
## 4.3 Acumulación y calados máximos

El calado máximo se analizó principalmente dentro de los cuencos y zonas asociadas a las obras de retención. En este contexto, el incremento del calado posobras no se interpreta de manera directa como aumento de amenaza, sino como evidencia de almacenamiento y retención controlada, siempre que el aumento se concentra dentro de las zonas previstas.

Al comparar los mapas exportados desde RAS Mapper para los escenarios preobras y posobras, mostrados en la **Figura 4.2** y la **Figura 4.3**, se observa una modificación en la distribución espacial del calado máximo dentro del dominio modelado. En el escenario preobras, el calado se concentra principalmente en el tramo alto de la quebrada y se mantiene como una franja continua a lo largo del cauce principal hasta el sector de ingreso urbano, con acumulaciones visibles hacia la parte baja derecha del modelo. En el escenario posobras, la profundidad máxima presenta una mayor concentración localizada en sectores específicos asociados a las zonas de retención, especialmente en el tramo medio, en el entorno del cuenco inferior y en el área próxima al ingreso urbano.

**Figura 4.2**

*Calado máximo en el escenario preobras*




*Nota. Mapa exportado desde RAS Mapper como resultado máximo de Depth para el escenario preobras.*

**Figura 4.3**

*Calado máximo en el escenario postobras*




*Nota. Mapa exportado desde RAS Mapper como resultado máximo de Depth para el escenario postobras.*

En las zonas de retención evaluadas, los valores reportados en la **Tabla 4.3** permiten diferenciar la respuesta hidráulica de cada elemento entre los escenarios preobras y posobras.

Los datos presentados con 0.00 m, se debe a que no existían las obras en el escenario previo. En el cuenco superior, el calado máximo pasa de 0.00 m a 5.30 m, mientras que el calado medio aumenta de 0.00 m a 4.00 m, lo que evidencia una variación marcada de la profundidad después de incorporar las obras. En la malla 1, el calado máximo aumenta de 4.00 m a 7.00 m, con una diferencia de 3.00 m y un cambio relativo de 42.86%; además, el calado medio se incrementa de 3.00 m a 5.00 m. En la malla 2, el calado máximo varía de 4.00 m a 6.30 m, con una diferencia de 2.30 m y un cambio relativo de 36.51%, mientras que el calado medio mantiene el mismo incremento observado en la malla 1. El cuenco inferior registra la mayor profundidad posobras, con un calado máximo de 10.54 m y un calado medio de 8.20 m, frente a valores preobras de 0.00 m en ambos indicadores.

**Tabla 4.3**

*Comparación de calados y acumulación en cuencos*

| Zona de retención | h pre,max (m) | h post,max (m) | h pre,medio (m) | h post,medio (m) | Δh,max (m) | Cambio (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cuenco superior** | 0.00 | 5.30 | 0.00 | 4.00 | 5.30 | 100.00% |
| **Malla 1** | 4.00 | 7.00 | 3.00 | 5.00 | 3.00 | 42.86% |
| **Malla 2** | 4.00 | 6.30 | 3.00 | 5.00 | 2.30 | 36.51% |
| **Cuenco inferior** | 0.00 | 10.54 | 0.00 | 8.20 | 10.54 | 100.00% |

*Nota. Los valores se identificaron a partir de los resultados de HEC-RAS 2D y la lectura espacial de las zonas de retención. Δh,max = h_post,max - h_pre,max. Cambio (%) = Δh,max / h_post,max × 100, por lo que expresa la proporción del calado máximo postobras asociada al incremento respecto del escenario preobras.*

### *4.3.1 Volumen de acumulación estimado en cuencos*

La delimitación espacial presentada en la **Figura 4.5** corresponde a las áreas evaluadas de acumulación definidas mediante polígonos dibujados en ArcGIS sobre las zonas de retención consideradas en la modelación. Las zonas se ubicaron en los puntos de control y se definieron por la mancha de acumulación que se generó en la modelación del escenario posobras.

**Figura 4.4**

*Ubicación de las Áreas Evaluadas de Acumulación de lodo preobras*




*Nota. Elaboración propia con asistencia de ChatGPT (OpenAI, 2026).Polígonos dibujados en ArcGIS sobre las zonas de retención definidas para estimar áreas de acumulación.*

A partir de las áreas delimitadas, la **Tabla 4.4** presenta la estimación comparativa de volúmenes de acumulación para los escenarios preobras y posobras. La existencia de valores de 0.00 m³ es debido a la misma razón explicada para los calados. El cuenco superior se evaluó un área de 1014.00 m²; el volumen preobras registrado es de 0.00 m³, mientras que el volumen posobras alcanza 4056.00 m³. En la malla 1, el área evaluada corresponde a 170.00 m², con un incremento de volumen de 680.00 m³ a 850.00 m³, equivalente a una diferencia de 170.00 m³ y un cambio relativo de 20.00%. Para la malla 2, el área analizada es de 300.00 m²; el volumen pasa de 1200.00 m³ en el escenario preobras a 1500.00 m³ en el escenario posobras, con una diferencia de 300.00 m³ y el mismo cambio relativo de 20.00%. El cuenco inferior presenta el área evaluada más extensa, con 2660.00 m², y registra un volumen posobras de 21812.00 m³ frente a 0.00 m³ en el escenario preobras. Estos valores expresan la variación volumétrica estimada para cada polígono de retención, calculada a partir del área evaluada y la profundidad

representativa de acumulación indicada en la nota metodológica de la tabla. Valores que son compatibles con las estimaciones de diseño.

**Tabla 4.4**

*Comparación de volúmenes en cuencos*

| Zona de retención | Área evaluada (m²) | V pre (m³) | V post (m³) | ΔV (m³) | Cambio (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Cuenco superior** | 1014.00 | 0.00 | 4056.00 | 4056.00 | 100.00% |
| **Malla 1** | 170.00 | 680.00 | 850.00 | 170.00 | 20.00% |
| **Malla 2** | 300.00 | 1200.00 | 1500.00 | 300.00 | 20.00% |
| **Cuenco inferior** | 2660.00 | 0.00 | 21812.00 | 21812.00 | 100.00% |

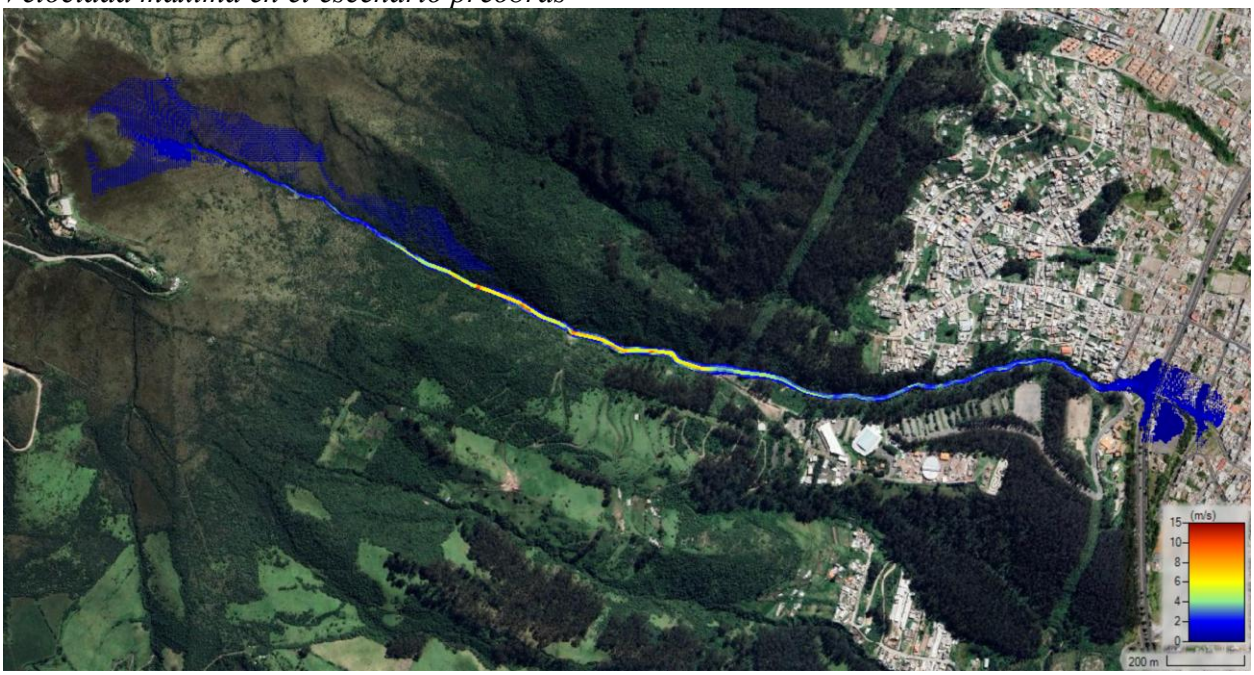
*Nota. El volumen corresponde a una estimación comparativa basada en el área evaluada y la profundidad representativa de acumulación para cada polígono. ΔV = V_post - V_pre. Cambio (%) = ΔV / V_post × 100; en zonas sin acumulación efectiva en el escenario preobras, el incremento se expresa como 100%.*

## 4.4 Velocidades máximas

En el escenario preobras, mostrado en la **Figura 4.5**, las velocidades máximas se concentran principalmente en el eje del cauce, con incrementos localizados en los tramos de mayor confinamiento y pendiente. La continuidad de las tonalidades correspondientes a velocidades intermedias y altas a lo largo del canal evidencia que el flujo conserva su movilidad durante la propagación hacia la zona baja. Aunque en las áreas laterales y en el sector urbano predominan velocidades menores, la configuración espacial indica que el cauce principal funciona como una trayectoria continua de transferencia del flujo antes de la incorporación de las nuevas obras.

**Figura 4.5**

*Velocidad máxima en el escenario preobras*

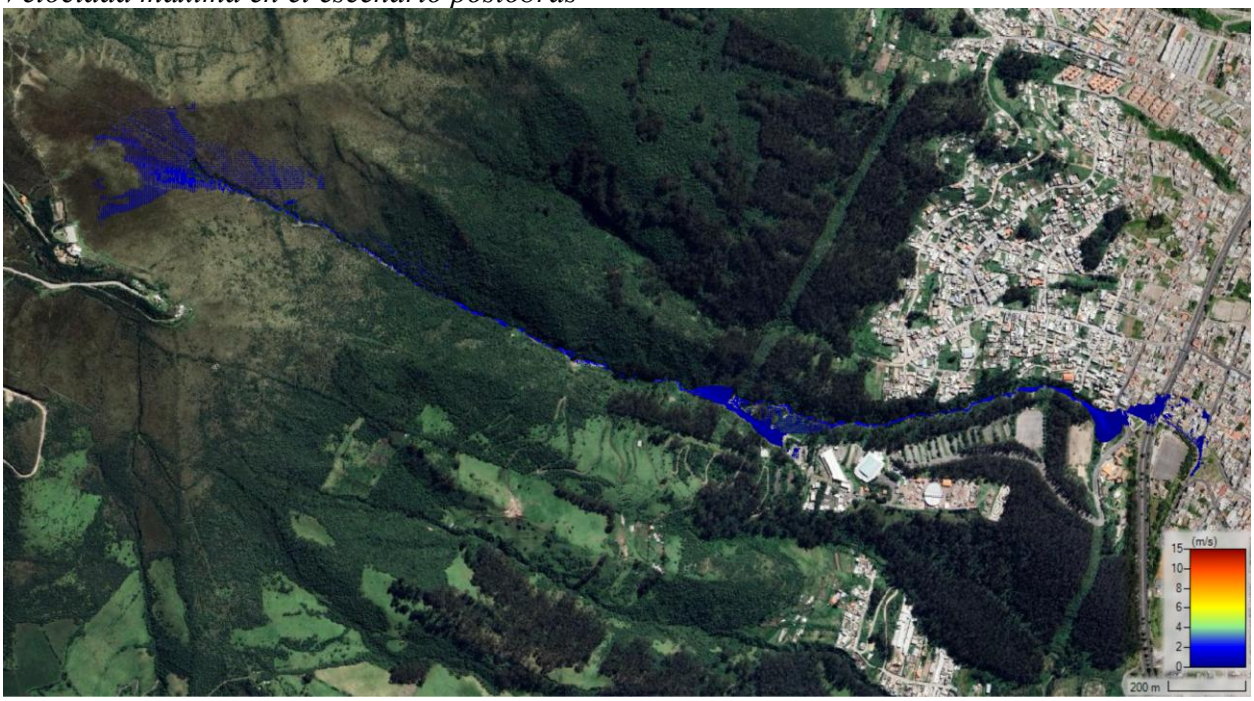



*Nota. Mapa exportado desde RAS Mapper como resultado máximo de Velocity (max) para el escenario preobras.*

La distribución posobras de la **Figura 4.6** presenta una reducción general de las velocidades máximas a lo largo del cauce. Las tonalidades de menor magnitud se vuelven predominantes, mientras que las zonas con velocidades relativamente elevadas se restringen a segmentos puntuales próximos a las transiciones geométricas y a las estructuras. También se observan áreas de expansión y acumulación en los cuencos, donde el aumento de la sección disponible favorece la disminución local de la velocidad.

**Figura 4.6**

*Velocidad máxima en el escenario postobras*




*Nota. Mapa exportado desde RAS Mapper como resultado máximo de Velocity (max) para el escenario postobras.*

Los valores de la **Tabla 4.5** confirman la atenuación observada en los mapas. En P1, ubicado en la salida del cuenco superior, la velocidad máxima disminuye de 4.00 a 0.60 m/s, con una reducción absoluta de 3.40 m/s y una disminución relativa del 85.00 %. Este punto registra la mayor reducción absoluta del conjunto analizado, lo que evidencia que el cuenco superior modifica de manera significativa las condiciones de salida del flujo. La disminución de velocidad en esta sección implica una menor movilidad inmediatamente aguas abajo de la primera zona de almacenamiento.

Aguas abajo de la malla 1, la velocidad se reduce de 2.60 a 1.80 m/s, equivalente a una disminución de 0.80 m/s o 30.77 %. En P3, después de la malla 2, el valor disminuye de 2.80 a 1.60 m/s, con una reducción de 1.20 m/s y 42.86 %. La mayor atenuación registrada en P3 respecto de P2 indica que el efecto de la segunda estructura y de las modificaciones acumuladas aguas arriba produce una disminución adicional de la movilidad del flujo. No obstante, las

velocidades residuales de 1.80 y 1.60 m/s muestran que el flujo mantiene capacidad de tránsito entre las estructuras, por lo que la eficiencia no debe interpretarse como una detención completa.

En P4, correspondiente a la salida del cuenco inferior y la entrada urbana, la velocidad máxima disminuye de 1.20 a 0.20 m/s. La reducción de 1.00 m/s representa una atenuación del 83.33 %, segunda en magnitud relativa después de P1. En conjunto, los resultados muestran reducciones de velocidad en los cuatro puntos de control, aunque con magnitudes diferentes según la ubicación y la función de cada estructura

**Tabla 4.5**

*Reducción de velocidad por punto o sección de control*

| Punto / sección | Ubicación | v pre (m/s) | v post (m/s) | Δv (m/s) | Reducción (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **P1** | Salida del cuenco superior | 4.00 | 0.60 | 3.40 | 85.00% |
| **P2** | Aguas abajo de malla 1 | 2.60 | 1.80 | 0.80 | 30.77% |
| **P3** | Aguas abajo de malla 2 | 2.80 | 1.60 | 1.20 | 42.86% |
| **P4** | Salida del cuenco inferior/Entrada urbana | 1.20 | 0.20 | 1.00 | 83.33% |

*Nota. $\Delta v = v_{pre,max} - v_{post,max}$. Reducción (%) = $\Delta v / v_{pre,max} \times 100$. Los valores corresponden a velocidades máximas extraídas en los puntos o secciones de control definidos para la comparación entre escenarios.*

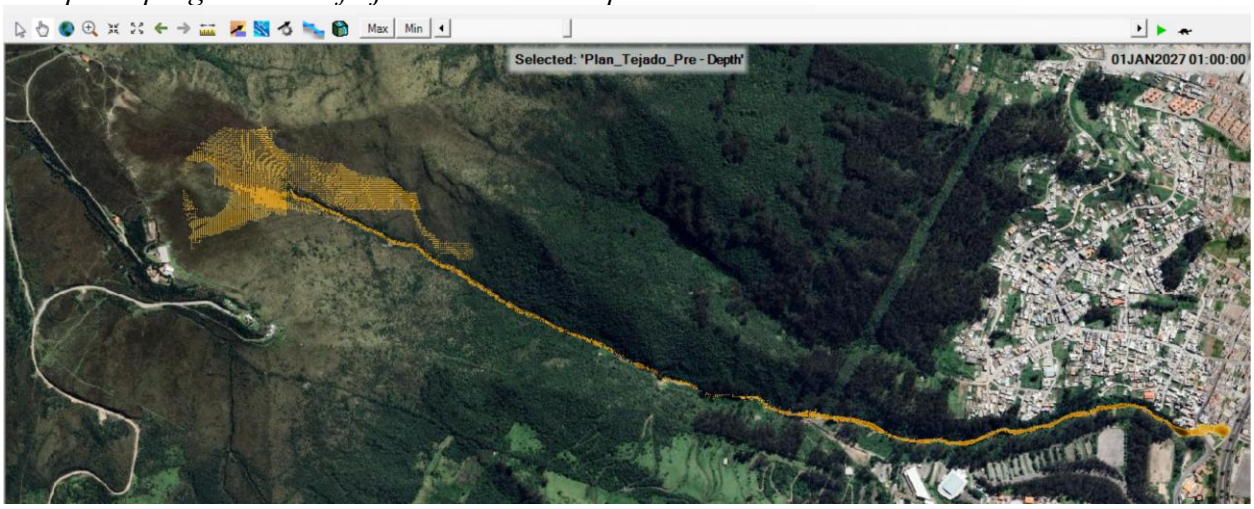
## 4.5 Tiempo de progresión del flujo

El tiempo de progresión se analizó a partir de la evolución temporal de los resultados de profundidad obtenidos en HEC-RAS 2D y de cuatro puntos de control distribuidos a lo largo del cauce. Este parámetro permitió identificar el momento de paso del frente del flujo y cuantificar el efecto acumulado de las obras de mitigación sobre su propagación.

En el escenario preobras, representado en la **Figura 4.7**, el flujo alcanza la entrada urbana aproximadamente 60 min después del inicio de la simulación. La distribución espacial muestra una propagación continua a lo largo del cauce, con escasa interrupción hasta el tramo de salida.

**Figura 4.7**

*Tiempo de progresión del flujo en el escenario preobras*

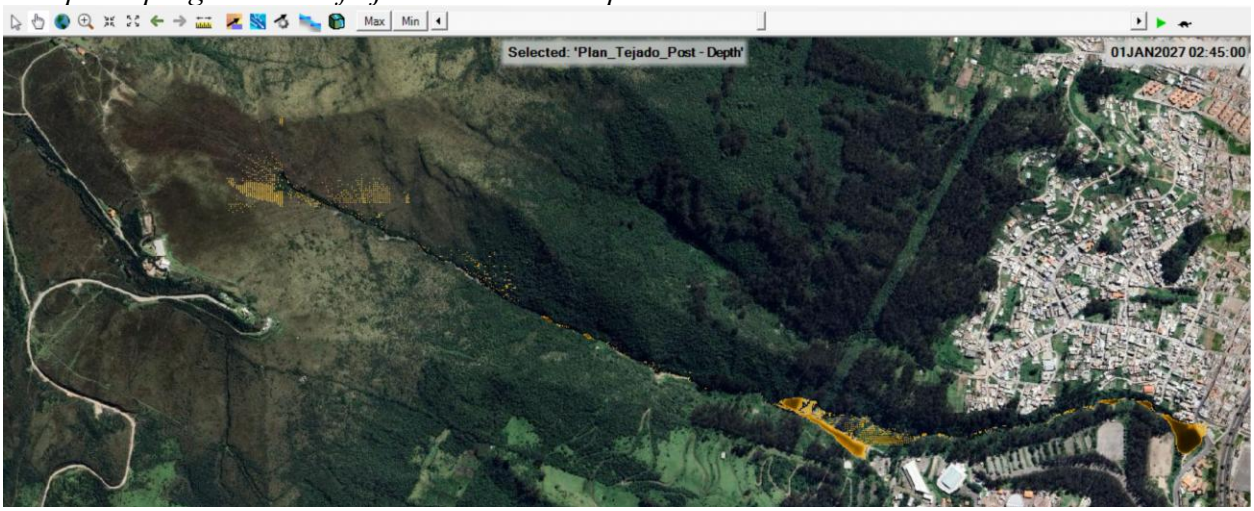



*Nota. Resultado temporal de HEC-RAS 2D para el escenario preobras, muestra el tiempo de ingreso del flujo al área urbana.*

La **Figura 4.8** evidencia una modificación del patrón temporal en el escenario postobras. El flujo alcanza la entrada urbana a los 165 min, equivalentes a 2 h 45 min desde el inicio de la simulación. En comparación con el escenario preobras, se observan acumulaciones localizadas y una propagación espacialmente discontinua, asociadas con la retención temporal del volumen dentro de los cuencos y con la reducción de la velocidad de tránsito en las estructuras de control. La presencia de flujo retenido en la zona superior y en el cuenco inferior indica que las obras redistribuyen temporalmente la descarga y disminuyen la velocidad con la que el flujo principal avanza hacia la zona urbana.

**Figura 4.8**

*Tiempo de progresión del flujo en el escenario posobras*




*Nota. Resultado temporal de HEC-RAS 2D para el escenario posobras, muestra el tiempo de ingreso del flujo al área urbana.*

Los resultados cuantitativos de la **Tabla 4.6** muestran que el efecto de las obras aumenta progresivamente en dirección aguas abajo. En P1, ubicado en la salida del cuenco superior, el tiempo de llegada se incrementa de 50 a 60 min, lo que representa un retardo de 10 min y un aumento relativo del 20.00 %. Aguas abajo de la malla 1, el tiempo pasa de 55 a 75 min, con un retardo de 20 min y una variación del 36.36 %. En P3, después de la malla 2, el incremento alcanza 25 min, equivalente al 45.45 % respecto del escenario preobras. Lo que representa un retardo acumulado de 105 minutos en la entrada urbana para el escenario posobras.

**Tabla 4.6**

*Tiempo de llegada en puntos de control*

| Punto / sección | Ubicación | t pre (min) | t post (min) | Δt (min) | Cambio (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **P1** | Salida del cuenco superior | 50 | 60 | 10 | 16.67% |
| **P2** | Aguas abajo de malla 1 | 55 | 75 | 20 | 26.67% |
| **P3** | Aguas abajo de malla 2 | 55 | 80 | 25 | 31.25% |
| **P4** | Salida del cuenco inferior Entrada urbana | 60 | 165 | 105 | 63.64% |

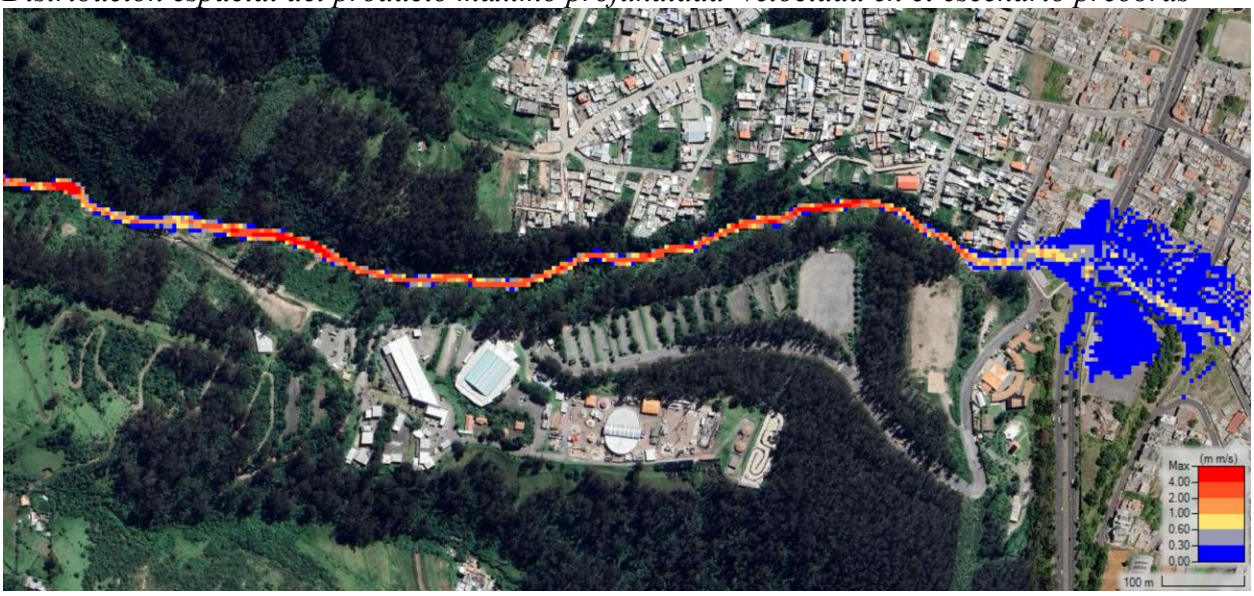
*Nota. $\Delta t = t_post - t_pre$. Cambio (%) = $\Delta t / t_post \times 100$; por tanto, el porcentaje expresa la proporción del tiempo posobras asociada al retardo respecto del escenario preobras.*

## 4.6 Mapa de Amenaza Hidráulica

La distribución correspondiente al escenario preobras se presenta en la **Figura 4.9**. A lo largo del cauce predominan valores de DxV superiores a 0.60 m²/s, representados por tonalidades amarillas, naranjas y rojas, lo que evidencia una propagación concentrada con condiciones hidrodinámicas elevadas. En el tramo de transición hacia la entrada urbana se obtuvo valores entre 0.60 a 1.00 m²/s, que corresponden al intervalo H3, por lo que es inseguro para vehículos y personas. Aunque se obtuvo un valor puntual de 1.02 m²/s, este resultado se ubica dentro del intervalo compatible con H5.

**Figura 4.9**

*Distribución espacial del producto máximo profundidad–velocidad en el escenario preobras*



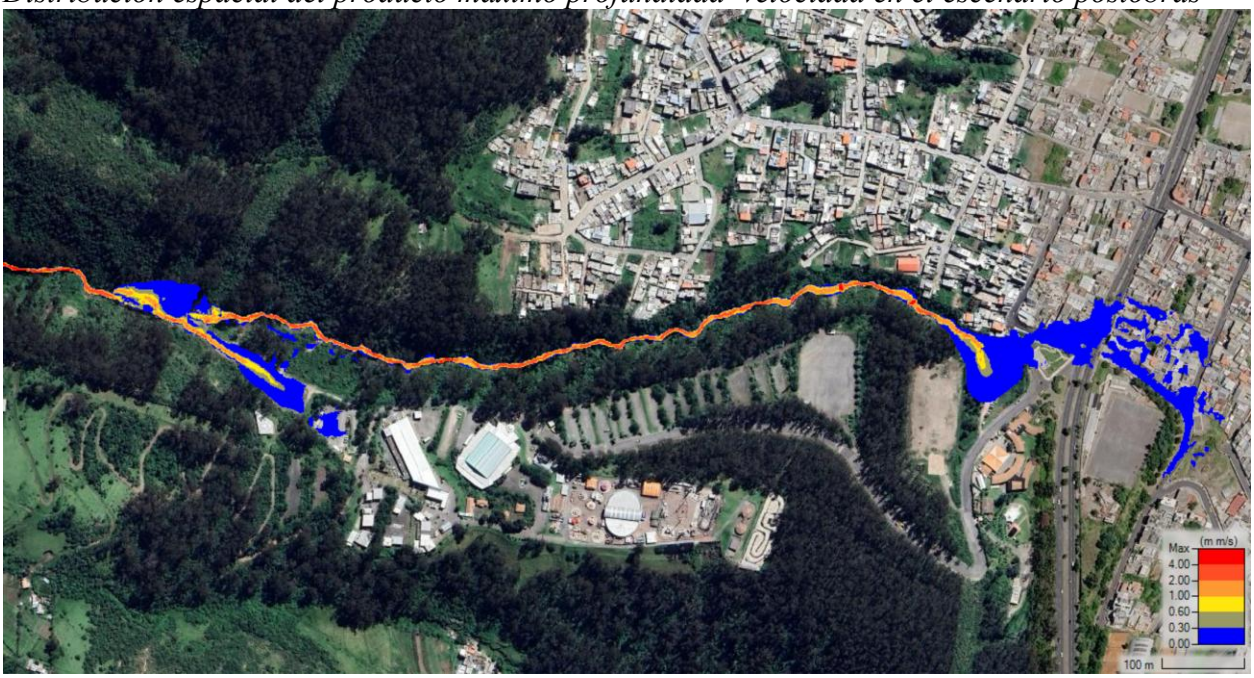

*Nota. Elaboración propia a partir de resultados de HEC-RAS 2D.*

En el escenario posobras, mostrado en la **Figura 4.10**, se observa una ampliación de las superficies con valores de DxV menores o iguales a 0.30 m²/s tanto en las zonas de almacenamiento como en la zona urbana evaluada. En el punto de control próximo a la entrada urbana, el producto disminuye de 1.02 m²/s en el escenario preobras a 0.10 m²/s en el escenario posobras. El primer valor se ubica por encima del límite de la categoría H5, mientras que el

segundo corresponde a la categoría H1. Bajo el criterio DxV adoptado, el escenario posobras representa una condición de amenaza baja en ese punto de control. Mostrando una reducción significativa del potencial de afectación para peatones y vehículos respecto del escenario preobras.

**Figura 4.10**

*Distribución espacial del producto máximo profundidad–velocidad en el escenario postobras*




*Nota. Elaboración propia a partir de resultados de HEC-RAS 2D.*

# CAPÍTULO 5: Conclusiones y recomendaciones

## 5.1 Conclusiones

- Bajo los parámetros y supuestos adoptados, correspondientes al hidrograma de entrada, la rugosidad de Manning, la concentración volumétrica de sólidos, la formulación reológica no newtoniana y las condiciones de borde utilizadas en HEC-RAS 2D, la comparación entre los escenarios preobras 2024 y posobras 2027 indica que las obras de control proyectadas modifican favorablemente el comportamiento hidrodinámico del flujo de detritos en la quebrada El Tejado. Su funcionamiento conjunto favorece la retención del material en las zonas previstas, disminuye la velocidad y la amenaza hidráulica aguas abajo, y retrasa la progresión del flujo hacia el área urbana. Dentro de las condiciones simuladas, las intervenciones analizadas constituyen una medida estructural relevante para reducir la amenaza física. Desde la perspectiva de la ingeniería civil, este resultado respalda la aplicación de sistemas escalonados de mitigación en quebradas urbanas.

- La integración de los levantamientos topográficos, los registros pluviométricos, las características del depósito del evento de 2022, las investigaciones geotécnicas y las especificaciones de las obras proyectadas permitió definir la geometría del cauce, las zonas de acumulación, las condiciones de resistencia al flujo y la ubicación de las estructuras de mitigación. El uso conjunto de esta información redujo la dependencia de valores exclusivamente teóricos y proporcionó una base técnica verificable para parametrizar y comparar los modelos numéricos.

- Con los parámetros hidrológicos, hidráulicos y reológicos definidos, se ejecutó la modelación bidimensional del flujo de detritos en HEC-RAS 2D para un escenario crítico plausible. El hidrograma de diseño alcanzó un caudal pico de 15.20 $m^3/s$, calculado a partir de

una precipitación de diseño de 83.01 mm, una precipitación efectiva de 44.51 mm y un número de curva CN = 84.17. La resistencia hidráulica y el comportamiento no newtoniano se representaron mediante un coeficiente de Manning de 0.148, una concentración volumétrica de sólidos Cv = 0.55 y la formulación cuadrática de O'Brien. Tanto el hidrograma de entrada como los parámetros hidráulicos y reológicos se mantuvieron constantes en los escenarios preobras y posobras. Este criterio redujo la influencia de variaciones en las condiciones de entrada y permitió atribuir las diferencias obtenidas principalmente a los cambios topográficos y a las estructuras de mitigación incorporadas en el escenario posobras.

- El álgebra de mapas y el análisis de los puntos de control permitieron cuantificar los cambios espaciales y temporales de la amenaza entre ambos escenarios. En la condición posobras, la acumulación del flujo se concentró en los cuencos y sectores de retención, donde se obtuvieron calados máximos de 5.30 m en el cuenco superior, 7.00 m en la malla 1, 6.30 m en la malla 2 y 10.54 m en el cuenco inferior. Al mismo tiempo, se registraron reducciones de velocidad de hasta 85.00% y en la entrada urbana se redujeron de 1.20 a 0.20 m/s, equivalente a 83.33%. En este punto, el DxV pasó de 1.02 a 0.10 $m^2/s$, lo que equivale a una reducción de 90.20% y a un cambio del nivel de amenaza H5 a H1. El tiempo de llegada también aumentó de 60 a 165 minutos, con un retraso de 105 minutos. Estos resultados indican que la reducción de la amenaza no depende únicamente de una disminución del calado, sino del efecto conjunto de la retención, la atenuación de la velocidad, la reducción del DxV y el aumento del tiempo disponible antes del ingreso del flujo al entorno urbano.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar ensayos reológicos y sedimentológicos con muestras representativas de la quebrada El Tejado para verificar experimentalmente la concentración volumétrica de sólidos (Cv), el tamaño representativo de partícula, la concentración volumétrica máxima, el esfuerzo de cedencia y la viscosidad dinámica de la mezcla. La caracterización de la rugosidad también debería complementarse con levantamientos de campo que permitan revisar el coeficiente de Manning adoptado. Con esta información se reduciría la incertidumbre de los parámetros de entrada y se fortalecería la representatividad física del modelo no newtoniano.
- El dominio de modelación debería ampliarse hacia la zona urbana históricamente afectada e incorporar el eje La Comuna–La Gasca–Santa Clara–La Mariscal. En esta extensión será necesario representar con suficiente detalle las calles, muros, viviendas, colectores, alcantarillas, puentes, cambios de pendiente, intersecciones viales y zonas potenciales de acumulación. La inclusión de estos elementos es relevante porque pueden generar obstrucciones, desvíos, confinamiento, aceleración o dispersión lateral del flujo.
- La calibración y validación del modelo numérico deberá considerar la ampliación del dominio computacional y la reconstrucción de los eventos ocurridos en 2022 y 2024. Durante la calibración, los resultados simulados deberán contrastarse con evidencias observadas, entre ellas la extensión alcanzada por el flujo, los espesores del depósito, las velocidades estimadas, los tiempos de propagación, los puntos de desbordamiento y las zonas de acumulación. Posteriormente, la validación con un evento independiente permitiría evaluar la capacidad predictiva del modelo y establecer intervalos razonables de incertidumbre para sus parámetros.
- También se recomienda desarrollar un esquema de modelación combinada que represente el material como flujo de detritos en el tramo natural comprendido hasta la captación o punto de

ingreso urbano y, posteriormente, como flujo hiperconcentrado en los sectores donde la mezcla experimente dilución, pérdida de la fracción gruesa o cambios significativos en su comportamiento reológico. La transición entre ambos regímenes deberá sustentarse en criterios físicos, sedimentológicos y volumétricos, y no definirse únicamente a partir de la ubicación espacial. Este enfoque permitiría representar con mayor realismo la transformación progresiva del flujo desde la quebrada de alta pendiente hasta el sistema urbano de drenaje.

- Finalmente, la evaluación de la amenaza deberá complementarse con análisis de exposición, vulnerabilidad y riesgo en la zona urbana. Para ello, se recomienda integrar los mapas de calado, velocidad, producto profundidad–velocidad y tiempos de llegada con la distribución de la población, las viviendas, la infraestructura crítica, las redes de servicios, las rutas de evacuación, los puntos seguros y los sectores con limitaciones de accesibilidad. Esta integración permitiría convertir los resultados hidráulicos en insumos aplicables a la planificación territorial, la gestión de emergencias y la reducción del riesgo.

# CAPÍTULO 6: Referencias bibliográficas

Bonomelli, R., Pilotti, M., & Farina, G. (2025). Use of simple analytical solutions in the calibration of shallow water equation debris flow models. Earth Surface Dynamics, 13, 665-681. https://doi.org/10.5194/esurf-13-665-2025

Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill Interamericana.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.

Córdova Gutiérrez, D., Paredes Méndez, D., & Alulema del Salto, R. A. (2017). Determinación del parámetro hidrológico número de curva en la cuenca de la quebrada El Batán, usando sistemas de información geográfica y percepción remota. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 2(8), 29-39.

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. (2024). Memoria técnica-diseño geotécnico. Quebrada El Tejado: Construcción de presa de amortiguamiento en la zona de captación. EPMAPS.

Escobar-González, D., Singaña-Chasi, M. S., González-Vergara, J., Erazo, B., Zambrano, M., Acosta, D., Villacís, M., Guallpa, M., Lahuatte, B., & Peluffo-Ordóñez, D. H. (2022). Intensity-duration-frequency curve for extreme rainfall event characterization, in the high tropical Andes. Water, 14(19), 2998. https://doi.org/10.3390/w14192998

Estrella, G. (2024). Estudio geológico-geotécnico quebrada El Tejado: Informe de investigaciones, trabajos de campo y laboratorio. EPMAPS.

Gibson, S., Moura, L. Z., Ackerman, C., Ortman, N., Amorim, R., Floyd, I., Eom, M., Creech, C., & Sánchez, A. (2022). Prototype scale evaluation of non-Newtonian algorithms in HEC-RAS: Mud and debris flow case studies of Santa Barbara and Brumadinho. Geosciences, 12(3), 134. https://doi.org/10.3390/geosciences12030134

Kostynick, R., Matinpour, H., Pradeep, S., Haber, S., Sauret, A., Meiburg, E., Dunne, T., Arratia, P., & Jerolmack, D. (2022). Rheology of debris flow materials is controlled by the distance from jamming. Proceedings of the National Academy of Sciences, 119(44), e2209109119. https://doi.org/10.1073/pnas.2209109119

Lima, D. C., Pulcha, A. H., Llamoca, M. T., Aquise, G. Y. N., & Vigil, A. J. E. (2025). Hydraulic modeling of Newtonian and non-Newtonian debris flows in alluvial fans: A case study in the Peruvian Andes. Water, 17(14), 2150. https://doi.org/10.3390/w17142150

Natural Resources Conservation Service. (2019). SCS dimensionless unit hydrograph and SCS triangular unit hydrograph. NRCS.

Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrología en la ingeniería (2.ª ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. La ficha bibliográfica registra la segunda edición, publicada en 1999.

OpenAI. (2026). ChatGPT (GPT-5.5 Thinking) [Modelo de lenguaje de gran escala]. https://chatgpt.com/

Orosco-Tacuri, M. K., Reyes-Zambrano, J. L., Chavarría-Párraga, J. E., & Alarcón-Loor, J. R. (2024). Modelación hidrológica e hidráulica de la quebrada El Tejado para el análisis de zonas de inundación en la ciudad de Quito en 2023. INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación, 7(14), 300-322. https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0219

Peker, İ. B., Gülbaz, S., Demir, V., Orhan, O., & Beden, N. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in flood modeling and flood hazard mapping. Sustainability, 16(3), 1226. https://doi.org/10.3390/su16031226

Rondal Viscaíno, N. A. (2022). Caracterización del depósito del flujo de lodo de la quebrada El Tejado, Quito, 31 de enero del 2022 [Trabajo de titulación, Universidad Central del Ecuador].

Smith, G. P., Davey, E. K., & Cox, R. J. (2014). Flood hazard (WRL Technical Report 2014/07). Water Research Laboratory, University of New South Wales. https://www.aidr.org.au/media/2334/wrl-flood-hazard-techinical-report-september-2014.pdf

Témez, J. R. (1978). Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Troncoso, L., Torrijo, F. J., Ibadango, E., Pilatasig, L., Alonso-Pandavenes, O., Mateus, A., Solano, S., Cañar, R., Rondal, N., & Viteri, F. (2024). Analysis of the impact area of the 2022 El Tejado Ravine mudflow (Quito,

Ecuador) from the sedimentological and the published multimedia documents approach. GeoHazards, 5(3), 596-620. https://doi.org/10.3390/geohazards5030031

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2023). HEC-RAS Mud and Debris Flow: User's Manual and Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center.

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2026). HEC-RAS downloads. U.S. Army Corps of Engineers. Recuperado el 16 de junio de 2026, de https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx

Zegers, G., Mendoza, P. A., Garces, A., & Montserrat, S. (2020). Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling. Natural Hazards and Earth System Sciences, 20, 1919-1930. https://doi.org/10.5194/nhess-20-1919-2020