

Caracterización del peligro de un flujo de detritos durante el Ciclón Yaku-2023 en la quebrada Cusipata, Perú

Carlos Enrique Millán Arancibia
Waldo Sven Lavado Casimiro



Dirección de Hidrología
Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
Diciembre 2024



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BICENTENARIO
DEL PERÚ
2021 - 2024





Caracterización del peligro de un flujo de detritos durante el Ciclón Yaku-2023 en la quebrada Cusipata, Perú

**Carlos Enrique Millán Arancibia
Waldo Sven Lavado Casimiro**

Diciembre 2024

Caracterización del peligro de un flujo de detritos durante el Ciclón Yaku-2023 en la quebrada Cusipata, Perú

Presidente Ejecutivo

MSc. Gabriela Teófila Rosas Benancio

Director de Hidrología

Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro

Autores:

Ing. M.Sc. Carlos Enrique Millán Arancibia

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro

Diseño y Diagramación por:

Carlos Enrique Millán Arancibia

Primera Edición: diciembre de 2024

Depósito Legal N° 2024- 13913

Estudio disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3820>

Derechos Reservados

© Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Jr. Cahuide 785. Jesús María, Lima – Perú. Teléfono (01) 614-1414

www.gob.pe/senamhi

Todos los derechos reservados

Prohibida la reproducción de este estudio por cualquier medio, total o parcialmente sin permiso expreso.

Referencia:

Millán, C. & Lavado, W. (2024). Caracterización del peligro de un flujo de detritos durante el Ciclón Yaku-2023 en la quebrada Cusipata, Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). <https://hdl.handle.net/20.500.12542/3820>

Índice

1. Introducción	1
2. Area de estudio y ciclón Yaku	3
2.1. Area de estudio	3
2.2. Ciclón Yaku	3
3. Datos y métodos	4
3.1. Datos	4
3.2. Análisis hidrológico	5
3.3. Dinámica de flujos de detritos	6
4. Resultados	7
4.1. Clasificación de tipos de flujos esdimento-agua	7
4.2. Lluvias desencadenantes	8
4.2.1. Umbral de lluvia local	8
4.3. Simulación de la respuesta hidrológica de la quebrada	9
4.4. Sensibilidad de las condiciones iniciales y calibración del modelo	10
4.5. Simulación del flujo de detrito	10
5. Discusiones	11
6. Conclusiones	13

Caracterización del peligro de un flujo de detritos durante el Ciclón Yaku-2023 en la quebrada Cusipata, Perú

1. Introducción

Los flujos de detritos (DF) son un peligro común, aunque significativo, en las regiones de montaña y en áreas donde las pendientes pronunciadas cortan sedimentos sueltos (e.g., Rickenmann and Zimmermann, 1993; Jakob and Hungr, 2005; Webb et al., 2008; Baum and Godt, 2010; Iverson, 2014; Gorr et al., 2022; An et al., 2022; Thouret et al., 2020). Según la clasificación actualizada de Varnes, los DF se definen como flujos muy rápidos a extremadamente rápidos de detritos saturados que ocurren en canales empinados con un arrastre significativo de material y agua (Hungr et al., 2014). Los DF son flujos de masa saturados de agua destructivos, condicionados principalmente por 3 factores: la presencia de sustratos susceptibles a la erosión que proporcionen una gran cantidad de material sedimentario, pendientes de canal pronunciadas superiores al 25-30% dependiendo del ángulo de fricción del material, y grandes volúmenes de agua que desencadenen estos fenómenos (Thouret et al., 2020; Wendeler, 2016). Los DF representan una amenaza directa a la vida humana (Jakob and Hungr, 2005; Dowling and Santi, 2014; Chae et al., 2017; Segoni et al., 2018), así como a la infraestructura río abajo, incluidas casas, carreteras y puentes (Jakob and Hungr, 2005; Petley, 2012; Kean et al., 2019). Adicionalmente, el crecimiento de la interfaz urbana en regiones vulnerables y expuestas, incluido el oeste de Lima en Perú (Moya et al., 2024; Parés-Ramos et al., 2013), ha acentuado las amenazas que plantean los DF. Dadas las numerosas amenazas que plantean los DF, existe una necesidad continua de métodos para delinear las zonas de riesgo potenciales asociadas con la inundación por DF. Esto es altamente importante en paisajes recientemente perturbados por flujos de detritos donde la ocurrencia de otro DF podría tener un aumento abrupto en su impacto, ya que las medidas de protección podrían estar colapsadas, por lo que requiere una evaluación rápida del riesgo post-evento para brindar información confiable para los tomadores de decisiones. La ocurrencia de un DF perturba el paisaje de diferentes formas debido a los procesos geomorfológicos inducidos por los DF. Los DF alteran principalmente el lecho del cauce, la morfología de los bancos, las redes de drenaje y los conos aluviales (Brenna et al., 2021; Chen et al., 2022; Savi et al., 2020; Brenna et al., 2023; Bufe et al., 2019; Davidson et al., 2024). Los cambios geomorfológicos que aumentan los peligros dentro de los canales son cuatro: (i) el empinamiento del gradiente, el retroceso de la pared hacia la cabecera y la denudación en el área de inicio empinada; (ii) la progradación del canal; (iii) el ensanchamiento del canal debido al entierro de tierra o el encajonamiento debido a la erosión, y (iv) la mayor curvatura del canal y la sinuosidad del río (Thouret et al., 2020).

Para identificar las áreas potencialmente afectadas y la gravedad de los impactos, es deseable tener la capacidad de simular la ruta de flujo de los escombros (Lin et al., 2005). A partir de esto, la primera consideración en el análisis de DF es la predicción

de la propagación cuesta abajo, o el alcance de la corrida (Cannon, 1989; Han et al., 2016), que se puede resolver utilizando simulaciones numéricas (Han et al., 2017).

Los flujos de alta descarga de agua y sedimentos que ocurren de forma natural en canales abiertos varían a lo largo de un amplio y continuo espectro de concentración de sedimentos y distribución del tamaño de partículas (Pierson, 2005). Aunque la discusión de la nomenclatura de los tipos de eventos aún continúa (Brenna et al., 2020, 2021, 2023; ?; Church and Jakob, 2020), en este estudio consideramos que la evolución de la mezcla fluida de sedimentos y agua incluye tres fases en términos de la concentración de sedimentos, la distribución del tamaño de grano y la densidad aparente: flujo fluvial (también llamados inundaciones de agua, flujos fluviales o flujos de agua clara), flujo hiperconcentrado (también llamados inundación de detritos, inundación de lodos) y flujo de detritos totalmente desarrollados (también llamados flujo de detritos, flujo de escombros o flujo de lodos) (Shen et al., 2018; Brenna et al., 2023; Jakob and Hungr, 2005; Vallance and Iverson, 2015; ?). La transición de la mezcla entre cualquiera de estas fases ocurre de manera espacial y temporal durante todo el proceso de lluvia (Shen et al., 2018; Wilford et al., 2004).

Los flujos fluviales son flujos líquidos con concentración de sedimentos volumétrica (C_V) menores a 20%. Los flujos hiperconcentrados son flujos bifásicos intermedios entre los flujos fluviales y los flujos de detritos, cuyo C_V varía entre el 20 y 45% (40 y 80% en peso), con densidades que varían entre 1300 y 1800 kg/m³. Los flujos de detritos comprenden una fase sólida con C_V mayores a 45% (>80% en peso), completamente mezclada con agua (Shen et al., 2018). El componente sólido incluye principalmente grava y cantos rodados en proporciones bajas de arena, limo y arcilla, con un umbral de 3% en peso de suelos finos (limo y arcilla) para definir entre DF no cohesivos y cohesivos. La densidad de un DF totalmente desarrollado varía entre 1800 y 2400 kg/m³ (Thouret et al., 2020; Hirschberg et al., 2021). Para clasificar estos tipos flujos se han desarrollado diferentes métodos, e.g., desde un enfoque morfométrico (Wilford et al., 2004; Marchi et al., 1993; Bertrand et al., 2013), basado en la concentración de sedimentos y la morfología de los depósitos Du et al. (2023), y basado en las condiciones hidrodinámicas y disponibilidad de sedimentos a partir de técnicas de machine learning (Du et al., 2023). En general, en este estudio nos referiremos a estos flujos de agua-sedimentos como flujos de detritos.

Los DF son desencadenados principalmente por las lluvias intensas y son sensibles al cambio climático (Millán-Arancibia and Lavado-Casimiro, 2022; Prenner et al., 2018; Segoni et al., 2014). A medida que las tormentas extremas se vuelven más frecuentes, hacer frente a los DF inducidos por lluvia se vuelve más crítico en las regiones propensas a los DF (Shen et al., 2018). En 2023, el ciclón Yaku azotó las zonas del noreste de Sudamérica, principalmente Perú y algunas partes de Ecuador, superando máximos históricos en diferentes estaciones pluviométricas respecto a la serie mensual (SENAMHI, 2023b, a, c). Se produjeron graves afectaciones en varias regiones de Perú, incluyendo la cuenca media-baja del río Rímac en el centro costero de Perú. Una de las formas más usadas para el estudio de las lluvias como factor desencadenante de los DF es la determinación de umbrales de lluvia (Guzzetti et al., 2007; Segoni et al., 2018; Tang et al., 2019; Berti et al., 2020; Millán-Arancibia and Lavado-Casimiro, 2022). De los diferentes métodos para definir los umbrales de lluvia, los umbrales definidos bajo un enfoque empírico-estadístico siguen siendo los que mejor representan la ocurrencia de DF a escala local (Hirschberg et al., 2021).

El objetivo de este estudio es analizar y simular un evento de flujo de alta descarga de agua y sedimentos en la quebrada Cusipata durante el ciclón Yaku, usando un enfoque de dos pasos: simulación de la escorrentía que desencadena el DF y

la simulación del DF para evaluar las áreas potencialmente afectadas por la ocurrencia de un DF. Estos resultados podrían proporcionar información crucial para una evaluación adicional de riesgos y la toma de decisiones en la mitigación de peligros. Adicionalmente, los resultados de la investigación proporcionan información de un umbral de lluvia local que puede ser usado en un sistema de alerta temprana para predecir la ocurrencia de DF en la zona de estudio.

2. Area de estudio y ciclón Yaku

2.1. Area de estudio

La quebrada Cusipata es una pequeña cuenca ubicada en las estribaciones occidentales de los Andes, dentro de la parte media baja de la cuenca del río Rímac en Perú. Localizada en el distrito de Chaclacayo, provincia y departamento de Lima. La quebrada Cusipata es una quebrada seca, que tiene como dren natural al río Rímac en la vertiente del Pacífico, región costera del Perú (Fig. 1), la cual se encuentra en el franco occidental del país. La quebrada tiene un clima de tipo árido y templado con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año, con precipitaciones anuales que varían entre 0 mm y 5 mm (SENAMHI, 2021). La cuenca tiene un área de 8.1 km², se extiende entre los 663-1703 m a.s.l. con una pendiente media de 13.87%. El perfil longitudinal de la quebrada presenta un alto gradiente potencial, con un desnivel de 1028 metros a lo largo de una longitud total de 7.45 km (Fig. 2). El Índice de Melton a la salida de la cuenca es de 0.36 y aguas arriba la zona poblada es de 0.35, por lo que desde un enfoque de vista morfométrico (Marchi et al., 1993; Bertrand et al., 2013; Wilford et al., 2004; Brenna et al., 2021), en la quebrada se esperan flujos de tipo hiperconcentrado, lo cual va acorde a trabajos antecedentes en la zona (Asencios Astorayme, 2022).

2.2. Ciclón Yaku

En marzo de 2023, se formó un sistema ciclónico sobre el Pacífico oriental denominado ciclón Yaku por el SENAMHI. El ciclón Yaku azotó las zonas del noreste de Sudamérica, principalmente Perú y algunas partes de Ecuador. El ciclón Yaku favoreció el ingreso y acumulación de humedad generando lluvias extremas entre el 05 y el 15 de marzo, superando máximos históricos en diferentes estaciones pluviométricas, lo cual produjo graves afectaciones en varias regiones de Perú, incluyendo la cuenca media baja del río Rímac en el centro costero de Perú. Este evento coincidió con el inicio de El Niño Costero 2023, aunque sus teleconexiones aún no han sido estudiadas a profundidad. El ciclón Yaku fue catalogado por el SENAMHI-Perú como un ciclón de características tropicales no organizadas (SENAMHI, 2023b, a, c). Las lluvias en la cuenca media baja del río Rímac (incluyendo la quebrada Cusipata) se presentaron entre el 10 y el 15 de marzo, generando DFs a su paso. La lluvia acumulada en la estación Cusipata fue de 21.8 mm. La mayoría de los DF son provocados por eventos con precipitaciones acumuladas superiores a 5 mm (Millán-Arancibia and Lavado-Casimiro, 2022), muy similar a pequeñas cuencas en regiones alpinas (Hirschberg et al., 2021).

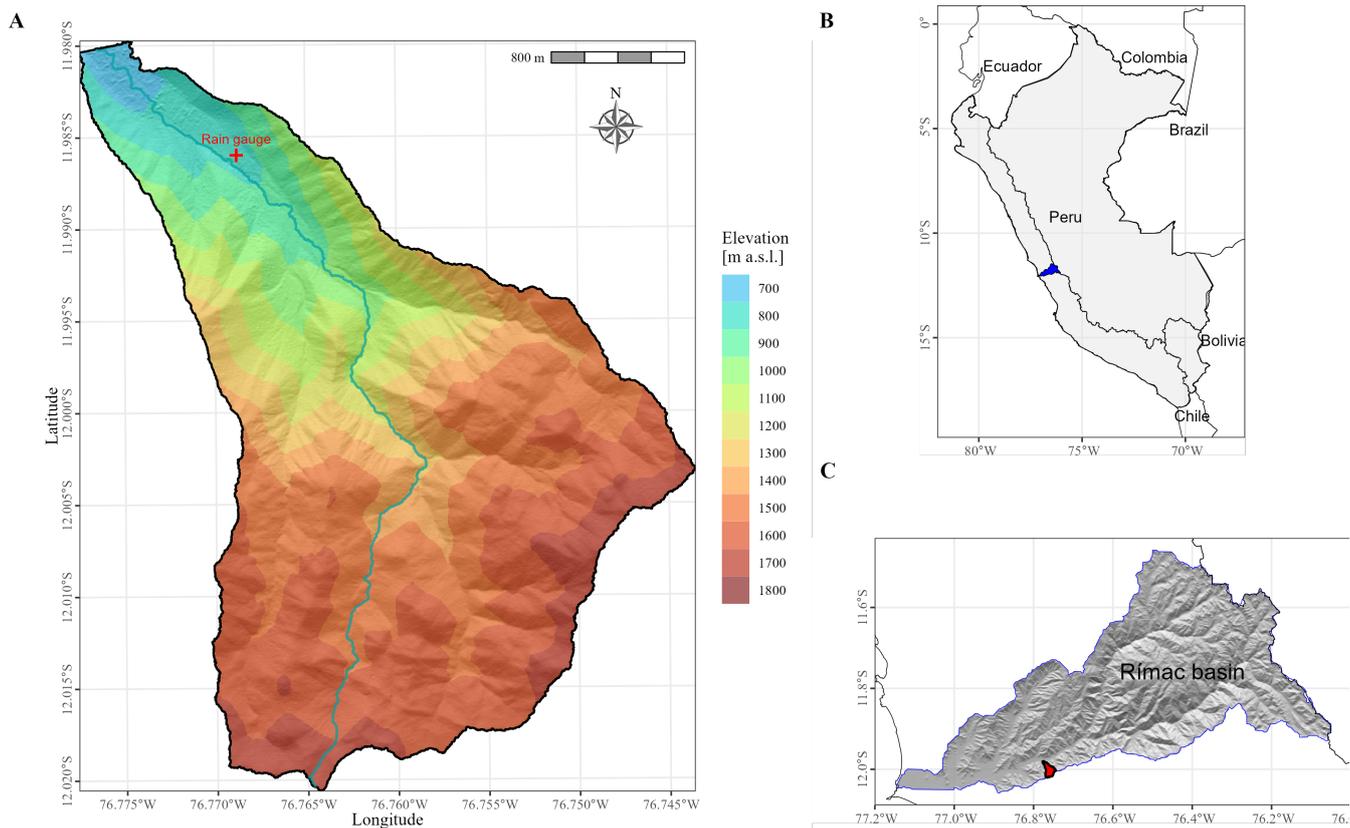


Figura 1. a) Mapa topográfico de la Quebrada Cusipata con la estación pluviométrica (marca roja) y el cauce principal (línea verde), b) Mapa de referencia de la ubicación de la cuenca Rímac, de fondo se representa también las vertiente del Pacífico (Oeste), Atlántico (Este) y Titicaca (sureste), y c) Mapa de referencia de la ubicación de la Quebrada Cusipata con respecto a la cuenca del río Rímac.

3. Datos y métodos

3.1. Datos

La información de precipitaciones fue proporcionada por el SENAMHI-Perú. En 2022, el SENAMHI instaló la estación pluviométrica Cusipata con fines de investigación para la caracterización de lluvias extremas (latitud -11.98599° , longitud -76.76879° , altitud 752 m s.n.m.). Este pluviómetro forma parte de una red de estaciones operadas por el SENAMHI, que han sido utilizadas para apoyar sistemas de alerta temprana (EWS) y monitoreo de lluvias extremas en la región. El pluviómetro es del tipo de cubeta basculante, con una resolución de 0.2 mm y una frecuencia de muestreo de 10 minutos.

La información topográfica se obtuvo a partir de dos modelos digitales de elevación (DEM) generados antes y después del ciclón Yaku. Estos DEMs fueron producidos por el SENAMHI mediante fotogrametría con un dron Wingtra, con resoluciones de 0.07 m y 0.23 m, respectivamente. Además, se dispone de datos, proporcionados por SENAMHI, sobre las propiedades

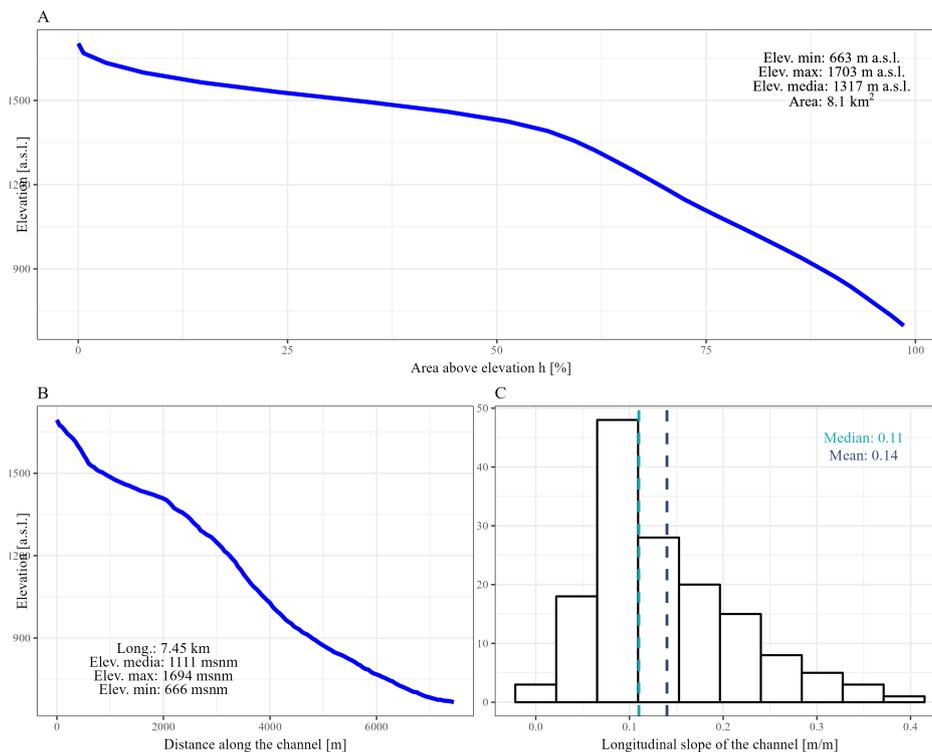


Figura 2. a) Curva hipsometrica de la Cuenca Cusipata, b) Perfil longitudinal del cauce principal, y c) Histograma de pendientes del cauce principal.

mecánicas de los depósitos de sedimentos en ocho puntos de la quebrada. Estas muestras incluyen análisis de granulometría de partículas gruesas y finas, contenido de humedad, límites líquido y plástico, clasificación de suelos (SUCS), densidad natural, gravedad específica de sólidos, ángulo de fricción, cohesión y permeabilidad.

En el periodo de lluvias de enero a marzo de 2023 (90 días), se encontraron 15 días con lluvias con una tasa mayor a 0.2 mm, mientras que solo 6 días reportaron por encima de 1 mm. En febrero se presentó uno de los eventos con mayor intensidad de la temporada el día 19 de febrero de 2023 con una tasa de 3.2 mm en 2 horas. En marzo, producto del ciclón Yaku, se presentaron una serie de días lluviosos comenzando el viernes 10 de marzo hasta el miércoles 15 de marzo, con el pico de lluvia en la tarde del 14 de marzo con una tasa de 13.4 mm que generó un DF en la quebrada Cusipata. Ver Tabla 1.

3.2. Análisis hidrológico

El análisis hidrológico del evento Yaku, se realizó mediante un modelamiento hidrológico y se utilizó la aplicación del Proyecto Reos denominado Lekan (Cloarec, 2023). Lekan tiene como objetivo ofrecer un software que ayude en estudios hidrológicos e hidráulicos para mapear y predecir inundaciones, dimensionar estructuras hidráulicas o cualquier otra tarea relacionada con los flujos naturales superficiales. Lekan cuenta con diferentes herramientas para el modelamiento meteorológico,

Cuadro 1. Eventos de lluvia a lo largo del periodo de lluvias 2023 (enero-abril)

Fecha	Lluvia total (mm)	Duración (hrs)
19/02/2023	3.2	2
23/02/2023	1	1
10/03/2023	2	7
12/03/2023	3.2	5
13/03/2023	2.2	3
14/03/2023	13.4	9

hidrológico y propagación del flujo en mediante un esquema hidráulico. La simulación de la respuesta hidrológica por eventos de la quebrada para la generación de escorrentía se realizó mediante un modelo hidrológico semidistribuido. Para representar el proceso de infiltración se utilizó el modelo Green Ampt para separar la lluvia en infiltración y escorrentía, con la función de transferencia mediante el Hidrograma Unitario del SCS. Se optó por este esquema metodológico debido a su fácil y rápida implementación y ya que no requiere gran capacidad computacional, por lo que es de gran utilidad para acoplarse a EWS.

3.3. Dinámica de flujos de detritos

La dinámica de la propagación del flujo de detritos se simuló con el módulo debris-flow del software RAMMS (Bartelt et al., 2013). RAMMS DF ha sido ampliamente usado en investigaciones y aplicaciones prácticas (Könz et al., 2024; Frank et al., 2015) para modelar la dinámica del flujo y su recorrido o propagación sobre terrenos tridimensionales (Bartelt et al., 2013). RAMMS también ha sido usado en aplicaciones en Perú (Motschmann et al., 2020; Millán Arancibia and Chávarri Velarde, 2019). RAMMS resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) bidimensionales promediadas en profundidad y un modelo de fricción de fluido de Voellmy, donde la resistencia de fricción se divide en una fricción seca de tipo Coulomb μ (escalada con la profundidad del flujo) y una fricción viscosa-turbulenta ξ (escalada con la velocidad del flujo) (Bartelt et al., 2013; Christen et al., 2010). El módulo DF de RAMMS está diseñado para fenómenos de flujo que contienen partículas de rocas que se mueven rápidamente, donde el líquido intersticial es el lodo o barro.

La información espacial requerida por RAMMS, incluyendo los modelos digitales de elevación (DEM) previos al evento, la extensión del dominio de cálculo (Figura 1c) y otros datos de campo se obtuvieron del estudio conducido por Asencios Astorayme (2022). Para optimizar el tiempo de ejecución de la simulación y la estabilidad numérica, utilizamos una malla de resolución de 2 m. El hidrograma de entrada en el límite aguas arriba del dominio de simulación se aproximó a partir de un modelamiento hidrológico a partir de un pluviómetro instalado en la quebrada.

Este modelo utiliza datos de campo y asunciones iniciales de Asencios Astorayme (2022), a partir del cual se simuló y calibró un evento ocurrido durante el ciclón Yaku el 14 de marzo y ha demostrado ofrecer resultados razonables para poder utilizarse en diferentes escenarios futuros. Revisar Tabla 2.

Cuadro 2. Estudios antecedentes en Perú

Estudio	Región	Área (km ²)	Cauce (km)	Tipo de flujo	Características del flujo				Modelo	Consideraciones modelo	Resultados principales
					QL (m ³ /s)	Qmix (m ³ /s)	Tr	Cv			
Castillo N. et al., 2006	Quebrada Payhua	15.5	7	Flujos de lodo (IP = 7%)	34.3	50.44	100	0.22-0.35	FLO-2D (O'Brien et al., 1988)	Muestra: Aspen Pit1 Gs: 2.65 K 2285 n 0.17	VT = 1.1 MMC VL = 0.45 MMC Vs = 0.62 MMC
Asencios Astorayme, 2022	Quebrada Cusipata	6.83	3.2	Flujo hiperconcentrado	-	5.5 (0.8)	500	0.22	FLO-2D (O'Brien et al., 1988)	Muestra: - Gs: 2.671 K 2285 n 0.08	VL = 0.03 MMC Vs = 0.004 MMC Sy = 689.0 Tn/km ² h > 2 m Vf = >4 m/s

4. Resultados

4.1. Clasificación de tipos de flujos esdimento-agua

El análisis del riesgo por inundaciones de flujos sedimento-agua comenzó con el reconocimiento de los tipos de flujo que se presentan en la quebrada; para ello, se utilizó un enfoque morfométrico (Brenna et al., 2021), mediante la aplicación de diferentes métodos morfométricos de clasificación (Marchi et al., 1993; Bertrand et al., 2013; Wilford et al., 2004) para garantizar la robustez de la clasificación. Los resultados de esta clasificación muestran que la dinámica de transferencia sedimentaria en la quebrada es dominada por inundaciones de detritos lo cual es coherente con estudios previos en la zona. Solo se observa que el método de Bertrand et al. (2013) no cuenta con una clasificación intermedia entre flujos líquidos y flujos de detritos, por lo que se clasifica como un flujo de detritos totalmente desarrollado.

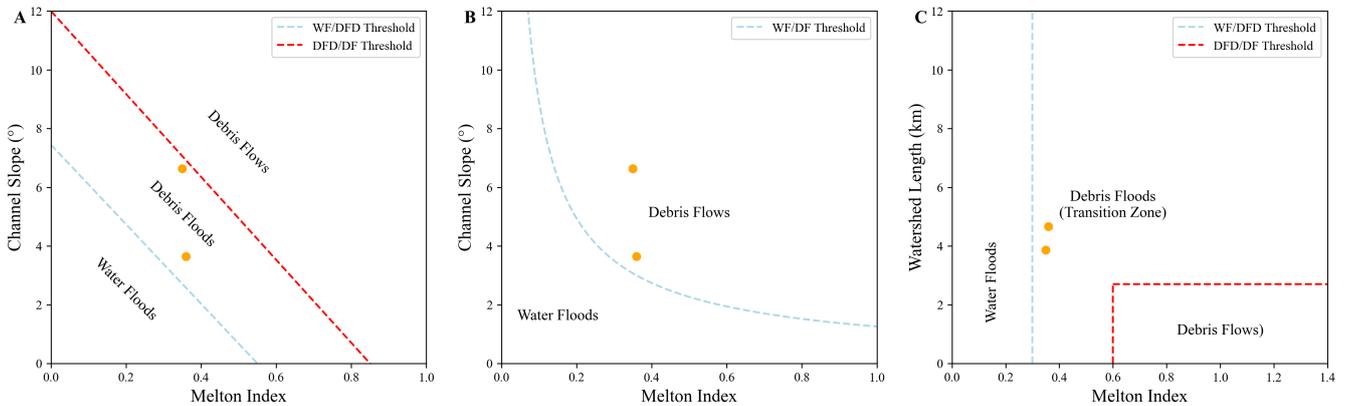


Figura 3. Umbrales del índice de Melton, la pendiente y la longitud de la cuenca mediante enfoques morfométricos de (a) Marchi et al. (1993), (b) Bertrand et al. (2013) y (c) Wilford et al. (2004) como medidas significativas para predecir los tipos de flujo de sedimento y agua que ocurren en la quebrada Cusipata en respuesta a eventos hidrometeorológicos de gran magnitud a la salida de la quebrada y antes del inicio de la zona urbana.

4.2. Lluvias desencadenantes

Las lluvias intensas son el factor principal que controla la actividad de flujo de detritos (Millán-Arancibia and Lavado-Casimiro, 2022; Dahlquist and West, 2019). Durante el ciclón Yaku se presentó una sucesión de lluvias en la quebrada Cusipata. La lluvia de mayor impacto se produjo el 14 de marzo, el primer periodo de la lluvia se presentó entre las 13:15-14:35 (duración de 1.4 horas) y un siguiente pulso de mayor intensidad se registró entre las 16:00 y 21:25 horas (duración de 5.4 horas), y duró aproximadamente 8 h desde el inicio de la lluvia, según los registros de la estación pluviométrica Cusipata. La lluvia acumulada observada en 8 estaciones pluviométricas de superficie osciló entre 13.4 y 22 mm. La lluvia acumulada en la quebrada Cusipata fue de 13.4 mm. La figura 4 ilustra la lluvia a paso horario observada en la quebrada Cusipata. En términos de intensidad, el valor máximo fue de $2.6 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ durante las 17:00 y las 18:00 horas LT, lo que representa el 18% de la lluvia acumulada. En conclusión, esta tormenta se puede caracterizar por su corta duración y su alta intensidad.

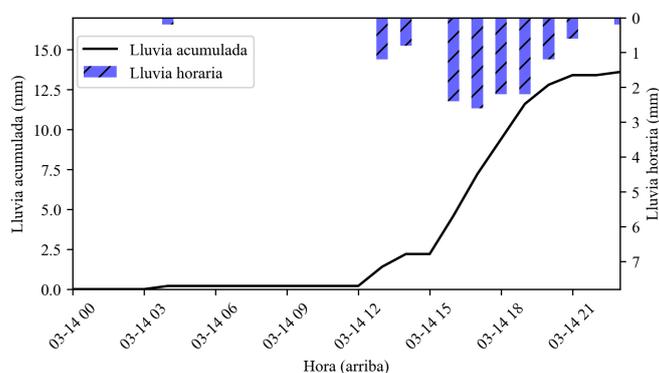


Figura 4. a) Evento de lluvia del 14 de marzo en la estación pluviométrica Cusipata.

4.2.1. Umbral de lluvia local

La estimación del umbral de lluvia local para la quebrada local, se realizó a partir de la información de la temporada de lluvias disponible de la estación Cusipata (21/12/2022 - 17/04/2023). El umbral de lluvia se definió siguiendo la ecuación $I = \alpha D^{-\beta}$ (Caine, 1980). Donde el parámetro de forma β se estimó mediante una regresión lineal de los eventos de lluvia desencadenantes de flujos y el parámetro de escalamiento α se estimó mediante una maximización del estadístico TSS, usando una optimización Elder-Mead (Gao and Han, 2012). El umbral definido es $I = 1,57D^{-0,047}$, con la duración D en horas y la tasa de intensidad I en mm/h. También se comparó el umbral propuesto en este estudio con umbrales para diferentes escenarios propuestos en otros estudios a diferentes escalas: global (Caine, 1980), regional (Millán-Arancibia and Lavado-Casimiro, 2022), local en una cuenca alpina (Hirschberg et al., 2021) (ver Fig. 5).

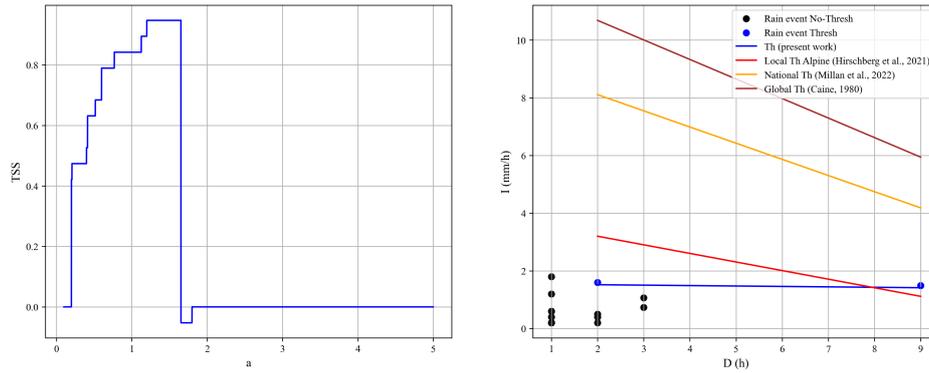


Figura 5. a) TSS en el proceso de optimización de α . b) Umbrales para la quebrada Cusipata.

4.3. Simulación de la respuesta hidrológica de la quebrada

La simulación de la respuesta hidrológica de la quebrada tuvo como inputs la lluvia horaria de la estación Cusipata (Fig. 6). Se observa que la lluvia de 0.2 mm de las 04:00 LT no ha generado escorrentía. El hidrograma representa los 2 pulsos de la tormenta que inició a la 13:00 LT. hasta pasada las 23:00 LT. El caudal pico se alcanzó a las 17:55 LT con un valor de 4.23 m³/s de flujo líquido. Para incluir los sedimentos se utilizó la concentración volumétrica de sedimentos CV de 0.22 calibrado por Ascencios Astorayme (2022) para la quebrada, llegando a un caudal mixto de 5.42 m³/s. Estos valores fueron ingresados al modelo de flujo de detritos.

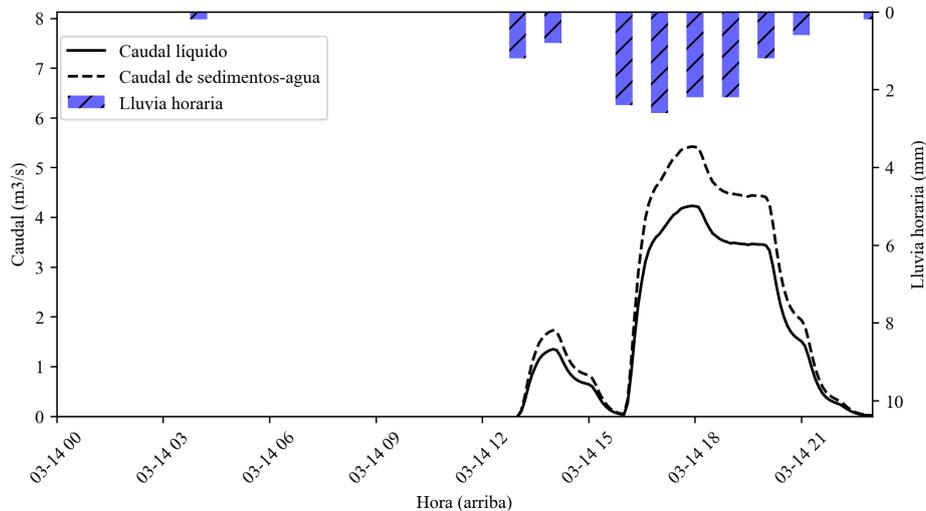


Figura 6. Caudales simulados para el evento del 14 de marzo de 2023 durante el ciclón Yaku.

4.4. Sensibilidad de las condiciones iniciales y calibración del modelo

La elección de los parámetros de fricción requiere una calibración cuidadosa del modelo utilizando información de referencia como datos de campo, fotografías de zonas de descentramiento, estimaciones o mediciones de velocidades y alturas de flujo, así como estimaciones de la composición del material. La calibración del modelo de fricción de Voellmy es uno de los pasos más importantes para obtener resultados realistas y útiles del modelo RAMMS::Debrisflow. Para los procedimientos de calibración se requiere un evento histórico bien documentado, en este caso el evento ocurrido en marzo de 2023 durante el ciclón Yaku. La información de alturas y velocidades de flujo en diferentes lugares del torrente, así como la composición del material, información sobre las diferentes trayectorias de flujo y las condiciones iniciales, como los volúmenes iniciales fueron determinados a partir del estudio de caracterización de la cuenca realizado por SENAMHI (Asencios Astorayme, 2022), el Informe de evaluación de riesgos por flujos de detritos en el área urbana de la subcuenca de Cusipata, distrito de Chaclacayo realizado por CENEPRED-SENAMHI-Municipalidad de Lima y los procedimientos realizados en el presente estudio. La calibración del modelo consistió en encontrar los coeficientes de fricción de Voellmy (fricción tipo Coulomb seco μ y fricción viscoso-turbulenta ξ) que mejor se ajusten al evento histórico durante el ciclón Yaku. La calibración del modelo RAMMS siguió en gran medida los pasos descritos en el manual del usuario (Bartelt et al., 2013).

En primer lugar, se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros enfocado a ajustar la propagación del flujo. A partir del cual se observó que variar la densidad sin incluir áreas erosionables no impacta en la altura de flujo ni en la propagación del flujo; también se observó que valores de μ muy por encima de 0.1 no representan la propagación del flujo, y por último se observa que la resolución del DEM de 2 metros no es capaz de representar las singularidades de la superficie del área de estudio. A partir de este enfoque, se realizaron simulaciones ajustando estos parámetros.

Esta calibración inicial ayudó a refinar los parámetros de fricción (μ y ξ). El parámetro de fricción de Coulomb se mantuvo constante en $\mu = 0.11$, valor que corresponde aproximadamente a la propagación del flujo dentro del dominio modelado (Bartelt et al., 2013; Frank et al., 2017), mostrando los mejores resultados en la calibración sin erosión. La mayoría de los parámetros relacionados con la erosión se mantuvieron en valores predeterminados, con $d_z/d_t = 0,025m/s$ y $\tau_{crit} = 1$ kPa, derivados de observaciones en Illgraben (Berger et al., 2011; Frank et al., 2015).

4.5. Simulación del flujo de detrito

En la Figura 8 se observa la altura máxima de la simulación de la propagación del flujo de detritos ocurrido durante el evento de lluvias de mayor intensidad del ciclón Yaku en marzo del 2023 con la topografía generada antes de los eventos del ciclón Yaku. También se realizó un escenario post Yaku con una topografía del área de estudio actualizada, donde se observa que los diques para la retención de flujos han sido dañados durante el evento Yaku permitiendo el flujo libre en la parte media-baja de la quebrada.

La evaluación del peligro de inundaciones es un paso clave en el análisis de riesgo de inundaciones ocasionado por los flujos hiperconcentrados, que a su vez se traduce en planificación de emergencia, estrategias de gestión del riesgo de inundaciones y medidas de mitigación y protección para mejorar la resiliencia de las comunidades que viven en áreas propensas a inundaciones

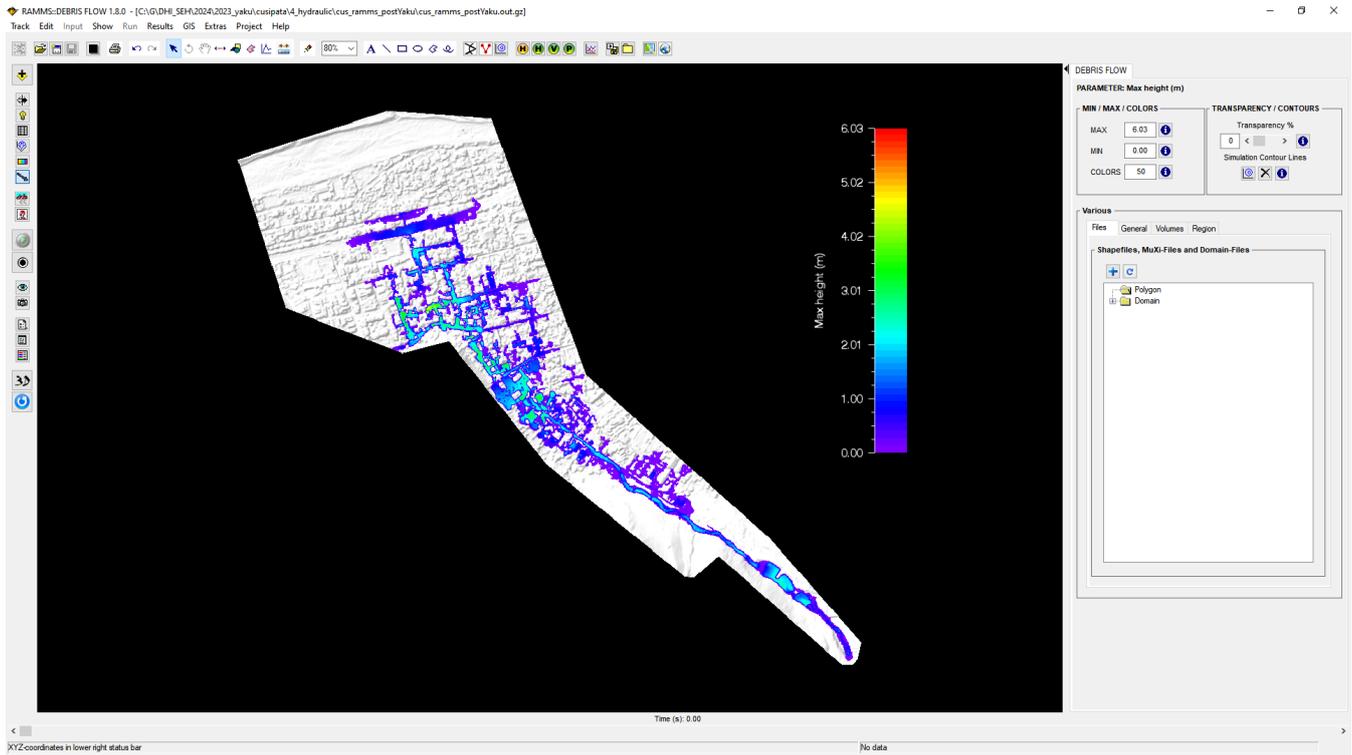


Figura 7. Configuración del modelo RAMMS.

(Maranzoni et al., 2023). Existen diferentes métodos cuantitativos de evaluación del peligro por inundaciones (Maranzoni et al., 2023); sin embargo, se han propuesto metodologías específicas para las inundaciones ocasionadas por flujos de detritos como la metodología de Loat y Petrascheck (Loat and Petrascheck, 1997) del gobierno suizo y Rickenmann (Rickenmann, 2005) además de la metodología de análisis de inundaciones afectada por un parámetro de flujo de detritos del gobierno británico (DEFRA, 2006b, a; Wade et al., 2005). Este estudio adoptó una actualización de la metodología planteada por Rickenmann (cited in Tsao et al., 2018) para estimar el peligro de inundaciones ocasionado por los flujos hiperconcentrados a partir de la combinación de diferentes intensidades de las variables hidráulicas (altura de inundación y velocidad) como se muestra en la Fig. 9.

5. Discusiones

Con respecto a la variabilidad espacial de las lluvias en la zona, el pluviómetro localizado en la parte media de la quebrada no registró ninguna tasa de lluvia el 15 de marzo; sin embargo, se observó la ocurrencia de un flujo en la quebrada. Una posible razón para esto es que el pluviómetro, aunque está lo más cerca del área de iniciación (~ 1 km), es propenso a no capturar las intensidades máximas, especialmente de tormentas convectivas, incluso a distancias cortas (Nikolopoulos et al., 2014; Marra

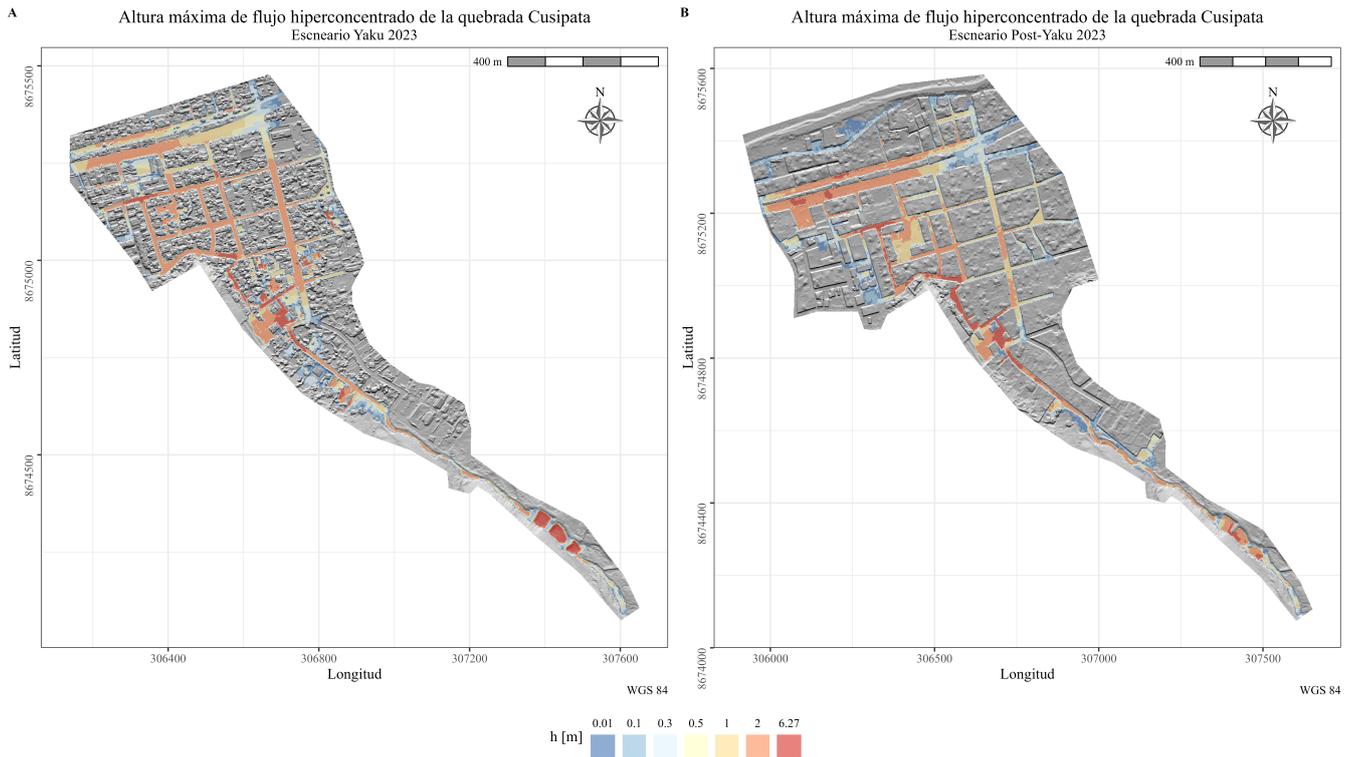


Figura 8. Las alturas máximas del flujo hiperconcentrado simulado para el evento Yaku (izquierda) y escenario post-Yaku (derecha).

et al., 2016; Hirschberg et al., 2021). Sin embargo, este evento se caracterizó por una alta precipitación antecedente (14 de marzo), lo que podría haber reducido el umbral de activación. Este escenario, evidencia la alta variabilidad a escala local en la cuenca media baja de la cuenca Rímac, mostrando que no es necesario la ocurrencia de lluvias intensas en la zona poblada (media y baja de la quebrada) para que ocurran activaciones, lo cual debe ser analizado en futuras investigaciones.

El evento analizado del 14 de marzo fue el de mayor impacto. Sin embargo, el 19 de febrero de 2023 se presentó un flujo líquido con duración de lluvia de 10 y 30 min que fue desencadenado por intensidades de lluvia significativamente más bajas que el evento de flujo de escombros del 14 de marzo. Una posible razón para esto es la incidencia de la precipitación antecedente dentro de los últimos 7 días (1 mm) que podría haber reducido el umbral de activación.

Otra lluvia registrada que sobrepasó el umbral propuesto fue la ocurrida el 21 de diciembre de 2022, aunque no hubo registros de la ocurrencia de un flujo. La lluvia se caracterizó por tener una lluvia acumulada de 1.8 mm en 10 minutos. Esto se puede explicar a que este evento de lluvia no tuvo lluvias antecedentes, lo que podría no haber sido suficiente para desarrollar un flujo en la quebrada. Otra posible explicación es que el flujo fue menor en magnitud y fue interceptado por los diques en la parte media alta de la quebrada.

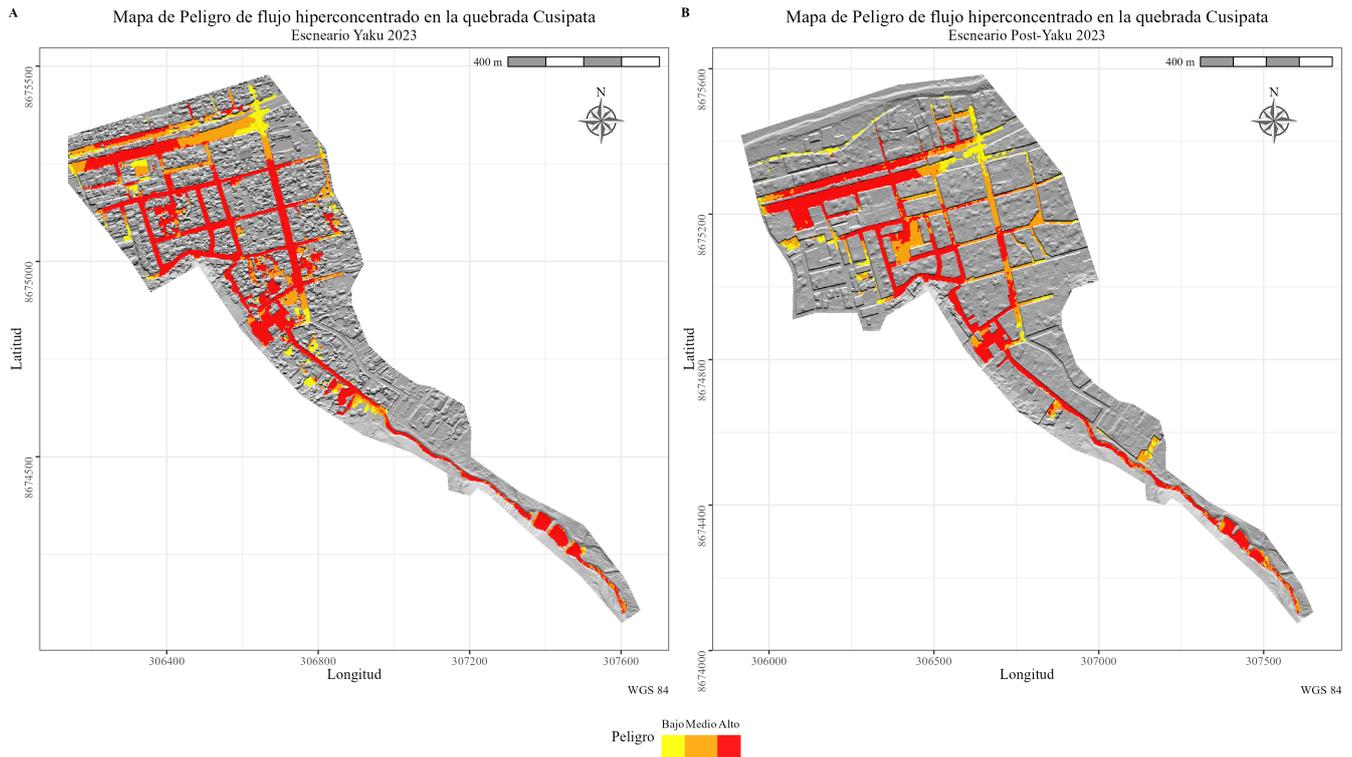


Figura 9. Peligro estimado del flujo hiperconcentrado simulado para el evento Yaku (izquierda) y escenario post-Yaku (derecha).

6. Conclusiones

En este estudio, se analizaron exhaustivamente las características del flujo de detritos ocurrido el 14 de marzo de 2023 en la quebrada Cusipata, durante el paso del ciclón Yaku. El análisis se basó en observaciones de campo, interpretación de imágenes y experimentos de laboratorio, considerando las variaciones espaciales de parámetros climáticos, hidrológicos y geotécnicos. Con estos datos, se simularon los procesos dinámicos de iniciación y propagación del flujo de detritos mediante modelos numéricos.

Se ha propuesto un umbral de lluvia para la ocurrencia de flujos de escombros a escala local, basado en los datos recolectados durante la temporada de lluvias 2022-2023. Este umbral constituye una herramienta clave para evaluar el riesgo de flujos de detritos, aunque requiere un ajuste constante mediante la integración de más eventos observados en el futuro. Su estimación representa un avance significativo en los sistemas de alerta temprana locales, especialmente al evidenciar que el uso de umbrales definidos en otras escalas temporales lleva a la subestimación del riesgo en contextos locales.

Se llevó a cabo una simulación hidrológica del evento de lluvia asociado al ciclón Yaku, utilizando datos de una estación pluviométrica localizada en la quebrada. Esta simulación permitió evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca ante lluvias intensas, identificando caudales pico, volúmenes de escorrentía y tiempos de concentración. Estos resultados fueron funda-

mentales para alimentar y calibrar un modelo de flujo de detritos, proporcionando información detallada sobre el proceso de lluvia-escorrentía bajo condiciones extremas.

La simulación numérica del flujo de detritos, basada en datos locales, permitió analizar su propagación y evaluar el impacto del transporte y deposición de material sedimentario. Los hallazgos resaltan el alto impacto de los flujos asociados a lluvias intensas durante el ciclón Yaku y sugieren escenarios futuros considerando la modificación del relieve por eventos de gran magnitud. Estos resultados son esenciales para identificar áreas críticas, mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos y diseñar estrategias efectivas de mitigación frente a eventos similares en el futuro.

. Disponibilidad de datos

En cumplimiento con los principios de transparencia y acceso a la información pública, los resultados del modelamiento hidráulico desarrollado como parte de este estudio están disponibles en el repositorio de acceso abierto [HydroShare](#).

Referencias

- An, H., Ouyang, C., Wang, F., Xu, Q., Wang, D., Yang, W., and Fan, T.: Comprehensive analysis and numerical simulation of a large debris flow in the Meilong catchment, China, *Engineering Geology*, 298, 106 546, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106546>, 2022.
- Asencios Astorayme, H. J. S.: Caracterización lluvias intensas asociada a peligros de remoción de masa en la quebrada Cusipata - Chaclacayo, Tech. rep., SENAMHI, Lima, 2022.
- Bartelt, P., Buehler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Graf, C., and McArdell, B.: RAMMS—rapid mass movement simulation, a modeling system for debris flows in research and practice, User Manual v1.8.0, Debris Flow, Manuscript update: July 2024, https://ramms.ch/wp-content/uploads/RAMMS_DBF_Manual.pdf, 2013.
- Baum, R. L. and Godt, J. W.: Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA, *Landslides*, 7, 259–272, 2010.
- Berger, C., McArdell, B. W., and Schlunegger, F.: Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116, <https://doi.org/10.1029/2010JF001722>, 2011.
- Berti, M., Bernard, M., Gregoret, C., and Simoni, A.: Physical Interpretation of Rainfall Thresholds or Runoff-Generated Debris Flows, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, <https://doi.org/10.1029/2019JF005513>, 2020.
- Bertrand, M., Liébault, F., and Piégay, H.: Debris-flow susceptibility of upland catchments, *Natural Hazards*, 67, 497–511, <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0575-4>, 2013.
- Brenna, A., Surian, N., Ghinassi, M., and Marchi, L.: Sediment–water flows in mountain streams: Recognition and classification based on field evidence, *Geomorphology*, 371, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107413>, 2020.
- Brenna, A., Marchi, L., Borga, M., Ghinassi, M., Zaramella, M., and Surian, N.: Sediment–water flows in mountain catchments: Insights into transport mechanisms as responses to high-magnitude hydrological events, *Journal of Hydrology*, 602, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126716>, 2021.
- Brenna, A., Marchi, L., Borga, M., Zaramella, M., and Surian, N.: What drives major channel widening in mountain rivers during floods? The role of debris floods during a high-magnitude event, *Geomorphology*, 430, 108 650, <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2023.108650>, 2023.
- Bufe, A., Turowski, J. M., Burbank, D. W., Paola, C., Wickert, A. D., and Tofelde, S.: Controls on the lateral channel-migration rate of braided channel systems in coarse non-cohesive sediment, *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, 2823–2836, <https://doi.org/10.1002/esp.4710>, 2019.
- Caine, N.: The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows, *Geografiska annaler A*, 62, 23–27, <https://doi.org/10.2307/520449>, 1980.
- Cannon, S. H.: An Evaluation of the Travel-distance Potential of Debris Flows, no. n.º 2;n.º 89 in *An Evaluation of the Travel-distance Potential of Debris Flows*, Utah Geological and Mineral Survey, ISBN 9781557913036, <https://books.google.com.pe/books?id=LZJQAQAAIAAJ>, 1989.
- Chae, B. G., Park, H. J., Catani, F., Simoni, A., and Berti, M.: Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art, *Geosciences Journal*, 21, 1033–1070, <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0034-4>, 2017.
- Chen, T. Y. K., Hung, C. Y., Mullenbach, J., and Hill, K.: Influence of fine particle content in debris flows on alluvial fan morphology, *Scientific Reports*, 12, 1–11, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24397-x>, 2022.

- Christen, M., Kowalski, J., and Bartelt, P.: RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Regions Science and Technology*, 63, 1–14, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>, 2010.
- Church, M. and Jakob, M.: What Is a Debris Flood?, *Water Resources Research*, 56, <https://doi.org/10.1029/2020WR027144>, 2020.
- Cloarec, V.: Lekan Software, 2023.
- Dahlquist, M. P. and West, A. J.: Initiation and Runout of Post-Seismic Debris Flows: Insights From the 2015 Gorkha Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 46, <https://doi.org/10.1029/2019GL083548>, 2019.
- Davidson, S. L., Marin-Esteve, B., and Eaton, B.: What controls river widening? Comparing large and extreme flood events, *Earth Surface Processes and Landforms*, <https://doi.org/10.1002/esp.5875>, 2024.
- DEFRA, E. A.: Flood risks to people (FD2321/TR2 Guidance Document), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602bbc3de90e07055f646148/Flood_risks_to_people_-_Phase_2_Guidance_Document_Technical_report.pdf, 2006a.
- DEFRA, E. A.: R&D outputs: Flood risks to people. Phase 2. FD2321/TR1 The flood risks to people methodology, https://www.e-lindsey.gov.uk/media/19064/ID26-FD2321-TR1/pdf/ID26_-_FD2321_TR1_The_Flood_Risks_to_People_Methodology.pdf?m=637564071968330000, 2006b.
- Dowling, C. A. and Santi, P. M.: Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011, *Natural hazards*, 71, 203–227, <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-013-0907-4>, 2014.
- Du, J., Zhou, G. G., Tang, H., Turowski, J. M., and Cui, K. F.: Classification of Stream, Hyperconcentrated, and Debris Flow Using Dimensional Analysis and Machine Learning, *Water Resources Research*, 59, <https://doi.org/10.1029/2022WR033242>, 2023.
- Frank, F., McArdell, B. W., Huggel, C., and Vieli, A.: The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: Examples from the Swiss Alps, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 2569–2583, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2569-2015>, 2015.
- Frank, F., McArdell, B. W., Oggier, N., Baer, P., Christen, M., and Vieli, A.: Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 801–815, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-801-2017>, 2017.
- Gao, F. and Han, L.: Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters, *Computational Optimization and Applications*, 51, 259–277, <https://doi.org/10.1007/s10589-010-9329-3>, 2012.
- Gorr, A. N., McGuire, L. A., Youberg, A. M., and Rengers, F. K.: A progressive flow-routing model for rapid assessment of debris-flow inundation, *Landslides*, 19, 2055–2073, 2022.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P.: Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98, 239–267, <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>, 2007.
- Han, Z., Chen, G., Li, Y., Zhang, H., and He, Y.: Elementary analysis on the bed-sediment entrainment by debris flow and its application using the TopFlowDF model, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7, 764–785, <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.966868>, 2016.
- Han, Z., Li, Y., Huang, J., Chen, G., Xu, L., Tang, C., Zhang, H., and Shang, Y.: Numerical simulation for run-out extent of debris flows using an improved cellular automaton model, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 961–974, <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0902-6>, 2017.
- Hirschberg, J., Badoux, A., McArdell, B. W., Leonarduzzi, E., and Molnar, P.: Evaluating methods for debris-flow prediction based on rainfall in an Alpine catchment, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 2773–2789, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2773-2021>, 2021.
- Hungr, O., Leroueil, S., and Picarelli, L.: The Varnes classification of landslide types, an update, *Landslides*, 11, 167–194, <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>, 2014.
- Iverson, R. M.: Debris flows: behaviour and hazard assessment, *Geology today*, 30, 15–20, 2014.

- Jakob, M. and Hungr, O.: *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Springer Praxis Books, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 9783540207269, https://books.google.com.pe/books?id=w4_QA22J4FoC, 2005.
- Kean, J. W., Staley, D. M., Lancaster, J. T., Rengers, F. K., Swanson, B. J., Coe, J. A., Hernandez, J. L., Sigman, A. J., Allstadt, K. E., and Lindsay, D. N.: Inundation, flow dynamics, and damage in the 9 January 2018 Montecito debris-flow event, California, USA: Opportunities and challenges for post-wildfire risk assessment, *Geosphere*, 15, 1140–1163, <https://doi.org/10.1130/GES02048.1>, 2019.
- Könz, A. L., Hirschberg, J., McArdeell, B. W., Mirus, B. B., de Haas, T., Bartelt, P., and Molnar, P.: Debris-flow entrainment modelling under climate change: Considering antecedent moisture conditions along the flow path, *Earth Surface Processes and Landforms*, 49, 2950 – 2964, <https://doi.org/10.1002/esp.5868>, 2024.
- Lin, M. L., Wang, K. L., and Huang, J. J.: Debris flow run off simulation and verification - case study of Chen-You-Lan Watershed, Taiwan, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 439–445, <https://doi.org/10.5194/NHESS-5-439-2005>, 2005.
- Loat, R. and Petrascheck, A.: *Consideration of flood hazards for activities with spatial impact. Recommendations*, 1997.
- Maranzoni, A., D’Oria, M., and Rizzo, C.: Quantitative flood hazard assessment methods: A review, *Journal of Flood Risk Management*, 16, 1–31, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12855>, 2023.
- Marchi, L., Pasuto, A., and Tecca, P. R.: Flow processes on alluvial fans in the eastern Italian Alps, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 37, 447–458, <https://doi.org/10.1127/zfg/37/1993/447>, 1993.
- Marra, F., Nikolopoulos, E. I., Creutin, J. D., and Borga, M.: Space–time organization of debris flows-triggering rainfall and its effect on the identification of the rainfall threshold relationship, *Journal of Hydrology*, 541, 246–255, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.010>, 2016.
- Millán Arancibia, C. and Chávarri Velarde, E.: Debris flow modelinig for risk analysis in Los Cóndores catchment, Chaclacayo, Lima, Peru, in: 38th IAHR World Congress - "Water: Connecting the World", vol. 38, pp. 3525–3533, <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0903>, 2019.
- Millán-Arancibia, C. and Lavado-Casimiro, W.: Rainfall thresholds estimation for shallow landslides in Peru from gridded daily data, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, pp. 1–22, 2022.
- Motschmann, A., Huggel, C., Muñoz, R., and Thür, A.: Towards integrated assessments of water risks in deglaciating mountain areas: water scarcity and GLOF risk in the Peruvian Andes, *Geoenvironmental Disasters*, 7, 1–20, <https://doi.org/10.1186/S40677-020-00159-7/FIGURES/8>, 2020.
- Moya, L., Vilela, M., Jaimes, J., Espinoza, B., Pajuelo, J., Tarque, N., Santa-Cruz, S., Vega-Centeno, P., and Yamazaki, F.: Vulnerabilities and exposure of recent informal urban areas in Lima, Peru, *Progress in Disaster Science*, 23, 100345, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2024.100345>, 2024.
- Nikolopoulos, E. I., Crema, S., Marchi, L., Marra, F., Guzzetti, F., and Borga, M.: Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence, *Geomorphology*, 221, 286–297, <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2014.06.015>, 2014.
- Parés-Ramos, I. K., Álvarez-Berríos, N. L., and Aide, T. M.: Mapping Urbanization Dynamics in Major Cities of Colombia, Ecuador, Perú, and Bolivia Using Night-Time Satellite Imagery, *Land*, 2, 37–59, <https://doi.org/10.3390/land2010037>, 2013.
- Petley, D.: Global patterns of loss of life from landslides, *Geology*, 40, 927–930, <https://doi.org/10.1130/G33217.1>, 2012.
- Pierson, T.: Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds, *Water*, p. 4, 2005.

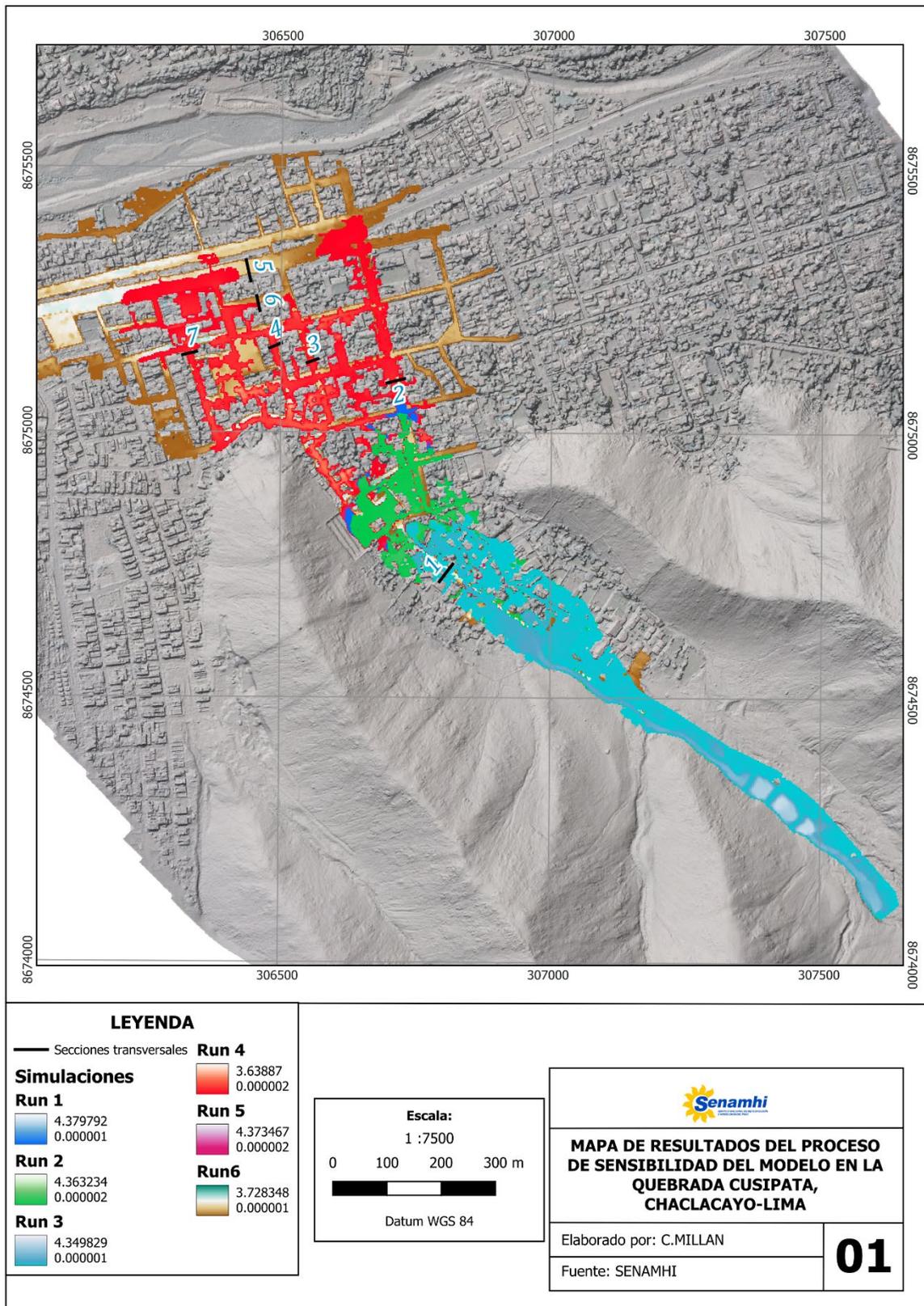
- Prenner, D., Kaitna, R., Mostbauer, K., and Hrachowitz, M.: The Value of Using Multiple Hydrometeorological Variables to Predict Temporal Debris Flow Susceptibility in an Alpine Environment, *Water Resources Research*, 54, 6822–6843, <https://doi.org/10.1029/2018WR022985>, 2018.
- Rickenmann, D.: Hangmuren und Gefahrenbeurteilung. kurzbericht für das Bundesamt für wasser und Geologie, Unpublished report, Universität für Bodenkultur, Wien, und Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 18p, 2005.
- Rickenmann, D. and Zimmermann, M.: The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis, *Geomorphology*, 8, 175–189, [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90036-2](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90036-2), 1993.
- Savi, S., Tofelde, S., Wickert, A. D., Bufe, A., Schildgen, T. F., and Strecker, M. R.: Interactions between main channels and tributary alluvial fans: channel adjustments and sediment-signal propagation, *Earth Surface Dynamics*, 8, 303–322, <https://doi.org/10.5194/esurf-8-303-2020>, 2020.
- Segoni, S., Rossi, G., Rosi, A., and Catani, F.: Landslides triggered by rainfall: A semi-automated procedure to define consistent intensity-duration thresholds, *Computers and Geosciences*, 63, 123–131, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.009>, 2014.
- Segoni, S., Tofani, V., Rosi, A., Catani, F., and Casagli, N.: Combination of rainfall thresholds and susceptibility maps for dynamic landslide hazard assessment at regional scale, *Frontiers in Earth Science*, 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00085>, 2018.
- SENAMHI: Climas del Perú Mapa de Clasificación Climática Nacional, 2021.
- SENAMHI: EVENTO EXTREMO N° 001-2023 SPM - DMA, Tech. rep., SENAMHI, Lima, <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/2789>, 2023a.
- SENAMHI: Efecto del ciclón Yaku y su recorrido, Tech. rep., SENAMHI, Lima, <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/efecto-ciclon-yaku-recorrido>, 2023b.
- SENAMHI: Precipitaciones y Temperaturas Extremas del aire MARZO 2023, Tech. rep., <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/2804>, 2023c.
- Shen, P., Zhang, L., Chen, H., and Fan, R.: EDDA 2.0: integrated simulation of debris flow initiation and dynamics considering two initiation mechanisms, *Geosci. Model Dev*, 11, 2841–2856, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2841-2018>, 2018.
- Tang, H., McGuire, L. A., Rengers, F. K., Kean, J. W., Staley, D. M., and Smith, J. B.: Developing and Testing Physically Based Triggering Thresholds for Runoff-Generated Debris Flows, *Geophysical Research Letters*, 46, 8830–8839, <https://doi.org/10.1029/2019GL083623>, 2019.
- Thouret, J.-C., Antoine, S., Magill, C., and Ollier, C.: Lahars and debris flows: Characteristics and impacts, *Earth-Science Reviews*, 201, 103 003, 2020.
- Tsao, T.-C., Huang, C.-Y., Chien, J.-H., Yin, H.-Y., and Chen, C.-Y.: Comparison of Debris Flow Hazard Mapping between Empirical Function and Numerical Simulation - a Case Study in Taiwan, https://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2018_1_349.pdf, 2018.
- Vallance, J. W. and Iverson, R. M.: Lahars and their deposits. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 2015.
- Wade, S., Ramsbottom, D., Floyd, P., Penning-rowsell, E., and Surendran, S.: Risks to people : developing new approaches for flood hazard and vulnerability mapping, 40th DEFRA Flood and Coastal Management Conference, pp. 1–14, 2005.
- Webb, R., Magirl, C., Griffiths, G., and Boyer, D. E.: Debris Flows and Floods in the Southeastern Arizona from Extreme Precipitation in July 2006: Magnitude, Frequency, and Sediment Delivery, U.S. Geological Survey Open File Report 2008-1274, <https://pubs.usgs.gov/of/2008/1274/>, 2008.

- Wendeler, C.: Debris-flow protection systems for mountain torrents: basics principles for planning and calculation of flexible barriers, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, 2016.
- Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., and Bergerud, W. A.: Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics, *Landslides*, 1, 61–66, <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>, 2004.

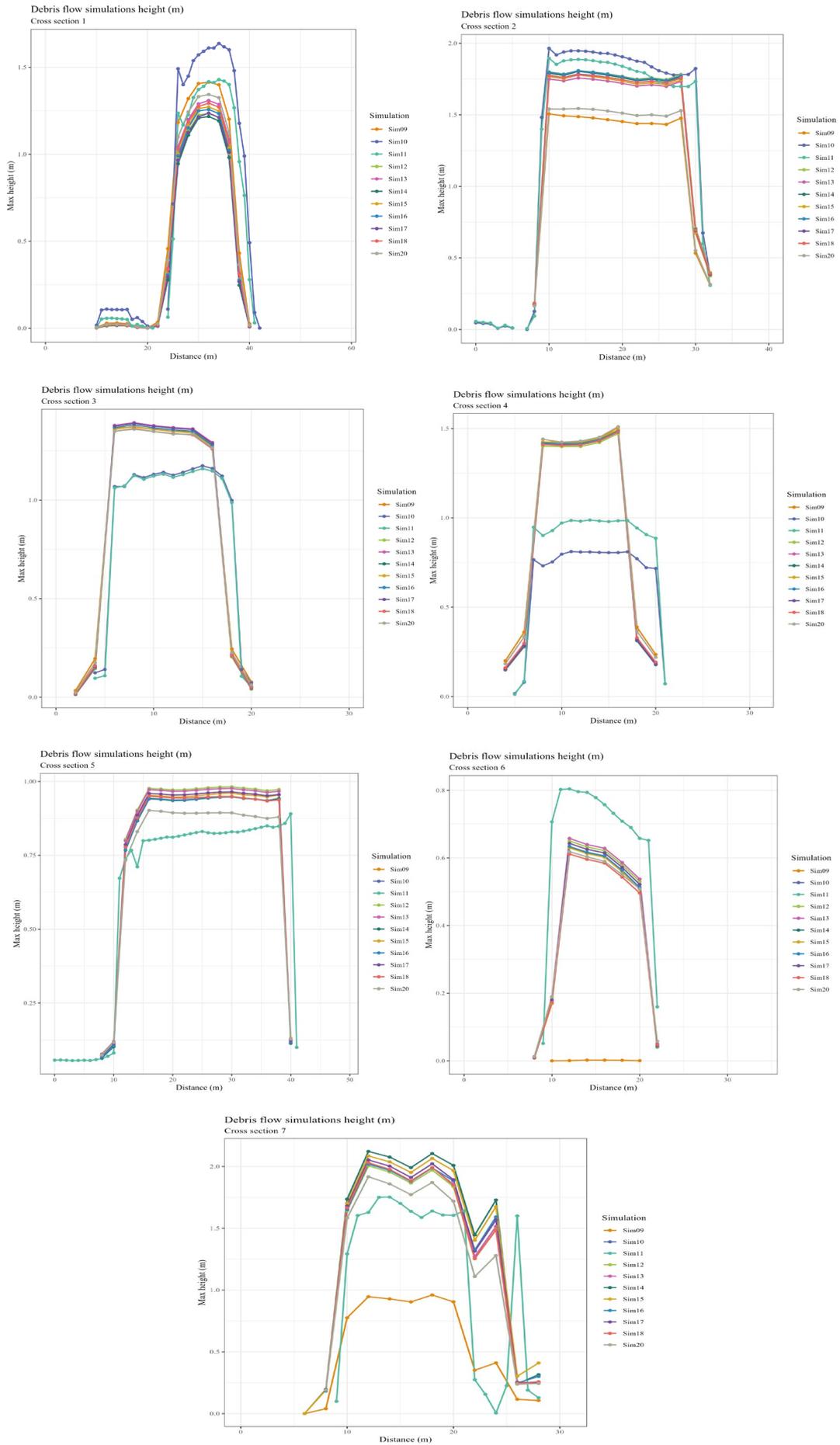
Caracterización del peligro de un flujo de detritos
durante el Ciclón Yaku-2023 en la quebrada
Cusipata, Perú

ANEXOS

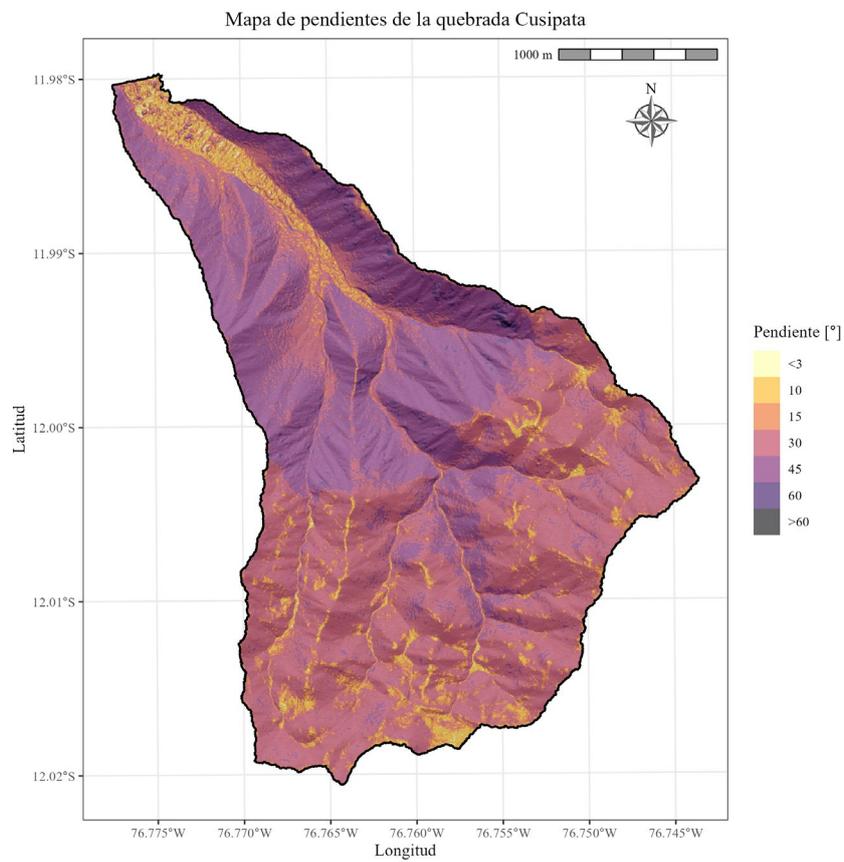
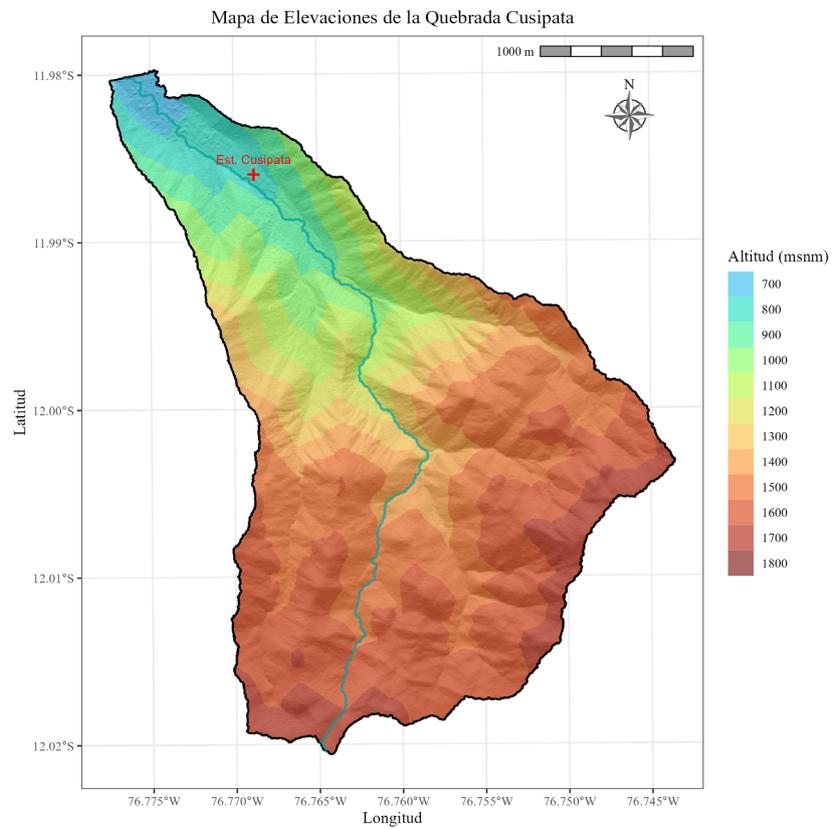
A. Simulaciones en el periodo de análisis de sensibilidad



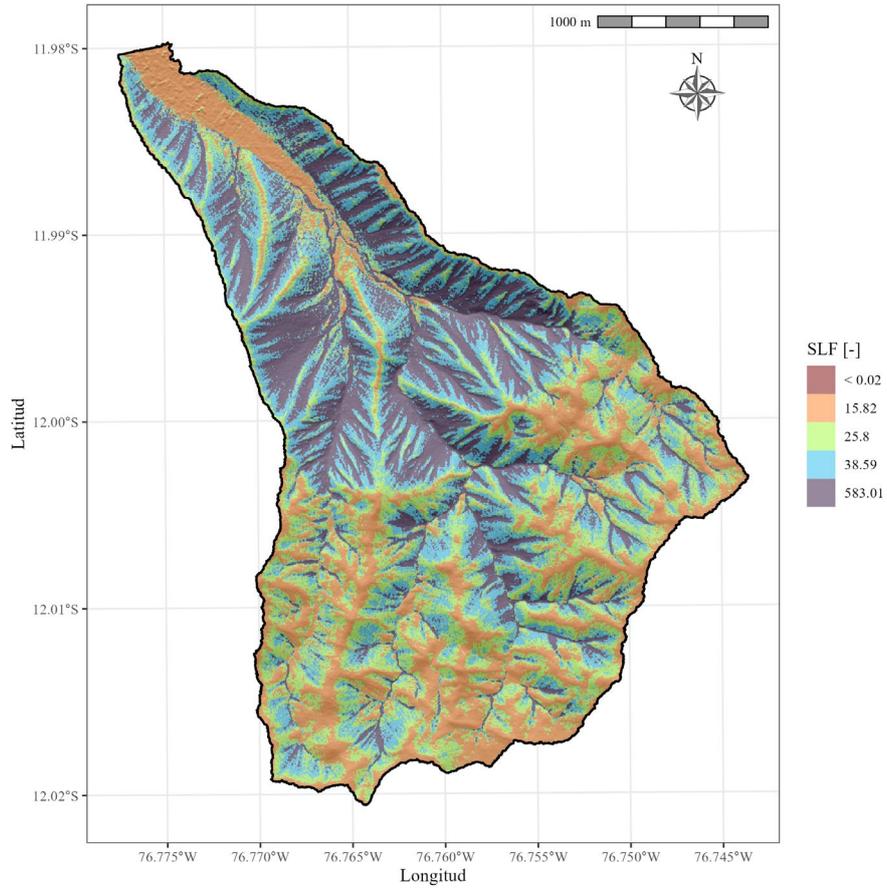
B. Secciones transversales para simulaciones durante la calibración



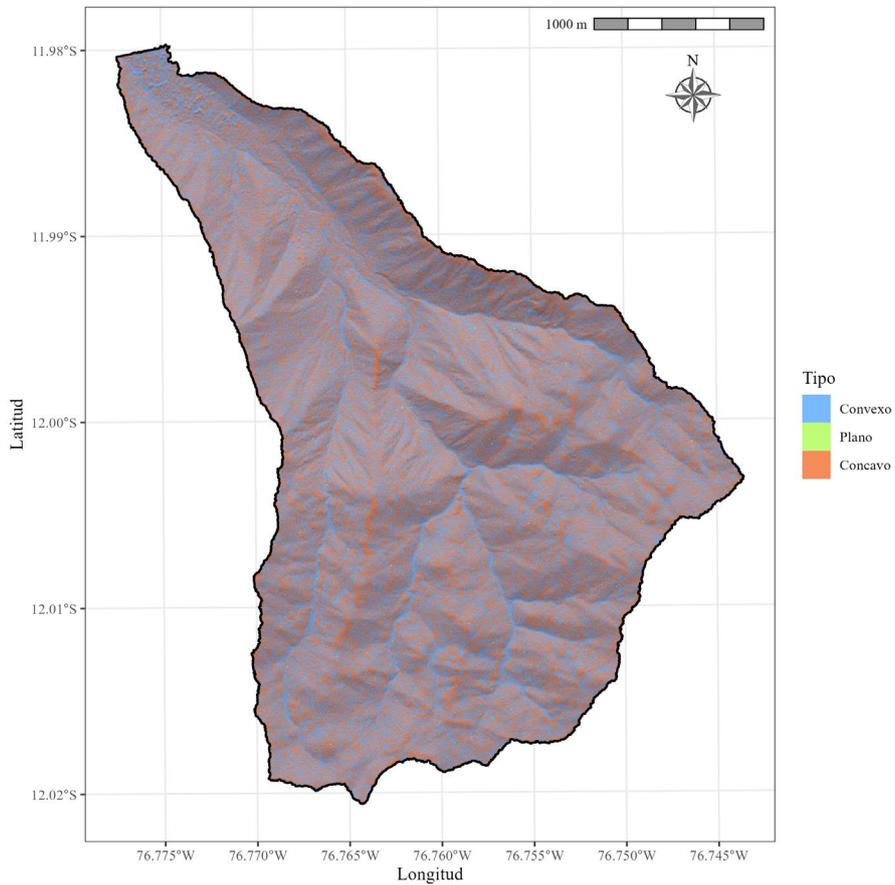
C. Mapas geomorfológicos



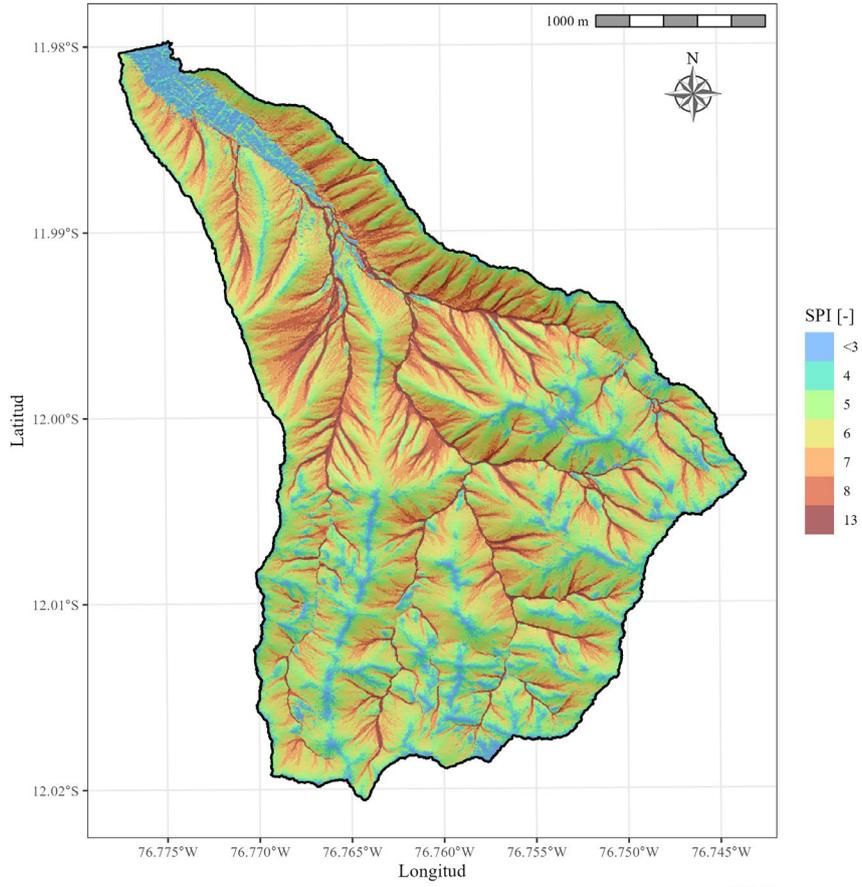
Factor de Longitud de pendiente (SLF) de la quebrada Cusipata



Curvatura de la quebrada Cusipata

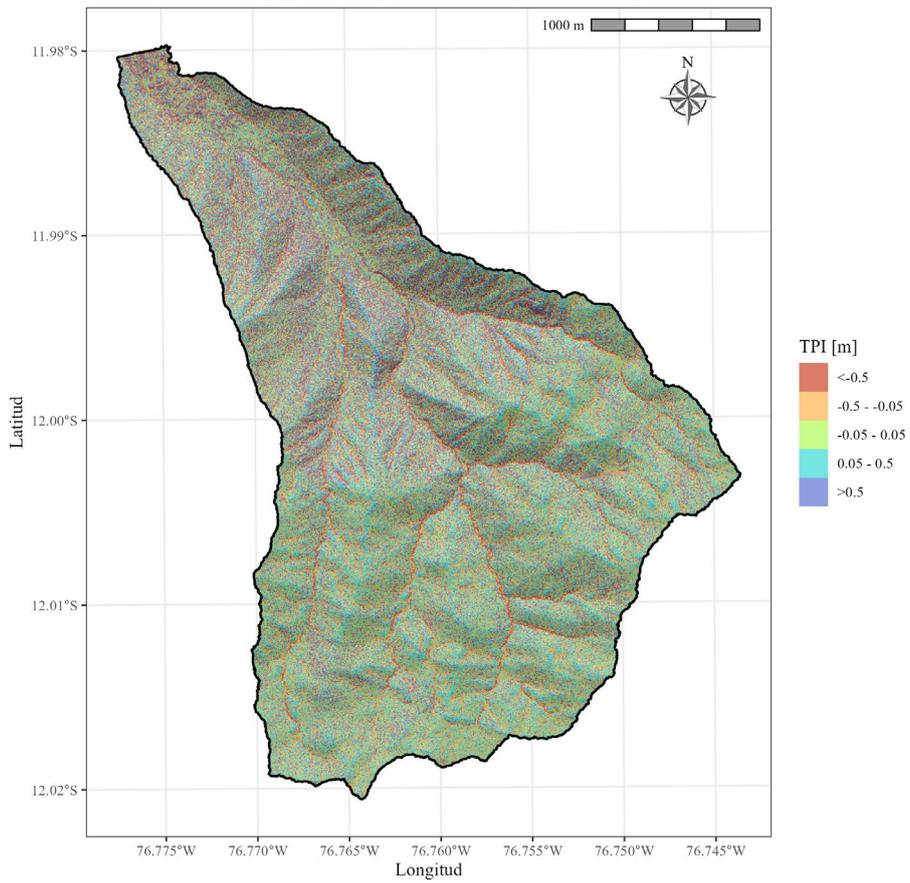


Índice de la Potencia erosiva del flujo de la quebrada Cusipata



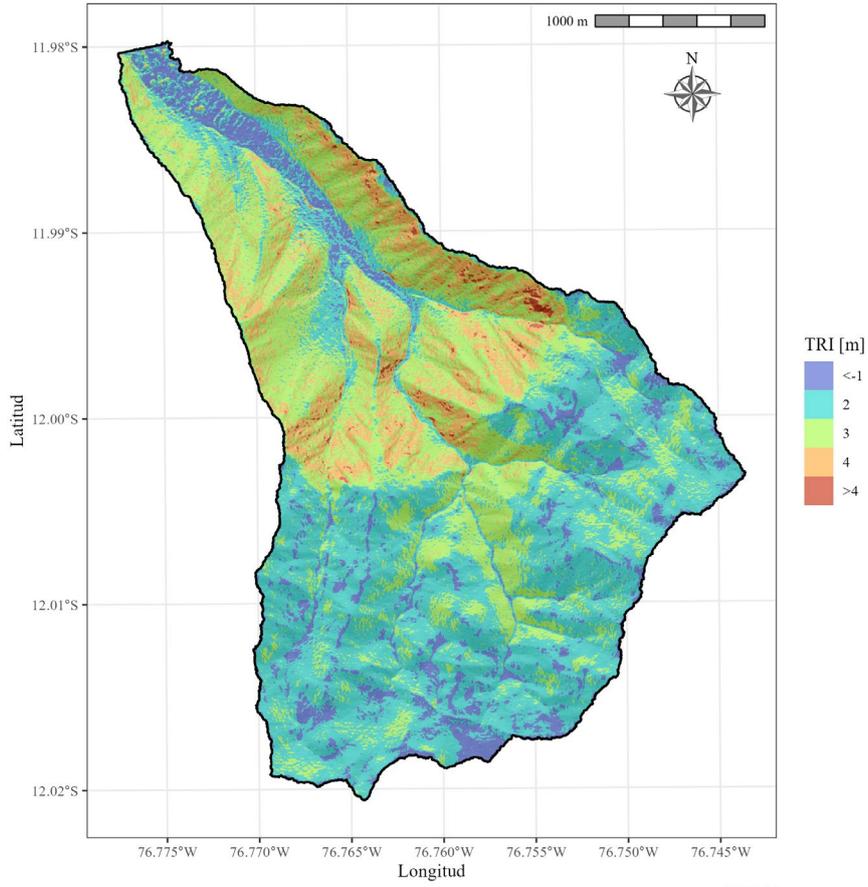
WGS 84

Índice topográfico de posición de la quebrada Cusipata



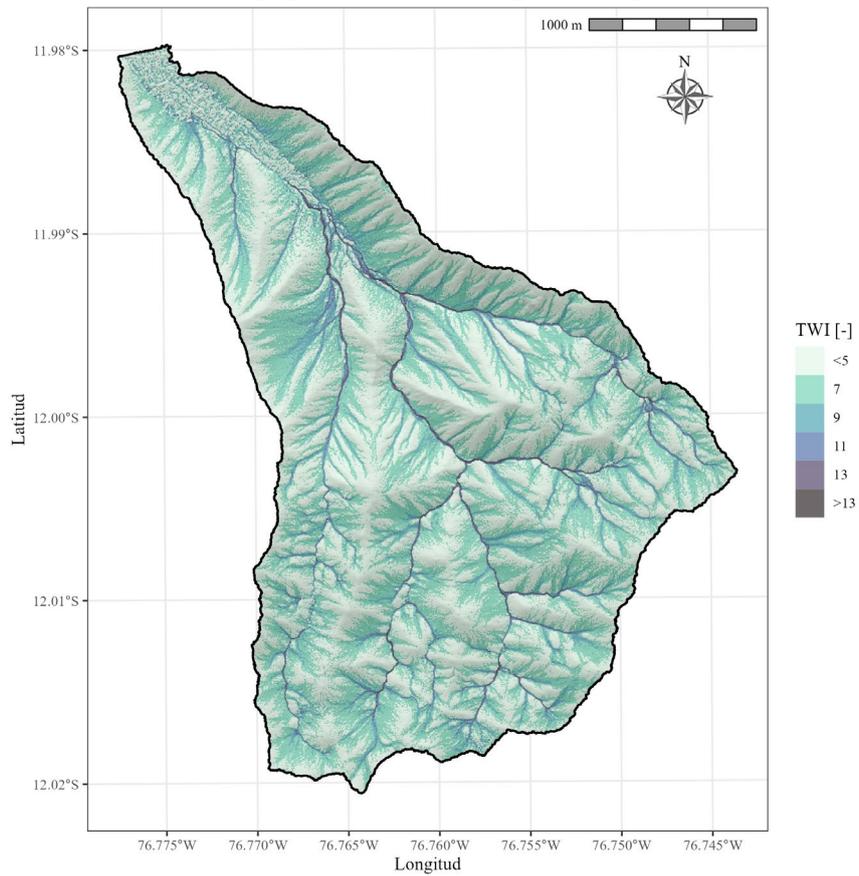
WGS 84

Índice de rugosidad del terreno de la quebrada Cusipata



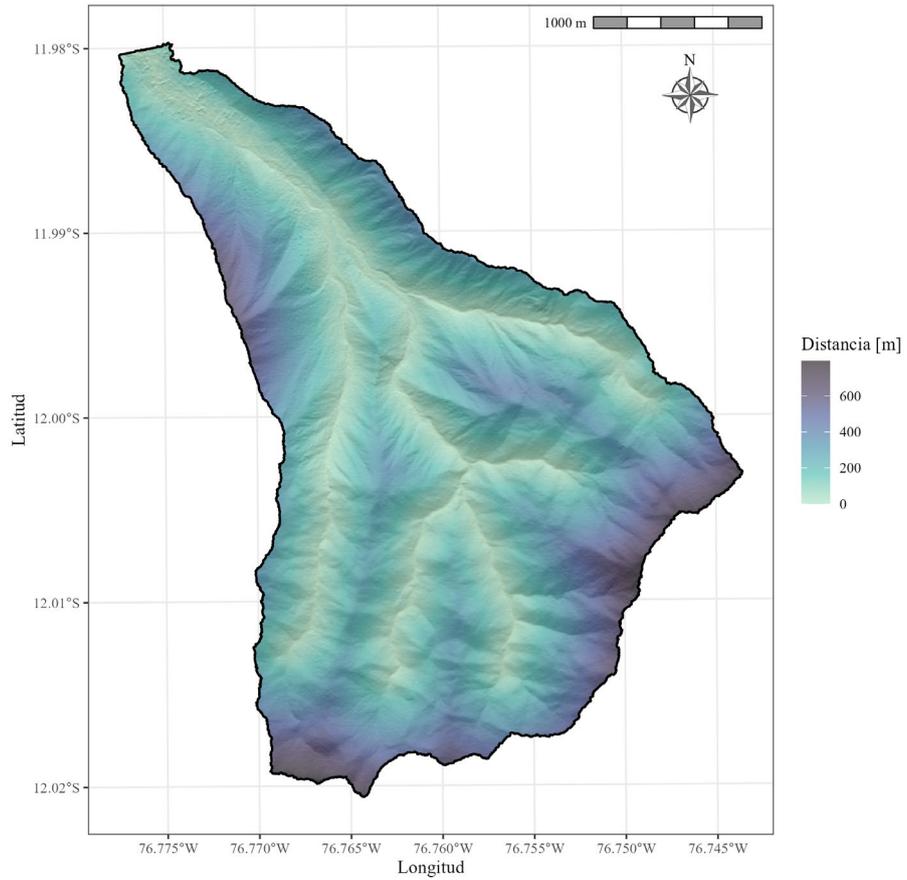
WGS 84

Índice topográfico de humedad de la quebrada Cusipata

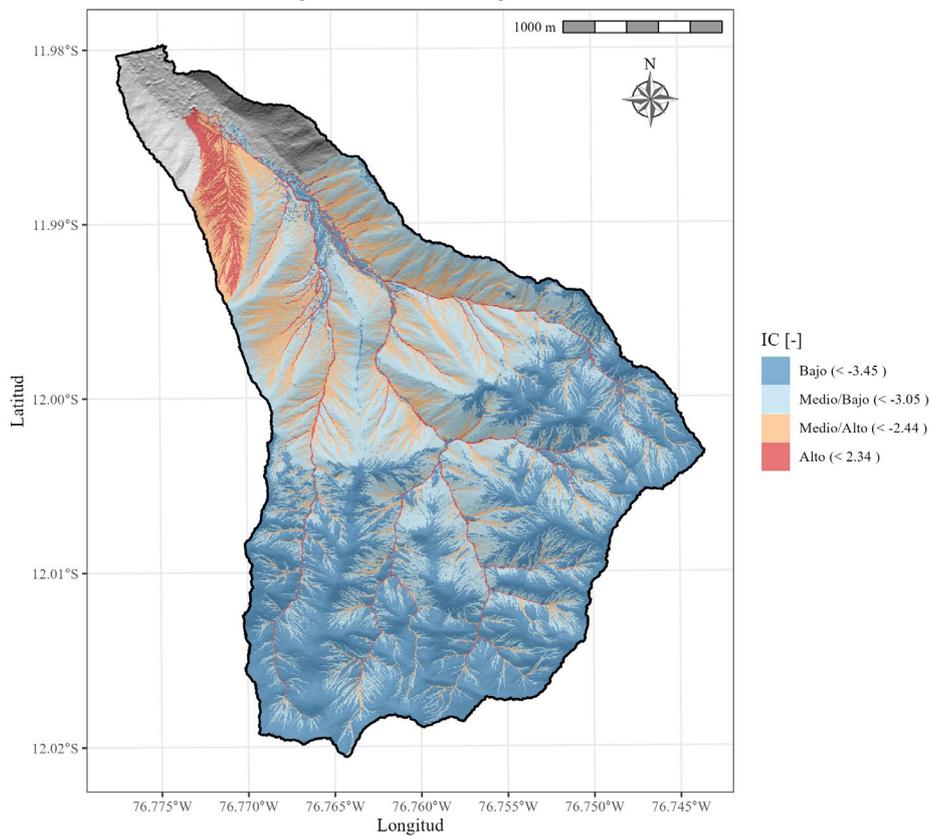


WGS 84

Distancia a los cauces de la quebrada Cusipata



Índice de Conectividad Sedimentaria de la quebrada Cusipata
Enfoque: Desembocadura de la quebrada



Índice de Conectividad Sedimentaria de la quebrada Cusipata
Enfoque: Red de drenaje

