

Determinación de los umbrales de precipitación de lluvia para el pronóstico de movimientos de flujo de detritos

Elizabeth Milagros Santiago Torres

E-MAIL: emist2694@gmail.com

Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Huánuco, Perú.

RESUMEN

Esta investigación utilizó métodos empíricos que relacionan la lluvia con los movimientos de flujo de detritos; los cuales, consisten en series de lluvia acumulada que detonan estos movimientos. Además, se procedió a establecer los umbrales estadísticos mediante la ley de la potencia en coordenadas lineales (relación logarítmica) y la estadística no paramétrica. En consecuencia, se establecieron los umbrales críticos de lluvia acumulada detonante (LA) y lluvia acumulada antecedente (LAA). Asimismo, a este modelo empírico-estadístico, se añade las condiciones locales de la zona de estudio; es decir, algunos parámetros físicos y la condición húmeda del suelo, así como combinarlos con las condiciones de amenaza de la región para la cual fueron definidos.

PALABRAS CLAVES: amenaza, deslizamientos, flujo de detritos o escombros, umbrales de precipitación de lluvia, peligro, pronóstico

Determination of rainfall precipitation thresholds for debris flow forecasting

ABSTRACT

This research employed empirical methods that relate rainfall to debris flow movements, which consist of series of accumulated rainfall that trigger these movements. Additionally, statistical thresholds were established using power law in linear coordinates (logarithmic relationship) and non-parametric statistics. Consequently, critical thresholds for triggering accumulated rainfall (LA) and antecedent accumulated rainfall (LAA) were established. Furthermore, this empirical-statistical model incorporates the local conditions of the study area, including certain physical parameters and soil moisture conditions, and combines them with the hazard conditions specific to the region for which they were defined.

KEYWORDS: threat, landslides, debris flow, rainfall precipitation thresholds, danger, forecast

01 INTRODUCCIÓN

Debido a que, los movimientos de flujo de detritos, comúnmente conocidos como huaycos, representan una amenaza potencial en todo el mundo, especialmente en Perú; es necesario analizar y estudiar dicha amenaza, así como la capacidad de pronosticar estos movimientos. Por lo tanto, es importante definir primero qué es un flujo de detritos; en consecuencia, podemos decir que se trata de un flujo canalizado rápido a extremadamente rápido, que transcurre a lo largo de un cauce con pendiente pronunciada (Hungar 2005; Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas 2007). Además, puede iniciar su movimiento de dos maneras: por deslizamientos superficiales en las cabeceras de las cuencas (Yang et al. 2023) o cuando el material acumulado en las laderas o canales se erosiona y se moviliza por escorrentía (Yang et al. 2023). Por lo cual, estos flujos incorporan una gran cantidad de sedimentos gruesos en su trayectoria mientras descienden por el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos (Ilinca 2021; Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas 2007). Adicionalmente, existen diversas causas, como los agentes condicionantes y desencadenantes, que dan lugar a la ocurrencia de los movimientos de flujo de detritos; los cuales pueden cambiar de localidad en localidad, operando con diferentes grados de complejidad e intensidad de uno a otro ambiente. Por lo que, si se sabe que la lluvia es el evento que dispara con mayor frecuencia estos movimientos; ya que, un aumento en las presiones de los poros del suelo reduce los esfuerzos efectivos entre las partículas, esto equivale a una reducción de resistencia al corte y, con ello una baja en la estabilidad y un eventual fenómeno de movimientos de flujo de detritos (Aristizábal et al. 2010). Por tal motivo, el estudio sobre la relación entre la precipitación de lluvia y la ocurrencia de los movimientos de flujo de detritos es muy importante. Finalmente, teniendo en cuenta que, la combinación de modelos empíricos con modelos físicos permite una adecuada caracterización de la amenaza en términos de probabilidades de ocurrencia en tiempo y espacio; con el fin de obtener una mejor predicción de los movimientos de flujo de detritos para este tipo de umbrales (Aristizábal et al. 2010).

Por otro lado, el motivo por el cual se escoge al distrito de San Rafael como zona de estudio, es porque, es el primer distrito con más registros de ocurrencia por fenómenos de geodinámica externa, en específico Huayco – Aluvión; mientras que, Ambo es la segunda provincia con mayores registros de ocurrencia a estos fenómenos (huaycos), así como también ocupa el cuarto lugar en fenómenos meteorológicos como precipitaciones de lluvia y avenidas torrenciales; por último, el departamento de Huánuco está dentro de los 10 departamentos con más incidentes registrados de peligros, ocasionados por fenómenos naturales según su tipo (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI] 2016 y DesInventar.org 2022). Asimismo, la quebrada Rosayoc/Batán, se ubica al margen derecho de la localidad de San Rafael (capital del distrito), siendo una zona muy susceptible a movimientos de flujo de detritos; los cuales son detonados, generalmente, por precipitaciones de lluvia. Además, las consecuencias que puede traer este problema son muchos, debido a que, la quebrada se encuentra ubicada cerca de la localidad de San Rafael (capital del distrito), la carretera central, el río Huallaga y el Asentamiento Humano 07 de junio (quebrada Pomabamba). Por último, esta investigación estuvo enfocada en la determinación de umbrales de precipitación de lluvia que detonan movimientos de flujos de detritos; con la finalidad de contribuir con la Gestión de Riesgos de Desastres (GRD); además de ofrecer información técnica sobre la dinámica que podrían presentar estos movimientos, a fin de producir mecanismos que sirvan para la elaboración de los diseños de las medidas de control, prevención y reducción de desastres, ante la probable ocurrencia de este evento, que ocasionaría varios problemas como pérdidas de vidas humanas y económicas; obstaculización del tránsito,

dejando a varias localidades y ciudades sin comunicación; además de generar daños en la infraestructura vial.

02 METODOLOGÍA PROPUESTA

En esta investigación, se ha empleado una metodología que integra los Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección y análisis de imágenes satelitales para el geoprocesamiento de datos espaciales; así como, el análisis y evaluación de las zonas susceptibles donde se genera movimientos de flujo de detritos, según el proceso de análisis jerárquico (CENEPRED 2014), considerando algunos factores condicionantes como la pendiente, unidades geológicas, geomorfológicas (relieve), cobertura vegetal y uso de suelo. Este último, se usó para elegir los números de curva (CN), siendo uno de los datos importantes en la determinación de los caudales líquidos de escorrentía. Además, para la simulación del flujo de detritos se empleó el modelo matemático FLO-2D; con lo cual, se determinó para cada escenario la condición de humedad antecedente del suelo (AMC) y el periodo de retorno (TR), el área de inundación, máximas profundidades y velocidades del flujo sobre las potenciales zonas de depositación. Con los resultados de la simulación se realizó el mapa de peligro, en función de las profundidades y velocidades del flujo de detritos, teniendo como base el mapa de peligro según los criterios del análisis jerárquico.

ZONA DE ESTUDIO

El enfoque de este estudio, se sitúa en el distrito de San Rafael, al sur de la provincia de Ambo, en la región de Huánuco – Perú. Asimismo, presenta una situación no óptima por problemas de geodinámica externa (movimientos de masa); ya que, en épocas de intensas precipitaciones o avenidas, se generan huaycos e inundaciones en la salida de la ciudad.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio específica, en donde se analizó el fenómeno, fue la quebrada Rosayoc/Batán (figura 1) perteneciente a la localidad de San Rafael (capital del distrito de San Rafael), que se encuentra al margen izquierdo del río Huallaga y margen derecho de la quebrada.

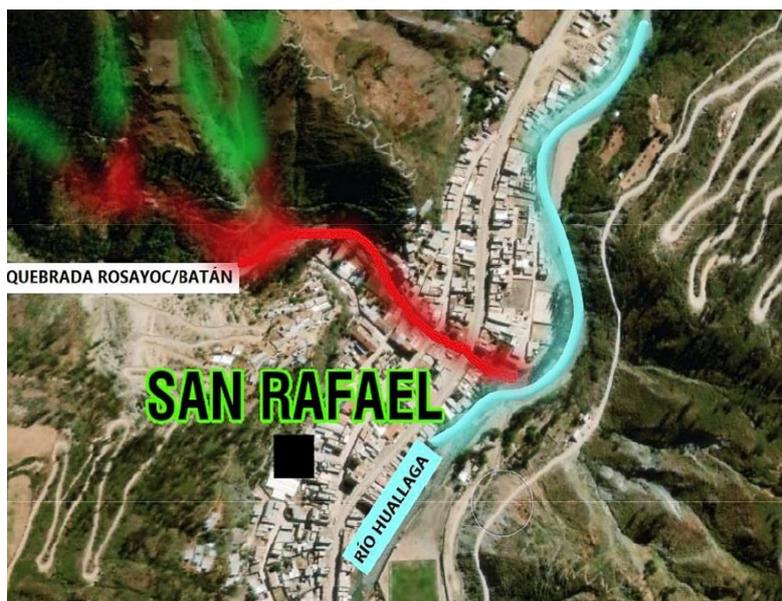


Figura 1. Zona de Estudio - Quebrada Rosayoc/Batán - Localidad de San Rafael

El área de estudio se ubica aproximadamente en la dirección de las siguientes coordenadas, las cuales se muestran en la tabla 1; asimismo, en la figura 2 se visualiza el mapa de localización y ubicación.

Tabla 1. Ubicación política y geográfica de la zona de estudio

UBICACIÓN POLÍTICA	UBICACIÓN GEOGRÁFICA
Departamento: Huánuco	Coordenadas: Sistema WGS84, UTM Planas
Provincia: Ambo	Zona UTM: 18S
Distrito: San Rafael	Cuadrícula: L
Extensión del área de estudio	Inicio Aproximado: Este: 370 305,00 m Sur: 8 857 068,00 m
	Fin Aproximado: Este: 370 569,00 m Sur: 8 857 052,00 m

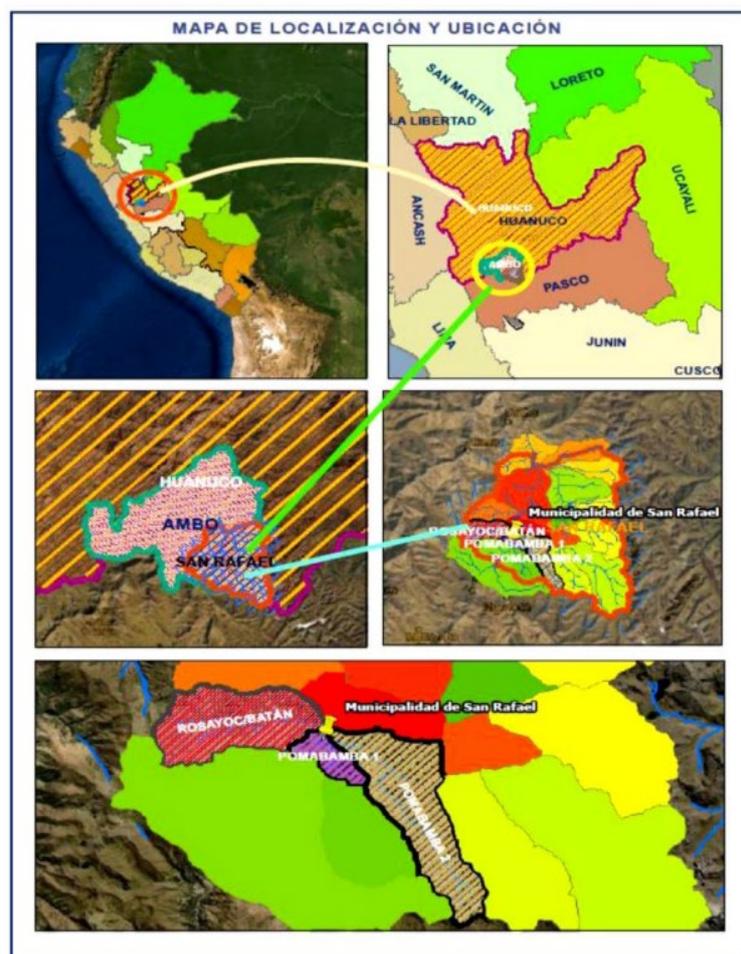


Figura 2. Mapa de localización y ubicación del área de estudio

RELACIÓN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES EVALUADAS

UMBRALES DE PRECIPITACIÓN DE LLUVIA QUE DETONAN MOVIMIENTOS DE FLUJO DE ESCOMBROS

Los umbrales de precipitación de lluvia pueden ser empíricos o de bases físicas: los primeros, se establecen en la identificación de áreas donde ha ocurrido o no un movimiento de masa, el cual está relacionado con un evento de precipitación; mientras que, los umbrales físicos se obtienen mediante modelos numéricos que combinan un análisis hidrológico y geotécnico, los cuales toman en cuenta

las relaciones entre precipitación (lluvias), infiltración, presiones de poros y estabilidad de la ladera. Asimismo, con el fin de, obtener una mejor predicción de los movimientos de masa para este tipo de umbrales, se requiere información hidrológica, litológica, morfológica y características de los suelos que controlan la activación de estos movimientos (Aristizábal et al. 2010). Estos modelos son de gran relevancia como base para el desarrollo de Sistemas de Alerta Temprana (SAT), ya que pueden predecir la cantidad de precipitación necesaria para desencadenar superficies de falla en laderas, así como la localización y tiempo en los cuales un movimiento pueda presentarse. Sin embargo, la necesidad de tener información sobre grandes áreas y el uso de equipos especializados (pluviómetros, tensiómetros, piezómetros) hacen que estos, tengan ciertas limitantes en su implementación (Aristizábal et al. 2010).

Adicionalmente, para la definición de los umbrales de precipitación de lluvia, se realizará el análisis de dos de los parámetros de la precipitación (Aristizábal et al. 2010):

Lluvia crítica: Es el volumen de la precipitación acumulada o el valor límite para que se presente un deslizamiento. Este tipo de lluvia se basa en el análisis de la precipitación acumulada o antecedente de días previos a la ocurrencia del evento.

- **Lluvia acumulada o lluvia de corto plazo (LA):** también denominada como lluvia crítica. Representa la cantidad de lluvia caída en los días inmediatamente previos a la ocurrencia del evento, incluyendo el día de su ocurrencia (lluvia de evento: corresponde a la precipitación registrada durante el día de la ocurrencia del evento o movimiento de masa).
- **Lluvia acumulada antecedente (LAA) o lluvia del largo plazo:** corresponde a la cantidad de lluvia caída en los días precedentes a los que se consideraron en la lluvia acumulada (LA).

Duración crítica: Es el tiempo de duración necesario para que la precipitación alcance el valor crítico.

UMBRALES EMPÍRICOS-ESTADÍSTICOS DE PRECIPITACIÓN DE LLUVIA

Generalmente, las características empleadas para describir y calcular los umbrales de un evento de lluvia son la duración de la lluvia (D) y la precipitación acumulada (o su intensidad promedio) (Martinengo et al. 2023). Por ende, este método basado en la precipitación de lluvia acumulada de días, que pueden llegar a ser semanas y/o meses, es muy útil en la predicción de movimientos de masa; además difiere según las condiciones locales de los suelos y del régimen climático, por tanto, debe ser aplicado en forma particular para cada zona de estudio. Para la realización de un análisis correcto, a cada movimiento de masa se debe asociar su precipitación de lluvia detonante; por lo cual, se debe contar con registros históricos completos de precipitación de lluvia, con un buen período de registro a nivel diario. Luego se podrá generar series de lluvia acumulada con sus respectivas duraciones; con el fin de sintetizar un modelo de comportamiento de la zona por estudiar y así contribuir al pronóstico de los movimientos mencionados, para esto se seleccionan los sitios con mayores eventos de movimientos de masa causados por la precipitación lluvia (Aristizábal et al. 2010).

$$E = \alpha \times D^{\gamma} \quad (1)$$

$$E = (\alpha \pm \Delta\alpha) \times D^{(\gamma \pm \Delta\gamma)} \quad (2)$$

03 RESULTADOS

UMBRALES MÍNIMOS DE LLUVIA ACUMULADA (LA)

Los umbrales con similitud de ecuación estadística, difieren de una familia de curva potencial a otra; ya que, una serie de lluvia acumulada representa un umbral, la cual inicia desde el día en que ocurrió el movimiento de flujo de detritos hasta el día en que no hay lluvia pudiendo activarse después otro evento de precipitación (nueva serie). Asimismo, cuando nuevos eventos de precipitación de lluvia asociados a movimientos de flujo de escombros son registrados en el área de estudio, la población de datos cambia y, por consiguiente, el umbral debe ser recalculado. Por tal motivo, los umbrales mínimos LA1 y LA2, se compararon por separado y entre ellos mismos; debido a que, el primero posee coeficiente de intercepción y el segundo, carece de este coeficiente. De lo anterior, se pudo observar que, el umbral mínimo LA1 de 18 días posee mayores precipitaciones que el umbral mínimo LA1 de 5 días. Además, el umbral mínimo LA2 de 5 días tiene las mayores precipitaciones que los umbrales mínimos LA2 de 6 y 7 días.

Adicionalmente, si se sabe que, los umbrales mínimos representan la cantidad de lluvia por encima de la cual, la probabilidad de ocurrencia de los movimientos de flujo de detritos aumenta severamente. Por lo que, se comparó los umbrales mínimos LA1 y LA2 con las precipitaciones máximas diarias. De esto, se deduce que, las precipitaciones máximas superan al umbral mínimo LA1 de 5 días desde el periodo de retorno (*TR*) de 20 años en adelante; asimismo, las precipitaciones máximas superan completamente a los umbrales mínimos LA2 de 5, 6 y 7 días. En cambio, las precipitaciones máximas no logran superar al umbral mínimo LA1 de 18 días. Finalmente, podemos decir que, las precipitaciones máximas diarias pueden detonar movimientos de flujo de detritos en las condiciones de los umbrales mínimos LA1 (*TR*=20) de 5 días, LA2 de 5, 6 y 7 días. De lo mencionado, los datos y resultados se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Cuadro comparativo entre los umbrales mínimos (LA) y las precipitaciones máximas en 24 horas

Periodo de Retorno (TR)	Umbrales mínimos LA					Precipitación máxima en 24 horas
	LA1 min 5 días (mm)	LA1 min 18 días (mm)	LA2 min 5 días (mm)	LA2 min 6 días (mm)	LA2 min 7 días (mm)	
	$E = (6,6 + 0,7) D^{(0,43 - 0,03)}$	$E = (0,57 + 0,06) D^{(0,784 - 0,021)}$	$E = D^{(0,870 - 0,065)}$	$E = D^{(0,670 - 0,033)}$	$E = D^{(0,568 - 0,034)}$	
	AMCI – LAA2 - 3, 4, 5 O 8 DÍAS	AMCI – LAA2 - 3, 4, 5 O 8 DÍAS	AMCIII – LAA2 - 12 DÍAS	AMCI – LAA2 - 3, 4, 5 O 8 DÍAS	AMCIII – LAA2 - 12 DÍAS	
	AMCIII - LA	AMCIII - LA	AMCIII - LA	AMCI - LA	AMCI - LA	
	$24 \leq D \leq 120$	$24 \leq D \leq 432$	$24 \leq D \leq 120$	$24 \leq D \leq 144$	$24 \leq D \leq 168$	AMCII y AMCIII - LA
10		61,06				48,29
15	53,02	64,94		25,29		52,18
20	54,36	67,48		26,15	16,85	54,93
25	55,34	69,35	54,33	26,79	17,23	57,05
50	58,14	74,71	58,43	28,6	18,30	63,66
100	60,67	79,53	62,11	30,24	19,27	70,35
200	62,98	83,94	65,48	31,73	20,15	77,15
500	65,78	89,28	69,57	33,55	21,22	86,36

UMBRALES MÍNIMOS DE LLUVIA ACUMULADA ANTECEDENTE (LAA)

Para desencadenar los movimientos de flujo de detritos, no solo influyen las lluvias acumuladas detonantes (LA), sino también las lluvias acumuladas antecedentes (LAA); puesto que, estas últimas están relacionadas con las condiciones iniciales de humedad del suelo y nivel freático de la quebrada Rosayoc/Batán. Por consiguiente, se genera erosión superficial (escorrentía) y subsuperficial (infiltración); así como, el ascenso del nivel freático por aumento del agua subterránea que satura el suelo de la quebrada Rosayoc/Batán. Por lo que, todas las componentes del agua precipitada sobre la quebrada, aumentan el peso de la masa, favoreciendo de esta manera la ocurrencia de los movimientos de flujo de detritos. Asimismo, para la determinación de estos umbrales, se utilizó los métodos de inferencia estadística y la teoría de las probabilidades, que comúnmente se aplican en la hidrología convencional. Por último, se obtuvieron los siguientes umbrales mínimos LAA confiables, para distintos periodos de retorno, los cuales se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Umbrales mínimos de lluvia acumulada antecedente (LAA) para distintos periodos de retorno

Periodo de Retorno (TR)	LAA2 mín 3 días (mm)	LAA2 mín 4 días (mm)	LAA2 mín 5 días (mm)	LAA2 mín 8 días (mm)	LAA2 mín 12 días (mm)
	$E = D^{(0,521 - 0,021)}$	$E = D^{(0,653 - 0,073)}$	$D^{(0,572 - 0,020)}$	$D^{(0,573 - 0,010)}$	$D^{(0,796 - 0,004)}$
	24 ≤ D ≤ 72	24 ≤ D ≤ 96	24 ≤ D ≤ 120	24 ≤ D ≤ 192	24 ≤ D ≤ 288
10	9,08	14,76	14,44	19,31	
15	9,48	15,50	15,15	20,31	
20	9,73	15,98	15,62	20,97	93,72
25	9,93	16,33	15,97	21,46	96,34
50	10,47	17,35	16,95	22,85	103,82
100	10,96	18,27	17,84	24,10	110,56
200	11,41	19,10	18,65	25,24	116,72
500	11,95	20,12	19,64	26,63	124,18

VOLÚMENES, MÁXIMAS PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES DEL FLUJO DE DETRITOS DETONADO POR LOS UMBRALES MÍNIMOS LA EN LOS CAUCES DE LA QUEBRADA ROSAYOC/BATÁN

Asimismo, se obtuvieron los siguientes volúmenes, máximas profundidades y velocidades del flujo de detritos detonado por los umbrales mínimos LA en los cauces de la quebrada Rosayoc/Batán, para distintos escenarios como la condición de humedad antecedente del suelo (AMC) y el periodo de retorno (TR), los cuales se muestran en la tabla 4 y tabla 5. Adicionalmente, se adjunta la superposición de los mapas de peligro de los cauces y superficie que conforma la quebrada Rosayoc/Batán, que se visualizan en la figura 3 y figura 5; así como, la comparación de los mapas de peligro de los cauces y superficie que conforma la quebrada Rosayoc/Batán.

Tabla 4. Volúmenes del flujo de detritos detonado por los umbrales mínimos LA en los cauces de la quebrada Rosayoc/Batán

VOLÚMENES DEL FLUJO DE DETRITOS DETONADO POR EL UMBRAL MÍNIMO LA1 DE 5 DÍAS DE LA QUEBRADA ROSAYOC/BATÁN							
AMCIII				AMCIII			
Flujo de detritos - LA1 5d - TR = 15 años				Flujo de detritos - LA1 5d - TR = 20 años			
Flujo (m³)	Agua (m³)	Agua + sedimentos (m³) = bf (agua)	Sedimentos (m³)	Flujo (m³)	Agua (m³)	Agua + sedimentos (m³) = bf (agua)	Sedimentos (m³)

Flujo de entrada (m ³)	2995 428,69	4 974 400,16	1 978 971,47	Flujo de entrada (m ³)	3 148 750,51	5 229 052,49	2 080 301,98
Flujo almacenado dentro del área de análisis o cauce (m ³)	407 721,40	677 088,20	269 366,79	Flujo almacenado dentro del área de análisis o cauce (m ³)	406 060,49	674 334,66	268 274,17
Flujo fuera del área de análisis o zona de depositación (m ³)	2 587 707,29	4 297 311,96	1 709 604,68	Flujo fuera del área de análisis o zona de depositación (m ³)	2 742 690,02	4 554 717,83	1 812 027,80
		CV = 0,40				CV = 0,40	
		BF = 1,66				BF = 1,66	
VOLÚMENES DEL FLUJO DE DETRITOS DETONADO POR EL UMBRAL MÍNIMO LA1 DE 18 DÍAS DE LA QUEBRADA ROSAYOC/BATÁN							
AMCIII				AMCIII			
Flujo de detritos - LA1 18d - TR = 10 años (m ³)				Flujo de detritos - LA1 18d - TR = 15 años			
Flujo (m ³)	Agua (m ³)	Agua + sedimentos (m ³) = bf (agua)	Sedimentos (m ³)	Flujo (m ³)	Agua (m ³)	Agua + sedimentos (m ³) = bf (agua)	Sedimentos (m ³)
Flujo de entrada (m ³)	3 951 105,99	6 561 583,88	2 610 477,89	Flujo de entrada (m ³)	4 441 647,13	7 376 148,96	2 934 501,84
Flujo almacenado dentro del área de análisis o cauce (m ³)	398 293,09	661 443,53	263 150,44	Flujo almacenado dentro del área de análisis o cauce (m ³)	398 018,40	660 980,70	262 962,30
Flujo fuera del área de análisis o zona de depositación (m ³)	3 552 812,90	5 900 140,35	2 347 327,45	Flujo fuera del área de análisis o zona de depositación (m ³)	4 043 628,72	6 715 168,26	2 671 539,54
		CV = 0,40				CV = 0,40	
		BF = 1,66				BF = 1,66	
VOLÚMENES DEL FLUJO DE DETRITOS DETONADO POR EL UMBRAL MÍNIMO LA2 DE 5 DÍAS DE LA QUEBRADA ROSAYOC/BATÁN							
AMCIII				AMCIII			
Flujo de detritos - LA2 5d - TR = 25 años				Flujo de detritos - LA2 5d - TR = 50 años			
Flujo (m ³)	Agua (m ³)	Agua + sedimentos (m ³) = bf (agua)	Sedimentos (m ³)	Flujo (m ³)	Agua (m ³)	Agua + sedimentos (m ³) = bf (agua)	Sedimentos (m ³)
Flujo de entrada (m ³)	3 146 184,08	5 224 806,05	2 078 621,97	Flujo de entrada (m ³)	3 626 638,65	6 022 714,75	2 396 076,10
Flujo almacenado dentro del área de análisis o cauce (m ³)	404 715,22	672 102,61	267 387,39	Flujo almacenado dentro del área de análisis o cauce (m ³)	401 123,96	666 141,69	265 017,73
Flujo fuera del área de análisis o zona de depositación (m ³)	2 741 468,86	4 552 703,43	1 811 234,58	Flujo fuera del área de análisis o zona de depositación (m ³)	3 225 514,69	5 356 573,06	2 131 058,38

CV = 0,40				CV = 0,40			
BF = 1,66				BF = 1,66			
VOLÚMENES DEL FLUJO DE DETRITOS DETONADO POR EL UMBRAL MÍNIMO LA2 DE 7 DÍAS DE LA QUEBRADA ROSAYOC/BATÁN							
AMCIII				AMCIII			
Flujo de detritos - LA2 7d - TR = 20 años				Flujo de detritos - LA2 7d - TR = 25 años			
Flujo (m³)	Agua (m³)	Agua + sedimentos (m³) = bf (agua)	Sedimentos (m³)	Flujo (m³)	Agua (m³)	Agua + sedimentos (m³) = bf (agua)	Sedimentos (m³)
Flujo de entrada (m³)	181 032,15	300 627,09	119 594,94	Flujo de entrada (m³)	193 629,29	321 532,79	127 903,49
Flujo almacenado dentro del área de análisis o cauce (m³)	181 032,15	300 627,09	119 594,94	Flujo almacenado dentro del área de análisis o cauce (m³)	193 607,33	321 496,32	127 888,99
Flujo fuera del área de análisis o zona de depositación (m³)	0,00	0,00	0,00	Flujo fuera del área de análisis o zona de depositación (m³)	21,96	36,47	14,51
CV = 0,40				CV = 0,40			
BF = 1,66				BF = 1,66			

Tabla 5. Máximas profundidades y velocidades del flujo de detritos, para distintos escenarios, detonado por los umbrales mínimos LA en los cauces de la quebrada Rosayoc/Batán

MÁXIMAS PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES DEL UMBRAL MÍNIMO LA1 5D			MÁXIMAS PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES DEL UMBRAL MÍNIMO LA1 18D		
Escenarios	Máximas profundidades (m)	Máximas velocidades (m/seg)	Escenarios	Máximas profundidades (m)	Máximas velocidades (m/seg)
			Escenario 1: TR= 10 años - AMCIII	0,00 <h≤ 15,76	0,00 <V≤ 21,09
Escenario 2: TR= 15 años - AMCIII	0,00 <h≤ 14,26	0,00 <V≤ 18,41	Escenario 2: TR= 15 años - AMCIII	0,00 <h≤ 16,56	0,00 <V≤ 22,32
Escenario 3: TR= 20 años - AMCIII	0,00 <h≤ 14,49	0,00 <V≤ 19,06	Escenario 3: TR= 20 años - AMCIII	0,00 <h≤ 16,43	0,00 <V≤ 22,97
Escenario 4: TR= 25 años - AMCIII	0,00 <h≤ 14,71	0,00 <V≤ 19,24	Escenario 4: TR= 25 años - AMCIII	0,00 <h≤ 16,83	0,00 <V≤ 23,19
Escenario 5: TR= 50 años - AMCIII	0,00 <h≤ 15,18	0,00 <V≤ 20,22	Escenario 5: TR= 50 años - AMCIII	0,00 <h≤ 17,89	0,00 <V≤ 23,83
Máximas profundidades y velocidades del umbral mínimo LA2 5d			Máximas profundidades y velocidades del umbral mínimo LA2 7d		
Escenarios	Máximas profundidades (m)	Máximas velocidades (m/seg)	Escenarios	Máximas profundidades (m)	Máximas velocidades (m/seg)
			Escenario 3: TR= 20 años - AMCIII	0,00 <h≤ 3,88	0,00 <V≤ 1,52
Escenario 4: TR= 25 años - AMCIII	0,00 <h≤ 14,46	0,00 <V≤ 18,90	Escenario 4: TR= 25 años - AMCIII	0,00 <h≤ 3,96	0,00 <V≤ 1,65

Escenario 5: TR= 50 años - AMCIII	0,00 <h≤ 15,35	0,00 <V≤ 20,27	Escenario 5: TR= 50 años - AMCIII	0,00 <h≤ 4,21	0,00 <V≤ 2,08
------------------------------------------------	----------------	----------------	----------------------------------------------------	---------------	---------------

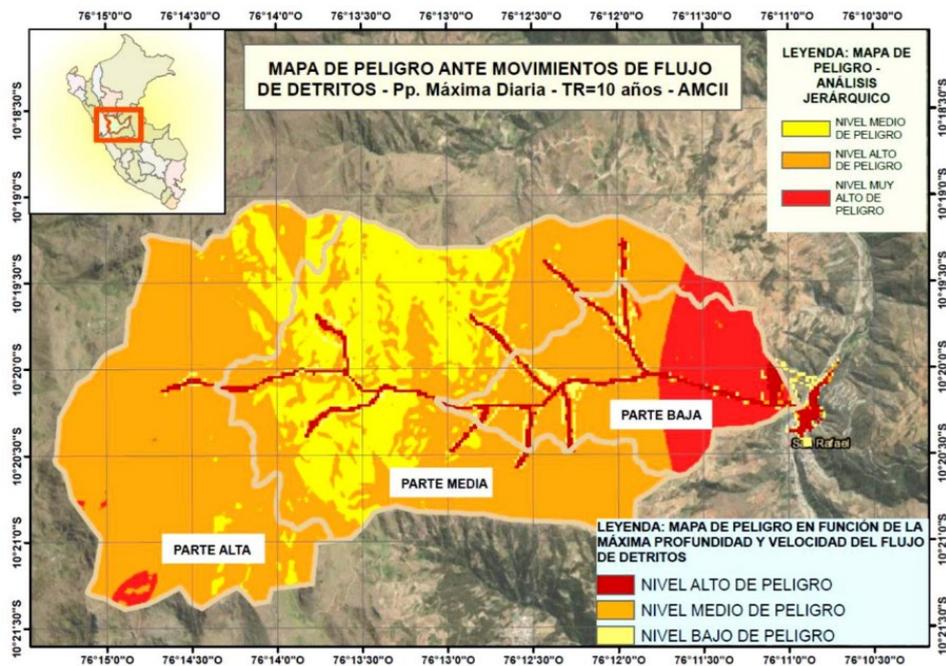


Figura 3. Superposición de los Mapas de peligro de los cauces, en función de la máxima profundidad y velocidad del flujo de detritos detonado por la precipitación máxima en 24 horas, y superficie que conforma la quebrada Rosayoc/Batán, mediante el proceso de análisis jerárquico, en condiciones normales (AMCII) para un periodo de retorno (TR) de 10 años

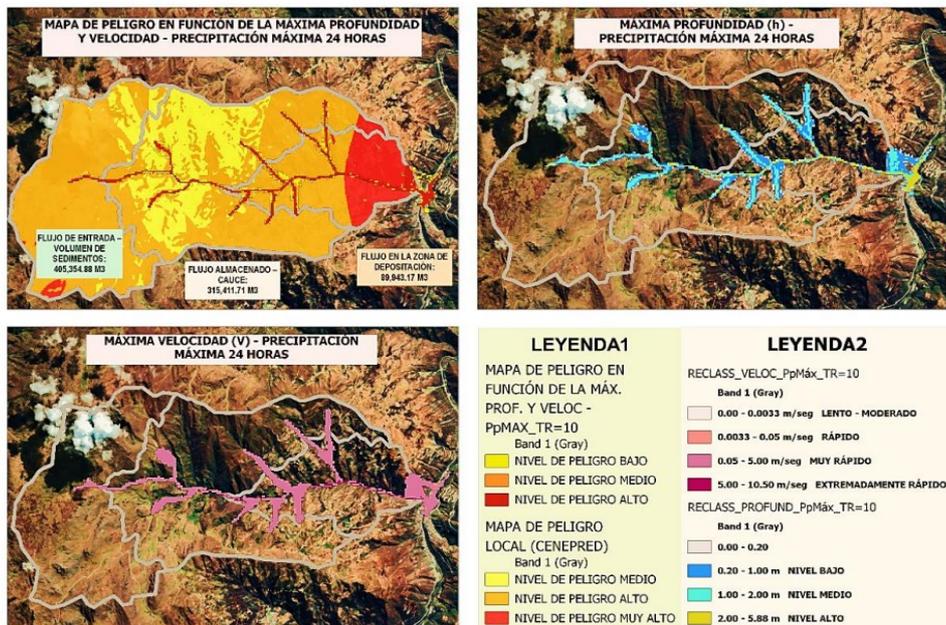


Figura 4. Comparación de los mapas de peligro de los cauces, en función de la máxima profundidad y velocidad del flujo de detritos detonado por la precipitación máxima en 24 horas, y superficie que conforma la quebrada Rosayoc/Batán, mediante el proceso de análisis jerárquico, en condiciones normales (AMCII) para un periodo de retorno (TR) de 10 años

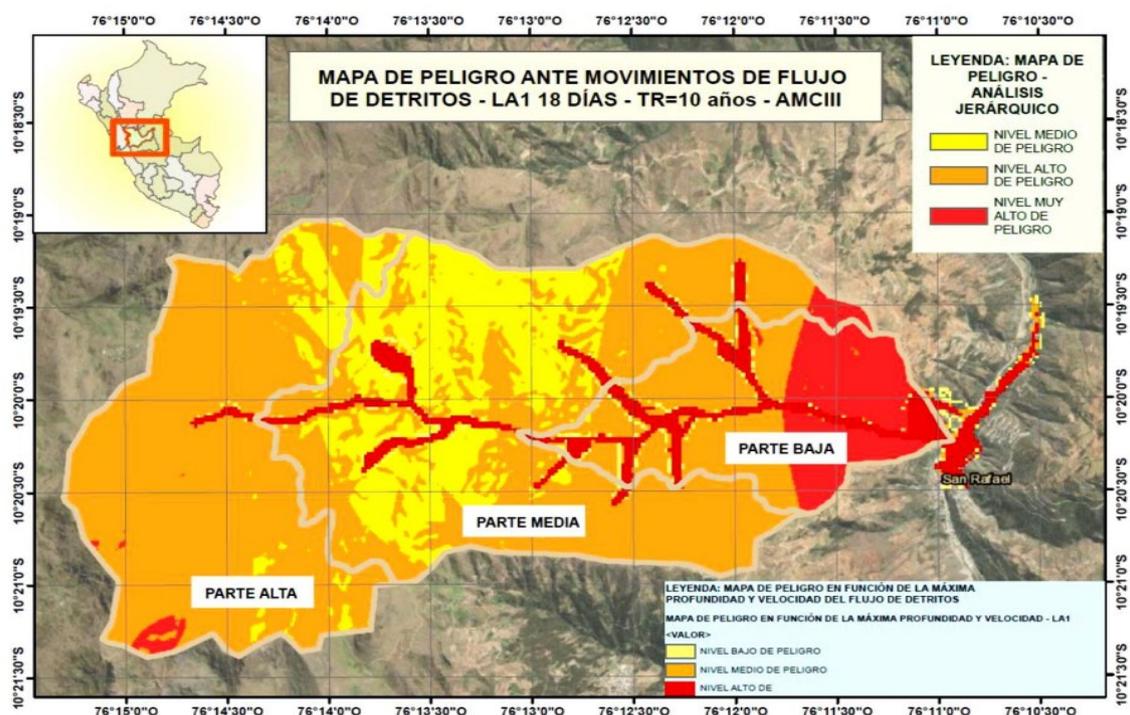


Figura 5. Mapas de peligro de los cauces, en función de la máxima profundidad y velocidad del flujo de detritos detonado por el umbral mínimo LA1 de 18 días, y superficie que conforma la quebrada Rosayoc/Batán, mediante el proceso de análisis jerárquico, en condiciones húmedas (AMCIII) para un periodo de retorno (TR) de 10 años

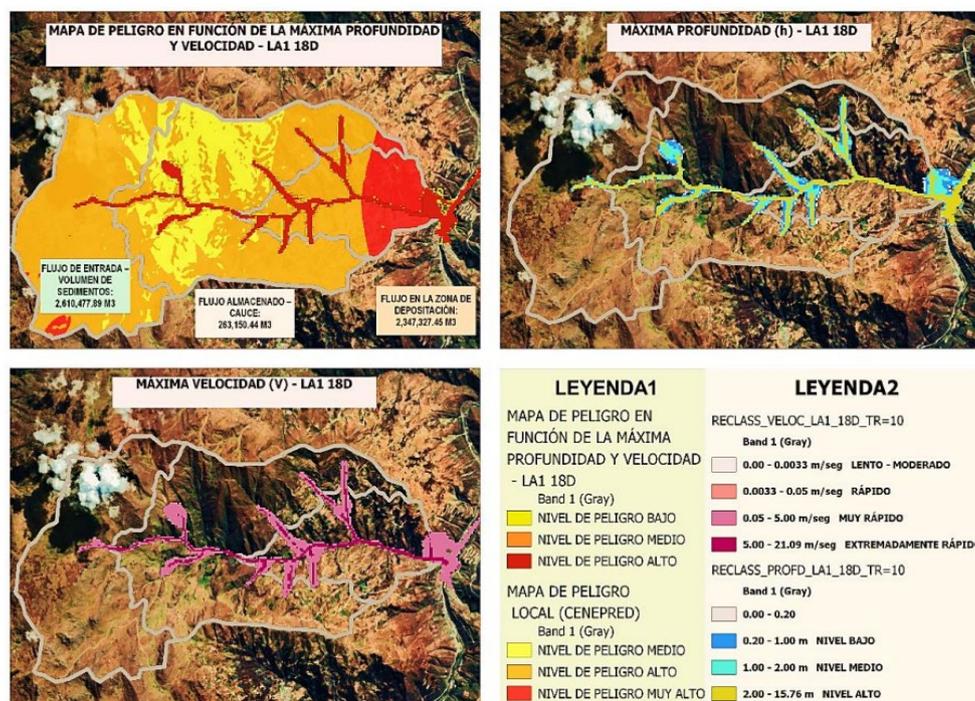


Figura 6. Comparación de los mapas de peligro de los cauces, en función de la máxima profundidad y velocidad del flujo de detritos detonado por el umbral mínimo LA1 de 18 días, y superficie que conforma la quebrada Rosayoc/Batán, mediante el proceso de análisis jerárquico, en condiciones húmedas (AMCIII) para un periodo de retorno (TR) de 10 años

04 CONCLUSIONES

En conclusión, se calculó el Estadístico de Habilidad Verdadera (TSS, por sus siglas en inglés) de los umbrales mediante la calibración y validación. Esto indica que se evaluó la capacidad del modelo para predecir resultados futuros, lo que condujo a los siguientes hallazgos: las incertidumbres son menores y cercanas al 10% para los umbrales LA1 de 5 días y 18 días, respectivamente; el umbral LA1 de 18 días también tiene la mayor tasa de predicción (49%) de los dos. También se encontraron incertidumbres por debajo del 10% para los umbrales LA2 de 5, 6 y 7 días, siendo el umbral LA2 de 7 días el que tiene el mayor porcentaje de predicción (62%). Los umbrales LAA2 de 3, 4, 5, 8 y 12 días presentan incertidumbres menores y cercanas al 10% y el umbral LAA2 de 3 días tiene el mayor porcentaje de predicción (41%), sin embargo es probable que no genere escorrentía. A esto, cabe destacar que, el umbral LAA de 12 días tiene 6% de predicción; no obstante, posee una baja incertidumbre del 0.5% y, es probable que genere una gran escorrentía. Adicionalmente, mediante el análisis y evaluación de los niveles de peligro para los movimientos de flujo de detritos según el proceso de análisis jerárquico (CENEPRED 2014), se estableció que la parte baja, se estableció que en la parte baja, se encuentran los niveles muy alto (color rojo) y alto (color anaranjado); en la parte media, se hallaron los niveles alto (color anaranjado) y medio (color amarillo); y en la parte alta, se encontró un nivel alto de peligrosidad (color anaranjado), asimismo, estos niveles poseen la mayor predominancia de área en cada una de las partes de la quebrada. Por otra parte, también se hicieron los mapas de peligrosidad ante movimientos de flujo de detritos detonados por la precipitación máxima en 24 horas y el umbral crítico de lluvia acumulada (LA1) de 18 días, en función de las máximas profundidades y velocidades que genera el flujo de detritos, en la simulación computacional del programa FLO-2D. Este modelo mencionado, presentó tres niveles, los cuales son bajo, medio y alto, teniendo como preponderante los niveles de peligro medio (color anaranjado) y alto (color rojo), en los recorridos de los cauces.

05 REFERENCIAS

- Aristizábal E., Martínez H. y Vélez J. I.** (2010). "Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias", *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131), 209-227, ISSN 0370-3908, Colombia. Extraído de: <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/621>
- Aleotti P.** (2004). "A warning system for rainfall-induced shallow failures", *Engineering Geology*, 73(3-4), 247-265, ISSN 0013-7952, Italia. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007>
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [CENEPRED].** (2014). "Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales (Versión 02)". Lima, Perú. Extraído de: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/257>
- DesInventar.org.** (2022). "UNDRR DesInventar Sendai: Perú". DesInventar online. Recuperado de 1994. Obtenido de: <https://www.desinventar.org/>
- Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI].** (2016). "Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación (SINPAD v2.0)". Sistema informático bajo la plataforma Internet. Lima, Perú. Recuperado de 2003. Extraído de: <http://sinpad2.indeci.gob.pe/sinpad2/faces/public/portal.html>
- Hungr O.** (2005). "Chapter 2: Classification and terminology", In M. Jakob, O. Hungr (Eds.), *Debris flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 9-23), Springer, Berlin, Heidelberg, Alemania, ISBN 978-3-540-27129-1. Obtenido de: https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_2

- Ilinca V.** (2021). "Using morphometrics to distinguish between debris flow, debris flood and flood (Southern Carpathians, Romania)", *Catena*, 197, 104982, ISSN 0341-8162. Obtenido de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104982>
- Martinengo M., Zugliani D. and Rosatti G.** (2023). "Validation and potential forecast use of a debris-flow rainfall threshold calibrated with the Backward Dynamical Approach", *Geomorphology*, 421, 108519, ISSN 0169-555X. Extraído de: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108519>
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas.** (2007), "Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas (Publicación Geológica Multinacional N°4)", Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. Repositorio Institucional INGEMMET. Obtenido de: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2830>
- Yang H., Hu K., Zhang S. and Liu S.** (2023). "Feasibility of satellite-based rainfall and soil moisture data in determining the triggering conditions of debris flow: The Jiangjia Gully (China) case study", *Engineering Geology*, 315, 107041, ISSN 0013-7952. Extraído de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107041>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Elizabeth Milagros Santiago Torres <https://orcid.org/0009-0002-6478-9816>

Es el único autor, por lo tanto, realizó el artículo en su totalidad.