



Estimación de umbrales de lluvia que desencadenan movimientos de flujo de escombros en la quebrada Rosayoc/Batán

Elizabeth Milagros Santiago Torres¹

emist2694@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-6478-9816>

Universidad Nacional Hermilio Valdizán

Huánuco – Perú

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo estimar y evaluar umbrales de lluvia locales que desencadenan movimientos de flujo de escombros, entorno al área de la quebrada Rosayoc/Batán – distrito de San Rafael – provincia de Ambo – departamento de Huánuco. Por otra parte, se realiza una metodología empírico-estadístico; por cual, en este estudio, se han hecho intentos para comprender mejor la relación entre la precipitación y el desarrollo de procesos de movimientos de flujo de escombros. Además, el umbral mínimo LA1 de 18 días posee mayores precipitaciones que el umbral mínimo LA1 de 5 días, siendo el más peligroso. Así como, el umbral mínimo LA2 de 5 días tiene las mayores precipitaciones que los umbrales mínimos LA2 de 6 y 7 días. A esto se añade que, los umbrales LA1 de 5 y 18 días tienen incertidumbres menores y cercanas al 10%; asimismo, el mayor porcentaje de predicción de los umbrales LA1, lo posee el umbral LA1 de 18 días con 49%. De igual modo, los umbrales LA2 de 5, 6 y 7 días tienen incertidumbres menores al 10%; y el mayor porcentaje de predicción de los umbrales LA2, lo posee el umbral LA2 de 7 días con 62%. Por último, los resultados de este trabajo demuestran el potencial de los umbrales de lluvia basados en la relación de la precipitación de lluvia con los eventos de movimientos de flujo de escombros, siendo importante para el monitoreo y pronóstico de este fenómeno.

Palabras clave: *flujo de escombros; umbrales de lluvia acumulada; umbrales de lluvia acumulada; movimientos en masa; incertidumbres; predicción.*

¹ Autor Principal

Rainfall threshold estimation that triggers debris flow movements in the Rosayoc/Batán stream

ABSTRACT

This research aims to estimate and evaluate the local precipitation thresholds that trigger debris flow movements in the area of the Rosayoc/Batán stream - district of San Rafael - district of Ambo, department of Huánuco. Furthermore, an empirical-statistical methodology is used, so that this study attempts to better understand the relationship between precipitation and the development of debris flow movement processes. In addition, the 18-day LA1 minimum threshold has higher precipitation than the more dangerous 5-day LA1 minimum threshold. Similarly, the 5-day LA2 minimum threshold has more precipitation than the 6- and 7-day LA2 minimum thresholds. In addition, the 5-day and 18-day LA1 thresholds have lower uncertainties close to 10%, and the highest percentage of predictability of the LA1 thresholds is the 18-day LA1 threshold with 49%. Similarly, the LA2 thresholds of 5, 6 and 7 days have uncertainties of less than 10%, and the highest percentage of predictability of the LA2 thresholds is for the LA2 threshold of 7 days with 62%. Finally, the results of this work demonstrate the potential of pluviometric thresholds based on the relationship of precipitation with debris flow movement events, being important for the monitoring and prediction of this phenomenon.

Keywords: debris flow; cumulative rainfall thresholds; cumulative antecedent rainfall thresholds; mass movements; uncertainties; prediction.

Artículo recibido 15 enero 2023

Aceptado para publicación: 05 febrero 2023

INTRODUCCIÓN

Debido a que, los movimientos de flujo de escombros, comúnmente conocidos como huaycos, son fenómenos naturales potencialmente destructivos y peligrosos en todo el mundo, especialmente en el Perú. Resulta necesario, el análisis y estudio de la amenaza ante movimientos de flujo de escombros, así como la capacidad de pronosticar dichos movimientos. Por ello, es importante primero definir qué es un flujo de escombros; por consiguiente, podemos decir que, es un flujo canalizado que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Asimismo, es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de gran cantidad de sedimentos gruesos saturados, o mucho mayor que la cantidad de sedimentos gruesos que tiene un flujo hiperconcentrado, y poca cantidad de sedimentos finos, por lo cual son no plásticos (Índice de plasticidad menor al 5%) (Hung, 2005; Hung et al., 2001; INGEMMET, 2007; Varnes, 1978). Además, existen diversas causas, como los agentes condicionantes y desencadenantes, que dan lugar a la ocurrencia de los movimientos de flujo de escombros; los cuales pueden cambiar de localidad en localidad, operando con diferentes grados de complejidad e intensidad de uno a otro ambiente. Sin embargo, para este estudio, se considera como agente detonante la de lluvia, ya que es el factor que activa con mayor frecuencia los movimientos de flujo de escombros. Por esta razón, se han realizado varios estudios para entender mejor la relación entre la lluvia y el desarrollo de procesos de movimientos en masa; los cuales son importantes para el estudio de los mecanismos desencadenantes, así como, el pronóstico de las características de eventos futuros y el desarrollo de guías de ingeniería para la mitigación respecto a los flujos de escombros (Hong et al., 2005; Ibsen & Casagli, 2004; Segoni et al., 2014; Yu et al., 2015). De estos estudios, surgen los umbrales de lluvia, los cuales pueden ser empíricos-estadísticos ($E = (\alpha \pm \Delta\alpha) \times D^{(\nu \pm \Delta\nu)}$), que vincula la lluvia acumulada del evento (E en mm) con la duración (D en horas), o de bases físicas; sin embargo, el presente estudio desarrolla y profundiza en el tema de umbrales empíricos-estadísticos que detonan movimientos de flujo de escombros en la quebrada Rosayoc/Batán. No obstante, 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 (Salinas Jasso, 2016). Adicionalmente, mediante métodos estadísticos, 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 pudo establecer los umbrales críticos de lluvia acumulada detonante (LA) y lluvia acumulada antecedente (LAA). Además, a través de la calibración y la validación se pudo definir umbrales de forma objetiva, tal como maximizar y mejorar la capacidad de desempeño predictivo. Con lo cual, se logra reducir los posibles errores referentes al seguimiento y pronóstico de los movimientos de flujos de escombros en la quebrada Rosayoc/Batán.

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) - SINPAD v2.0 y DesInventar.org (2022). Asimismo, la quebrada Rosayoc/Batán, ubicada al margen derecho de la localidad de San Rafael (capital del distrito), es una zona muy susceptible a movimientos de flujo de escombros; 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); pero entre las que hemos considerado como destacadas para este estudio son: las 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. Por lo que, esta investigación beneficiará a la población que reside en esta localidad; así como, a otras localidades, asentamientos humanos y ciudades. Finalmente, el objetivo principal de este trabajo es estimar los umbrales de precipitación para probar la viabilidad del pronóstico de movimientos de flujo de escombros a escala local – en la quebrada Rosayoc/Batán.

METODOLOGÍA

El área de estudio se ubica en el distrito de San Rafael, al sur de la provincia de Ambo, en la región Huánuco, la cual presenta una situación no óptima por problemas de geodinámica externa (movimientos de masa); puesto que, en épocas de intensas precipitaciones o avenidas, se generan huaycos e inundaciones en la salida de la ciudad (SGOT - GRPPAT - GOREHCO, 2013).

Esta investigación utilizó métodos científicos para justificar las hipótesis formadas a través de la observación, asimismo se esfuerza por obtener información cuantificable, verificable y a través de experimentos; siguiendo así, un proceso lógico y sistemático, que ayuda a verificar los resultados obtenidos y ampliar el conocimiento, en términos de precipitaciones desencadenantes de movimiento de flujo de escombros. Por otro lado, este estudio se enfocó en considerar dos efectos principales de la lluvia: el efecto acumulativo de la lluvia a largo plazo (días antes del evento) y el efecto inmediato de la lluvia a corto plazo (día del evento).

Enfoque de la Investigación

Según el tipo de datos analizados, esta investigación es de tipo cuantitativa; dado que es de carácter objetivo, pues se dedica a recopilar, procesar y analizar los valores numéricos obtenidos de la muestra de este estudio.

Tipo de investigación

- De acuerdo con el nivel de profundidad es de nivel explicativo; dado que es el nivel más profundo de conocimientos, que una investigación posee, con enfoque cuantitativo. Además, buscaremos el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa (investigación post facto) – efecto (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis.
- Según el periodo de tiempo en el que se realiza es de tipo longitudinal-retrospectiva; debido a que, se recolectan datos cuantitativos de un periodo largo de tiempo. Así mismo, se considera que esta investigación es retrospectiva; ya que, este estudio es posterior al suceso del evento e implica la recopilación de datos del pasado; así como para esta investigación se obtuvieron los datos de registros históricos de movimientos de flujo de escombros detonados por precipitaciones de lluvia.

Diseño de la investigación

El diseño es observacional-longitudinal, ya que, se recolectan datos cuantitativos de un periodo largo de tiempo. Asimismo, puede llegar a ser un diseño preexperimental mediante la simulación computacional, para esto se deberá añadir los parámetros físicos (geomorfológicos y geotécnicos) y la humedad antecedente del suelo al modelo empírico-estadístico (Campbell y Stanley, 1966, citado en Hernández Sampieri et al., 2014; Ñaupas Paitán et al., 2014).

POBLACIÓN Y MUESTRA

González Castellanos et al. (2003) y Arias (2006) señalan que, en términos más precisos, la población es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Por ello, se considera como población lo siguiente: movimientos de flujo de escombros detonados por precipitaciones de lluvia del distrito de San Rafael, provincia de Ambo, departamento de Huánuco. Asimismo, la muestra es cualquier subconjunto representativo y característico de la población; por lo cual, para esta investigación se eligió la siguiente muestra: movimientos de flujo de escombros detonado por precipitaciones de lluvia, registrados desde el año 1990 hasta el año 2019, en la localidad de San Rafael, distrito San Rafael, provincia de Ambo, departamento de Huánuco. Adicionalmente, González Castellanos et al. (2003) y Arias (2006) declaran que, para seleccionar la muestra se utiliza una técnica o procedimiento denominado muestreo. Existen dos tipos básicos de muestreo: Probabilístico o Aleatorio y No Probabilístico. Este estudio desarrolla un muestreo no probabilístico; ya que, se eligió trabajar con una muestra específica de 30 años, con el objetivo de que, los resultados sean confiables al momento de analizar los parámetros pluvio-meteorológicos.

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Conforme a lo expuesto en la teoría, y luego de la construcción de series parciales de los umbrales empíricos, se procedió a establecer los umbrales estadísticos mediante la ley de la potencia en coordenadas lineales (relación logarítmica) y la estadística no paramétrica. Asimismo, la confiabilidad de un umbral estadístico de lluvia que detona movimientos de flujo de escombros está relacionado con las incertidumbres relativas $\Delta\alpha/\alpha$ y $\Delta\gamma/\gamma$. Es decir, esto se puede desarrollar a través del análisis de dependencia de los parámetros del modelo (α , γ , $\Delta\alpha$ y $\Delta\gamma$). Adicionalmente, de acuerdo con Peruccacci

et al. (2012), se estableció que las incertidumbres ($\Delta\alpha/\alpha$ y $\Delta\gamma/\gamma$) deben ser menores, próximos, o iguales al 10 por ciento; con el objetivo de obtener resultados confiables.

La validación tiene como objetivo mostrar el potencial de la capacidad de predecir o diferenciar eventos de lluvia desencadenantes y no desencadenantes. Por tal motivo, después de determinar los umbrales estadísticos y las incertidumbres asociadas, así como su calibración, se procede a validar el desempeño de estos umbrales estadísticos calibrados. Por lo cual, se utiliza la metodología definida por Galiano et al. (2015), quienes señalan que para propósitos de validación, un umbral de lluvia puede ser considerado como un clasificador binario de las condiciones de lluvia (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), ya que pueden ser probables, o no probables, de resultar en movimientos de flujo de escombros. Asimismo, para poder efectuar esta validación se empleó la curva ROC, la cual analiza la capacidad predictiva de los umbrales estadísticos calibrados. Además, mediante el gráfico de curva ROC se ilustra la "proporción de verdaderos positivos" (eje Y) versus la "proporción de falsos positivos" (eje X) para cada punto de corte del test de diagnóstico de umbrales, cuya escala de medición es continua. Luego, a modo de referencia, se traza una línea desde el punto (0,0) al punto (1,1), la cual es denominada diagonal de referencia o línea de no-discriminación. Esta línea representaría un test de diagnóstico con curva ROC incapaz de discriminar umbrales desencadenantes versus no desencadenantes, debido a que cada punto de corte que la compone determina la misma proporción de verdaderos positivos y de falsos positivos. Finalmente, podemos decir que, un test de diagnóstico tendrá mayor capacidad discriminativa en la medida que sus puntos de corte tracen una curva ROC lo más lejana posible a la línea de no-discriminación; dicho de otra manera, lo más cercana posible a los lados izquierdo y superior del gráfico.

Tabla 1

Tabla de contingencia para un modelo de clasificador binario

EVENTO PRONOSTICADO	EVENTO OBSERVADO		TOTAL
	Sí	No	
Sí	TP	FP	(TP + FP)
No	FN	TN	(FN + TN)
Total	(TP + FN)	(FP + TN)	

Fuente: Gariano et al. (2015).

En función a las cuatro contingencias, se calcularon los siguientes índices de puntuación (skill scores) (Gariano et al., 2015; Martinengo et al., 2023):

- POD (Probabilidad de detección), también conocido como tasa de acierto, que es la proporción de eventos que fueron predichos correctamente.
- POFD (Probabilidad de falsa detección), también conocido como tasa de falsa alarma, que es la proporción de predicciones correctas cuando el evento no ocurre.
- POFA (Probabilidad de falsa alarma), también conocido como la proporción de falsa alarma, es la relación entre el número de falsas alarmas y el número total de pronósticos correctos.
- Puntuación de Hanssen y Kuipers (HK o TSS), que mide el rendimiento predictivo del modelo, o precisión, para eventos con y sin movimientos de masa. El HK depende linealmente de POD y POFD (HK=POD-POFD).

Asimismo, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

se presenta las fórmulas y valores óptimos de los índices de puntuación utilizados en la validación de los umbrales.

Tabla 2

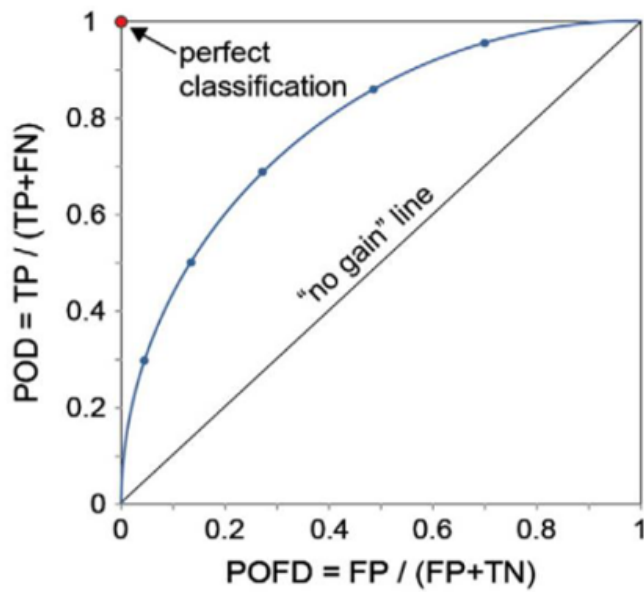
Índices de puntuación para validación de umbrales

ÍNDICE DE PUNTUACIÓN	FÓRMULA	RANGO	VALOR ÓPTIMO
Probabilidad de detección	$POD = \frac{TP}{TP + FN}$	[0, 1]	1
Probabilidad de falsa detección	$POFD = \frac{FP}{FP + TN}$	[0, 1]	0
Probabilidad de falsa alarma	$POD = \frac{FP}{TP + FP}$	[0, 1]	0
Puntuación de Hanssen y Kuipers	$POD = \left(\frac{TP}{TP + FN} \right) - \left(\frac{FP}{FP + TN} \right)$	[-1, 1]	1

Fuente: Gariano et al. (2015).

Figura 1

Espacio ROC, con un resultado del modelo hipotético



Fuente: Gariano et al. (2015).

Tabla 3

Resumen de datos para la calibración y validación de los umbrales de lluvia de la quebrada

Rosayoc/Batán

Periodo de estudio 1994 - 2019 (1994, 1998, 1999, 2006, 2010, 2011, 2013, 2016, 2017, 2018 y 2019)		11 años	
Eventos de lluvia	1757	100%	
Eventos de lluvia que resultaron en flujo de escombros y/o deslizamientos de tierra	323	18%	
Eventos de lluvia que no cuentan con información de flujo de escombros y/o deslizamientos de tierra	1434	82%	

Tabla 4

Número de eventos de lluvia para la calibración y validación de los umbrales de lluvia de lluvia de la quebrada Rosayoc/Batán

Calibración de los eventos de lluvia que detonaron flujo de escombros y/o deslizamientos de tierra	304	94%
Validación de los eventos de lluvia que detonaron flujo de escombros y/o deslizamientos de tierra	323	100%
Validación de los eventos de lluvia que no cuentan con información de flujo de escombros y/o deslizamientos de tierra	1434	82%
Validación total de los eventos de lluvia	1757	100%

Tabla 6

Umbrales mínimos de lluvia acumulada (LA) calibrados y validados

UMBRALES MÍNIMOS LA CALIBRADOS Y VALIDADOS - AÑOS 1994 - 2019 (11 AÑOS)								
ECUACIÓN DE UMBRALES LA	TR	PROB DE EXCEDENCIA (KERNEL)	α	$\pm\Delta\alpha$	$\Delta\alpha/\alpha$	γ	$\pm\Delta\gamma$	$\Delta\gamma/\gamma$
UMBRALES - LA1 18D								
$E = (0.57 + 0.06)D^{(0.784 - 0.021)}$	10 - 500	0.00% - 7.48%	0.57	0.06	10.53%	0.784	0.021	2.68%
UMBRALES - LA2 6D								
$E = D^{(0.670 - 0.033)}$	15 - 500	0.00% - 6.00%				0.670	0.033	4.93%
UMBRALES - LA2 7D								
$E = D^{(0.568 - 0.034)}$	20 - 500	0.00% - 4.23%				0.568	0.034	5.99%
UMBRALES - LA1 5D								
$E = (6.6 + 0.7)D^{(0.43 - 0.03)}$	15 - 500	0.00% - 5.89%	6.6	0.7	10.61%	0.43	0.03	6.98%
UMBRALES - LA2 5D								
$E = D^{(0.670 - 0.065)}$	25 - 500	0.00% - 3.40%				0.670	0.065	7.47%

Tabla 7

Umbral estadístico de lluvia acumulada antecedente (LAA) calibrados y validados

TR (PERIODO DE RETORNO)	PROB. DE EXCEDENCIA (KERNEL)	ECUACION	TP	FN	FP	TN	POD	POFD	POFA	HK	δ
10 - 500	0.00% - 8.84%	$E = D^{(0.211 \pm 0.021)}$	129	57	485	1029	0.69	0.25	0.76	0.41	0.42
10 - 500	0.00% - 8.39%	$E = D^{(0.212 \pm 0.010)}$	119	67	350	1084	0.64	0.24	0.73	0.40	0.44
10 - 500	0.00% - 8.39%	$E = D^{(0.212 \pm 0.020)}$	117	69	350	1084	0.62	0.24	0.73	0.38	0.44
10 - 500	0.00% - 7.93%	$E = D^{(0.222 \pm 0.072)}$	59	127	244	1190	0.32	0.17	0.81	0.13	0.70
20 - 500	0.00% - 4.98%	$E = D^{(0.198 \pm 0.020)}$	26	160	115	1319	0.14	0.05	0.82	0.06	0.86

Tabla 8

Umbral mínimo de lluvia acumulada antecedente (LAA) calibrados y validados

UMBRALES MÍNIMOS LAA CALIBRADOS Y VALIDADOS - AÑOS 1994 - 2019 (11 años)									
ECUACION DE UMBRALES LAA	TR	PROB DE EXCEDENCIA	α	$\pm \Delta \alpha$	$\Delta \alpha / \alpha$	γ	$\pm \Delta \gamma$	$\Delta \gamma / \gamma$	
UMBRALES - LAA2 12D									
$E = D^{(0.796 - 0.004)}$	20 - 500	0.00% - 4.79%				0.796	0.004	0.50%	
UMBRALES - LAA2 8D									
$E = D^{(0.573 - 0.010)}$	10 - 500	0.00% - 8.21%				0.573	0.010	1.75%	
UMBRALES - LAA2 5D									
$E = D^{(0.572 - 0.020)}$	10 - 500	0.00% - 7.67%				0.572	0.020	3.50%	
UMBRALES - LAA2 3D									
$E = D^{(0.521 - 0.021)}$	10 - 500	0.00% - 7.38%				0.521	0.021	4.03%	
UMBRALES - LAA2 4D									
$E = D^{(0.653 - 0.073)}$	10 - 500	0.00% - 8.16%				0.653	0.073	11.18%	

TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

- Para la presente investigación, se utilizó la técnica de análisis documental como las fuentes primarias, proporcionadas por el SENAMHI, que nos ayudó en la obtención de los parámetros pluvio-meteorológicos. También, con la técnica mencionada se pudo adquirir los datos históricos de los movimientos de flujo de escombros del distrito de San Rafael, esta información fue brindada por el Desinventar e INDECI-Sinpad.
- **Estadística Descriptiva:** Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos se empleó medidas de tendencia central (media) y medidas de variabilidad (desviación estándar y varianza).
- **Estadística Inferencial:** Para estimar los parámetros pluvio-meteorológicos, se usaron los siguientes análisis paramétricos: coeficientes de correlación, regresión lineal, consistencia en la media con la prueba T - Student y consistencia en la desviación estándar con la prueba F – Fisher.
- **Estadística no paramétrica:** Para realizar la calibración y estimar las incertidumbres de los umbrales mediante la técnica de Bootstrap; asimismo, para determinar las probabilidades de excedencia se usó la densidad de Kernel (KDE).
- **Software y Paquete Estadístico:** Para procesar los datos de este trabajo de investigación se usó los softwares como: Microsoft Excel, IBM SPSS STATISTICS, HIDROESTA, ARCGIS, QGIS, entre otros.

INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN

- Los instrumentos que se usaron en el presente estudio de investigación fueron los siguientes:
- Fichas de registro de precipitaciones de lluvia, los cuales fueron adquiridos de la medición del pluviómetro de cada estación requerida,
- Registro de los movimientos de masa (deslizamientos, huaicos y flujo de escombros) ocurridos en el lugar de estudio.
- Dispositivos tecnológicos: La utilización de una computadora y un ordenador portátil para el uso de las herramientas y programas como SIG (Sistema de Información Geográfica), entre otros.

LIMITACIONES

Esta investigación presenta las siguientes limitaciones:

- Carencia de estaciones meteorológica en la parte media y alta de la microcuenca Rosayoc/Batán; asimismo, si se considerara otras estaciones con igual característica climática y ecológica, en su mayoría, no se cuenta con información extensa, ni completa de varios años requeridos para este estudio.
- Falta de catálogos, registros y/o inventarios con clasificación de los distintos tipos de movimientos de masa que ocurren en el área de estudio, para poder tener información exacta solo del tipo de movimiento requerido para este estudio, que en este caso es flujo de escombros.
- En la información que tienen los registros de movimientos en masa recopilados, ya que, no cuentan con una ubicación exacta de dónde ocurrió el fenómeno; es decir, la localización de los movimientos en masa que se reportan, en coordenadas geográficas de latitud y longitud no necesariamente corresponden al lugar exacto donde ocurrió el evento

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitaciones máximas multianuales en 24 horas de la quebrada Rosayoc/Batán

Estos son los resultados de las precipitaciones máximas en 24 horas, con distintos periodos de retorno (TR), para cada una de las estaciones seleccionadas, en función a las partes (baja, media y alta) que conforman la quebrada Rosayoc/Batán.

Tabla 10

Precipitaciones máximas en 24 horas, con diferentes periodos de retorno (TR), de la quebrada Rosayoc/Batán

PRECIPITACIÓN MÁXIMA DE LA QUEBRADA ROSAYOC/BATÁN	
Periodo de Retorno (TR)	Promedio de Precipitación Máxima
10	48.29
15	52.18
20	54.93
25	57.05
50	63.66
100	70.35
200	77.15
500	86.36

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 escombros 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 escombros 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 escombros en las condiciones de los umbrales mínimos LA1 (TR=20) de 5 días, LA2 de 5, 6 y 7 días.

UMBRALES MÍNIMOS LA						
Periodo de Retorno (TR)	LA1 MIN 5	LA1 MIN 18	LA2 MIN 5	LA2 MIN 6	LA2 MIN 7	PRECIPITACIÓN MÁXIMA en 24 HORAS
	DÍAS (mm)	DÍAS (mm)	DÍAS (mm)	DÍAS (mm)	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 - LAA	AMCI - LAA	AMCIII - LAA	AMCI - LAA	AMCIII - LAA	
	AMCIII - LA	AMCIII - LA	AMCIII - LA	AMCI - LA	AMCI - LA	
	$24 \leq D \leq 120$	$24 \leq D \leq 432$	$24 \leq D \leq 120$	$24 \leq D \leq 144$	$24 \leq D \leq 168$	
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 escombros, no solo influye las lluvias acumuladas detonantes (LA), sino también las lluvias acumuladas antecedentes (LAA); ya 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 escombros.

Según lo señalado en la teoría, se utilizó los métodos de inferencia estadística y la teoría de las probabilidades, que comúnmente se aplican en la hidrología convencional. Además, se escogió trabajar

con los umbrales mínimos de lluvia acumulada antecedente (LAA); ya que, cuando exista valores superiores al umbral mínimo de lluvia, se aumentará la probabilidad de ocurrencia de movimientos de flujo de escombros en la quebrada Rosayoc/Batán. Por último, después de todo el procedimiento mencionado se obtuvieron los siguientes umbrales mínimos LAA confiables, para distintos periodos de retorno:

Tabla 11

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)
	$E = D^{(0.521 - 0.021)}$	$E=D^{(0.653 - 0.073)}$	$D^{(0.572 - 0.020)}$	$D^{(0.573 - 0.010)}$	$D^{(0.796 - 0.004)}$
	$24 \leq D \leq 72$	$24 \leq D \leq 96$	$24 \leq D \leq 120$	$24 \leq D \leq 192$	$24 \leq D \leq 288$
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

CONCLUSIONES

- De acuerdo con Peruccacci et al. (2012), se estableció que las incertidumbres deben ser menores, próximos, o iguales al 10 por ciento, con el objetivo de obtener resultados confiables y referenciales, las cuales están relacionadas con las incertidumbres relativas ($\Delta\alpha/\alpha$ y $\Delta\gamma/\gamma$). Sin embargo, hay que tener presente que, esta limitación es cuando se tenga datos mayores a 175 eventos de flujo de escombros.
- A través de la validación, se mostró el potencial de la capacidad de predecir o diferenciar eventos de lluvia desencadenantes y no desencadenantes. Por consiguiente, se determinó el TSS de los umbrales; es decir, se midió el rendimiento predictivo del modelo, y en consecuencia, se encontró las siguientes predicciones: los umbrales LA1 de 5 y 18 días tienen incertidumbres menores y

cercanas al 10%; asimismo, el mayor porcentaje de predicción de los umbrales LA1, lo posee el umbral LA1 de 18 días con 49%. De igual modo, los umbrales LA2 de 5, 6 y 7 días tienen incertidumbres menores al 10%; y el mayor porcentaje de predicción de los umbrales LA2, lo posee el umbral LA2 de 7 días con 62%.

- Se identificó que los umbrales LAA2 de 3, 4, 5, 8 y 12 días presentan incertidumbres menores y cercanas al 10%; además, el mayor porcentaje de predicción de los umbrales LAA2, lo tiene el umbral LAA2 de 3 días con 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.

LISTA DE REFERENCIAS

- Arias, F. G. (2006). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (6.^a ed.). Editorial Episteme.
- DesInventar.org. (2022). *UNDRR DesInventar Sendai: Perú. DesInventar online*. Recuperado de 1994, de <https://www.desinventar.org/>
- Gariano, S., Brunetti, M., Iovine, G., Melillo, M., Peruccacci, S., Terranova, O., Vennari, C., & Guzzetti, F. (2015). Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy. *Geomorphology*, 228, 653-665. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.019>
- González Castellanos, R. A., Yll Lavín, M. y Curiel Lorenzo, L. D. (2003). *Metodología de la investigación científica para las ciencias técnica* (2.^a parte: Organización y ejecución de la investigación). Universidad de Matanzas, Matanzas - Cuba.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill/Interamericana.
- Hungr, O. (2005). Chapter 2: Classification and terminology. In M. Jakob, O. Hungr (Eds.), *Debris flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 9-23). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_2
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of

- landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), 221-238.
<https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>
- Hong, Y., Hiura, H., Shino, K., Sassa, K., Suemine, A., Fukuoka, H., & Wang, G. (2005). The influence of intense rainfall on the activity of large-scale crystalline schist landslides in Shikoku Island, Japan. *Landslides*, 2(2), 97-105. <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0043-z>
- Ibsen, M., & Casagli, N. (2004). Rainfall patterns and related landslide incidence in the Porretta-Vergato region, Italy. *Landslides*, 1(2), 143-150. <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0018-0>
- 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. Recuperado el 2003, de <http://sinpad2.indeci.gob.pe/sinpad2/faces/public/portal.html>
- Martinengo, M., Zugliani, D., & Rosatti, G. (2023). Validation and potential forecast use of a debris-flow rainfall threshold calibrated with the Backward Dynamical Approach. *Geomorphology*, 421, 108519. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108519>
- Ñaupas Paitán, H., Mejía, E., Novoa Ramírez, E. y Villagómez Paucar, A. (2014). *Metodología de la investigación: cuantitativa - cualitativa y redacción de la tesis* (4.ª ed.). Ediciones de la U.
- Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Luciani, S., Vennari, C., & Guzzetti, F. (2012). Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. *Geomorphology*, 139–140, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.005>
- 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. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2830>
- Salinas Jasso, R. A. (2016). *Movimientos en masa desencadenados por eventos hidrometeorológicos en el Cañón Santa Rosa, Iturbide, Nuevo León, México* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/15901/>

Segoni, S., Rossi, G., Rosi, A. & Catani, F. (2014). Landslides triggered by rainfall: A semi-automated procedure to define consistent intensity – duration thresholds. *Computers & Geosciences*, 63, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.009>

Sub Gerencia de Ordenamiento Territorial [SGOT] - Gerencia Regional de Planeamiento, Presupuesto y Acondicionamiento Territorial [GRPPAT] - Gobierno Regional Huánuco [GOREHCO]. (2013, julio). *Estudio de diagnóstico zonificación para el tratamiento de la demarcación territorial de la provincia Ambo*. Gobierno Regional Huánuco [GOREHCO].

Varnes, D.J. (1978). Chapter 2: Slope movement types and processes. In R.L., Schuster, R.J., Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control* (Special Report 176, pp. 11 - 33). Transportation Research Board, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, USA National Research Council [NRC]. <https://trid.trb.org/View/86167>

Yu, G., Zhang, M., Cong, K., & Pei, L. (2015). Critical rainfall thresholds for debris flows in Sanyanyu, Zhouqu County, Gansu Province, China. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 48(3-4), 224-233. <https://doi.org/10.1144/qjegh2014-078>