



Vigilada Mineducación

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA A LO LARGO DE LA TRAYECTORIA
DE ESCORRENTÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE
MOVIMIENTOS EN MASA**

**Geomorphological Characterization Along the Runout Trajectory for Estimating Mass
Movement Propagation**

JOHAN STEVEN MARTINEZ OSORIO

Proyecto de grado para optar por el título de geólogo

Evaluador:

Profesor Daniel Felipe Ruiz Restrepo

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA
MEDELLÍN

2024

CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Generalidades de la distancia de propagación (<i>Runout</i>)	2
2.1. Ángulo de alcance	2
2.2. Métodos de análisis de propagación	3
2.2.1. Métodos empírico-estadísticos	3
2.2.2. Métodos analíticos o numéricos	3
3. Componentes de la masa propagada	4
3.1. Volumen o magnitud de la masa	4
3.2. Velocidad	4
4. Trayectoria o ruta de propagación	4
5. Características geomorfológicas que influyen en la propagación de deslizamientos de tierra	5
5.1. Características geomorfológicas del punto de origen del deslizamiento	6
5.1.1. Relación del volumen del deslizamiento con el ángulo de alcance y la distancia de propagación	6
5.1.2. Relación de la altura de caída con el ángulo de alcance y la distancia de propagación	7
5.2. Características geomorfológicas a lo largo de la trayectoria de propagación	7
5.2.1. Curvas	8
5.2.2. Desviación	9
5.2.3. Pared opuesta	9
5.2.4. Estrechamiento del valle	11
5.2.5. Avance simple	12
5.2.6. Engrosamiento de abanico	12
5.2.7. Confinamiento	12
5.2.8. Canalización	12
5.2.9. Crestas	12
5.2.10. Bosque denso	13
6. Análisis del efecto de las barreras topográficas de la trayectoria de propagación	14
7. Recomendación de adaptación a los análisis empíricos de escorrentía	15
8. Conclusiones	16
9. Referencias bibliográficas	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema con las distancias típicas que caracterizan la morfometría de deslizamiento de tierra en condiciones previas y posteriores al fallo..	2
Figura 2. Ilustración de correlación inversa entre el volumen del deslizamiento (V) versus el ángulo de alcance (α)..	7
Figura 3. Principales barreras y/o limitaciones topográficas a lo largo de la trayectoria de propagación de los movimientos en masa.....	8
Figura 4. (A) Topografía tipo T y (B) Topografía tipo Curva, de una zona montañosa.....	9
Figura 5. Topografía con estrechamiento de valle.....	11
Figura 6. Influencia de una cresta en la propagación de masas..	13
Figura 7. Análisis del efecto de las barreras topográficas versus el volumen y el ángulo de alcance para desprendimientos de roca..	14

Resumen

Los deslizamientos de tierra generalmente se propagan ciertas distancias, amenazando la vida de personas y/o infraestructuras no solo en el lugar de origen del deslizamiento sino también a lo largo de la trayectoria de propagación, debido a esto, es necesario poder estimar la distancia máxima que pueda viajar una masa para evaluar la posible zona de impacto. Existen métodos empíricos y numéricos para la estimación de la distancia potencial de propagación, estos métodos numéricos se limitan a un deslizamiento de tierra específico y pueden llegar a ser costosos y requerir mucho tiempo de procesamiento. Por ende, resulta útil usar los métodos empíricos para estudios a escalas regionales, que se basan principalmente en correlaciones geométricas del punto de origen del deslizamiento, pero estos no tienen en cuenta las características geomorfológicas a lo largo de la trayectoria de propagación. En este estudio, se identificaron 10 características geomorfológicas (denominadas barreras topográficas) a lo largo de la trayectoria de escorrentía de los deslizamientos de tierra, que tienen una influencia significativa en la determinación de la distancia máxima de alcance de la masa. Debido a que el porcentaje de influencia de estas barreras depende de su ubicación con respecto a la zona de origen del deslizamiento, para la mayoría no se pudo establecer un peso de dominio con respecto a la distancia máxima de propagación, pero sí hay relaciones aplicables para curvas, desviaciones y paredes opuestas. De igual forma, se recomienda tener en cuenta todas las características geomorfológicas para los análisis de escorrentía.

Palabras claves: Distancia de propagación - Características geomorfológicas - Trayectoria de escorrentía - Propagación de masas – Deslizamiento de tierra

Abstract

Landslides generally propagate certain distances, threatening the lives of people and/or infrastructure not only at the origin site of the landslide but also along the propagation trajectory, therefore, it is necessary to estimate the maximum distance a mass could travel to assess the potential impact zone. There are empirical and numerical methods for estimating the potential propagation distance, with numerical methods being limited to specific landslides and potentially costly and time-consuming. Hence, empirical methods are useful for regional-scale studies, primarily relying on geometric correlations from the landslide origin point, but they do not consider geomorphological characteristics along the propagation trajectory. In this study, ten geomorphological characteristics (referred to as topographic barriers) were identified along the runout trajectory of landslides, significantly influencing the determination of the maximum reach distance of the mass. Since the influence percentage of these barriers depends on their location relative to the landslide's origin zone, a dominant weight with respect to the maximum propagation distance could not be established for most, but applicable relationships exist for curves, deviations, and opposing walls. Likewise, it is recommended to consider all geomorphological features for runoff analyses.

Keywords: Propagation distance - Geomorphological characteristics - Runout trajectory - Mass propagation - Landslide

1. Introducción

Los deslizamientos de tierra son eventos catastróficos en los que una parte del terreno pierde su equilibrio estático y entra en estado de movimiento (Román et al., 2024, p. 1). Estos deslizamientos de tierra a menudo viajan ciertas distancias en terrenos montañosos, amenazando en gran medida a las personas y propiedades no solo dentro de las áreas de origen del deslizamiento sino también a lo largo de las trayectorias de propagación (Ju, et al. 2022, p. 1). La estimación de la distancia potencial de propagación (*Runout* en inglés) de un deslizamiento de tierra es esencial para comprender mejor la posible área de impacto (Finlay et al., 1999; Xu et al., 2017).

Un índice que expresa la movilidad de los deslizamientos de tierra es el ángulo de la línea que une la cabeza de la fuente del deslizamiento con el margen distal de la masa desplazada, conocido como ángulo de alcance (Corominas, 1996, p. 260). Existen relaciones entre el ángulo de alcance y el volumen del deslizamiento, que son correlaciones ampliamente aceptadas para estimar la distancia potencial de propagación (Scheidegger, 1973; Rickenmann, 1999; Di Napoli et al., 2021), pero Corominas (1996) sugiere que el ángulo de alcance depende no sólo del volumen de deslizamiento, sino también de los obstáculos topográficos a lo largo de la trayectoria de propagación.

La distancia potencial de propagación se puede estimar por dos tipos de métodos: (1) métodos empírico-estadísticos que se basan en correlaciones geométricas y (2) métodos analíticos o numéricos que se fundamentan en procesos físicos (McDougall, 2017, p. 606). Los modelos numéricos de propagación que consideran la realidad del terreno generalmente se limitan a un deslizamiento de tierra específico (Ju, et al. 2022. p. 1), además, estimar los parámetros puede ser difícil, o al menos llevar mucho tiempo y ser costoso, lo que a menudo es incompatible con las limitaciones operativas en las que la evaluación de peligros debe realizarse rápidamente (Peruzzetto et al., 2020, p. 3), en este caso los métodos empíricos resultan útiles para el análisis de propagación de deslizamientos a escalas regionales, pero estos modelos estadísticos solo consideran las características geomorfológicas en el origen sin ajustar las características del terreno a lo largo de la trayectoria de escorrentía (Ju, et al. 2022, pp. 1-2).

Por consiguiente, el presente trabajo pretende por medio de recopilación bibliográfica identificar y correlacionar las características geomorfológicas asociadas a la trayectoria de propagación de movimientos en masa, que sirvan de material base para los métodos empíricos en la estimación de la distancia potencial de escorrentía. En esta monografía investigativa el término propagación y escorrentía se refieren a la palabra en inglés *Runout*.

2. Generalidades de la distancia de propagación (*Runout*)

La distancia de propagación (*Runout*) se conoce como la distancia máxima alcanzada por el material arrastrado de un deslizamiento de tierra. Se define como la proyección horizontal de la línea que une la parte más alta del deslizamiento con su parte más exterior (Román et al., 2024, p. 6), tal y como se muestra en la figura 1, donde (L) representa la distancia de propagación. La estimación de la distancia potencial de propagación de deslizamientos de tierra es el análisis del movimiento de deslizamientos de tierra posterior a la movilización. Puede implicar tanto el análisis retrospectivo (simulación) de eventos anteriores como el análisis directo (predicción o pronóstico) de posibles eventos futuros (McDougall, S., 2017, p. 606).

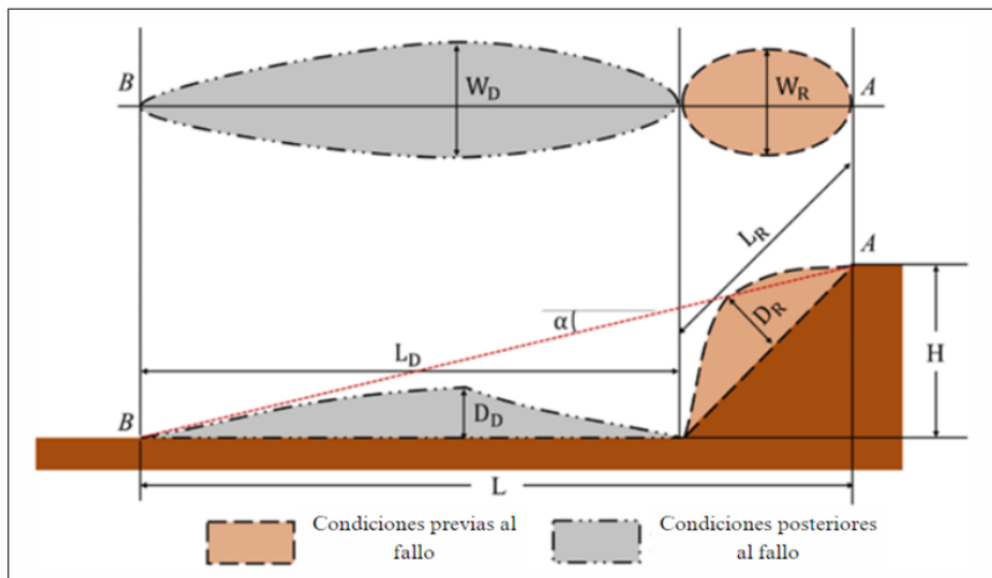


Figura 1. Esquema con las distancias típicas que caracterizan la morfometría de deslizamiento de tierra en condiciones previas y posteriores al fallo. Tomado de (Román et al., 2024).

2.1. Ángulo de alcance

El ángulo de alcance es el ángulo de la línea que conecta la cresta de la fuente del deslizamiento con la punta del depósito (McDougall, S., 2017, p. 607). En la figura 1 se ilustra como el ángulo (θ) de la línea roja que conecta el punto A y B. Este es un índice que expresa la movilidad de los deslizamientos de tierra (Corominas, 1996, p. 260). Existen relaciones entre este ángulo y el volumen de la masa que se utilizan para estimar la distancia potencial de propagación de un deslizamiento (Scheidegger, 1973; Rickenmann, 1999; Di Napoli et al., 2021). La tangente de este ángulo equivale al coeficiente de fricción equivalente (f_e), derivado de la relación (H/L). El coeficiente de fricción equivalente es un escalar

adimensional que describe la relación promedio de la fuerza de fricción entre la masa deslizante y su trayectoria (Zou et al., 2017, p. 6-7).

2.2. Métodos de análisis de propagación

Los métodos de análisis de la distancia de propagación (*runout*) se pueden agrupar en dos amplias categorías: (1) métodos empírico-estadísticos que se basan en correlaciones geométricas estadísticas y (2) métodos analíticos que se basan en modelos fundamentados en procesos numéricos (McDougall, S., 2017, p. 606).

2.2.1. Métodos empírico-estadísticos

Los métodos empíricos se basan en observaciones de campo y en un análisis de la relación entre los parámetros morfométricos del deslizamiento (por ejemplo, el volumen) y la distancia recorrida por la masa del deslizamiento (Corominas et al., 2014, p. 226). Algunos estudios en los que se puede ver y obtener más información sobre la estimación por medio de estos métodos empíricos son los siguientes (Corominas, 1996; Hunter & Fell, 2003; Budetta, & de Riso, 2004; Mitchell et al., 2018; Román et al., 2024).

Peruzzetto et al. (2020) plantea que las estimaciones empíricas que relacionan el volumen de deslizamientos dependen de grandes conjuntos de datos que, en general, no son específicos del sitio. Por lo tanto, no se tiene en cuenta la configuración topográfica particular de un sitio de estudio determinado, esto a menudo da como resultado grandes incertidumbres (p. 2).

2.2.2. Métodos analíticos o numéricos

Los métodos analíticos se basan en el uso de modelos numéricos. Se pueden clasificar en modelos discretos o basados en continuos (Corominas et al., 2014, p. 227). Estos modelos numéricos en comparación con los empíricos se utilizan particularmente para llevar a cabo análisis de peligros específicos del sitio. Sin embargo, se necesitan muchas simulaciones (hasta 1.000 o incluso 10.000) para realizar un análisis probabilístico de peligros riguroso (Peruzzetto et al., 2020, p. 3). Algunos estudios en los que se puede obtener más información acerca de estos métodos son los siguientes (Crosta et al., 2003; Staron, 2008; Peruzzetto et al., 2020).

A continuación, se presentarán los componentes básicos de una masa propagada y más adelante hablaremos sobre cómo la identificación y el uso de parámetros geomorfológicos

a lo largo de la trayectoria de propagación nos permite mejorar la estimación de la distancia potencial de escorrentía de los análisis de *runout* empíricos.

3. Componentes de la masa propagada

Los componentes principales de una masa propagada son la distancia de propagación (mencionada anteriormente), el volumen de la masa y la velocidad. La distancia de propagación se presentó en un apartado diferente ya que es el componente principal a analizar, y a continuación se mencionan el volumen y velocidad de la masa.

3.1. Volumen o magnitud de la masa

La magnitud de los deslizamientos de tierra corresponde a la cantidad de material involucrado en el proceso y se puede caracterizar midiendo diferentes magnitudes características del movimiento. Entre los más comunes están la longitud (l_r , l_d), ancho (W_r , W_d), y la profundidad (D_r , D_d) de la masa de suelo en las etapas de ruptura y desplazamiento (es decir, antes y después del desplazamiento) (Fig. 1). La figura 1 muestra esquemáticamente las partes de un deslizamiento de tierra que son identificables. Los subíndices r y d indican las magnitudes en las etapas de ruptura y desplazamiento respectivamente (Román et al., 2024, p. 5).

3.2. Velocidad

La velocidad de un deslizamiento de tierra cambia tanto en el espacio como en el tiempo, por lo que un deslizamiento de tierra no exhibe una sola velocidad constante (McKinnon, 2010, p. 12). Esto quiere decir que las estimaciones que se reportan de las velocidades de los deslizamientos de tierra generalmente se realizan en puntos espaciales específicos. Estas estimaciones suelen ser de la velocidad máxima del deslizamiento de tierra en un punto determinado del espacio (Aaron et al., 2019, p. 912)

4. Trayectoria o ruta de propagación

La trayectoria o ruta de propagación es el camino por el cual viaja el deslizamiento de tierra, esta ruta va desde la zona de ruptura, siguiendo por el o los caminos que puede tomar la masa, hasta el punto donde se disipa totalmente su energía y entra en reposo. La masa en el estado inicial (justo antes del deslizamiento, $t = 0$ s) tiene energía potencial. La energía potencial se transforma en energía cinética tan pronto como la masa deslizante comienza a moverse. Además, se pierde algo de energía como resultado de la fricción y las colisiones con barreras topográficas (Wang et al., 2024, p. 12). Comprender las características geomorfológicas, en especial las barreras topográficas

que se presentan a lo largo de esta ruta son de gran utilidad para poder estimar con mayor precisión la distancia potencial de propagación.

Los deslizamientos de tierra sin obstáculos geomorfológicos son movimientos de cualquier tipo y tamaño que progresan ladera abajo sin obstáculos ni restricciones topográficas. Incluyen el movimiento hacia abajo de los desprendimientos de rocas a través de praderas abiertas o laderas rocosas desnudas (es decir, laderas con poca o nula vegetación), la trayectoria rectilínea de los deslizamientos traslacionales, los deslizamientos de escombros, y los deslizamientos de lodo sobre una superficie topográfica regular (Corominas, 1996, p. 262).

Al final de la trayectoria de propagación se tiene la zona de deposición. Con el consumo gradual de energía cinética, la velocidad del flujo del deslizamiento disminuye y la masa es arrasada hasta detenerse (Yin et al., 2023, p. 13). Para un caso de simulación del efecto de barreras artificiales a lo largo de la trayectoria de propagación (Cuomo et al., 2019), identificaron que la zona de deposición y el área afectada (distancia de propagación), dependen del volumen de falla inicial, la reología y del tipo y posición de la barrera topográfica. Resulta también importante mencionar que, en las simulaciones, notaron que el efecto de las barreras en la trayectoria de propagación no solo causaba una reducción de la distancia de escorrentía, sino que también en unos casos implicaba el aumento de la extensión lateral de la masa (p. 1080-1081).

5. Características geomorfológicas que influyen en la propagación de deslizamientos de tierra

Varios autores plantean que la distancia potencial de propagación se ve directamente afectada por el volumen de los deslizamientos de tierra y otros parámetros geomorfológicos, incluidas las barreras topográficas a lo largo de la ruta de propagación de los deslizamientos (Corominas, 1996; Xu et al., 2017; Zhan et al., 2017; Ju et al., 2022; Román et al., 2024). Los estudios sobre la estimación de la distancia potencial de propagación se basan en correlaciones geomorfológicas del punto de origen del deslizamiento, además incluyen algunos parámetros que son suposiciones, como el ángulo de alcance (que como se explicó anteriormente es el ángulo de la línea que une la cabeza de la fuente del deslizamiento con el margen distal de la masa desplazada) que depende de variables que son desconocidas antes de que se detenga el movimiento en masa, pero estos estudios, en especial los basados en métodos empíricos no tienen en cuenta las características geomorfológicas a lo largo de la trayectoria de propagación y esto representa una inadecuada

estimación debido a que subestiman o sobreestiman la distancia potencial de propagación como en el caso de (Zuo et al. 2017).

Xu et al. (2017) plantearon que usar muchos parámetros geomorfológicos no siempre resulta útil pero que utilizar menos parámetros de entrada puede resultar en una pérdida de información. Por eso es necesario el conocimiento de un experto para los análisis de escorrentía, en el caso de (Xu et al., 2017) implementaron un algoritmo de árbol para evaluar la relevancia de los parámetros geomorfológicos, aunque solo tuvieron en cuenta los parámetros del punto de origen del deslizamiento.

5.1. Características geomorfológicas del punto de origen del deslizamiento

Los parámetros clasificados dentro de esta sección se definen como parámetros del punto de origen del deslizamiento, ya que dependen del punto fuente del deslizamiento de tierra y se calculan o estiman a partir de otros análisis, generalmente análisis geométricos.

Algunos parámetros geomorfológicos del punto de origen comúnmente mencionados por diversos autores (Corominas, 1996; Xu et al., 2017; Peruzzetto et al., 2020) para sus análisis de escorrentía son el volumen del deslizamiento y la caída vertical, estos se seleccionan en algunos métodos como parámetros de entrada para predecir las distancias de propagación de los deslizamientos de tierra.

5.1.1. Relación del volumen del deslizamiento con el ángulo de alcance y la distancia de propagación

En un análisis que Corominas (1996) realizó a más de 200 deslizamientos de diferentes tamaños, evidenció que cualquiera que sea el mecanismo de movimiento, todos los tipos de deslizamientos experimentan una reducción continua del ángulo de alcance con el aumento de volumen, esto quiere decir que la distancia de propagación será mayor con respecto al aumento del volumen, como también se comprobó en (Okura et al., 2000) con experimentos al aire libre de bloques de roca. En la Figura 2 se ilustra la correlación inversa que existe entre el volumen del deslizamiento de tierra y el ángulo de alcance.

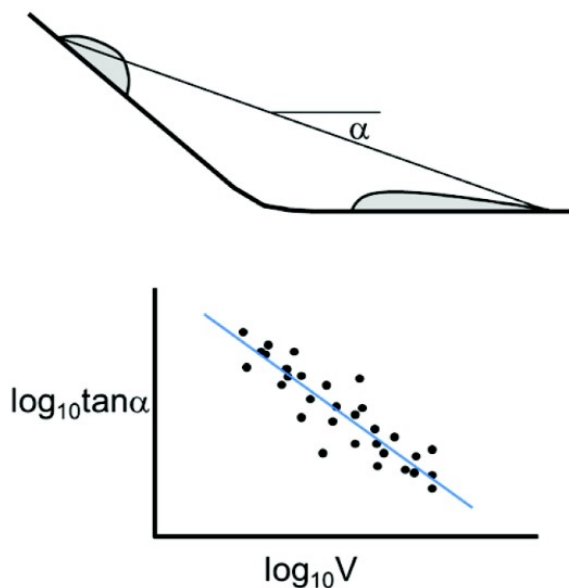


Figura 2. Ilustración de correlación inversa entre el volumen del deslizamiento (V) versus el ángulo de alcance (α). Modificado de McDougall (2017).

Adicionalmente, la importancia del volumen en la estimación de la distancia de escorrentía se puede evidenciar en el caso de estudio presentado en (Zou et al., 2017), donde exhibieron como una mala estimación del volumen conllevó a una enorme subestimación de la distancia máxima de propagación de la masa de tierra.

5.1.2. Relación de la altura de caída con el ángulo de alcance y la distancia de propagación

Existe una correlación positiva entre la altura de caída y la distancia horizontal alcanzada por el deslizamiento (distancia de propagación), esto quiere decir que a medida que aumenta la altura de caída, se espera que la masa viaje más lejos (Corominas, 1996; Qarinur, 2015; Zhan et al., 2017), esto se debe a que: cuanto mayor es la altura de caída, más energía cinética podría obtener la masa del deslizamiento y más lejos podría viajar (Legros, 2002, como se citó en Zhan et al., 2017, p. 841).

5.2. Características geomorfológicas a lo largo de la trayectoria de propagación

Las características geomorfológicas a lo largo de la trayectoria de propagación son aquellas geoformas (denominadas barreras y/o limitaciones topográficas) que se encuentran en la ruta de escorrentía del deslizamiento de tierra y que tienen influencia en la distancia de propagación. En la figura 3, Corominas (1996) ilustra las principales características geomorfológicas que afectan el alcance de los deslizamientos de tierra.

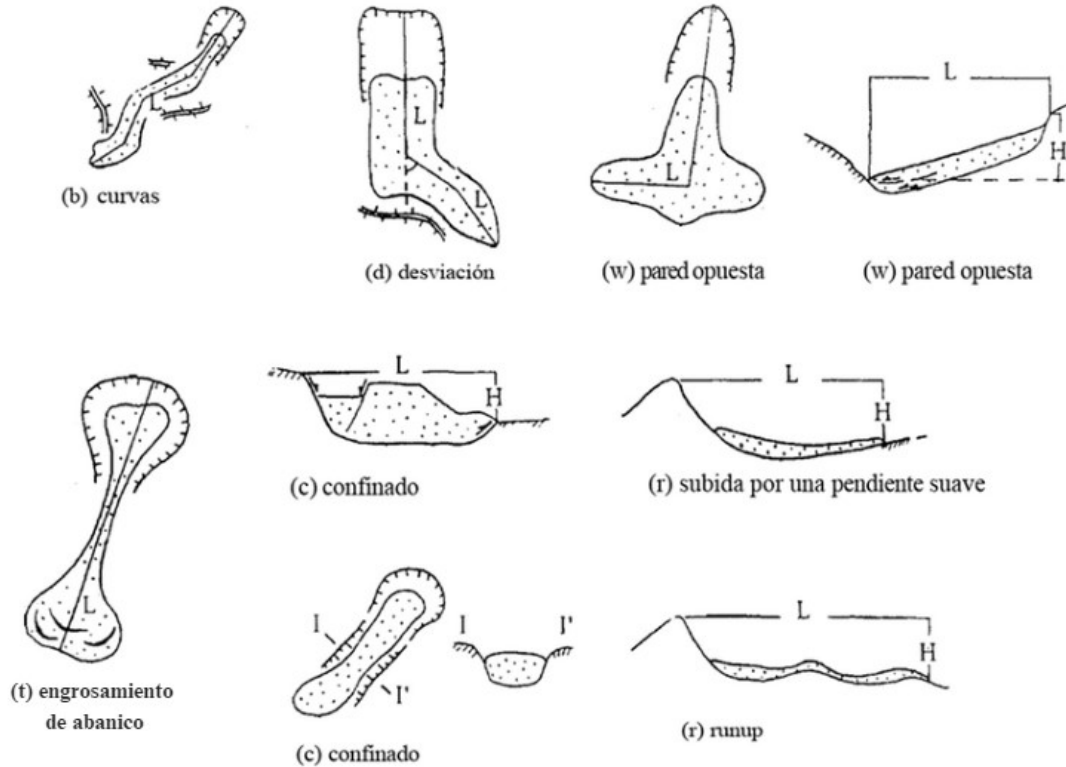


Figura 3. Principales barreras y/o limitaciones topográficas a lo largo de la trayectoria de propagación de los movimientos en masa. Traducido de (Corominas, 1996).

Algunas características geomorfológicas no se encuentran en la figura 3, pero, a continuación, se describen todas las características geomorfológicas identificadas a lo largo de la trayectoria de propagación que tienen un impacto en la distancia de escorrentía.

5.2.1. Curvas

Corominas (1996) define las curvas (b) como obstáculos topográficos en la trayectoria de propagación que fuerzan un cambio en la dirección de progresión anterior de menos de 60° (p. 262).

Zuo et al. (2017) plantean que la topografía en zona montañosa se clasifica en dos tipos: topografía tipo T (que se menciona en el ítem 5.2.3) y topografía tipo curva, como se puede ver en la figura 4. En la topografía de tipo curva, la energía cinética del deslizamiento de tierra en movimiento puede disiparse completamente mediante la fricción a lo largo de la trayectoria del movimiento (Fig. 4 B) (p. 7).

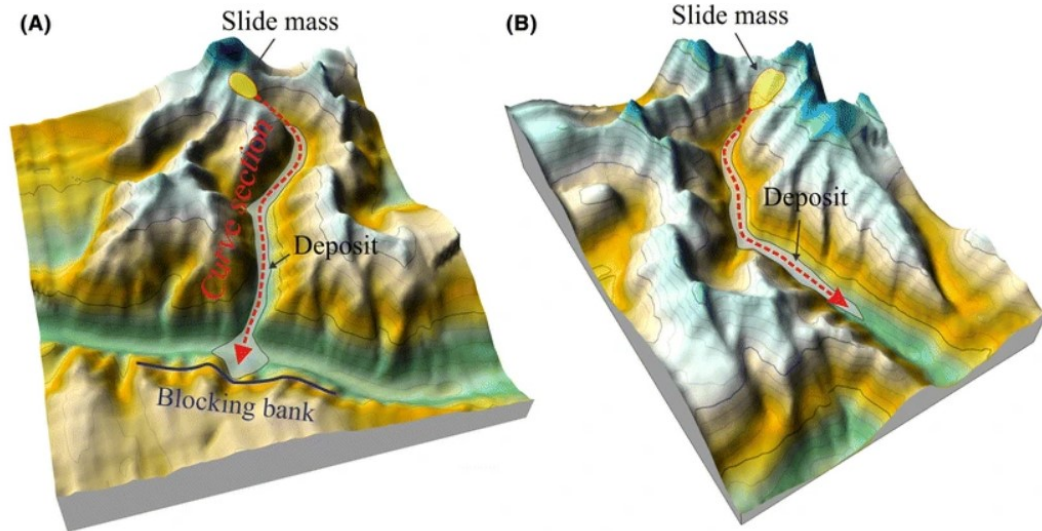


Figura 4. (A) Topografía tipo T y (B) Topografía tipo Curva, de una zona montañosa. Tomado de (Zou et al., 2017).

Para el caso de estudio presentado en (Wang et al., 2024), analizaron que los flujos de escombros y los deslizamientos de tierra tuvieron una desviación de casi 30° lo que resulto en una disipación de energía para la propagación de la masa. En términos prácticos (Hu et al., 2019, como se citó en Wang et al., 2024, p. 14) descubrió que esta tasa de disipación de energía cinética es inversamente proporcional a $\cos^2(\theta)$, donde θ es el ángulo de desviación. Tomando en consideración que este cálculo sobre la tasa de disipación tiene en cuenta el ángulo, sin importar si es mayor o menor a 60° , también aplica para las “desviaciones” mencionadas a continuación en el ítem 5.2.2.

5.2.2. Desviación

Para Corominas (1996) las desviaciones (d), son obstáculos topográficos en la trayectoria que fuerzan un cambio en la dirección de progresión anterior de más de 60° , a menudo responsables de sobreespesor de la masa desplazante (p. 262).

5.2.3. Pared opuesta

Siguiendo con Corominas (1996) la obstrucción de la pared opuesta (w), es la presencia de una pared de valle opuesta en casi ángulo recto con respecto a la dirección de progresión anterior lo que provoca un sobreespesor o división de la masa en movimiento (p. 262).

Para el otro tipo de topografía en zona montañosa mencionada en (Zou et al., 2017) (Topografía tipo T) se clasifica dentro de la definición de pared opuesta presentada por Corominas (1996). Para (Zuo et al., 2017) en la topografía tipo T, el deslizamiento de tierra

encuentra una pendiente pronunciada que es casi perpendicular a su trayectoria de flujo, lo que termina abruptamente el movimiento posterior, tales situaciones son comunes cuando un afluente ingresa a un valle inferior en un ángulo alto (Fig. 4 A). La trayectoria a lo largo de la cual se mueve la masa del deslizamiento antes de encontrar el banco de bloqueo en una situación tipo T se denomina sección curva (L_c) (Fig. 4 A) (p. 7).

La movilidad de un deslizamiento de tierra en entornos tipo T depende de la longitud de la sección curva, donde el deslizamiento puede convertir su energía potencial gravitacional en energía cinética. Cuanto más larga sea la sección de la curva, con mayor precisión el valor estimado por la relación (H/L) refleja el coeficiente de fricción equivalente real. Por tanto, el entorno topográfico tipo T introduce una gran incertidumbre a la hora de establecer relaciones útiles entre H y el volumen de la masa (Zuo et al., 2017, p. 9).

Esta es una de las barreras topográficas con mayor influencia. Ya que en la mayoría de casos esta barrea frena totalmente el deslizamiento. Corominas (1996) evidencio que esta característica geomorfológica causaba que los deslizamientos estudiados tuvieran ángulos de alcance entre 0,2 y 0,4 que corresponden a deslizamientos con volúmenes de entre 3 y 4 órdenes de magnitud menores (p. 265). Por otro lado (Zuo et al., 2017) dice que, para la predicción de la distancia de escorrentía en entornos tipo T, la masa de deslizamiento podría cesar antes de toparse con esta barrera, por ende, propone que la longitud de la sección curva (L_c) debe medirse y compararse con la distancia de propagación calculada (L). Si La distancia calculada (L) es menor que la longitud de la sección curva (L_c), indica que la topografía tipo T (también pared opuesta) no tiene influencia en el movimiento. De lo contrario, el movimiento se habría extendido hasta la barrera topográfica lo que indica que la distancia de escorrentía esta limitada por la longitud de la sección curva.

Estos análisis presentan que esta barrera puede conllevar al detenimiento total de la propagación de la masa, pero hay otro factor que puede influir aquí (relacionada con la distancia de propagación) y es el área de inundación o deposición mencionada anteriormente, estimar esta área resulta útil para poder identificar los extremos del depósito, para obtener más información sobre este tema se recomienda consultar en (Whittall et al., 2017).

5.2.4. Estrechamiento del valle

El estrechamiento del valle es cuando una sección de valle presenta un ancho menor a las áreas circundantes.

En (Zuo et al., 2017) simularon una distancia de propagación, usando el volumen real de la masa propagada y la distancia que estimaron fue de 3km. Esta estimación fue aproximadamente un 15% mayor que la distancia real de 2620m. Eventualmente concluyeron que uno de los posibles factores por el cual no se obtuvo una adecuada estimación fue porque la zona estrecha del valle impidió el movimiento y redujo la movilidad. Si consideramos con base en el análisis de los autores que el principal o único factor que influyó en la reducción de la distancia estimada a lo largo de la trayectoria fue el estrechamiento del valle, se podría decir que esta barrera topográfica redujo en un 15% la distancia de propagación estimada. Ciertamente como se muestra en la Figura 5, esta barrera topográfica se encuentra casi que al final de la distancia máxima estimada por lo que su influencia pudo haber sido mayor si estuviera más cerca de la fuente del deslizamiento.

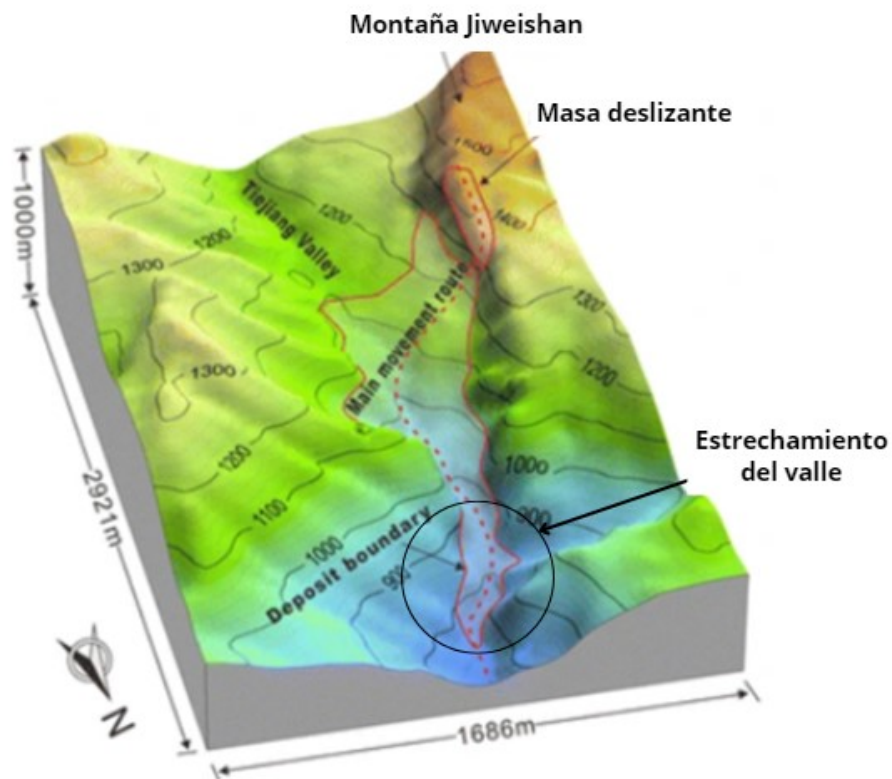


Figura 5. Topografía con estrechamiento de valle. Modificado de (Zou et al., 2017).

5.2.5. Avance simple

Corominas (1996) expresa el avance simple (r), como el avance sobre una pendiente suave opuesta sin sobreespesor de la masa en movimiento, además plantea que esta barrera topográfica tiene ligeros efectos en el ángulo de alcance (p. 262-265).

5.2.6. Engrosamiento de abanico

El engrosamiento de abanico (t), se define según Corominas (1996) como el engrosamiento de la punta de un movimiento tipo flujo por apilamiento de olas sucesivas de escombros (p. 262).

5.2.7. Confinamiento

El confinamiento (c), es cuando la superficie de fallo en deslizamientos planares está situada muy por debajo del suelo original, lo que provoca que el deslizamiento empuje el suelo y abulte el pie; también se incluyen los flujos de tierra y los deslizamientos de lodo limitados por superficies de cizallamiento laterales y basales (Corominas, 1996, p. 262)

5.2.8. Canalización

La canalización, según Corominas (1996) es la corriente de escombros y su confinamiento en un canal (p. 262). Por otro lado, Zhan et al. (2017) definen la canalización como una avalancha de rocas con una trayectoria de flujo confinada entre las paredes del valle (p. 843).

Zhan et al. (2017) dan evidencia de que el gradiente del canal esta altamente correlacionado con H/L (H y L se presentan en la figura 1) y esto conlleva a que la haya una correlación negativa entre la distancia recorrida y el gradiente del canal, ya que la disminución del gradiente significa la disminución del coeficiente de fricción estático (capacidad de oposición al movimiento relativo entre dos superficies) y el aumento del volumen y a su vez de la movilidad de los deslizamientos (p. 841).

5.2.9. Crestas

Las crestas son otras características geomorfológicas que representan una influencia en la propagación de masas. En un estudio realizado en China (Guo et al., 2020), donde se analizaron los efectos de la topografía en la propagación de los deslizamientos de tierra, identificaron que a lo largo de la trayectoria de escorrentía la masa propagada se dividió en 2 masas al golpear con una cresta, lo que significó que 5 casas en la parte central de esa

zona quedaran protegidas. Aunque en este estudio no analizaron o compararon la influencia de esta característica con posibles estimaciones de escorrentía, se presenta en este estudio como una barrera topográfica, dado que seguramente la colisión de la masa con la cresta causó disipación de energía y esto pudo influir en una disminución de la distancia máxima de propagación, aparte de haber servido como barrera protectora natural para algunos hogares.

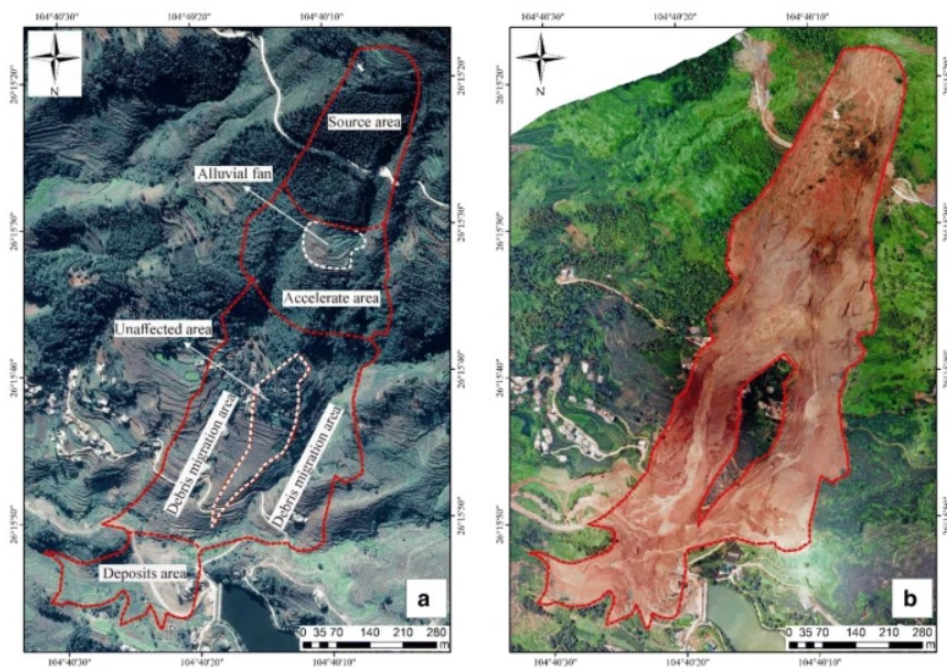


Figura 6. Influencia de una cresta en la propagación de masas. Tomado de (Guo et al., 2020).

5.2.10. Bosque denso

El bosque denso se refiere a la alta presencia de arbustos, y este tipo de restricción tiene influencia principalmente para deslizamientos con volúmenes menores de 1×10^5 m, para deslizamientos de tierra mayores, la presencia de bosque denso tiene poca influencia (Corominas, 1996, p. 262).

Claramente, como plantea Corominas (1996) la ubicación relativa de estas restricciones topográficas y obstáculos en el camino afectará el alcance final. Por ejemplo, si una pared opuesta del valle situada cuando el movimiento ha recorrido una gran distancia, afectará mucho menos al alcance que cuando la misma pared está cerca del origen del deslizamiento (p. 262).

6. Análisis del efecto de las barreras topográficas de la trayectoria de propagación

Evidentemente como se comprobó en los estudios presentados, estas características geomorfológicas causan una disminución en la distancia de propagación de los movimientos en masa, debido a que generan una reducción de la energía cinética del deslizamiento y eso favorece a que la zona de impacto de la masa sea menor.

En la figura 7, Whittall et al. (2017) compara datos de una mina a cielo abierto con las regresiones de Corominas (1996) para desprendimientos de roca con obstrucción en el camino (p. 389).

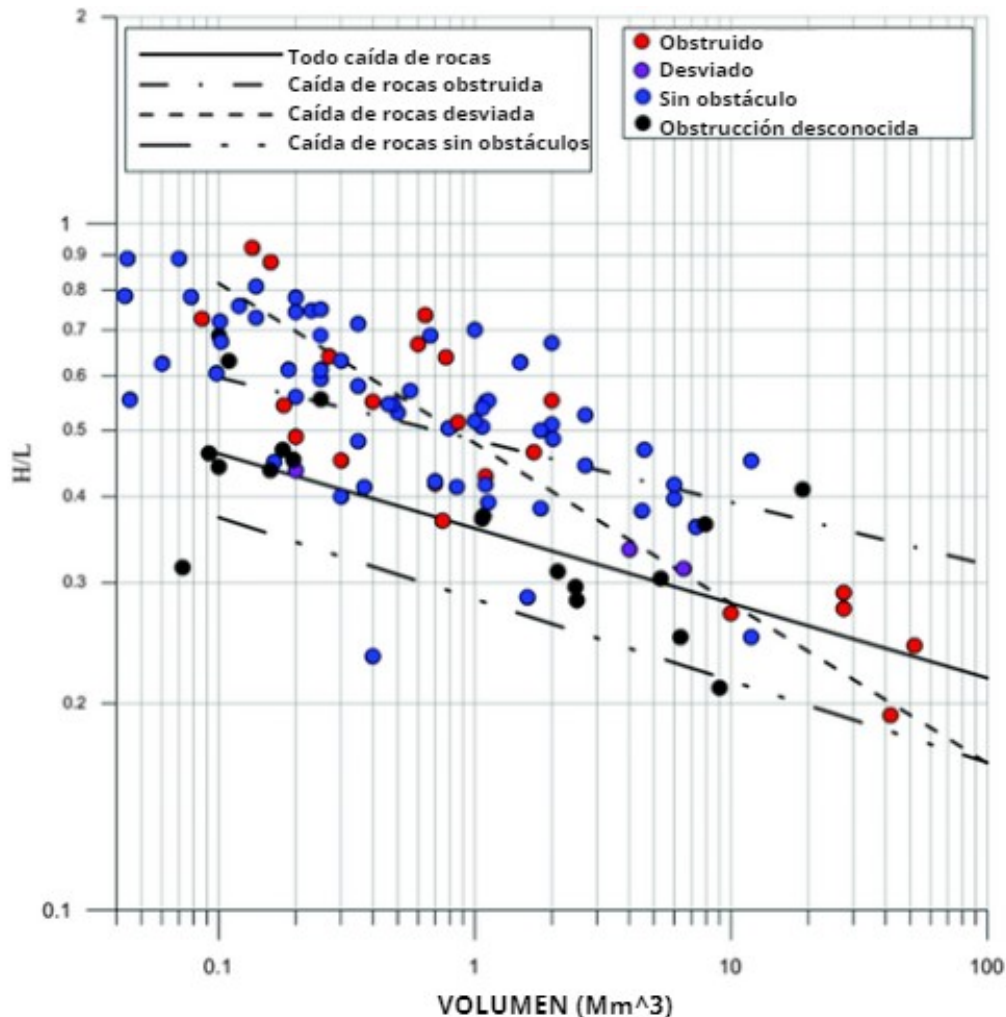


Figura 7. Análisis del efecto de las barreras topográficas versus el volumen y el ángulo de alcance para desprendimientos de roca. Traducido de (Whittall et al., 2017).

La relación inversa entre el volumen y el ángulo de alcance se mantiene independientemente del atributo de la trayectoria. Además, la duración de los deslizamientos de tierra obstruidos es más corta que la de los deslizamientos de tierra no obstruidos (Whittall et al., 2017 p. 389). En

la figura 7 también se puede notar que las caídas de rocas con desviaciones en la ruta de escorrentía tienden a tener una relación mucho más pronunciada entre el ángulo de alcance y el volumen de la masa, para este caso, esto podría implicar que las curvas y/o desviaciones no tuvieron un gran impacto en la pérdida de energía potencial, sin embargo, teniendo en cuenta lo que (Hu et al., 2019, como se citó en Wang et al., 2024, p. 14) descubrió acerca de la pérdida de energía con respecto al ángulo de desviación, deberíamos analizar que ángulos presentaban las trayectorias curvas de esta ruta de propagación para poder dar un análisis más certero.

Otro dato que resulta importante mencionar, relacionado con la ubicación de la barrera a lo largo de la trayectoria de escorrentía, se encontró en las simulaciones realizadas por (Cuomo et al., 2019) sobre del efecto de unas barreras artificiales a lo largo de la trayectoria de propagación, donde evidenciaron que la escorrentía disminuía cuando la barrera estaba cerca del pie de la pendiente, pero que tenía un ligero aumento de la propagación (pero con menor espesor) cuando la barrera estaba ubicada a lo largo de pendiente (p. 1086). Este dato resulta interesante a tener en cuenta y correlacionar con otras posibles simulaciones, pero no es útil para este estudio porque, 1) no es una barrera topográfica natural y 2) no es comparable con alguna de las características geomorfológicas a lo largo de la trayectoria de propagación, identificadas en (Corominas, 1996) (Fig. 3). Además, siguiendo por este lado de las barreras artificiales, en (Choi et al., 2021) mencionan que es más efectivo instalar barreras cerca del lugar de origen del deslizamiento de tierra, debido a que a lo largo de la trayectoria de escorrentía puede haber un incremento del volumen de escombros inducidos por el arrastre (p. 227).

7. Recomendación de adaptación a los análisis empíricos de escorrentía

Teniendo claro que la mayoría de los métodos empíricos de estimación de propagación de deslizamientos de tierra no tienen en cuenta las características geomorfológicas a lo largo de la trayectoria de escorrentía, y que evidentemente estos representan un gran valor para lograr una estimación más precisa, especialmente para los estudios de amenaza en gestión de riesgo.

Se recomienda el siguiente enfoque en las estimaciones:

- 1) Realizar la estimación de escorrentía a partir del volumen y del ángulo de alcance calculado y/o por medio de las relaciones y ecuaciones definidas por el experto que vaya a hacer el estudio.

- 2) Identificar las características geomorfológicas presentadas en este estudio que se encuentren a lo largo de la ruta de propagación del deslizamiento de tierra.
- 3) Comparar la distancia de escorrentía estimada con las características geomorfológicas identificadas para definir qué factores adicionar a la estimación. Si la distancia de propagación estimada es mayor a la ubicación en la que se encuentra alguna de las características mencionadas en este estudio (es decir, que va más allá de la ubicación de la barrera topográfica), debe tener en cuenta esa barrera topográfica para el análisis de escorrentía, especialmente si es una pared opuesta, curva o desviación, ya que con respecto a estas barreras se presenta mayor información sobre la disipación de energía para los deslizamientos y posteriormente evalúe nuevamente la distancia de escorrentía con estos factores influyentes (barreras topográficas). En caso de que la distancia máxima estimada sea menor que la ubicación de algunas de las características geomorfológicas identificadas a lo largo de la ruta, no las considere para su análisis de escorrentía, dado que su distancia máxima de propagación va a ser el valor inicial calculado y las barreras no presentarán influencia alguna.

8. Conclusiones

El estudio presentado da evidencia de la importancia de determinar e implementar en los análisis de escorrentía las características geomorfológicas a lo largo de la trayectoria de propagación, ya que pueden proporcionar estimaciones más precisas y reducir significativamente la distancia de propagación de los deslizamientos. Aunque sigue siendo un tema poco estudiado, se lograron identificar 10 principales características geomorfológicas a lo largo de la ruta de propagación que tienen influencia en la distancia de viaje de los deslizamientos de tierra.

Las principales características identificadas fueron: Curvas, desviaciones, paredes opuestas, estrechamientos de valle, avances simples, engrosamientos de abanico, confinamientos, canalizaciones, crestas y bosques densos.

Con base en las investigaciones realizadas no fue posible identificar el porcentaje de influencia que podrían presentar las limitaciones topográficas para estimaciones futuras de las distancias potenciales de propagación de los deslizamientos, debido a que las barreras topográficas varían su capacidad de dominio sobre la masa de tierra dependiendo de la distancia en la que se ubique con respecto al área fuente del deslizamiento, pero para las curvas, desviaciones y paredes opuestas, si se identificó un factor de influencia en la disipación de energía.

Finalmente, se evidenció que estas características geomorfológicas generan un impacto en la disipación de energía de la masa propagada por lo que contribuyen a la disminución de la distancia de propagación de los deslizamientos de tierra. Esto resulta interesante porque ayuda a disminuir la zona de impacto de los movimientos en masa.

9. Referencias bibliográficas

- Aaron, J., McDougall, S., & Nolde, N. (2019). Two methodologies to calibrate landslide runout models. *Landslides*, 16, 907-920. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1116-8>
- Budetta, P., & de Riso, R. (2004). The mobility of some debris flows in pyroclastic deposits of the northwestern Campanian region (southern Italy). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63, 293-302. <https://doi.org/10.1007/s10064-004-0244-7>
- Choi, S. K., Park, J. Y., Lee, D. H., Lee, S. R., Kim, Y. T., & Kwon, T. H. (2021). Assessment of barrier location effect on debris flow based on smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation on 3D terrains. *Landslides*, 18, 217-234. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01477-5>
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 260-271. <https://doi.org/10.1139/t96-005>
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., ... & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 73, 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Crosta, G. B., Imposimato, S., & Roddeman, D. G. (2003). Numerical modelling of large landslides stability and runout. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(6), 523-538. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-523-2003>
- Cuomo, S., Moretti, S., & Aversa, S. (2019). Effects of artificial barriers on the propagation of debris avalanches. *Landslides*, 16, 1077-1087. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01155-1>
- Di Napoli, M., Di Martire, D., Bausilio, G., Calcaterra, D., Confuorto, P., Firpo, M., ... & Cevasco, A. (2021). Rainfall-induced shallow landslide detachment, transit and runout susceptibility mapping by integrating machine learning techniques and GIS-based approaches. *Water*, 13(4), 488. <https://doi.org/10.3390/w13040488>

- Finlay, P. J., Mostyn, G. R., & Fell, R. (1999). Landslide risk assessment: prediction of travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(3), 556-562. <https://doi.org/10.1139/t99-012>
- Guo, J., Yi, S., Yin, Y., Cui, Y., Qin, M., Li, T., & Wang, C. (2020). The effect of topography on landslide kinematics: a case study of the Jichang town landslide in Guizhou, China. *Landslides*, 17, 959-973. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-019-01339-9>
- Hunter, G., & Fell, R. (2003). Travel distance angle for "rapid" landslides in constructed and natural soil slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1123-1141. <https://doi.org/10.1139/t03-061>
- Ju, L. Y., Xiao, T., He, J., Wang, H. J., & Zhang, L. M. (2022). Predicting landslide runout paths using terrain matching-targeted machine learning. *Engineering Geology*, 311, 106902. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106902>
- McDougall, S. (2017). 2014 Canadian Geotechnical Colloquium: Landslide runout analysis—current practice and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(5), 605-620. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0104>
- McKinnon, M. (2010). Landslide runout: statistical analysis of physical characteristics and model parameters (Doctoral dissertation, University of British Columbia). <http://hdl.handle.net/2429/25835>
- Mitchell, A., McDougall, S., Whittall, J., Brideau, M. A., & McClarty, D. (2018). New empirical-statistical tools for the analysis of rock avalanche runout. In *Proceedings of the 7th Canadian Geohazards Conference, Canmore, AB, Canada* (pp. 3-6). https://www.researchgate.net/publication/325681363_New_empirical-statistical_tools_for_the_analysis_of_rock_avalanche_runout
- Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., & Kawanami, A. (2000). The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology*, 58(2), 109-124. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00049-1)
- Peruzzetto, M., Mangeney, A., Grandjean, G., Levy, C., Thiery, Y., Rohmer, J., & Lucas, A. (2020). Operational estimation of landslide runout: comparison of empirical and numerical methods. *Geosciences*, 10(11), 424. <https://doi.org/10.3390/geosciences10110424>

- Qarinur, M. (2015). Landslide runout distance prediction based on mechanism and cause of soil or rock mass movement. In *Journal of the Civil Engineering Forum* (Vol. 1, No. 1). Universitas Gadjah Mada. <https://doi.org/10.22146/jcef.22728>
- Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural hazards*, 19, 47-77. <https://doi.org/10.1023/A:1008064220727>
- Román Quintero, D. C., Ortiz Contreras, J. D., Tapias Camacho, M. A., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2024). Empirical Estimation of Landslide Runout Distance Using Geometrical Approximations in the Colombian North–East Andean Region. *Sustainability*, 16(2), 793. <https://doi.org/10.3390/su16020793>
- Scheidegger, A. E. (1973). On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock mechanics*, 5(4), 231-236. <https://doi.org/10.1007/BF01301796>
- Staron, L. (2008). Mobility of long-runout rock flows: a discrete numerical investigation. *Geophysical Journal International*, 172(1), 455-463. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03631.x>
- Wang, J., Hu, X., Zheng, H., Xu, C., Li, Y., Shi, C., ... & Zhang, H. (2024). Energy transfer mechanisms of mobility alteration in landslide-debris flows controlled by entrainment and runout-path terrain: A case study. *Landslides*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02221-z>
- Whittall, J., Eberhardt, E., & McDougall, S. (2017). Runout analysis and mobility observations for large open pit slope failures. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(3), 373-391. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0255>
- Xu, Q., Li, H., He, Y., Liu, F., & Peng, D. (2017). Comparison of data-driven models of loess landslide runout distance estimation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 1281-1294. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1176-3>
- Yin, Y., Li, B., Gao, Y., Wang, W., Zhang, S., & Zhang, N. (2023). Geotechnical structures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(1), 66-101. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.11.001>
- Zhan, W., Fan, X., Huang, R., Pei, X., Xu, Q., & Li, W. (2017). Empirical prediction for travel distance of channelized rock avalanches in the Wenchuan earthquake area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(6), 833-844. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-833-2017>

Zou, Z., Xiong, C., Tang, H., Criss, R. E., Su, A., & Liu, X. (2017). Prediction of landslide runout based on influencing factor analysis. *Environmental earth sciences*, 76, 1-17.
<https://doi.org/10.1007/s12665-017-7075-x>