

Análisis de la influencia de parámetros hidrológicos en la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos en una región montañosa tropical

Daniel Alberto Martínez Ramon y Christian Ferney Rodríguez Correa

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Directora

Sandra Rocío Villamizar Amaya

Ingeniera Civil, MSc, Ph.D.

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ingeniero Sanitario, MSc, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fiscomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Primero que todo, al Todopoderoso, al Creador del Universo, Jehová Dios, por darme la vida y la salud, y cuidarme amorosa y generosamente a lo largo de mi vida, tal como dice Deuteronomio 31:8, “Jehová es el que va delante de ti [...] no te dejará ni te abandonará”.

A mi familia, por brindarme su amor, por cuidarme desde que nací, por siempre preocuparse por mí, por darme el apoyo emocional y económico necesario, y por siempre creer en mí. A mis amigos, por su apoyo incondicional, compañía y por brindarme momentos tan increíbles; cumpliéndose así, las palabras de Proverbios 17:17 que dice: “El verdadero amigo ama en todo momento y es un hermano en tiempos de angustia”.

Estoy sumamente agradecido con Jehová por todas las personas que me ha dado, a todos ellos, va dedicado este trabajo.

Daniel

Dedicatoria

Agradezco a las muchas personas que me han ayudado constantemente, durante este complicado proceso, y me han permitido obtener un logro más, también a mi familia que siempre está conmigo y a mi gato Igor.

Christian

Agradecimientos

Nuestros sinceros agradecimientos para:

Jehová Dios, nuestra familia y nuestros amigos.

A los diferentes docentes que nos acompañaron durante esta etapa universitaria.

A la profesora Sandra Rocío Villamizar Amaya, por aportarnos sus conocimientos y por acompañarnos en todas las etapas de este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco teórico	16
2.1 Deslizamientos y los mecanismos que los producen	16
2.1.1 Aspectos hidrológicos	17
2.1.2 Consideraciones geológicas y geomorfológicas	18
2.1.3 Aspectos geotécnicos	18
2.1.4 Uso y cobertura del suelo.....	19
2.2 Descripción general de los métodos para el cálculo de longitudes de viaje de deslizamientos.....	19
2.3 Métodos utilizados en Colombia	21
2.4 Principales plataformas institucionales colombianas de información relevantes para este estudio	22
3. Metodología	23
3.1 Búsqueda de información	24
3.2 Caracterización de los recursos.....	26
3.3 Lectura y análisis de la información	29
3.4 Evaluación de pertinencia	30
4. Resultados	31

4.1	Análisis bibliométrico.....	31
4.2	Estandarización de los parámetros generales.....	36
4.3	Estandarización de los parámetros hidrológicos.....	39
4.4	Tipos de ecuaciones resultantes.....	44
4.5	Detonantes de deslizamientos.....	45
5.	Análisis de resultados.....	46
5.1	Análisis de los parámetros más utilizados.....	46
5.1.1	A nivel de zonas no tropicales o combinadas.....	47
5.1.2	A nivel de zonas tropicales.....	49
5.1.3	A nivel nacional (caso colombiano).....	51
5.1.4	Comparativa entre parámetros generales hidrológicos.....	53
5.2	Factibilidad de aplicación de metodologías en el contexto colombiano.....	54
5.3	Factibilidad de aplicación de parámetros hidrológicos en el contexto colombiano.....	56
6.	Conclusiones.....	58
	Referencias Bibliográficas.....	61
	Apéndices.....	75

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Tipos de ecuaciones recurrentes y su forma general</i>	44
Tabla 2 <i>Factibilidad de uso en Colombia de los parámetros hidrológicos considerados en esta revisión</i>	57
Tabla 3 <i>Factibilidad de uso en Colombia de los parámetros de precipitación considerados en esta revisión</i>	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Histograma por décadas de los años de publicación de los documentos identificados en esta revisión.</i>	32
Figura 2 <i>Diagrama de barras con la cantidad de artículos que tuvo cada revista académica referenciada en esta revisión.</i>	33
Figura 3 <i>Mapamundi que señala los países en los cuales se realizaron los estudios de esta revisión</i>	35
Figura 4 <i>Diagrama de barras con la cantidad de veces en las que fue estudiado un lugar del mundo (país o región) en los documentos identificados en esta revisión</i>	35
Figura 5 <i>Distribución porcentual de tipo de ecuaciones usado en documentos a nivel de zonas no tropicales o combinadas</i>	45
Figura 6 <i>Distribución porcentual de los detonantes de los deslizamientos considerados en los diversos estudios</i>	46
Figura 7 <i>Distribución porcentual de parámetros generales en documentos a nivel de zonas no tropicales o combinadas</i>	47
Figura 8 <i>Distribución porcentual de parámetros hidrológicos en documentos a nivel de zonas no tropicales o combinadas</i>	48
Figura 9 <i>Distribución porcentual de parámetros de precipitación en documentos a nivel de zonas no tropicales o combinadas</i>	49
Figura 10 <i>Distribución por número de artículos de parámetros generales usados en documentos a nivel de zonas tropicales</i>	50

Figura 11 <i>Distribución por número de artículos de parámetros hidrológicos usados en documentos a nivel de zonas tropicales</i>	50
Figura 12 <i>Distribución por número de artículos de parámetros de precipitación en documentos a nivel de zonas tropicales</i>	51
Figura 13 <i>Distribución porcentual de parámetros en general en documentos a nivel nacional</i> ..	52
Figura 14 <i>Distribución por número de artículos de parámetros hidrológicos usados en documentos en el contexto colombiano</i>	53
Figura 15 <i>Distribución porcentual de parámetros de precipitación en documentos en el caso colombiano</i>	53
Figura 16 <i>Comparativa porcentual entre los primeros tres parámetros generales (naranja) y los primeros tres parámetros hidrológicos (azul), usados en zonas no tropicales o combinadas</i>	54

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Documentos usados en esta revisión	75
Apéndice B. Tabla detallada de los documentos usados en esta revisión	80

Resumen

Título: Análisis de la influencia de parámetros hidrológicos en la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos en una región montañosa tropical

Autor: Daniel Alberto Martínez Ramon y Christian Ferney Rodríguez Correa

Palabras Clave: Deslizamiento, longitud de viaje, tropical, parámetro hidrológico, precipitación.

Descripción: Los deslizamientos afectan la vida e integridad de personas e infraestructuras y resultan en grandes pérdidas económicas. No cabe duda de que se requiere prevenirlos o mitigarlos. La determinación de la longitud de viaje de los deslizamientos es fundamental pues permitiría determinar zonas de riesgo en áreas activas de deslizamientos y, de esta manera, planificar mejor los desarrollos urbanos y de infraestructuras. Este trabajo, por medio de una revisión bibliográfica de 59 documentos, analiza la influencia de parámetros generales e hidrológicos en la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos en regiones montañosas, a nivel mundial, tropical y en el caso colombiano. Se identificaron nueve parámetros hidrológicos que fueron usados independientemente o en conjunto con parámetros generales. Tanto a nivel global como en las zonas tropicales, las métricas relacionadas con la precipitación son los parámetros hidrológicos más usados, especialmente la precipitación anual promedio, dejando ver una clara relación entre la cantidad de agua que ingresa al sistema de la ladera y la masa removida. Otros parámetros importantes son aquellos que involucran características físico-mecánicas del suelo en el sitio del deslizamiento. Este trabajo identificó la falta de estudios sobre estimaciones estadísticas de longitudes de viaje específicos a zonas tropicales, la necesidad de garantizar la calidad y alta densidad espacial y temporal de datos de precipitación que permitan obtener estimativos locales acertados, y la urgencia de un trabajo interinstitucional coordinado en Colombia para recolectar datos de propiedades hidrológicas y físico-mecánicas de los suelos que posibiliten la implementación de modelos más robustos para la estimación estadística de longitudes de viaje.

Abstract

Title: Analysis of the hydrological parameters determining landslide travel lengths in a tropical mountainous region

Author(s): Daniel Alberto Martínez Ramon and Christian Ferney Rodríguez Correa

Key Words: Landslide, travel length, tropical, hydrological parameter, precipitation.

Description: Landslides affect the life and integrity of the people and infrastructures, and result in great economic losses. There is no doubt that it is required both to prevent and mitigate these events. The determination of the landslide's travel length is fundamental because it allows determining risk zones in landslides active areas to improve the planning of urban and infrastructural developments. This work, by means of a bibliographic review of 59 papers, analyzes the influence of general and hydrological parameters in the determination of landslide travel lengths in a mountainous region, worldwide, tropical, and in the Colombian case. Nine hydrological parameters were identified and used independently or combined with general parameters. Both globally and in tropical zones, metrics related to precipitation are the most used hydrological parameters, especially average annual precipitation, showing a clear relationship between the amount of water entering the slope system and the mass removed. Other important parameters are those involving physical-mechanical characteristics of the soil at the landslide site. This work has identified the lack of studies about statistical estimates of travel lengths specific to tropical zones, the need to guarantee the quality and high spatial and temporal density of precipitation data to obtain accurate local estimates, and the urgency of a coordinated inter-institutional work in Colombia to collect data on hydrological and physical-mechanical properties of soils to enable the implementation of more robust models for the statistical estimation of travel lengths.

Introducción

Los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier zona montañosa del mundo y sus causas son variadas; pueden ser de tipo geológico, morfológico, por procesos físicos (como la acción de las lluvias o la actividad sísmica) e incluso de tipo antrópico (Pinillos, 2017). Los lugares más propensos para su ocurrencia pueden ser terrenos escarpados, áreas alteradas por la actividad humana, el valle de un río o cualquier área donde el suelo esté muy saturado (Abril, 2015). Solo entre 1998 y 2017 los deslizamientos afectaron aproximadamente a 4.8 millones de personas y causaron más de 18,000 muertes en todo el mundo; todo esto, acompañado de grandes pérdidas económicas. El futuro no es nada prometedor, ya que, gracias al aumento de las temperaturas y la regularización de eventos extremos provocados por el cambio climático, se espera que se produzcan más deslizamientos de tierra, especialmente en áreas montañosas con nieve y hielo o en zonas con permafrost (Organización Mundial de la Salud, 2021).

La determinación de la longitud de viaje de los deslizamientos es fundamental pues permitiría determinar zonas de riesgo en áreas activas de deslizamientos y, de esta manera, planificar mejor los desarrollos urbanos y de infraestructuras. Existen diversas metodologías que permiten determinar la longitud de viaje, muchas de ellas, usando parámetros hidrológicos. De ahí repercute la importancia, de, identificar los más empleados. Este trabajo analiza la influencia de parámetros hidrológicos en la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos en una región montañosa tropical. Para ello, se revisó sistemáticamente la incorporación de variables hidrológicas en las metodologías estadísticas para la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos. También se caracterizaron las variables hidrológicas consideradas en las

metodologías estadísticas aplicables a la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos en contextos tropicales. Por último, se determinaron las variables hidrológicas más relevantes para el caso del cálculo de longitudes de viaje de deslizamientos por métodos estadísticos en el marco de existencia, resolución y calidad de información del contexto colombiano, para de esta forma, tener una aproximación de las herramientas con las que cuentan las entidades encargadas de estudiar estos eventos en Colombia.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la influencia de parámetros hidrológicos en la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos en una región montañosa tropical.

1.2 Objetivos Específicos

Revisar sistemáticamente la incorporación de variables hidrológicas en las metodologías estadísticas para la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos.

Caracterizar las variables hidrológicas consideradas en las metodologías estadísticas aplicables a la determinación de las longitudes de viaje de deslizamientos en contextos tropicales.

Determinar las variables hidrológicas más relevantes para el caso del cálculo de longitudes de viaje de deslizamientos por métodos estadísticos en el marco de existencia, resolución y calidad de información del contexto colombiano.

2. Marco teórico

En este capítulo, se exponen los aspectos sobre los conocimientos necesarios (Ardila & Durán, 2011), antecedentes y consideraciones teóricas, para comprender los deslizamientos, los mecanismos que los producen y los métodos que existen para calcular las longitudes de viaje.

2.1 Deslizamientos y los mecanismos que los producen

Aunque no se ha llegado a un acuerdo para definir qué es un deslizamiento de tierra (Sandoval, 2021), tradicionalmente se ha considerado que es “un rápido desplazamiento de masa de roca, suelo residual o sedimentos adyacentes a una pendiente, en el que el centro de gravedad de la masa que se mueve avanza hacia abajo” (Terzaghi, 1950). También se ha definido como la descripción del “movimiento descendiente de suelo, rocas y materiales orgánicos bajo el efecto de la gravedad, y también la forma del terreno que resulta de ese movimiento” (Highland & Bobrowsky, 2008). La Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano prefiere usar el término “movimiento en masa” y lo define como “aquellos movimientos ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efecto de la gravedad” (Servicio Geológico Colombiano & Universidad Nacional de Colombia, 2015). En cualquiera de los casos, hay interés en conocer los mecanismos que los producen y la extensión que pueden abarcar una vez estos ocurren.

Aunque por las definiciones presentadas es evidente que la acción de la gravedad juega un papel preponderante para que un deslizamiento ocurra, diversos procesos naturales o antropogénicos pueden aportar al debilitamiento de la ladera (factores condicionantes) haciéndola

propensa a fallar; como si de apretar un gatillo se tratara, un deslizamiento a menudo sobreviene gracias a la acción de un factor detonante (Werner & Friedman, 2009). El agua en exceso que ingresa al sistema de la ladera, producto de las precipitaciones que ocurren en la zona de ubicación del talud, puede generar procesos de remoción de masa. Del mismo modo, los sismos que suceden en una zona también pueden ser detonantes de un deslizamiento. Los aspectos que se deben evaluar para determinar la potencial ocurrencia de un deslizamiento incluyen los hidrológicos en conjunción con otros factores condicionantes como la pendiente del terreno, la geología de la ladera y las propiedades geomecánicas del tipo de suelo, además de la vegetación presente en la superficie del terreno y el uso que se le pueda estar dando a este (Jiménez, 2017).

2.1.1 Aspectos hidrológicos

El agua es uno de los factores naturales que más influye en la estabilidad de un talud puesto que el aumento de la cantidad de agua que se infiltra o se desliza superficialmente afecta las presiones intersticiales de dos formas: aumentando la presión de poros y en una manera proporcionalmente inversa, disminuyendo la resistencia. Es por esto que, cuando se presentan precipitaciones torrenciales, el aumento repentino de la saturación genera disminución de la cohesión aparente, menguando la resistencia al corte del suelo y causando condiciones propicias para un deslizamiento (Jiménez, 2017). El análisis de la infiltración requiere conocer el contenido de agua inicial y la cantidad de lluvia antecedente, junto a la profundidad crítica de saturación (Aristizábal et al., 2011). Por otra parte, a partir de la combinación de la lluvia total acumulada, la lluvia pre-evento, la duración y la intensidad de un evento de precipitación, se pueden obtener

diversas relaciones que son usadas para estudiar el desencadenamiento de un movimiento en masa (Guzzetti et al., 2005).

2.1.2 Consideraciones geológicas y geomorfológicas

El marco geológico proporciona información muy valiosa como la identificación de un posible mecanismo de falla traslacional. También la litología influye en la estabilidad de un talud, pues cada mineral constituyente de las rocas tiene propiedades diferentes, y estas, por efecto de la meteorización ya sea física o química, varían su comportamiento. Los procesos geomorfológicos tales como el diastrofismo, la orogénesis, el vulcanismo o la tectónica de placas, también pueden desencadenar eventos que modifiquen el talud. Por lo general, la geología de una ladera es heterogénea. Esto implica una gran complejidad a la hora de analizarla y por esto los métodos que existen en la actualidad han hecho una simplificación, considerando todo el sistema como homogéneo (Cho, 2014). Sin embargo, considerar una ladera completa como geológicamente homogénea, repercute en la confiabilidad de los resultados obtenidos, ya que cuando un talud posee una litología heterogénea, el comportamiento de este como conjunto, es diferente al de cada material por separado (Suárez, 1998).

2.1.3 Aspectos geotécnicos

Fruto de la exploración geotécnica, se deben considerar los parámetros de entrada y condiciones de frontera, teniendo en cuenta la variabilidad espacial y cómo pueden fluctuar ya sea a corto o largo plazo, es decir, se debe tener en cuenta, el tipo de confinamiento el cual sirve como

plataforma o en el cual se desarrolla el deslizamiento en cuestión. Por otra parte, también se debe caracterizar el suelo por medio de ensayos de laboratorio para obtener parámetros, como el contenido de agua, peso unitario, granulometría, límites de Atterberg, resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción). También es necesario conocer algunas propiedades físicas del terreno como la permeabilidad con el objetivo de comprender la influencia de las lluvias sobre el suelo y los posibles efectos detonados por estas (Jiménez, 2017).

2.1.4 Uso y cobertura del suelo

Se ha encontrado que la cobertura vegetal sobre un talud repercute en su estabilidad ya que intercepta la lluvia, aumenta su capacidad de infiltración, y ayuda a extraer el contenido de humedad del suelo. Las raíces de los árboles aumentan la resistencia al cortante brindado mayor refuerzo al talud pues sirven de ancla de la capa superficial del suelo a capas más profundas y retienen partículas de suelo, haciendo al talud menos propenso a la erosión. Por ejemplo, una ladera cubierta de bosque que posteriormente es deforestada será más propensa a deslizamientos ya que el suelo queda más expuesto a la erosión, y en especial, a la acción del agua porque se disminuye las tensiones capilares de la humedad superficial, se elimina el refuerzo brindado por las raíces y se favorece la infiltración masiva del agua (Suárez, 2012).

2.2 Descripción general de los métodos para el cálculo de longitudes de viaje de deslizamientos

Aunque existen diferentes estrategias de estimación de la longitud de viaje de un deslizamiento, las metodologías se pueden dividir en dos grandes grupos: los métodos estadísticos,

basados en correlaciones geométricas, y los métodos analíticos, basados en modelos físicos del sistema (McDougall, 2017). La diferencia principal entre los métodos estadísticos y los analíticos es que los primeros se pueden aplicar de una forma más rápida, económica y pueden abarcar grandes cantidades de área, mientras que los métodos analíticos tienden a ser específicos, centrados en una zona de estudio o incluso en un único evento.

Los métodos estadísticos, de interés en esta investigación, dependen de la disponibilidad de una gran cantidad de datos de campo que incluyen tanto características del terreno como información de las precipitaciones de la zona a través del tiempo (Jiménez, 2017). La mayor fortaleza de estos métodos es la capacidad de abarcar extensas zonas y aportar conclusiones generales sobre deslizamientos sin necesidad de estudios a fondo sobre los suelos. Sin embargo, esta facilidad que brinda el depender principalmente de datos históricos hace que el método sea de baja exactitud para ubicaciones particulares de especial interés de un estudio (Sandoval, 2021).

Dentro de la categoría de métodos estadísticos se incluyen los llamados métodos empíricos o métodos probabilísticos, que se pueden clasificar en tres tipos: análisis basados en propiedades geomorfológicas, métodos basados en cambios de volumen y métodos geométricos (Sandoval, 2021).

- Análisis basados en propiedades geomorfológicas: Por medio del trabajo de campo y fotointerpretación de la ladera, se reconocen y evalúan depósitos de material, desde los más antiguos hasta los más recientes, como medio de predecir longitudes de viaje (Hung et al., 2005).

- Métodos basados en cambios de volumen: Se valen de correlaciones entre el volumen de la remoción de masa y el ángulo de alcance de esta. Usando estas correlaciones se puede obtener un rango del ángulo de alcance. Adicionalmente, utilizando técnicas estadísticas, se pueden predecir las longitudes de viaje más probables. La literatura ha probado de gran utilidad estos métodos (McDougall, 2017).
- Métodos geométricos: Se tratan de aproximaciones empíricas que intentan establecer una dependencia entre la geometría inicial de la ladera y la longitud de viaje (Hung et al., 2005); esta metodología fue escogida por el Servicio Geológico Colombiano para hacer sus análisis de longitudes de viaje de deslizamientos (Servicio Geológico Colombiano & Universidad Nacional de Colombia, 2015).

2.3 Métodos utilizados en Colombia

En Colombia, la estrategia recomendada por el Servicio Geológico Colombiano en su Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa para predecir las longitudes de viaje y la velocidad de un deslizamiento es el modelo de bloque deslizante (Servicio Geológico Colombiano & Universidad Nacional de Colombia, 2015). Este es un método geométrico consistente en que la masa removida se representa por medio de bloques que se mueven o se deslizan sobre una superficie debido a la gravedad, teniendo en cuenta una resistencia friccional (Cantor & Prieto, 2019). Este método presenta la desventaja de no tener en cuenta las deformaciones de la masa deslizada. Por otro lado, la superficie de remoción de masa se asume como un plano rígido y dada esa circunstancia, no es posible conocer el comportamiento en la base del talud (Sandoval, 2021). La Guía Metodológica ofrece unas ecuaciones de regresión logarítmicas tomadas de literatura internacional y de autores prolíficos en este campo como

Corominas, Finlay, Hungr y Hunter; no obstante, la Guía Metodológica indica que “se podrán emplear otras correlaciones reportadas en la bibliografía técnica internacional” (Servicio Geológico Colombiano & Universidad Nacional de Colombia, 2015). En este trabajo, no se profundizará en esta metodología ya que el método del bloque deslizante es un modelo puntual que complica el análisis a gran escala, a diferencia de lo que se puede lograr, a partir de amplios catálogos e inventarios de deslizamientos.

2.4 Principales plataformas institucionales colombianas de información relevantes para este estudio

Colombia cuenta con dos plataformas principales que pueden ser aprovechadas para la implementación de metodologías para la predicción de longitudes de viaje de un deslizamiento. El Servicio Geológico Colombiano ofrece el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), que consiste en una plataforma de tipo geomático que contiene 242 planchas en escala 1:100.000 que cubren la Región Andina de Colombia. Esta zona constituye el 30% del territorio nacional y en ella habita el 70% de la población (Servicio Geológico Colombiano, 2021). El SIMMA también incorpora una gran cantidad de información relacionada con deslizamientos en su catálogo e inventario de deslizamientos, divididos por zonas o regiones, y también ofrece una amplia gama de estudios para eventos específicos. No obstante, hay que aclarar, que la cantidad de datos o de información proporcionada por el SIMMA puede variar de un lugar a otro, o de un estudio a otro (Moncayo, 2021). Toda esta información es accesible previo registro. El país también cuenta con datos e información de hidrometeorología proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en su plataforma DHIME. Este geoportal ofrece datos diarios, mensuales y anuales de precipitación (máximos, mínimos y

promedios) y en el caso de algunas estaciones, también se encuentra disponible información de precipitación a nivel subdiario (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2022).

3. Metodología

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica para la elaboración del estado del arte sobre la estimación de longitudes de viaje de deslizamientos. Se usó como guía la estrategia de búsqueda propuesta por la Universidad de Leeds (University of Leeds, 2021), adaptándose esta, a las necesidades de este trabajo. Se tuvo en cuenta la relevancia y el impacto de las fuentes bibliográficas, priorizando las que tenían más citas. La información se recopiló, en mayor medida, por medio de los recursos ofrecidos por la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander. Dentro de las bases de datos indexadas que se usaron para buscar información general se encuentran: ScienceDirect, Springer, Nature, Oxford Academic y Taylor and Francis. También se usó el buscador académico Google Scholar.

Para encontrar información más específica y focalizada en el contexto colombiano, se recurrió a trabajos de pregrado o posgrado de las diez universidades colombianas mejor posicionadas según las mediciones del QS Latin America University Rankings 2022 (Quacquarelli Symonds, 2022). Para ello, se hizo uso de los repositorios de dichas 10 instituciones de educación superior, a saber: Universidad de los Andes, Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Antioquia, Pontificia Universidad Javeriana, Universidad del Rosario, Universidad de la Sabana, Universidad del Valle, Universidad del Norte, Universidad EAFIT, y Universidad Industrial de

Santander. También se hizo uso de recursos proporcionados por el Servicio Geológico Colombiano como son su Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano & Universidad Nacional de Colombia, 2015) y su Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) (Servicio Geológico Colombiano, 2021).

La estrategia de revisión bibliográfica se estructuró en cuatro etapas. Primero, búsqueda en bases de datos; segundo, caracterización de los recursos; tercero, lectura y análisis de la información; cuarto, evaluación de pertinencia.

3.1 Búsqueda de información

Al buscar información por medio de bases de datos o buscadores académicos se usaron las palabras claves en español: *longitud de viaje, distancia de viaje, recorrido, deslizamiento, estadístico, probabilístico, parámetros hidrológicos, presión de poro, precipitación, lluvia, intensidad, y precipitación acumulada*. Las palabras claves en inglés fueron: *travel length, travel distance, runout, landslide, statistical, probabilistic, hydrological parameters, pore pressure, precipitation, rainfall, intensity, cumulative rainfall, y hazard*.

Se siguieron los consejos de búsqueda avanzada recomendados por la base de datos ScienceDirect (ScienceDirect, 2021): uso de operadores booleanos como AND, OR o NOT, siendo la precedencia booleana: 1. NOT, 2. AND, 3. OR; también el uso de paréntesis entre palabras claves para agruparlas y hacer una búsqueda mejorada, dando como resultado búsquedas como: “((rainfall) AND (empirical model OR statistical) AND landslide AND (travel distance OR runout

OR travel length)) NOT (hazard OR risk)”, “(empirical model OR statistical) AND landslide AND (travel distance OR runout OR travel length)” o “((rainfall) AND (empirical model OR statistical OR database) AND landslide AND (travel distance OR runout OR travel length)) NOT (hazard)”.

Las bases de datos usadas ordenan automáticamente los resultados en función de su relevancia; no obstante, dado que en algunos casos las búsquedas arrojaron cientos de resultados, fue necesario aplicar filtros. Primero, se inspeccionaron los títulos de los artículos o trabajos obtenidos verificando que el título del artículo o trabajo estuviera en concordancia con lo requerido por los objetivos de esta revisión. A la par se revisaron las palabras clave de cada documento. Si el título estaba en armonía con lo requerido y las palabras clave coincidían o estaban relacionadas con la temática del estudio, se procedió a leer el resumen o *abstract* de dicho documento.

La recopilación de metadatos y archivos (formato PDF) de los artículos o trabajos que pasaron los filtros de título, palabras clave y resumen se llevó a cabo con el software de gestión bibliográfica Zotero y su extensión para el navegador de Google Chrome (*Zotero / Your personal research assistant*, 2022). En la mayoría de los casos, el acceso a los artículos estuvo habilitado bien sea por las licencias de acceso institucional a bases de datos con que cuenta la Biblioteca Universidad Industrial de Santander o porque estaban disponibles con acceso libre en la web. En casos en que los documentos no estaban disponibles por los mecanismos anteriores, se contó con acceso a bases de datos de las bibliotecas de las Universidades de California, Merced y Oregon State University, tomando ventaja de las relaciones existentes entre la directora de este trabajo de grado y dichas universidades. Para los casos excepcionales en que no fue posible el acceso a la lectura de los documentos, estas referencias fueron descartadas del análisis.

3.2 Caracterización de los recursos

Se procedió a caracterizar los recursos obtenidos de acuerdo con su relevancia y calidad. Adicionalmente, dado que este estudio tiene tres enfoques: uno general (objetivo específico 1), uno focalizado en el contexto tropical (objetivo específico 2) y otro particular, esto es, en el contexto nacional (objetivo específico 3), se analizaron los recursos encontrados, identificando temáticas, metodologías, limitantes y asegurándose que los estudios estuvieron dentro del rango del alcance de esta revisión. Por ello, se procedió a descartar algunos documentos, que inicialmente, en la búsqueda inicial, se consideraron, pero después de una lectura más exhaustiva, se llegó a la conclusión que las metodologías usadas no eran empíricas o estadísticas, quedando fuera del alcance de este proyecto. Para dicho propósito, a medida que se iban recopilando las referencias, se fueron caracterizando, usando una tabla de Excel con las siguientes columnas:

- Fecha: Año de publicación de la referencia.
- Tipo de publicación: evalúa si la referencia corresponde a un artículo de revista académica, un libro o capítulo de libro, una tesis (puede ser de pregrado o posgrado) o una conferencia.
- Q (Cuartil): este tópico solo se aplicó para los artículos de revista académica o científica. Es un indicador que refleja la importancia relativa de una determinada revista dentro del total de las revistas que abarcan su área de estudio. Dicho de otro modo, “es una medida de posición de una revista en relación con todas las de su área” (Deusto, 2015). La categorización de cuartiles es Q1, Q2, Q3 y Q4, siendo la mejor clasificación la del primer cuartil (Q1). Para determinar el cuartil de las revistas donde se publicaron los artículos usados en esta investigación se usó la plataforma Scimago Journal & Country Rank (SJR) (*Scimago Journal & Country Rank*, 2022). La búsqueda

se hizo por nombre de la revista, pero en los casos en que hubiese posibilidad de confusión, se usó el ISSN como medio de verificación. Para una revista especificada, el apartado de cuartiles (Quartiles) muestra la clasificación de la revista en una serie de años recientes, siendo identificado cada cuartil con un color, a saber: Q1 verde, Q2 amarillo, Q3 naranja y Q4 rojo. Para esta revisión, se tuvo en cuenta el cuartil del último año disponible y se utilizó el área o categoría más relacionada con el artículo estudiado.

- Índice H: este tópico solo se aplicó para los artículos de revista académica o científica. Se trata de una metodología propuesta por Jorge Hirsch, de la Universidad de California (Sánchez, 2022), para clasificar los autores de artículos científicos haciendo un balance entre el número de publicaciones que ha realizado y las citas que ha recibido. Para su cálculo, se ordenan en forma descendente las publicaciones de acuerdo con el número de citas recibidas “enumerándolas para identificar el punto en el que el número de orden coincide con el número de citas recibidas por una publicación” (*Índice h - Universidad de Chile*, 2022). A modo de ejemplo, un índice H de 10 significa que por lo menos, 10 artículos han recibido 10 citaciones cada uno. El índice H (H-INDEX) se consultó simultáneamente al cuartil en la plataforma SJR.
- Citaciones recibidas: este tópico solo se aplicó para los artículos de revista académica o científica. Corresponde al número de veces que un artículo ha sido citado en otros artículos de revistas científicas indexadas. Esta medición se obtuvo de las métricas proporcionadas por las mismas bases de datos consultadas. Por ejemplo, si el artículo fue encontrado en ScienceDirect, se tuvieron en cuenta las citaciones declaradas en esta misma base de datos.
- Autor: corresponde al apellido o los apellidos de los autores de la referencia. Si son dos autores, se colocó el primer apellido de cada autor, uniéndolos con el conector “y” (por ejemplo:

Jaiswal y Vanwesten). Si se trata de tres o más autores, solo se escribió el nombre del primer autor, seguido de la expresión latina “et al.” (por ejemplo: Kirschbaum et al.).

- Título: corresponde al nombre con el que se identifica la referencia bibliográfica.
- Título de la revista (Publicación): Corresponde al nombre con el que se identifica la revista científica indexada que contiene el artículo analizado, o el del libro del cual fue tomada la referencia. En el caso de trabajos de pregrado o posgrado, o conferencias no se usó este apartado.
- Editor: corresponde al nombre de la editorial que publica la revista científica indexada que contiene el artículo analizado, el nombre del editor del libro del cual fue tomada la referencia, la universidad que publicó los trabajos de pregrado o posgrado analizados, o el nombre del evento en el cual se llevó a cabo la conferencia analizada.
- DOI: siglas para el identificador de objeto digital (Digital Object Identifier). Es un código alfanumérico para identificar un producto científico o académico, de forma única, directa, fácil y segura. Su uso permite localizar el objeto de interés, recuperándolo aún si cambia su ubicación digital, evitando así, el problema de los enlaces rotos. Como si de un código de barras se tratara, identifica de forma estandarizada un artículo académico. El sistema DOI es gestionado por la Fundación Internacional de Identificación de Objeto Digital, adscrita a la estandarización ISO («El DOI, Identificador de Objetos Digitales», 2011). En este trabajo se incluyó el DOI en forma de URL ofrecidos por los artículos de revistas científicas indexadas.
- Palabras clave (keywords): hacen parte de los metadatos de un artículo. Corresponde a los términos que mejor describen la temática de un trabajo académico y, en especial, la peculiaridad que este ofrece. Estas palabras tienen una doble función ya que permiten, por un lado, describir de forma concisa las características principales de una referencia, ampliando de esta forma su alcance, y por el otro lado, facilita la búsqueda de los trabajos que necesite un investigador, entre el gran

número de resultados que pueda encontrar en una base de datos (García-Ruiz, 2017). En la tabla se incluyeron las palabras clave en el idioma del producto académico o científico analizado y, para el caso de documentos en inglés, se incluyó una traducción apropiada al español.

- Descripción: corresponde a una pequeña síntesis que explica el propósito del trabajo.
- Detonante del deslizamiento: corresponde a la descripción del factor desencadenador de los deslizamientos analizados por la referencia en cuestión.
- Parámetros generales: son aquellas variables que intervienen y que se tienen en cuenta en las diferentes metodologías analizadas para evaluar longitudes de viaje, pero que no son de tipo hidrológico.
- Parámetros hidrológicos: son aquellas variables que intervienen y que se tienen en cuenta en las diferentes metodologías analizadas para evaluar longitudes de viaje, de naturaleza hidrológica.

3.3 Lectura y análisis de la información

A partir del ejercicio anterior, se desarrolló el componente de revisión bibliográfica, que incluyó la lectura y el análisis de las referencias seleccionadas considerando diversos aspectos. Desde el punto de vista metodológico, en particular, se evaluaron las diferentes estrategias estadísticas para el cálculo de la longitud de viaje identificando aspectos claves como relevancia de la información y aplicabilidad en el contexto nacional, siempre teniendo en cuenta la identificación de las zonas en las que fueron desarrollados los estudios ya que esto es vital de acuerdo con los objetivos propuestos en esta investigación. En este sentido, se elaboró un mapa en donde se señaló la ubicación de los diferentes estudios analizados resaltando los que están ubicados

en la región intertropical (zona geográfica que está comprendida entre el Trópico de Cáncer en el norte, y el Trópico de Capricornio en el sur), ya que esta es la zona en la que se enfoca el objetivo específico 2 de este trabajo.

Cuando se trató de una muestra considerable de estudios, como es el caso de los documentos identificados a nivel global, se recurrió a diagramas circulares mostrando los porcentajes de uso de cada parámetro. Para ello, se contabilizó el número de veces que se usaba cada parámetro estandarizado (contenidos en las secciones 5.2 y 5.3 de este trabajo) en el total de estudios, y se procedió a realizar una sumatoria de las veces que fue usado para calcular el porcentaje basado en el total de estudios revisados. Por lo general, en un solo estudio se usaban varios parámetros a la vez; los estudios en donde se usó un solo parámetro fueron casos excepcionales.

Cuando se trató de una muestra pequeña de estudios, insuficiente para generar estadísticas a partir de ella, como es el caso de los documentos identificados a nivel tropical y nacional, que solo fueron siete y cuatro, respectivamente, se recurrió a diagramas de barras mostrando la cantidad de veces que se usó cada parámetro en los diferentes estudios.

3.4 Evaluación de pertinencia

Se evaluó la pertinencia de las metodologías revisadas para el caso colombiano, en el contexto de las condiciones hidroclimatológicas de esta región montañosa tropical y de la disponibilidad de información a nivel institucional en el contexto nacional, regional y local. Para la parte local, se hizo uso de recursos proporcionados por el Servicio Geológico Colombiano y

Corporaciones Autónomas Regionales. Este ejercicio permitió emitir una recomendación sobre las metodologías más recomendadas para la evaluación de las longitudes de viaje en Colombia.

4. Resultados

4.1 Análisis bibliométrico

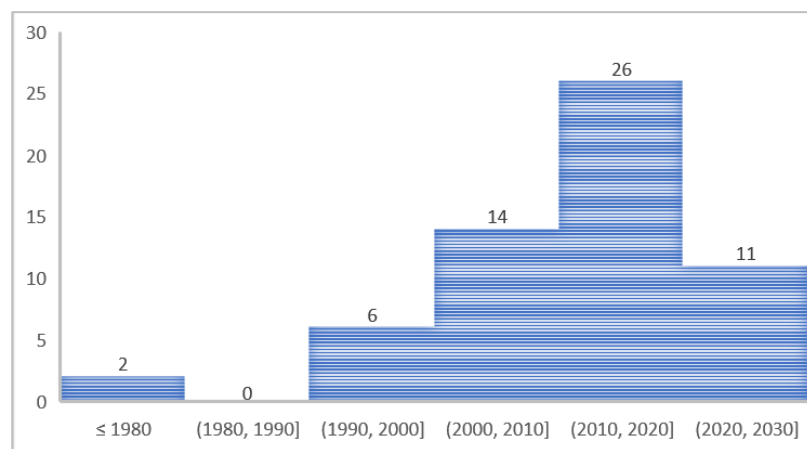
El ejercicio de revisión bibliográfica identificó un total de 59 documentos que trabajan metodologías estadísticas para el cálculo de longitudes de viaje de un deslizamiento; de ellos 53 fueron artículos científicos (89,8% del total), 2 fueron capítulos de libro (3,4% del total), 2 fueron artículos de conferencia (3,4% del total) y 2 fueron trabajos de grado (3,4% del total).

El Apéndice B de este trabajo presenta la tabla conformada para la caracterización de los recursos como se describe en la sección 4.2. El tiempo de producción de la bibliografía revisada se distribuye entre 1973 y 2022. En general, se observa una tendencia creciente en el tiempo de las investigaciones realizadas en esta temática con el máximo pico alcanzado en la década 2010-2020 donde se produjo el 44% de las 59 publicaciones totales (Figura 1). Por otra parte, 34 documentos (23 a nivel global, 1 para zonas tropicales y 10 para el caso colombiano) que fueron considerados en un principio, al final, no se tuvieron en cuenta, ya que, después de una revisión más profunda, se observó que el método usado estaba más cerca de lo analítico que de lo empírico, quedando por fuera de los alcances que abarca esta revisión. Por ejemplo, algunos estudios descartados predecían la longitud de viaje de un deslizamiento, usando ecuaciones analíticas, sin usar métodos estadísticos o probabilísticos. También, 3 estudios fueron descartados, dada la imposibilidad de conseguir sus documentos por vías legales. La gran mayoría de los documentos considerados,

usaron datos de catálogos de deslizamientos reales, mientras que una minoría se basó en el uso de datos de deslizamientos simulados, estos últimos, también se tuvieron en cuenta, ya que dichos estudios usaron métodos estadísticos o probabilísticos para sus investigaciones.

Figura 1

Histograma por décadas de los años de publicación de los documentos identificados en esta revisión.



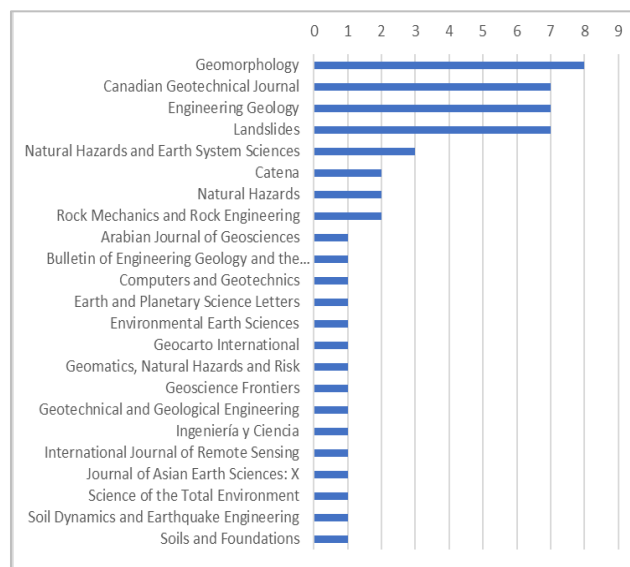
De las 23 revistas científicas en las cuales estaban los estudios analizados, 18 (78.3%) son de cuartil Q1, mientras que 4 (17,4%) son de cuartil Q2. Las revistas restantes (que representan el 4,3% del total de revistas) no aparecen indexadas en la plataforma ScimagoJR. Para este estudio, no se tuvieron en cuenta revistas con cuartiles Q3 y Q4. Las revistas científicas más representativas para esta temática fueron *Geomorphology* (8 artículos), *Canadian Geotechnical Journal*, *Engineering Geology* y *Landslides* (con 7 artículos cada una) (Figura 2).

Por otro lado, el estudio más popular, fue el artículo titulado “A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches” realizado en 1995 por Hungr (Hungr,

1995) con 968 citaciones, le sigue “The angle of reach as a mobility index for small and large landslides” realizado en 1996 por Corominas (Corominas, 1996) con 649 citaciones, en tercer lugar se encuentra el artículo “The mobility of long-runout landslides” realizado en 2002 por Legros (Legros, 2002). Los trabajos de Hungr, Corominas, Legros y Scheidegger (con su artículo “On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides” (Scheidegger, 1973.) fueron los más citados en la mayoría de los documentos que se usaron en esta revisión.

Figura 2

Diagrama de barras con la cantidad de artículos que tuvo cada revista académica referenciada en esta revisión.



Respecto a la ubicación geográfica de los estudios, 49 fueron hechos a nivel de zonas tropicales o combinadas. Se consideró “a nivel de zonas no tropicales o combinadas” a sitios fuera del área comprendida entre el Trópico de Cáncer y del Trópico de Capricornio (no obstante, algunos estudios usaron datos de lugares tropicales y no tropicales a la vez, incluyendo Colombia. Dado que contenían otras regiones geográficas fuera del contexto tropical, fueron considerados

como estudios en zonas combinadas). En algunas excepciones, los datos fueron ficticios, ya que se trataba de simulaciones. En esos casos, también fueron considerados como estudios a nivel de zonas no tropicales o combinadas. Por otro lado, 7 estudios fueron considerados como en “zonas tropicales”, es decir, en locaciones en el área comprendida entre el Trópico de Cáncer y del Trópico de Capricornio. En el caso de países que una porción está en territorio tropical y otra no, como en el caso de China, solo se consideraron en “zonas tropicales” aquellos estudios que consideraron dicha área, siempre y cuando, estuviera especificado en el documento. Se excluyó a los estudios realizados en Colombia, a pesar de ser un país tropical, ya que este territorio cuenta con su propia categoría en esta revisión. Por último, 4 estudios se consideraron “a nivel nacional (caso colombiano)”, que fueron aquellos realizados en territorio nacional (Figura 3).

Los estudios realizados en China son los que están representados en mayor cantidad (en 13 estudios), incluso más que los que en esta revisión se clasificaron como “Mundial” (12 estudios) en la clasificación “Mundial” se incluyen los artículos o documentos que tuvieron como región geográfica varios países a la vez) (Figura 4).

Figura 3

Mapamundi que señala los países en los cuales se realizaron los estudios de esta revisión

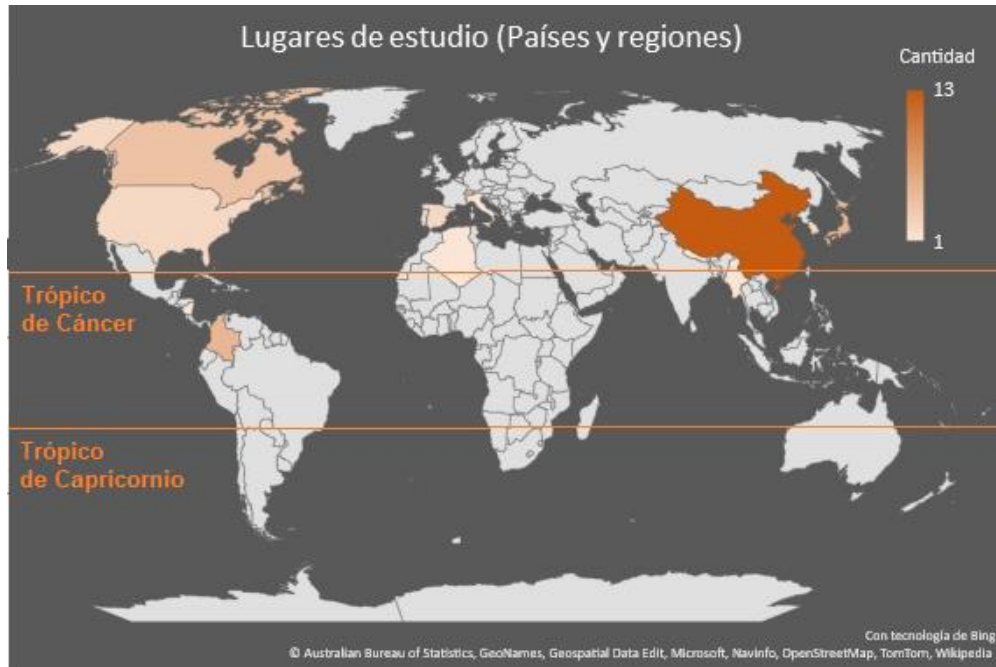
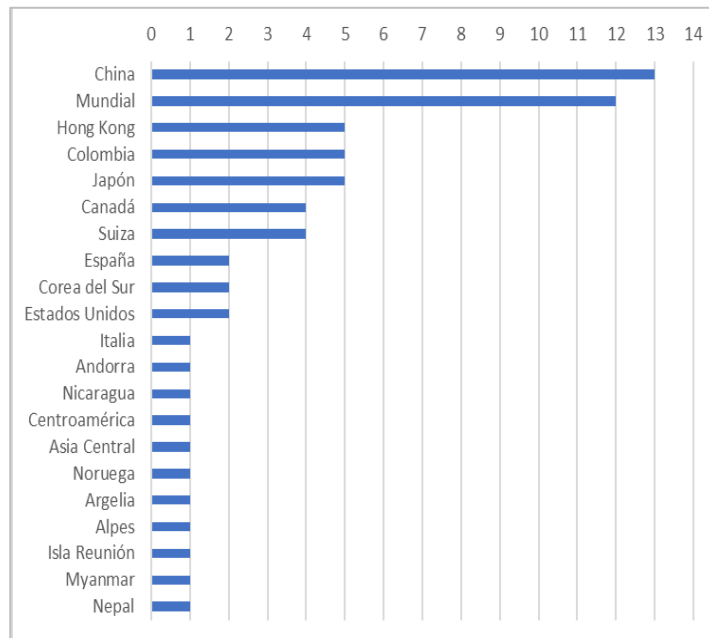


Figura 4

Diagrama de barras con la cantidad de veces en las que fue estudiado un lugar del mundo (país o región) en los documentos identificados en esta revisión



4.2 Estandarización de los parámetros generales

Esta revisión define el concepto de “parámetros generales” como aquellas variables que intervienen y que se tienen en cuenta en las diferentes metodologías analizadas para evaluar longitudes de viaje, pero que no son de tipo hidrológico. No se pudo generar una estandarización completa por falta de claridad y consistencia entre el uso de variables y parámetros entre los diferentes estudios revisados. No obstante, cuando se pudo verificar la definición de cada término o, al menos, la equivalencia estaba implícita dentro del estudio, se procedió a implementar la estandarización. A continuación, se muestra la lista de los parámetros generales usados en la totalidad de los estudios revisados, agrupados en cuatro categorías: caracterización del suelo, geométricos, mecánicos y varios, que corresponde a parámetros que no pueden ser clasificados en las anteriores tres categorías.

Parámetros de caracterización del suelo:

- Ángulo de fricción: es el “ángulo cuya tangente es el coeficiente promedio de fricción entre las partículas de un suelo” (*Ángulo de Fricción Interna | Diccionario, 2022*).
- Coeficiente de fricción: se define como: “la relación entre la fuerza de deslizamiento y la fuerza de retención ejercida por dos superficies en contacto. Este coeficiente es de hecho una evaluación de la dificultad con la que la superficie de un material se deslizará sobre otro material” (*Definición del coeficiente de fricción, 2022*).
- Contenido de arcilla: es la proporción de existencia de material arcilloso en el material removido en masa.

- Granulometría: distribución estadística de los diferentes tamaños de las partículas de suelo que componen el material removido en masa.
- Peso específico: Es el producto de la densidad de una muestra de suelo por la gravedad.
- Porosidad: es la fracción del volumen de los espacios vacíos de un material con respecto al volumen total.

Parámetros geométricos:

- Altura: corresponde a la dimensión vertical que va desde el punto de rotura del deslizamiento hasta el punto de deposición.
- Ancho de depósito: dimensión que compone la extensión del material removido en masa, visto frontalmente.
- Ángulo de alcance: ángulo que forma la superficie inclinada del punto de deposición, con el plano horizontal.
- Ángulo de pendiente: es el ángulo de la relación que forma el plano horizontal de un terreno con el plano tangente de la superficie.
- Área: es la extensión en dos dimensiones (ancho y longitud) de la superficie que compone el material removido en masa.
- Distancia horizontal: corresponde a la dimensión horizontal que va desde la proyección en el plano horizontal del punto de rotura del deslizamiento hasta el punto de deposición.

- Pendiente: es la relación que forma el plano horizontal de un terreno con el plano tangente de la superficie. Es decir, es el desnivel o la inclinación del talud o de la superficie de un deslizamiento.
- Perímetro: es la suma de la longitud de todos los lados, de la superficie del material removido en masa.
- Volumen: es la extensión en las tres dimensiones (ancho, longitud y altura) del material removido por el movimiento en masa.

Parámetros mecánicos:

- Criterio de falla Mohr-Coulomb: también conocido como “criterio de fricción interna”, es un concepto de resistencia estática que establece, que “el material resistirá en el punto analizado siempre que su círculo de Mohr sea interno a la envolvente definida por los círculos de Mohr correspondientes a la rotura del ensayo de tracción y del ensayo de compresión y la línea tangente a ambos” (*Mecapedia-criterio de Coulomb-Mohr, 2022*).
- Energía potencial: es “la energía que almacena un objeto y que depende de su posición con respecto a otros objetos, o de que exista un campo de fuerzas dentro de él” («¿Qué es la energía potencial?», 2018).
- Viscosidad del flujo: rozamiento interno entre las capas de fluido. En este caso, del material removido en masa.
- Tensión de rotura: es la máxima tensión que puede soportar un material sometido a tensión antes de que su sección transversal se contraiga.

- Velocidad: es la relación entre la distancia recorrida por el deslizamiento y el tiempo empleado para ello.
- Pico de descarga: el mayor volumen de material descargado en una unidad de tiempo.

Parámetros varios:

- Altitud: distancia vertical en la cual está ubicado el deslizamiento, con respecto al nivel del mar.
- Grado de confinamiento: morfometría del terreno que envuelve el material removido.
- Intensidad sísmica: descripción cualitativa de los efectos de un sismo, en este caso, un movimiento telúrico que desencadene un deslizamiento.
- Temperatura anual: promedio de temperaturas registradas en un año en el sitio de ubicación del deslizamiento.

4.3 Estandarización de los parámetros hidrológicos

Los parámetros hidrológicos identificados en la revisión de literatura fueron consistentes entre todos los recursos revisados y no hubo necesidad de realizar una estandarización. En total, se identificaron nueve parámetros que fueron usados independientemente o en conjunto con parámetros generales. Los parámetros hidrológicos identificados fueron:

- Cohesión: es la “fuerza de unión entre las partículas de un suelo, cuya magnitud depende de la naturaleza y estructura de este. En los suelos cohesivos la estructura depende del contenido de minerales arcillosos presentes y de las fuerzas que actúan entre ellos” (*Cohesión (suelo) - Geotecnia y Mecánica de Suelos*, 2022). En esta revisión se consideró como un parámetro hidrológico, porque, cuando la intensidad de la lluvia aumenta, esta provoca una disminución en la cohesión aparente, lo que provoca que la resistencia al cortante disminuya, debilitando el talud, pudiendo provocar de esta forma, deslizamientos (Tost & Rincón, 2011).
- Conductividad hidráulica: describe la capacidad de un suelo para transmitir agua e indirectamente oxígeno a través del perfil del suelo. Es una medición indirecta de la estabilidad estructural del suelo o de su grado de compactación (World Meteorological Organization & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2012). Los suelos que tienen altos valores de conductividad hidráulica solo necesitan lluvias cortas e intensas para fallar. Por lo tanto, es un buen predictor de la estabilidad de un talud, a la hora de analizar el riesgo de ocurrencia de un deslizamiento (Aristizábal et al., 2017).
- Contenido de Humedad: cantidad de agua contenida en un volumen de suelo (ABC Geotechnical Consulting, 2021). La humedad es un factor que puede condicionar el acaecimiento de un deslizamiento (Moreno et al., 2006).
- Curva característica de humedad: es la gráfica que representa la presión de succión en relación con la humedad o contenido de agua en un suelo no saturado. También son “curvas que relacionan las propiedades de un medio poroso parcialmente saturado con la presión de succión” (World Meteorological Organization & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2012).

- Grado de saturación: se define como el grado o la proporción en que los espacios vacíos de un suelo o una roca contienen agua. Se expresa como un porcentaje en relación con el volumen total de vacíos. Cuando el suelo de un talud está sobresaturado, por la acción de las lluvias, es propenso a fallar (Mora-Ortiz & Rojas-González, 2012).
- Nivel freático: es el nivel del agua en el subsuelo que se encuentra en condiciones de presión atmosférica (Valdivielso, 2020). Las laderas con niveles freáticos muy cercanos a la superficie del talud pueden ser propensas a sufrir roturas (Redacción GeoQuantics, 2019). El agua subterránea puede repercutir en la estabilidad de un talud, afectando los siguientes aspectos: presiones de poro (disminuyendo presión efectiva y resistencia al corte), disminución de tensiones capilares (reduciendo la resistencia al corte), lavando los cementantes (haciendo decrecer la cohesión y el coeficiente de fricción interna), favoreciendo la erosión interna, la erosión por exfiltración, las subpresiones, aumentando la densidad o peso de los materiales del suelo, favorece la aparición de fuerzas dinámicas y produce grietas por desecación (disminuyendo el factor de seguridad de un talud) (Suárez, 1998).
- Permeabilidad: Es la capacidad que tiene el suelo de permitir el paso del agua sin afectar su estructura interna (*Permeabilidad de los suelos*, 2013). En gravas la permeabilidad es alta, mientras que en las arcillas es baja. En taludes heterogéneos, como los que se encuentran en regiones tropicales, la permeabilidad no es isotrópica, si no tiende a variar en conformidad con la orientación de las discontinuidades que pueda haber, por lo tanto, la permeabilidad es mayor en la dirección a los planos de depósito (Suárez, 1998).
- Precipitaciones: datos de las lluvias acaecidas en el lugar de deslizamiento en un periodo de tiempo. En los diferentes estudios se habla de diversos tipos de datos, entre ellos: frecuencia, intensidad de lluvia, periodo de retorno de precipitación, precipitación anual promedio,

precipitación anual total, precipitación extrema, precipitación máxima en 24 horas, precipitación media mensual, precipitación promedio en 10 años y probabilidad de excedencia. La mayoría de los deslizamientos en los Andes colombianos, son provocados por las lluvias (Aristizábal et al., 2017) por lo tanto, tener datos de precipitaciones es importante para analizarlos.

- Presión de poro: es la presión del agua retenida en el suelo (intersticial). Usando piezómetros se mide la presión de poro debajo del nivel freático. Normalmente, la presión vertical se puede asumir distribuida de forma parecida a la presión hidrostática (Davison & Springman, 2000). Un aumento en la presión de poros positiva o una reducción en la presión de poros negativa, se traduce en una disminución de resistencia al cortante y la estabilidad de un talud (Suárez, 1998).

A continuación, se muestra una definición más específica de cada parámetro de precipitaciones usados en este documento:

- Frecuencia: es la forma en la que se repiten eventos de precipitación, similares en intensidad y duración. Entre más elevada sea una precipitación, esta se repetirá con menor frecuencia (Coras & Arteaga-Ramírez, 2005).

- Intensidad de lluvia: es la tasa de lluvia expresada en unidades de altura por unidad de tiempo (World Meteorological Organization & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2012).

- Periodo de retorno de precipitación: es el número de años que en promedio, se cree que será igualado o excedido, es decir, es la frecuencia con la que se presenta un evento extremo de precipitación (Méllice & Reason, 2007).

- Precipitación anual promedio: es el promedio en un año en profundidad (sobre espacio y tiempo) de precipitación en un área (IndexMundi, 2022).
- Precipitación anual total: es la sumatoria de lluvias diarias durante un año (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2013)
- Precipitación extrema: un evento de lluvia extrema está relacionado con colas de distribución probabilísticas de valores observados. Para ello, de acuerdo con el estudio, se consideran extremos los valores que pertenecen a algún percentil de la distribución, o los valores atípicos en un diagrama de caja y bigotes (Guillén-Oviedo et al., 2020).
- Precipitación máxima en 24 horas: según el IDEAM, es aquella precipitación que ocurre entre las siete de la mañana de un día y las siete de la mañana del día siguiente, periodo que se conoce como “día pluviométrico” (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2022).
- Precipitación media mensual: es la media aritmética de precipitaciones de un cierto mes, a lo largo de una serie de años, por ejemplo, si la serie es de 20 años, se trataría de la media de los 20 meses a lo largo de ese periodo de tiempo (Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, 2021).
- Precipitación promedio en 10 años: es el promedio en 10 años en profundidad (sobre espacio y tiempo) de precipitación en un área.
- Probabilidad de excedencia: es la probabilidad de que un evento hidrológico, sea igualado o excedido. Es la inversa del periodo de retorno (Arrau, 1990).

4.4 Tipos de ecuaciones resultantes

Generalmente, las diversas metodologías consideradas en los estudios brindaban una ecuación o un algoritmo para predecir las longitudes de viaje. Los 48 documentos (de 59) que en esta revisión se consideraron como “a nivel de zonas no tropicales o combinadas” (distribuidos entre los años 1973 y 2022) consideraron cuatro modelos matemáticos: logarítmico, lineal, trigonométrico y exponencial. Adicionalmente, hubo estudios que propusieron un algoritmo y casos donde no se ofrece ni ecuación, ni algoritmo. Normalmente, las ecuaciones siguen una estructura general, con diversos coeficientes que le dan su propia peculiaridad a cada una, dependiendo de factores como la zona de estudio y los parámetros utilizados (Tabla 1).

Tabla 1

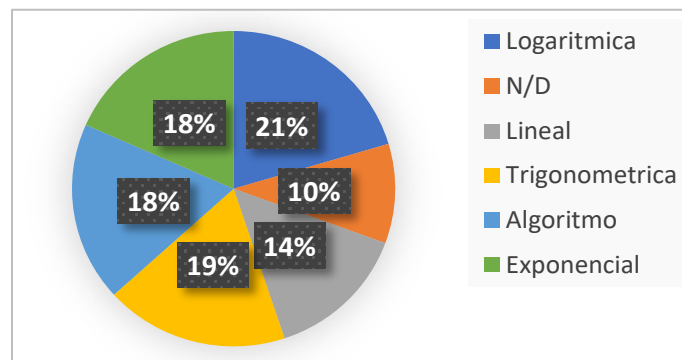
Tipos de ecuaciones recurrentes y su forma general

Tipo de ecuación	Forma general
Logarítmica	$\log\left(\frac{H}{L}\right) = a * \log(V) + b$
Lineal	$f = \frac{H}{L}$
Trigonométrica	$\frac{H}{L} = a * \tan(\theta) + b$
Exponencial	$L = a * V^b * H^c$
Algoritmo	Diferente para cada estudio

La proporción estuvo bien distribuida entre los diferentes tipos de modelos. Se pudo observar que las ecuaciones logarítmicas abarcaron el 21% del total, las trigonométricas el 19%, las exponenciales y los algoritmos, compartieron un 18% cada uno y las ecuaciones lineales fueron representadas en un 14%. En un 10% de los documentos revisados no se presentaron ecuaciones ni algoritmos a usar; en ese caso, esta revisión clasifica esos datos como N/D (Figura 5).

Figura 5

Distribución porcentual de tipo de ecuaciones usado en documentos a nivel de zonas no tropicales o combinadas

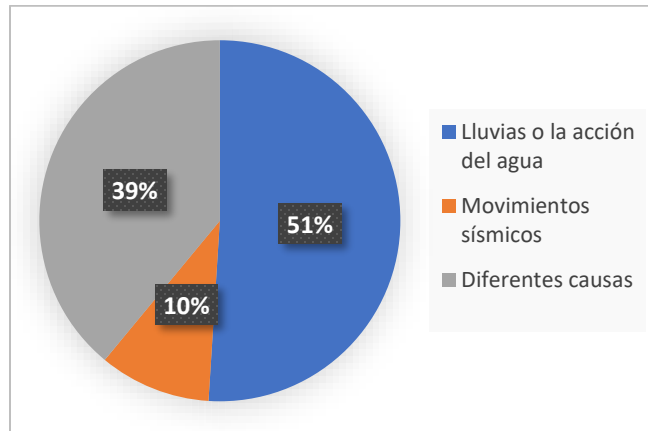


4.5 Detonantes de deslizamientos

En la mayoría de los casos, el detonante de los deslizamientos analizados en los diversos estudios identificados fue por lluvias o por la acción del agua, con un 51% (30 de 59 estudios). En el caso colombiano, los 4 documentos considerados, tuvieron como detonante la lluvia. En menor medida, fue por movimientos sísmicos con un 10%. En los otros casos, fue por la acción eólica, antrópica o de la gravedad. En algunas excepciones hubo diversas causas no especificadas, por lo tanto, no se enumeró ningún detonante en especial en esos casos (Figura 6).

Figura 6

Distribución porcentual de los detonantes de los deslizamientos considerados en los diversos estudios

**5. Análisis de resultados****5.1 Análisis de los parámetros más utilizados**

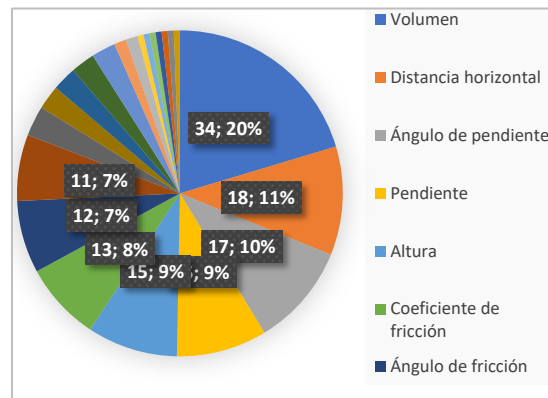
El parámetro hidrológico más usado en la totalidad de documentos analizados (a nivel global, tropical y nacional) fue la precipitación anual promedio (usado en 26 de 59 estudios) seguida de la presión de poro (usado en 17 de 59 estudios). Esto permite ver una clara relación entre la cantidad de agua que ingresa al sistema de la ladera y la cantidad de masa removida. Paralelamente, el parámetro general, más usado fue el volumen (usado en 39 de 59 estudios), seguido del ángulo de la pendiente (usado en 24 de 59 estudios).

5.1.1 A nivel de zonas no tropicales o combinadas

El análisis global (48 documentos que se distribuyen entre los años 1973 y 2022) encontró que el parámetro general más usado es el volumen de deslizamiento con amplia diferencia (20%). Sin embargo, también resaltaron parámetros de tipo geométrico como distancia horizontal (11%), ángulo de pendiente (10%), altura (9%) y pendiente (9%). El coeficiente de fricción (8%) también se destacó por su uso dentro de los estudios analizados (Figura 7).

Figura 7

Distribución porcentual de parámetros generales en documentos a nivel de zonas no tropicales o combinadas



El parámetro hidrológico más usado en los análisis de longitudes de viaje es la precipitación en general (25%) y en particular la precipitación anual promedio, por lo que se constituye en una variable fundamental para tener en cuenta en estudios de este tipo. Tiene la ventaja de que existe la posibilidad de que haya información continua y de alta resolución temporal a partir de la infraestructura de monitoreo climatológico de entidades gubernamentales o privadas.

La humedad del suelo, por otra parte, es el segundo parámetro más usado (23%), seguido de la presión de poro (19%) y del grado de saturación del suelo (11%). Estos tres últimos parámetros tienen la limitación de que requieren recolectar información específica del sitio e implican recursos humanos y de equipos importantes. Los demás parámetros están representados en menor proporción dentro de la literatura con un 22% del total de documentos revisados (Figura 8). En cuanto a parámetros de precipitaciones, el más usado fue el de precipitación anual total y promedio (usado cada uno 5 veces), y le sigue intensidad de lluvia (usado 4 veces) (Figura 9).

Figura 8

Distribución porcentual de parámetros hidrológicos en documentos a nivel de zonas no tropicales o combinadas

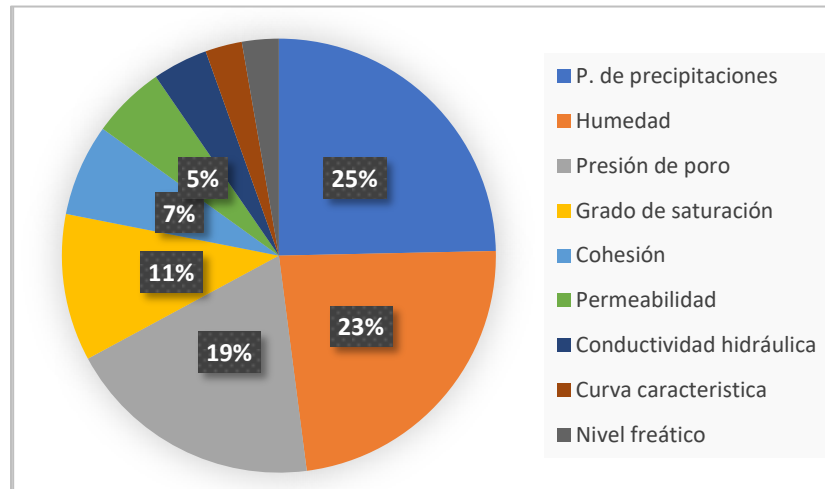
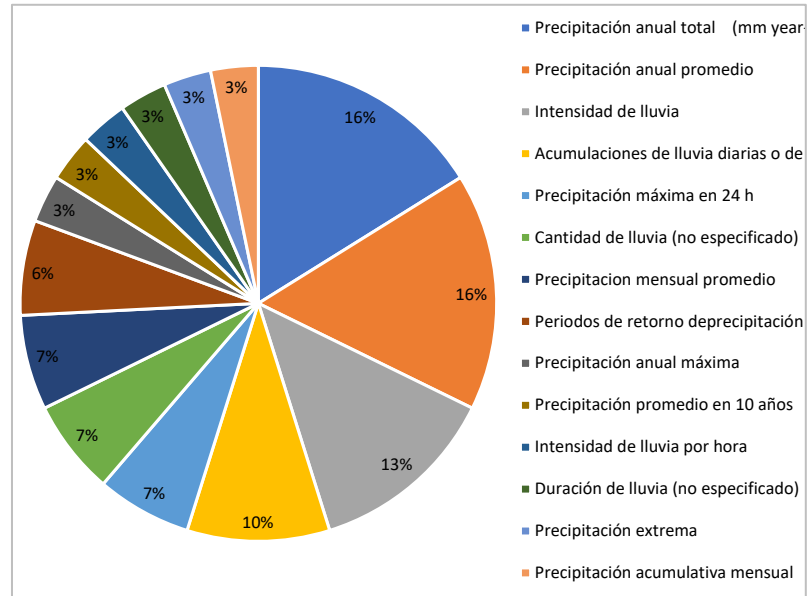


Figura 9

Distribución porcentual de parámetros de precipitación en documentos a nivel de zonas no tropicales o combinadas

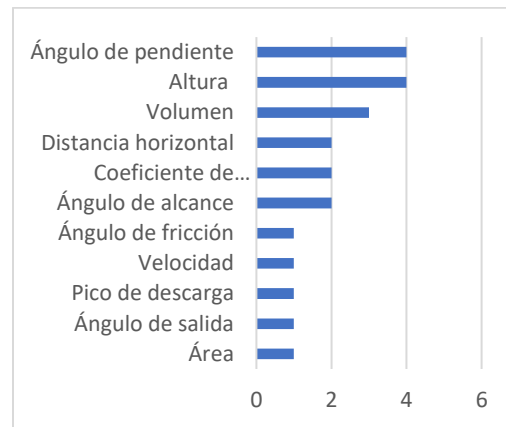


5.1.2 A nivel de zonas tropicales

Se identificaron siete documentos enfocados en sitios localizados en la zona tropical. Estos se distribuyen entre los años 1999 a 2021. Los parámetros generales más relevantes identificados por la revisión, por números de artículos en los que fueron considerados, son altura (4 estudios), ángulo de pendiente (4 estudios) y volumen de deslizamiento (3 estudios). También se identificaron, en menor medida, el coeficiente de fricción (2 estudios), el ángulo de alcance (2 estudios) y la distancia horizontal (2 estudios) (Figura 10).

Figura 10

Distribución por número de artículos de parámetros generales usados en documentos a nivel de zonas tropicales



Con respecto a los parámetros hidrológicos usados en estudios de las zonas tropicales, al igual que a nivel global, se identificó la precipitación como el parámetro más usado para determinar la longitud de viaje de los deslizamientos (5 estudios). Los demás parámetros usados en los estudios revisados incluyen la cohesión, la presión de poro, el nivel freático y la humedad (Figura 11).

Figura 11

Distribución por número de artículos de parámetros hidrológicos usados en documentos a nivel de zonas tropicales

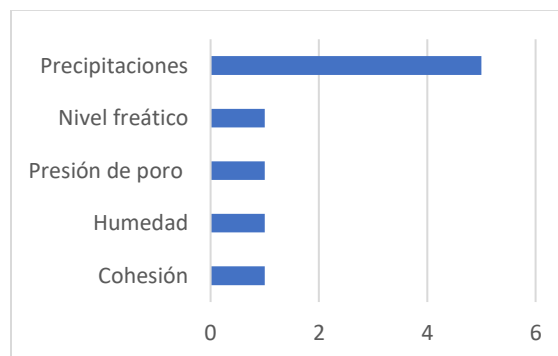
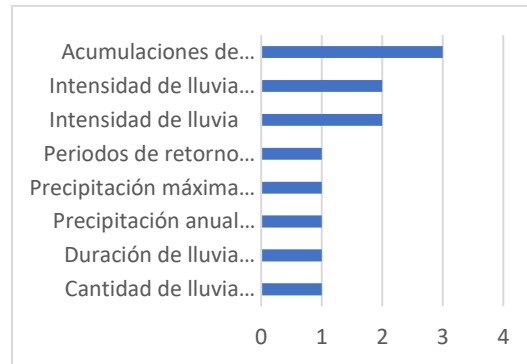


Figura 12

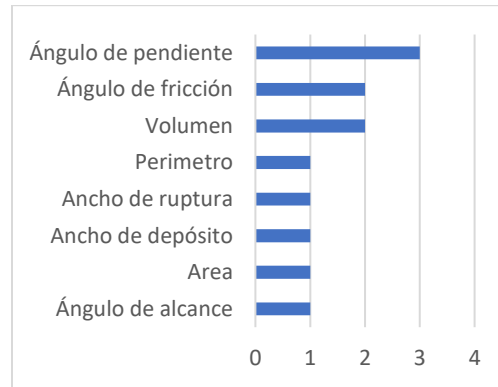
Distribución por número de artículos de parámetros de precipitación en documentos a nivel de zonas tropicales

**5.1.3 A nivel nacional (caso colombiano)**

Se identificaron únicamente cuatro documentos producidos entre los años de 2000 y 2021 para sitios en Colombia. Los parámetros generales usados en estos estudios incluyen el ángulo de pendiente, el volumen y el ángulo de fricción. También, se identificaron parámetros de tipo geométrico como el ángulo de alcance, el área, el ancho de depósito, el ángulo de ruptura y el perímetro. No se encontraron parámetros relacionados con las propiedades del suelo o con características mecánicas (Figura 13).

Figura 13

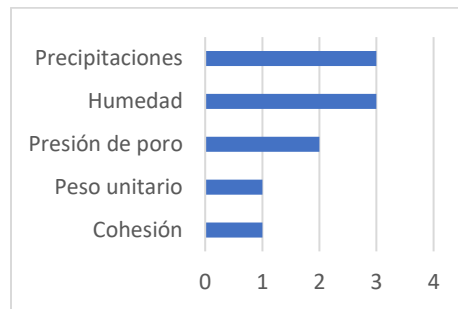
Distribución porcentual de parámetros en general en documentos a nivel nacional



Igual que a nivel mundial y de áreas tropicales, los parámetros hidrológicos más usados fueron los relacionados con las precipitaciones (3 estudios) y con la humedad del suelo (3 estudios). Luego, les sigue la presión de poro (2 estudio), la cohesión (1 estudio) y el peso unitario (1 estudio) (Figura 14). Respecto a parámetros de precipitación, 3 documentos los usaron, no obstante, se usaron varios de ellos en cada documento. A nivel general, el que más se usó, fue la intensidad de lluvia, usado en los 3 mismos documentos, seguido de la precipitación media anual, usado en 2 de los 3 estudios (Figura 15).

Figura 14

Distribución por número de artículos de parámetros hidrológicos usados en documentos en el contexto colombiano

**Figura 15**

Distribución porcentual de parámetros de precipitación en documentos en el caso colombiano



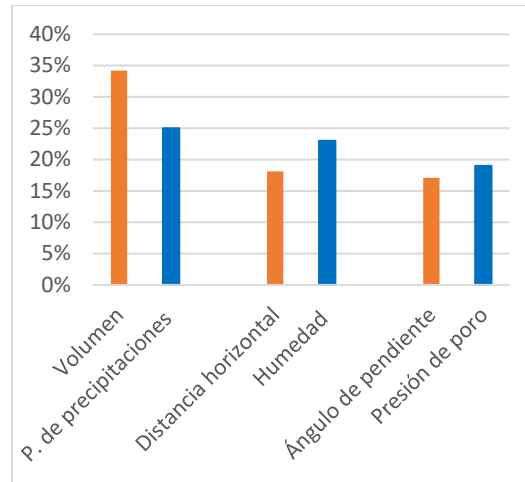
5.1.4 Comparativa entre parámetros generales hidrológicos

Al comparar la frecuencia de uso de los primeros tres parámetros generales e hidrológicos en zonas no tropicales o combinadas (Figura 16) se puede observar que el volumen es más usado que los parámetros de precipitación, dejando ver una preponderancia de los parámetros generales sobre los de precipitación. No obstante, en los segundos y terceros puestos hay una leve ventaja de aplicación de los hidrológicos sobre los generales. Para los casos de zonas tropicales o el caso

colombiano, no se realiza la comparativa pues la baja cantidad de estudios encontrados (siete y cuatro, respectivamente) no son suficientes para efectuar análisis comparativos.

Figura 16

Comparativa porcentual entre los primeros tres parámetros generales (naranja) y los primeros tres parámetros hidrológicos (azul), usados en zonas no tropicales o combinadas



5.2 Factibilidad de aplicación de metodologías en el contexto colombiano

En contextos tropicales como Hong Kong, o los del sur de China se puede decir que las instituciones que estudian los deslizamientos en estas regiones gozan de una gran cantidad de información a su disposición. Se destaca el uso prominente de imágenes satelitales y datos de lluvia, además de la gran capacidad que tienen para hacer estudios in situ (Gao et al., 2021). Por lo tanto, la mayoría de las metodologías analizadas, son aplicables en lugares como China, Hong Kong o Taiwán (Kang et al., 2018). A diferencia de China, Hong Kong o Taiwán, a Colombia, se le da mejor el uso de inventarios de deslizamientos (Moncayo, 2021), como el del SIMMA, que dispone de un catálogo de cierto tamaño, en el cual están registrados parámetros, como el volumen (Servicio Geológico Colombiano, 2021). También el contexto nacional, es susceptible al uso de

imágenes satelitales o el uso de GIS a la hora de analizar la longitud de viaje de un deslizamiento. En el aspecto hidrológico, el IDEAM proporciona los datos de precipitaciones que se puedan necesitar para un análisis usando como base el agua (Arango, 2000). No obstante, a la hora de necesitarse datos de campo, como la humedad, o presión de poro, las entidades nacionales muestran un rezago, en comparación a los países anteriormente mencionados (Grima et al., 2020). Por lo tanto, metodologías que necesiten de esos parámetros, son más costosas, o menos factibles a la hora de ser consideradas para analizar un deslizamiento, en especial, si se trata de regiones alejadas de los principales núcleos urbanos. Por lo tanto, se podría decir, que, a la hora de determinar las variables hidrológicas más relevantes para el caso del cálculo de longitudes de viaje de deslizamientos por métodos estadísticos en el marco de existencia, resolución y calidad de información del contexto colombiano, son las que están relacionadas con las precipitaciones, en sus diferentes formas, como la lluvia antecedente, la intensidad de lluvia por hora, la precipitación media anual o la precipitación extrema. Muchos de estos datos están recogidos por el IDEAM, por lo tanto, esto es un punto a favor para realizar dichos estudios en el contexto colombiano. Por esta razón, autores prolíficos en este campo como Aristizábal, basan sus estudios sobre deslizamientos en datos de precipitaciones (Aristizábal, Gamboa, et al., 2010), (Aristizábal, Martínez, et al., 2010), (Aristizábal et al., 2011), (Aristizábal et al., 2017). Mientras tanto, análisis que tengan que usar datos tomados en campo, muestran debilidades a la hora de aplicarse en el contexto colombiano, ya que se cuentan con pocos recursos para llevarlos a cabo.

Los principales parámetros generales identificados en esta revisión (en cualquier zona) tales como el volumen, el ángulo de pendiente, el ángulo de fricción, el área, las longitudes, el perímetro, y otros datos de tipo geométrico pueden ser fácilmente encontrados en los catálogos y bases de datos

ofrecidos por el SIMMA. No obstante, se debe tener en cuenta que cada una de estas fuentes de información o estudios cuentan con una metodología distinta; esto repercute en que el número de registros o ciertos parámetros específicos de cada evento pueden diferir considerablemente, o incluso la misma disponibilidad de datos pueda variar de una zona a otra, o de un evento a otro (Moncayo, 2021). Adicionalmente, una gran cantidad de parámetros generales de tipo geométrico se pueden obtener de imágenes satelitales y se pueden procesar usando GIS y otras técnicas geomáticas (Beltrán Rincón, 2019) incluso, algunos autores han llegado a hacer uso de drones para obtener parámetros generales del tipo geométrico para sus estudios (Marcos, 2019).

El SIMMA proporciona información fiable, gratuita y al alcance de cualquier interesado, previo registro, con una factibilidad de aplicación alta, cuando existe la información. El uso de imágenes de satelitales y de drones conllevan un gasto económico y de procesamiento de datos; no obstante, la mayoría de las veces, suponen una alternativa mucho más económica y rápida a obtener datos en campo.

5.3 Factibilidad de aplicación de parámetros hidrológicos en el contexto colombiano

La factibilidad de uso de parámetros hidrológicos se desarrolló de forma cualitativa con base en la disponibilidad de información en Colombia (Tabla 2). La factibilidad está categorizada en cuatro niveles: alta (los datos están explícitos en bases de datos), media alta (los datos se pueden inferir de datos explícitos en bases de datos), media baja (es posible derivarlos de información existente en bases de datos, no obstante, en la mayoría de los casos, se deben obtener en campo) y baja (los datos se deben obtener en campo y la mayoría de las veces conlleva un alto procesamiento de información). Se le dio una factibilidad más alta a los datos que se pueden obtener de bases de

datos que a los que se obtienen en campo, ya que tomar y procesar datos in situ, es más costoso y conlleva un mayor esfuerzo y trabajo, que obtenerlos de bases de datos o catálogos existentes. Se tomaron en cuenta cuatro fuentes de datos: SIMMA (datos en el inventario, catálogo y estudios del SGC), DHIME (datos hidrometeorológicos del IDEAM), in situ (aquellos datos que son tomados en campo o que para llegar a ellos es necesario tomar otros datos en campo) y derivaciones (aquellos datos que se pueden derivar de diferentes fuentes ya sean de datos procedentes de bases de datos o de trabajo de campo).

Tabla 2

Factibilidad de uso en Colombia de los parámetros hidrológicos considerados en esta revisión

Parámetros hidrológicos	Factibilidad	Fuente de datos
Cohesión	Media baja	In situ
Conductividad hidráulica	Media baja	In situ
Contenido de humedad	Alta	SIMMA
Curva característica de humedad	Baja	Derivaciones
Grado de saturación	Media alta	In situ
Nivel freático	Baja	In situ
Permeabilidad	Media alta	In situ
Parámetros de precipitaciones	Alta	DHIME
Presión de poro	Media alta	SIMMA

También se calificó la factibilidad de uso de los parámetros de precipitaciones (Tabla 3) usando la misma escala cualitativa. El IDEAM cuenta con una red hidrometeorológica robusta en los principales núcleos urbanos y económicos del país, pero su densidad y calidad se debilita en entornos rurales o alejados de zonas estratégicas. Debido a esto, al tratarse de una clasificación

cuantitativa y generalizada, es posible que la factibilidad de los parámetros hidrológicos presentados no sea la misma en todas las zonas del país con ocurrencias de deslizamientos.

Tabla 3

Factibilidad de uso en Colombia de los parámetros de precipitación considerados en esta revisión

Parámetros de precipitaciones	Factibilidad	Fuente de datos
Frecuencia	Alta	DHIME
Intensidad de lluvia	Media baja	DHIME
Periodo de retorno	Alta	DHIME
Precipitación anual promedio	Alta	DHIME
Precipitación anual total	Alta	DHIME
Precipitación extrema	Alta	DHIME
Precipitación máxima en 24 horas	Media baja	DHIME
Precipitación media mensual	Alta	DHIME
Precipitación promedio en 10 años	Alta	DHIME
Probabilidad de excedencia	Media alta	DHIME

6. Conclusiones

- Este trabajo evaluó 59 estudios a partir de un proceso de revisión bibliográfica sistemática para determinar los parámetros generales e hidrológicos usados en métodos estadísticos para la determinación de la longitud de viaje de deslizamientos.

- Se determinaron los parámetros generales e hidrológicos más relevantes en las metodologías estadísticas diferenciando entre las aplicaciones en zonas no tropicales, tropicales, y en Colombia específicamente.

- Se encontró una cantidad considerable de estudios (59 en total) a nivel global pero muy pocos en las zonas tropicales (solo 11 de 59, incluyendo los de Colombia). Entonces es difícil hacer recomendaciones sobre los parámetros más relevantes en esta zona cuando se tienen tan pocos estudios que pueden no ser representativos, en especial los de Colombia, que solo fueron 4 de 59.
- Se puede observar a lo largo del análisis de los documentos tenidos en cuenta, que la generalización de los parámetros hidrológicos y en general, para los métodos para el cálculo de longitud de viaje de deslizamientos resulta compleja debido al amplio uso de sinónimos y a la vez escritura subjetiva que dificulta la identificación en los distintos documentos.
- El parámetro general más usado fue el volumen, por lo tanto, los catálogos de deslizamientos son muy importantes de tener en cuenta a la hora de hacer un análisis. Colombia cuenta con el catálogo proporcionado por el SIMMA, haciendo que, en la mayoría de los casos, sea posible obtener el volumen de deslizamientos de relevancia acaecidos en el pasado.
- Las instituciones colombianas que quieran hacer uso de datos geométricos como la altura, la distancia horizontal o el ángulo de pendiente, que también ocuparon un lugar prominente en las metodologías analizadas, cuentan con la aproximación muy buena, y relativamente económica, de las imágenes satelitales; por lo tanto, el uso de estos parámetros generales, gozan de una buena factibilidad a la hora de ser considerados.

- El país cuenta con una red hidrometeorológica que facilita el uso de la precipitación y sus descriptores para los análisis estadísticos de longitudes de viaje de deslizamientos. Sin embargo, es necesario fortalecer esta red en densidad y calidad (alta resolución y estandarización de estaciones y mediciones) para posibilitar aún más el uso de estas estrategias satisfactoriamente. Esto es importante tanto a nivel rural como urbano y suburbano.

- A la hora de necesitarse datos de campo, como la humedad, o presión de poro, las entidades nacionales muestran mayor dificultad para obtenerlos, ya que supone un costo y esfuerzo mayor, al tratarse de análisis in situ. Esto hace que, las metodologías que hacen uso de estos parámetros hidrológicos sean menos propensas a ser usadas.

- El país muestra un rezago en comparación a otras regiones tropicales, como China, Hong Kong o Taiwán, a la hora de aplicar las diferentes metodologías para analizar la longitud de viaje de un deslizamiento, basándose en parámetros hidrológicos. Por lo tanto, se requiere de mayor inversión a las entidades que se dedican al estudio de estos eventos, lo que redundaría en una mejor comprensión de ellos, y se traduce en vidas salvadas y menores pérdidas económicas.

- Las CAR, el Servicio Geológico Colombiano y las oficinas de gestión del riesgo municipales y departamentales, deben trabajar mancomunadamente para lograr coordinar recursos y esfuerzos que permitan recolectar información de campo relevante para la implementación de modelos empíricos y determinísticos (cuando sea necesario) que permitan producir información más relevante y aplicable a programas de prevención y control de este tipo de desastres.

Referencias Bibliográficas

- Aaron, J., McDougall, S., & Nolde, N. (2019). Two methodologies to calibrate landslide runout models. *Landslides*, 16(5), 907-920. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1116-8>
- Abril, M. Á. C. (2015). *Incidencia del agua en los procesos de inestabilidad de taludes y laderas en el centro y norte de la ciudad de Guayaquil*. 222.
- Ángulo de Fricción Interna / Diccionario. (2022). <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/angulo-de-friccion-interna/>
- Arango, J. D. (2000). *Relaciones lluvias – deslizamientos y zonificación geotécnica en la Comuna dos de la ciudad de Manizales*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7037>
- Ardila, C., & Durán, J. (2011). *DISEÑO DE OBJETOS VIRTUALES PARA EL APRENDIZAJE DE SISTEMAS INMUNES ARTIFICIALES*. Universidad Industrial de Santander.
- Aristizábal, E., Gamboa, M. F., & Leoz, F. J. (2010). SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR MOVIMIENTOS EN MASA INDUCIDOS POR LLUVIA PARA EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA. (EARLY WARNING SYSTEM FOR RAINFALL-INDUCED LANDSLIDES IN THE ABURRÁ VALLEY, COLOMBIA). *Revista EIA*, 7(13), 155-169.
- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). *ANÁLISIS DE UMBRALES EMPÍRICOS DE LLUVIA PARA EL PRONÓSTICO DE MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA*. 17.
- Aristizábal, E., Martínez, H., & Velez, J. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales ISSN 0370-3908*, 34, 209-227.

- Aristizábal, E., Vélez Upegui, J. I., & Martínez Carvajal, H. E. (2017). INFLUENCIA DE LA LLUVIA ANTECEDENTE Y LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR LLUVIAS UTILIZANDO EL MODELO SHIA_LANDSLIDE. *Revista EIA*, 13(26), 31-46. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.863>
- Arrau, L. (1990). *Cálculo de Crecidas. CURSO DE INGENIERÍA DE RIEGO APUNTES DE CLASES*. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2010/1/CI61C/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D291867
- Beltrán Rincón, L. C. (2019). *ELABORACIÓN DE UN INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA MEDIANTE TÉCNICAS GEOMÁTICAS EN EL MUNICIPIO DE VILLET A CUNDINAMARCA*. 104.
- Bhandari, B. P., & Dhakal, S. (2021). A multidisciplinary approach of landslide characterization: A case of the Siwalik zone of Nepal Himalaya. *Journal of Asian Earth Sciences: X*, 5, 100061. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100061>
- Cantor, L. C., & Prieto, A. F. (2019). *Desarrollo de una metodología que permita calcular la distancia de viaje y velocidad de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite* [Pontificia Universidad Javeriana]. <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/47310>
- Cho, S. E. (2014). Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability. *Engineering Geology*, 171, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.015>
- Cohesión (suelo)—Geotecnia y Mecánica de Suelos*. (2022). <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/glosario/cohesion-suelo/>

- Copons, R., Vilaplana, J. M., & Linares, R. (2009). Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Solà d'Andorra la Vella, Central Pyrenees). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), 2107-2118. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-2107-2009>
- Coras, P. M., & Arteaga-Ramírez, R. (2005). *ANÁLISIS DE FRECUENCIAS DE LLUVIAS MÁXIMAS CON FINES DE DRENAJE SUPERFICIAL LOCAL, TABASCO, MÉXICO*. 9.
- Corominas, J. (1996). *The angle of reach as a mobility index for small and large landslides*. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t96-005>
- D'Agostino, V., Cesca, M., & Marchi, L. (2010). Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps). *Geomorphology*, 115(3-4), 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.032>
- Dai, F. C., Lee, C. F., & Wang, S. J. (2003). Characterization of rainfall-induced landslides. *International Journal of Remote Sensing*, 24(23), 4817-4834. <https://doi.org/10.1080/014311601131000082424>
- Davison, L., & Springman, S. (2000). *Pore water pressure*. <http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/water/water.htm>
- Definición del coeficiente de fricción*. (2022). <https://es.andilog.com/Definicion-coeficiente-friccion.html>
- Deusto, B. U. de. (2015). *Bibliogúas Deusto LibGidak: Índices de impacto: Cuartiles*. <https://biblioguias.biblioteca.deusto.es/c.php?g=155487&p=1114311>
- Devoli, G., De Blasio, F. V., Elverhøi, A., & Høeg, K. (2009). Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and their Run-out Distance. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(1), 23-42. <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9209-0>

- El DOI, Identificador de Objetos Digitales. (2011). *Información tecnológica*, 22(6), 1-1.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000600001>
- Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. (2021). Capítulo 2. La precipitación. En *Hidrología 1. Ciclo hidrológico*.
http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%202.pdf
- Fan, L., Lehmann, P., McArdell, B., & Or, D. (2017). Linking rainfall-induced landslides with debris flows runout patterns towards catchment scale hazard assessment. *Geomorphology*, 280, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.007>
- Fannin, R. J., & Wise, M. P. (2001). An empirical-statistical model for debris flow travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 982-994. <https://doi.org/10.1139/t01-030>
- Finlay, P. J., Mostyn, G. R., & Fell, R. (1999). *Landslide risk assessment: Prediction of travel distance*. 36, 7.
- Gao, L., Zhang, L. M., Chen, H. X., Fei, K., & Hong, Y. (2021). Topography and geology effects on travel distances of natural terrain landslides: Evidence from a large multi-temporal landslide inventory in Hong Kong. *Engineering Geology*, 292, 106266.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106266>
- García-Ruiz, R. (2017). Palabras clave. *Comunicar. Escuela de Autores*.
<https://www.revistacomunicar.com/wp/escuela-de-autores/palabras-clave/>
- Grima, N., Edwards, D., Edwards, F., Petley, D., & Fisher, B. (2020). Landslides in the Andes: Forests can provide cost-effective landslide regulation services. *Science of The Total Environment*, 745, 141128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141128>
- Guillén-Oviedo, H. S., Cid-Serrano, L. R., Alfaro-Martínez, E. J., Guillén-Oviedo, H. S., Cid-Serrano, L. R., & Alfaro-Martínez, E. J. (2020). Comparación de parámetros de valor

- extremo de la distribución generalizada asociada a eventos de precipitación extrema en América Central. *Uniciencia*, 34(1), 111-128. <https://doi.org/10.15359/ru.34-1.7>
- Guo, D., Hamada, M., He, C., Wang, Y., & Zou, Y. (2014). An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earthquake area. *Landslides*, 11(2), 281-291. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0444-y>
- Guthrie, R. H., Hockin, A., Colquhoun, L., Nagy, T., Evans, S. G., & Ayles, C. (2010). An examination of controls on debris flow mobility: Evidence from coastal British Columbia. *Geomorphology*, 114(4), 601-613. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.021>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., & Rossi, M. (2005). *RISK AWARE. RISK-Advanced Weather forecast system to Advise on Risk Events and management. Definition of critical threshold for different scenarios.*
- Hattanji, T., & Moriwaki, H. (2009). Morphometric analysis of relic landslides using detailed landslide distribution maps: Implications for forecasting travel distance of future landslides. *Geomorphology*, 103(3), 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.07.009>
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes.*
- Huang, Y., Zhang, W., Xu, Q., Xie, P., & Hao, L. (2012). Run-out analysis of flow-like landslides triggered by the Ms 8.0 2008 Wenchuan earthquake using smoothed particle hydrodynamics. *Landslides*, 9(2), 275-283. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0285-5>
- Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 610-623. <https://doi.org/10.1139/t95-063>

- Hungr, O., Corominas, J., & Eberhardt, E. (2005). Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. En *Landslide Risk Management*. CRC Press.
- 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>
- Hürlimann, M., McArdell, B. W., & Rickli, C. (2015). Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland. *Geomorphology*, 232, 20-32.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.030>
- Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., & Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology*, 102(3-4), 152-163. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.012>
- IndexMundi. (2022). *Promedio detallado de precipitaciones (mm anuales) por país*.
<https://www.indexmundi.com/es/datos/indicadores/AG.LND.PRCP.MM>
- Índice h—Universidad de Chile. (2022). <https://uchile.cl/portal/informacion-y-bibliotecas/ayudas-y-tutoriales/100617/indice-h>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2013). *Formato Común Hoja Metodológica*. http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/18-1.08_HM_Anomalia_precipitacion_3_FI.pdf/c60552b2-0808-4a1c-9c29-d34b3bb7662d
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *GEOPORTAL - IDEAM*.
<http://www.ideam.gov.co/geoportal>
- Jiménez, C. A. (2017). *Análisis de metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes* [Universidad Nacional de Colombia].
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59107>

- Kang, C., & Chan, D. (2018). A progressive entrainment runout model for debris flow analysis and its application. *Geomorphology*, 323, 25-40. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.003>
- Kang, C., Zhang, F., Pan, F., Peng, J., & Wu, W. (2018). Characteristics and dynamic runout analyses of 1983 Saleshan landslide. *Engineering Geology*, 243, 181-195. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.006>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Kokusho, T., Ishizawa, T., & Nishida, K. (2009). Travel distance of failed slopes during 2004 Chuetsu earthquake and its evaluation in terms of energy. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(7), 1159-1169. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.02.001>
- Legros, F. (2002). The mobility of long-runout landslides. *Engineering Geology*, 63(3-4), 301-331. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00090-4)
- Li, Y., Chen, W., Rezaie, F., Rahmati, O., Davoudi Moghaddam, D., Tiefenbacher, J., Panahi, M., Lee, M.-J., Kulakowski, D., Tien Bui, D., & Lee, S. (2021). Debris flows modeling using geo-environmental factors: Developing hybridized deep-learning algorithms. *Geocarto International*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1912194>
- Lin, Q., Lima, P., Steger, S., Glade, T., Jiang, T., Zhang, J., Liu, T., & Wang, Y. (2021). National-scale data-driven rainfall induced landslide susceptibility mapping for China by accounting for incomplete landslide data. *Geoscience Frontiers*, 12(6), 101248. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101248>
- Liu, X., & Wang, Y. (2021). Probabilistic simulation of entire process of rainfall-induced landslides using random finite element and material point methods with hydro-mechanical

- coupling. *Computers and Geotechnics*, 132, 103989.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103989>
- Long, J., Li, C., Liu, Y., Feng, P., & Zuo, Q. (2022). A multi-feature fusion transfer learning method for displacement prediction of rainfall reservoir-induced landslide with step-like deformation characteristics. *Engineering Geology*, 297, 106494.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106494>
- Mansour, Z., Miloud, B., Donzé, F., Soraya, R., & Abderahmane, H. (2015). Morphometric analysis of landslides in the Ouarsenis area (west Algeria): Implications for establishing a relationship between tectonic, geomorphologic, and hydraulic indexes. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 6465-6482. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1711-5>
- Marcos, C. (2019). *Utilización de drones para el estudio detallado de un deslizamiento de tierra – Sitep Ingeniería GIS*. <https://sitep.com/utilizacion-de-drones-para-el-estudio-detallado-de-un-deslizamiento-de-tierra/>
- 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>
- Mecapedia-criterio de Coulomb-Mohr.* (2022).
http://www.mecapedia.uji.es/criterio_de_Coulomb-Mohr.htm
- Medwedeff, W. G., Clark, M. K., Zekkos, D., & West, A. J. (2020). Characteristic landslide distributions: An investigation of landscape controls on landslide size. *Earth and Planetary Science Letters*, 539, 116203. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116203>
- Mélice, J.-L., & Reason, C. J. C. (2007). Return period of extreme rainfall at George, South Africa. *South African Journal of Science*, 103(11-12), 499-501.

- Mitchell, A., McDougall, S., Aaron, J., & Brideau, M.-A. (2021). Development of a universal open access rock avalanche case study database. *13th International Symposium on Landslides*, 8.
- Mitchell, A., McDougall, S., Nolde, N., Brideau, M.-A., Whittall, J., & Aaron, J. B. (2020). Rock avalanche runout prediction using stochastic analysis of a regional dataset. *Landslides*, 17(4), 777-792. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01331-3>
- Mitchell, A., Mcdougall, S., Whittall, J., Brideau, M.-A., & Mcclarty, D. (2018, junio 1). *New empirical-statistical tools for the analysis of rock avalanche runout*.
- Moncayo, C. S. (2021). *Evaluación de la distancia de viaje de movimientos en masa en Colombia a partir de registros históricos* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80825>
- Mora-Ortiz, R. S., & Rojas-González, E. (2012). Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(1), 55-68. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2012.13n1.006>
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L. (2006). LA LLUVIA Y LOS DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN ANTIOQUIA: ANÁLISIS DE SU OCURRENCIA EN LAS ESCALAS INTERANUAL, INTRAANUAL Y DIARIA. *Revista EIA Escuela de Ingeniería de Antioquia*. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n5/n5a05.pdf>
- Okura, Y., Kitahara, H., Kawanami, A., & Kurokawa, U. (2003). Topography and volume effects on travel distance of surface failure. *Engineering Geology*, 67(3-4), 243-254. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00183-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00183-7)

- Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., & Kawanami, A. (2000). The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology*, 58, 109-124. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00049-1)
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Landslides*. <https://www.who.int/westernpacific/health-topics/landslides>
- Panday, S., & Dong, J.-J. (2021). Topographical features of rainfall-triggered landslides in Mon State, Myanmar, August 2019: Spatial distribution heterogeneity and uncommon large relative heights. *Landslides*, 18(12), 3875-3889. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01758-7>
- Permeabilidad de los suelos: Concepto y determinación («in situ» y en laboratorio) - Estudios Geotécnicos*. (2013, abril 3). <https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>
- Pinillos, D. V. (2017). *Metodología para la evaluación cuantitativa de amenaza por deslizamientos en roca* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/61001>
- Qiu, H., Cui, P., Hu, S., Regmi, A. D., Wang, X., & Yang, D. (2018). Developing empirical relationships to predict loess slide travel distances: A case study on the Loess Plateau in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1299-1309. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1328-0>
- Qiu, H., Cui, P., Regmi, A. D., Hu, S., Wang, X., & Zhang, Y. (2018). The effects of slope length and slope gradient on the size distributions of loess slides: Field observations and simulations. *Geomorphology*, 300, 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.020>

- Qiu, H., Regmi, A. D., Cui, P., Cao, M., Lee, J., & Zhu, X. (2016). Size distribution of loess slides in relation to local slope height within different slope morphologies. *CATENA*, *145*, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.005>
- Quacquarelli Symonds. (2022). *QS Latin America University Rankings 2022*. Top Universities. <https://www.topuniversities.com/university-rankings/latin-american-university-rankings/2022>
- ¿Qué es la energía potencial? (2018, octubre 30). *Energya*. <https://www.energyavm.es/que-es-la-energia-potencial/>
- Redacción GeoQuantics. (2019, octubre 21). Factores que influyen en la estabilidad de taludes y laderas en suelo. *GeoQuantics*. <https://geoquantics.com/2019/10/21/factores-influyen-la-estabilidad-taludes-laderas-suelo/>
- Rickenmann, D. (1999). *Empirical Relationships for Debris Flows*. 32.
- Rickenmann, D. (2005). Runout prediction methods. En *Debris-flow Hazards and Related Phenomena* (pp. 305-324). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_13
- Sánchez, L. D. (2022). *Guías de la BUH: Evaluación de la Investigación: Índice H*. <https://guiasbuh.uhu.es/c.php?g=655120&p=4605523>
- Sandoval, S. (2021). *Estimación de velocidades y distancias de viaje de deslizamientos utilizando el método del punto material* [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79665>
- Santa-Ramírez, G., Cuevas-González, J., Leal-Villamíl, J., Muñoz-Ramos, J., Santa-Ramírez, G., Cuevas-González, J., Leal-Villamíl, J., & Muñoz-Ramos, J. (2020). Correlación de

- variables morfométricas para deslizamientos en la cuenca del río Combeima, Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, 16(31), 145-168. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.16.31.7>
- Scheidegger, A. E. (1973). *On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides*. 6.
- ScienceDirect, S. C. (2021). *How do I use the advanced search? - ScienceDirect Support Center*. https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/25974/supporthub/sciencedirect/~how-do-i-use-the-advanced-search%3F/
- Scimago Journal & Country Rank. (2022). <https://www.scimagojr.com/>
- Servicio Geológico Colombiano. (2021). *Sistema de Información de Movimientos en Masa*. SIMMA. <http://simma.sgc.gov.co/>
- Servicio Geológico Colombiano, & Universidad Nacional de Colombia. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa: Escala detallada*.
- Strand, S.-A., Thakur, V., L'Heureux, J.-S., Lacasse, S., Karlsrud, K., Nyheim, T., Aunaas, K., Ottesen, H. B., Gjelsvik, V., Fauskerud, O. A., Sandven, R., & Rosenquist af Åkershult, A. (2017). Runout of Landslides in Sensitive Clays. En V. Thakur, J.-S. L'Heureux, & A. Locat (Eds.), *Landslides in Sensitive Clays* (Vol. 46, pp. 289-300). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56487-6_26
- Strom, A., Li, L., & Lan, H. (2019). Rock avalanche mobility: Optimal characterization and the effects of confinement. *Landslides*, 16(8), 1437-1452. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01181-z>
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Suárez, J. (2012). *Deslizamientos. Tomo II: Técnicas de Remediación*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of landslides*. Geotechnical Society of America.

Tost, G. O., & Rincón, C. P. (2011). *Deslizamiento de suelos visto desde la dinámica de sistemas*. 3.

University of Leeds. (2021). *Literature searching explained*.
https://library.leeds.ac.uk/info/1404/literature_searching/14/literature_searching_explained/4

Valdivielso, A. (2020, septiembre 18). *¿Qué es el nivel freático?* [Text]. iAgua; iAgua.
<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-nivel-freatico>

von Ruetze, J., Lehmann, P., & Or, D. (2016). Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances. *Landslides*, 13(5), 1097-1107.
<https://doi.org/10.1007/s10346-015-0621-2>

Wang, L., Wang, N., & Wang, Q. (2016). Prediction of sliding distance of seismic landslides in Loess Plateau, China. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(32), 1177-1182. <https://doi.org/10.3208/jgssp.ATC1-3-13>

Wegner, K., Haas, F., Heckmann, T., Mangeney, A., Durand, V., Villeneuve, N., Kowalski, P., Peltier, A., & Becht, M. (2021). Assessing the effect of lithological setting, block characteristics and slope topography on the runout length of rockfalls in the Alps and on the island of La Réunion. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3), 1159-1177.
<https://doi.org/10.5194/nhess-21-1159-2021>

- Werner, E. D., & Friedman, H. P. (2009). *Landslides: Causes, Types and Effects: Causes, Types and Effects*. Nova Science Publishers, Incorporated.
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/detail.action?docID=3017974>
- 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>
- World Meteorological Organization, & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2012). *International Glossary of Hydrology*.
- Xu, Q., Li, H., He, Y., Liu, F., & Peng, D. (2019). Comparison of data-driven models of loess landslide runout distance estimation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), 1281-1294. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1176-3>
- 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>
- Zhang, Z., Zeng, R., Meng, X., Zhao, S., Meng, X., Yao, Y., Wang, H., Guo, W., Chen, G., & Zhang, Y. (2021). Estimating landslide sliding distance based on an improved Heim sled model. *CATENA*, 204, 105401. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105401>
- Zotero | Your personal research assistant. (s. f.). Recuperado 21 de julio de 2022, de <https://www.zotero.org/>
- 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(21), 723.
<https://doi.org/10.1007/s12665-017-7075-x>

Apéndices

Apéndice A. Documentos usados en esta revisión

A nivel de zonas tropicales o combinadas (48 documentos):

1. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches (Hungar, 1995)
2. A multidisciplinary approach of landslide characterization: A case of the Siwalik zone of Nepal Himalaya (Bhandari & Dhakal, 2021)
3. A multi-feature fusion transfer learning method for displacement prediction of rainfall reservoir-induced landslide with step-like deformation characteristics (Long et al., 2022)
4. A multi-feature fusion transfer learning method for displacement prediction of rainfall reservoir-induced landslide with step-like deformation characteristics (Long et al., 2022)
5. An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earthquake area (Guo et al., 2014)
6. An empirical–statistical model for debris flow travel distance (Fannin & Wise, 2001)
7. An examination of controls on debris flow mobility: Evidence from coastal British Columbia (Guthrie et al., 2010)

8. Assessing the effect of lithological setting, block characteristics and slope topography on the runout length of rockfalls in the Alps and on the island of La Réunion (Wegner et al., 2021)
9. Characteristic landslide distributions: An investigation of landscape controls on landslide size (Medwedeff et al., 2020)
10. Comparison of data-driven models of loess landslide runout distance estimation (Xu et al., 2019)
11. Debris flows modeling using geo-environmental factors: developing hybridized deep-learning algorithms (Li et al., 2021)
12. Developing empirical relationships to predict loess slide travel distances: a case study on the Loess Plateau in China (Qiu, Cui, Hu, et al., 2018)
13. Development of a universal open access rock avalanche case study database (Mitchell et al., 2021)
14. Empirical prediction for travel distance of channelized rock avalanches in the Wenchuan earthquake area (Zhan et al., 2017)
15. Empirical Relationships for Debris Flows (Rickenmann, 1999)
16. Estimating landslide sliding distance based on an improved Heim sled model (Zhang et al., 2021)
17. Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment (Hürlimann et al., 2008)
18. Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland (Hürlimann et al., 2015)

19. Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps) (D'Agostino et al., 2010)
20. Linking rainfall-induced landslides with debris flows runout patterns towards catchment scale hazard assessment (Fan et al., 2017)
21. Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances (von Ruetten et al., 2016)
22. Morphometric analysis of landslides in the Ouarsenis area (west Algeria): implications for establishing a relationship between tectonic, geomorphologic, and hydraulic indexes (Mansour et al., 2015)
23. Morphometric analysis of relic landslides using detailed landslide distribution maps: Implications for forecasting travel distance of future landslides (Hattanji & Moriwaki, 2009)
24. National-scale data-driven rainfall induced landslide susceptibility mapping for China by accounting for incomplete landslide data (Lin et al., 2021)
25. New empirical-statistical tools for the analysis of rock avalanche runout (Mitchell et al., 2018)
26. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides (Scheidegger, 1973)
27. Prediction of landslide runout based on influencing factor analysis (Zou et al., 2017)
28. Prediction of sliding distance of seismic landslides in Loess Plateau, China (Wang et al., 2016)
29. Probabilistic simulation of entire process of rainfall-induced landslides using random finite element and material point methods with hydro-mechanical coupling (Liu & Wang, 2021)

30. Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability (Cho, 2014)
31. Rock avalanche mobility: optimal characterization and the effects of confinement (Strom et al., 2019)
32. Rock avalanche runout prediction using stochastic analysis of a regional dataset (Mitchell et al., 2020)
33. Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Sola' d'Andorra la Vella, Central Pyrenees) (Copons et al., 2009)
34. Runout analysis and mobility observations for large open pit slope failures (Whittall et al., 2017)
35. Run-out analysis of flow-like landslides triggered by the Ms 8.0 2008 Wenchuan earthquake using smoothed particle hydrodynamics (Huang et al., 2012)
36. Runout of Landslides in Sensitive Clays (Strand et al., 2017)
37. Runout prediction methods (Rickenmann, 2005)
38. Size distribution of loess slides in relation to local slope height within different slope morphologies (Qiu et al., 2016)
39. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog (Kirschbaum et al., 2015)
40. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides (Corominas, 1996)
41. The effects of rockfall volume on runout distance (Okura et al., 2000)
42. The effects of slope length and slope gradient on the size distributions of loess slides: Field observations and simulations (Qiu, Cui, Regmi, et al., 2018)
43. The mobility of long-runout landslides (Legros, 2002)

44. The prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides (Scheidegger, 1973)
45. Topography and volume effects on travel distance of surface failure (Okura et al., 2003)
46. Travel distance angle for "rapid" landslides in constructed and natural soil slopes (Hunter & Fell, 2003)
47. Travel distance of failed slopes during 2004 Chuetsu earthquake and its evaluation in terms of energy (Kokusho et al., 2009)
48. Two methodologies to calibrate landslide runout models (Aaron et al., 2019)

A nivel tropical (7 documentos):

1. A progressive entrainment runout model for debris flow analysis and its application (Kang & Chan, 2018)
2. Characterization of rainfall-induced landslides (Dai et al., 2003)
3. Landslide risk assessment: prediction of travel distance (Finlay et al., 1999)
4. Landslide risk assessment; prediction of travel distance (Finlay et al., 1999)
5. Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and their Run-out Distance (Devoli et al., 2009)
6. Topographical features of rainfall-triggered landslides in Mon State, Myanmar, August 2019: spatial distribution heterogeneity and uncommon large relative heights (Panday & Dong, 2021)

7. Topography and geology effects on travel distances of natural terrain landslides: Evidence from a large multi-temporal landslide inventory in Hong Kong (Gao et al., 2021)

A nivel nacional (4 documentos):

1. Correlación de variables morfométricas para deslizamientos en la cuenca del río Combeima, Colombia (Santa-Ramírez et al., 2020)

2. Evaluación de la distancia de viaje de movimientos en masa en Colombia a partir de registros históricos (Moncayo, 2021)

3. Landslides in the Andes: Forests can provide cost-effective landslide regulation services (Grima et al., 2020)

4. Relaciones lluvias – deslizamientos y zonificación geotécnica en la Comuna Dos de la ciudad de Manizales (Arango, 2000)

Apéndice B. Tabla detallada de los documentos usados en esta revisión

En la siguiente página se encuentra una tabla, dividida por las tres regiones geográficas consideradas, con todos los parámetros de búsqueda y selección de los documentos usados en esta revisión, de acuerdo con la metodología presentada.

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
1995	Artículo de revista académica	Q1	118	968	Hungr	A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches	Canadian Geotechnical Journal	National Research Council of Canada	Modelo basado en una solución lagrangiana de ecuación de movimiento, permite analizar una gran variedad de reologías, que pueden variar a lo largo de la trayectoria del deslizamiento. Los efectos del confinamiento lateral son tenidos en cuenta de forma simplificada. El principal inconveniente del modelo propuesto es que reduce un problema tridimensional complejo, a uno unidimensional simple, por lo tanto, no se espera una precisión perfecta.	https://doi.org/10.1139/t95-063	Landslides, dynamic analysis, runout prediction, debris flows, debris avalanches, flow slides	Flujos, flujos de detritos y avalanchas.	Mundial	Empírico	Algoritmo	Confinamiento, altura, velocidad, longitud	Humedad, permeabilidad
1996	Artículo de revista académica	Q1	118	649	Corominas	The angle of reach as a mobility index for small and large landslides	Canadian Geotechnical Journal	National Research Council of Canada	Datos de 204 deslizamientos. Se analiza la influencia del ángulo de deslizamiento de tierra en la movilidad de deslizamientos grandes y pequeños. Se demuestra que, sin importar el tamaño, todos los tipos de deslizamientos experimentarán una reducción continua del ángulo de alcance, a medida que aumenta el volumen. Se concluye que la longitud de viaje está influida por dicho ángulo, en vez de depender de la altura de la caída.	https://doi.org/10.1139/t96-005	Mass wasting, landslides, reach angle, runout distance, rock avalanches, shallow landslides	Lluvia	España	Estadístico	Logarítmica	Ángulo de alcance, coeficiente de fricción, volumen, distancia horizontal	N/D
2002	Artículo de revista académica	Q1	136	547	Legros	The mobility of long-runout landslides	Engineering Geology	Elsevier	La correlación negativa observada entre el coeficiente de rozamiento aparente y el volumen se debe precisamente a que, en las pendientes suaves por las que se desplazan y se detienen los deslizamientos, hay un gran aumento de la distancia de viaje debido a un gran volumen corresponde a un pequeño aumento en la altura total de caída, por lo tanto, a una disminución en el coeficiente de fricción aparente. Se propone que la relación H/L tiene poco sentido, ya que la propagación de un deslizamiento puede estar controlada por su propio volumen, y no por la altura de la caída inicial. El agua puede jugar un papel preponderante a la hora de mover flujo de detritos.	https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00090-4	Landslide, Debris flow, Granular flow, Pore pressure	Agua	Mundial	Estadístico	Lineal	Coeficiente de fricción aparente, Presión intersticial de agua, relaciones entre volumen, área, distancia de viaje y altura de caída.	Presión intersticial de agua.
1973	Artículo de revista académica	Q1	91	460	Scheidegger	On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides	Rock Mechanics and Rock Engineering	Springer-Verlag Wien	Análisis de los datos de 33 deslizamientos de tierra rápidos y catastróficos, tomados de la literatura. Se muestra que existe una correlación entre el logaritmo del volumen de dichos deslizamientos de tierra y el logaritmo del coeficiente de fricción que gobierna su curso. obteniéndose de esa forma, un coeficiente de correlación de 0,82, que se puede usar para predecir la distancia y la velocidad de un deslizamiento, si el volumen se pudiera estimar de antemano.	https://doi.org/10.1007/BF01301796	Civil Engineer, Volume Versus, Catastrophic Landslide, Eine Analyse	Desprendimientos de rocas	Mundial	Estadístico	Lineal	Volumen, coeficiente de fricción, pendiente	No resultan evidentes en la investigación y datos reportados como principales

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
1973	Artículo de revista académica	Q1	91	455	Scheidegger	On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides	Rock Mechanics and Rock Engineering	Springer-Verlag Wien	Usa datos de deslizamientos recolectados de la literatura. El análisis hecho arroja que existe una correlación entre el logaritmo del volumen de tales deslizamientos y el logaritmo del coeficiente de fricción que lo gobierna. El coeficiente de correlación es de 0,82. Esta correlación puede usarse para predecir la longitud de viaje y la velocidad de un deslizamiento.	https://doi.org/10.1007/BF01301796	N/D	Diversas causas	Mundial	Estadístico	Lineal	Volumen, velocidad	N/D
1999	Artículo de revista académica	Q1	105	451	Rickenmann	Empirical Relationships for Debris Flows	Natural Hazards	Springer Netherlands	Se ofrece un modelo general de las relaciones empíricas que se pueden usar para estimar los parámetros más importantes del comportamiento del flujo de escombros, como la evaluación de un volumen máximo de flujo, estimaciones de la descarga máxima, la velocidad media del flujo y la distancia total del recorrido. Para ello, usa métodos semicuantitativos. Se proponen algunas ecuaciones empíricas para analizar los parámetros anteriormente mencionados.	https://doi.org/10.1023/A:1008064220727	Debris-flow volume, peak discharge, flow velocity, travel distance, runout distance, hazard assessment, torrent, debris flow	Flujo de detritos	Mundial	Empírico	Exponencial	Ángulo de pendiente, grado de saturación. Volumen de agua de flujo de escombros, volumen de agua de flujo de saturación, viscosidad.	Grado de saturación. Volumen de agua de flujo de escombros, volumen de agua de flujo de saturación, viscosidad.
2001	Artículo de revista académica	Q1	118	189	Fannin y Wise	An empirical-statistical model for debris flow travel distance	Canadian Geotechnical Journal	National Research Council of Canada	Se presenta una metodología empírica para analizar la longitud de viaje de los flujos de detritos. La morfología de ladera se utilizó para asignar tres tipos de comportamiento de flujo: flujo no confinado, confinado y de transición. Se halló que el comportamiento del flujo y el ángulo de la pendiente, determinan la ocurrencia de arrastre y deposición.	https://doi.org/10.139/t01-030	slope stability, debris flow, travel distance, runout, risk, clear-cut.	Flujo de detritos	Columbia Británica, Canadá	Estadístico	Logarítmica	Volumen, longitud, pendiente, ancho de deposito	Humedad
2015	Artículo de revista académica	Q1	159	157	Kirschbaum et. al.	Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog	Geomorphology	Elsevier	Un catálogo de 5741 deslizamientos, del periodo comprendido entre 22007 a 2013, en Asia, América del Norte y el Sudeste Asiático	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016	Landslide catalog, TRMM, Extreme precipitation, Global analysis, Remote sensing	Lluvia	Mundial	Estadístico	N/D	Volumen, pendiente.	Precipitación extrema, recurrencia promedio, Grado de saturación, lluvia máxima diaria
2012	Artículo de revista académica	Q1	80	146	Huang et al.	Run-out analysis of flow-like landslides triggered by the Ms 8.0 Wenchuan earthquake using smoothed particle hydrodynamic s	Landslides	Springer Verlag	Uso de hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH, por sus siglas en inglés) para deslizamientos con características de fluidización, provocados por un terremoto de magnitud 8,0 acaecido en 2008. Este modelado numérico, usando la combinación de un modelo de flujo de Bingham y ecuaciones de Navier-Stokes, todo en el marco de la dinámica de fluidos computacional, proporciona una valiosa herramienta para caracterizar la dinámica de este tipo de deslizamientos	https://doi.org/10.1007/s10346-011-0285-5	Run-out analysis, Flow-like landslides, Smoothedparticle hydrodynamics, Hazard assessment, Wenchuan earthquake	Terremoto	Sichuan, centro sur de China	Simulacion es	Algoritmo	Ángulo de fricción	de Viscosidad, cohesión,

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2008	Artículo de revista académica	Q1	136	101	Hürlimann et al.	Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment	Engineering Geology	Elsevier	Revisa las técnicas empíricas, analíticas, de enrutamiento de flujo simple y numéricas. En el artículo se presentan diversos factores y metodologías analizadas para caracterizar parámetros que afectan la longitud de viaje. Las relaciones empíricas representan otro método para estimar la distancia de descentramiento total. Las relaciones empíricas contienen una incertidumbre importante, en relación a los numéricos y analíticos. Se halló que los coeficientes de fricción "basales" influyen en la velocidad de flujo.	https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.012	Debris flow, Runout Hazard assessment Parameters	Flujo de detritos	Pirineos Orientales, España	Empírico	Exponencial	Altitud, longitud, ángulo de pendiente, velocidad	Periodos de retorno de precipitaciones, precipitación acumulada diaria
2014	Artículo de revista académica	Q1	136	100	Cho	Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability	Engineering Geology	Elsevier	En este estudio, se realizó un análisis de estabilidad probabilística para un talud de suelo residual erosionado con un lecho rocoso impermeable poco profundo para estudiar el mecanismo de falla de los deslizamientos de tierra relacionados con la lluvia.	https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.12.015	Rainfall infiltration, Monte Carlo simulation, Probability, Random field, Infinite slope, Hydraulic conductivity	Lluvia	Corea del Sur	Probabilístico	Logarítmica	Criterio de falla de Mohr-Coulomb	Conductividad hidráulica, grado de saturación
2010	Artículo de revista académica	Q1	159	85	D'Agostino et. al.	Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps)	Geomorphology	Elsevier	Se basa en datos de 6 flujos de escombros que se desencadenaron el 5 de julio de 2006 por intensas lluvias en las Dolomitas. Se usó un análisis de regresión múltiple para evaluar la longitud de viaje, en función, tanto de la energía potencial de la masa, como de la concentración de sedimentos del flujo. Se compararon los resultados con pruebas de laboratorio, observándose que, una fórmula de desviación basada en la energía podría predecir las longitudes de viaje en los flujos de escombros de las Dolomitas.	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.032	Alluvial fan, Debris flow, Runout distance, Laboratory flume Alp	Lluvia	Italia	Estadístico	Exponencial	Granulometría, ángulo de fricción, altura, pendiente, área, longitud, volumen	Grado de saturación, humedad, presión de poro, intensidad de lluvia
2005	Capítulo de un libro	N/D	N/D	72	Rickenmann	Runout prediction methods	Debris flow Hazards and Related Phenomena	Springer Praxis Books	Es recomendable que los métodos empíricos solo se apliquen con fines predictivos a condiciones similares a aquellas en las que se basa su desarrollo. La topografía y el volumen del movimiento en masa controla longitud de viaje y la desviación en un grado considerable.	https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_13	Prediction method, runout prediction	Diferentes tipos, especialmente, flujo de detritos	Canadá, Colombia, Estados Unidos, Japón y Suiza	Empírico	Logarítmica	Ángulo de la pendiente, Volumen, coeficiente de fricción	Concentración de agua, presión de poro
2015	Artículo de revista académica	Q1	159	55	Hürlimann et. al.	Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland	Geomorphology	Elsevier	Un análisis de la longitud de viaje de 117 flujos de detritos. Se mostró que normalmente viajaban algunas decenas de metros, pero a veces la distancia excedía los 300 metros. Se observó una relación positiva entre el volumen y la distancia, y entre el volumen y el área afectada, aunque existe una dispersión considerable en los datos.	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.030	Hillslope debris flow, Runout distance, Landslide inventory, Laboratory experiment, Switzerland	Lluvia	Suiza	Estadístico	Exponencial	Grado de saturación, contenido de arcilla, distribución del tamaño de grano del terreno, volumen de deslizamiento	Grado de saturación, humedad,

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2010	Artículo de revista académica	Q1	159	50	Guthrie et al.	An examination of controls on debris flow mobility: Evidence from coastal British Columbia	Geomorphology	Elsevier	Datos de 1700 observaciones de campo complementadas con la interpretación de fotografías aéreas, complementados con los datos de 331 flujos de detritos. Se examinó el papel de la pendiente en la deposición y la socavación y se evidenció que ocurren en pendientes más empinadas y planas. También se observó que más del 75% de estos flujos que se detuvieron tenían ángulos de más de 45 grados, jugando un papel fundamental en la longitud de viaje. La presencia de árboles detuvo o ralentizaron dichos flujos muy significativamente.	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.021	Debris flow, Runout, Landslide mobility, Entrainment, Erosion, Landslide travel distance	Lluvia	Columbia Británica, Canadá	Estadístico	Exponencial	Volumen, pendiente, ángulo de fricción	N/D
2003	Artículo de revista académica	Q1	136	42	Okura et al.	Topography and volume effects on travel distance of surface failure	Engineering Geology	Elsevier	Los autores investigaron los factores que afectan la distancia de recorrido de una falla superficial y desarrollaron un modelo simple para estimar la distancia en función de las propiedades del suelo y el factor topográfico. Los análisis no mostraron una relación clara entre el volumen del deslizamiento y el coeficiente de fricción equivalente.	https://doi.org/10.1016/S0167-7952(02)00183-7	Landslips Friction lines Travel distances Fluidization Topography Landslide volume	Diversas causas	Fukushima, Japón	Empírico	Trigonométrica	Presión intersticial de agua, inclinación de pendiente y fricción interna.	Presión intersticial de agua, precipitación anual, intensidad de lluvia
2003	Artículo de revista académica	Q1	136	42	Okura et al.	Topography and volume effects on travel distance of surface failure	Engineering Geology	Elsevier	Los autores investigaron los factores que afectan la distancia de recorrido de una falla superficial y desarrollaron un modelo simple para estimar la distancia en función de las propiedades del suelo y el factor topográfico. Se realizó estudios de campo y varias pruebas de suelo para una serie de fallas en la superficie que ocurrieron durante las lluvias torrenciales.	https://doi.org/10.1016/S0167-7952(02)00183-7	Landslips, Friction lines, Travel distances, Fluidization, Topography, Landslide volume	Lluvia	Fukushima, centro de Japón	Empírico	Trigonométrica	Volumen de deslizamiento, inclinación de pendiente, fricción interna.	Presión de agua de poros, precipitación acumulada, coeficiente de permeabilidad
2009	Artículo de revista académica	Q1	99	40	Copons et al.	Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Sola` d'Andorra la Vella, Central Pyrenees)	Natural Hazards and Earth System Sciences	European Geosciences Union	Datos de 20 pequeños desprendimientos (menores a 100 metros cúbicos) en un talud de Andorra. En el documento se muestra el análisis de la longitud de viaje aplicada a la caída de rocas usando modelos empíricos. Se ha propuesto un método basado en el concepto de "probabilidad de alcance". Se da la evidencia de que el momento horizontal de la energía cinética adquirida en el primer movimiento del desprendimiento puede influir en la longitud de viaje.	https://doi.org/10.5194/nhess-9-2107-2009	N/D	Caída de rocas	de Andorra	Empírico	Lineal	Topografía, longitud vertical, longitud horizontal, ángulo de fricción	N/D
2018	Artículo de revista académica	Q1	159	37	Qiu et al.	The effects of slope length and slope gradient on the size distributions of loess slides: Field observations and simulations	Geomorphology	Elsevier	Datos de 275 deslizamientos de loess. Tanto las observaciones de campo como el análisis de estabilidad de taludes demuestran que el tamaño del deslizamiento de loess aumenta con la longitud del talud. El gradiente de la pendiente no está relacionado con el tamaño del deslizamiento de loess.	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.020	Loess slides, Size distribution, Simulations Rollover	Depósitos sedimentarios eólicos (loess)	Zhidan, Meseta de Loess, centro norte de China	Estadístico	Exponencial	Volumen, longitud, área, ángulo de pendiente	Precipitación anual promedio

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2017	Artículo de revista académica	Q1	159	34	Fan et. al.	Linking rainfall-induced landslides with debris flows runout patterns towards catchment scale hazard assessment	Geomorphology	Elsevier	Datos de 35 deslizamientos, producidos en un mismo evento de lluvia, en los Alpes Suizos. Los resultados indican que las distancias de viaje pronosticadas por el modelo Perla concuerdan razonablemente con las mediciones del inventario y con los otros modelos. El estudio enfatiza el vínculo entre el desencadenamiento de deslizamientos y la escorrentía a escala de cuenca.	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.007	Landslide triggering, Debris flow, Runout distance, Hazard assessment	Lluvia	Suiza	Estadístico	Algoritmo	Grado de saturación, viscosidad del flujo, Volumen del deslizamiento	Grado de saturación, viscosidad del flujo, intensidad de lluvia, intensidad de lluvia por hora
2014	Artículo de revista académica	Q1	80	33	Guo et al.	An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earthquake area	Landslides	Springer Verlag	Datos de 54 deslizamientos de tierra, con una distancia de viaje de 347 a 4170 metros, provocados en el terremoto de Wenchuan de 2008. Se halló que el tipo de roca, el volumen de la fuente de deslizamiento y el ángulo de transición de la pendiente fueron los factores predominantes en la influencia sobre la distancia de viaje del deslizamiento.	https://doi.org/10.1007/s10346-013-0444-y	Landslide, travel distance prediction, statistical analysis, influential factors, Wenchuan earthquake	Terremoto	China	Empírico	Logarítmica	Volumen y área del deslizamiento, ángulo de fricción	Humedad
2017	Artículo de revista académica	Q1	105	28	Xu et al.	Comparison of data-driven models of loess landslide runout distance estimation	Natural Hazards	Springer Netherlands	Modelo basado en datos para pronosticar la distancia de desviación del deslizamiento de tierra utilizando características geométricas del deslizamiento de tierra, ocurridos en el centro de China. El ángulo de la pendiente tiene una gran relevancia en la longitud de viaje. Se halló que los parámetros geomorfológicos de los deslizamientos, como el volumen, la caída vertical y el ancho, están altamente correlacionados con las longitudes de viaje de movimientos de remoción en masa poco profundos.	https://doi.org/10.1007/s10064-017-1176-3	Data-mining, Predictive modeling, Field investigation, Distribution fitting, Value-at-risk, Tail-value-at-risk	Lluvia y actividades humanas	Centro de China	Estadístico	Algoritmo	Ángulo de pendiente, Para los desprendimientos poco profundos, el volumen, la longitud, la anchura, el espesor del depósito, la diferencia vertical, el ángulo de inclinación y el espesor de la capa de loess del desprendimiento se consideran vitales	N/D
2003	Artículo de revista académica	Q1	118	23	Hunter y Fell	Travel distance angle for "rapid" landslides in constructed and natural soil slopes	Canadian Geotechnical Journal	National Research Council of Canada	Este documento presenta métodos para la predicción de la distancia de viaje posterior a la falla para deslizamientos de tierra "rápidos" desde taludes de corte y relleno construidos y taludes de suelo natural derivados de una base de datos de unos 350 deslizamientos de tierra "rápidos" en taludes. Puede ser posible obtener una estimación aproximada H/L a partir de correlaciones de volumen, pero se recomienda ser cuidadoso, ya que esta estimación conlleva incertidumbre.	https://doi.org/10.1139/t03-061	Rapid landslide, flow slide, debris slide, travel distance angle, failure mechanism	Agua	Mundial	Empírico	Trigonométrica	Tipo de pendiente, volumen de deslizamiento, geometría de la pendiente en y debajo del área de origen del deslizamiento, y el grado de confinamiento de la ruta de desplazamiento del deslizamiento.	Presión intersticial de agua.

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2016	Artículo de revista académica	Q1	128	23	Qiu et al.	Size distribution of loess slides in relation to local slope height within different slope morphologies	Catena	Elsevier	Datos de 155 deslizamientos de loess. Se relacionó empíricamente, tanto el volumen del deslizamiento, como el área, en el marco de diferentes morfologías de pendiente. El tamaño del deslizamiento se incrementó, a medida que aumentaba la altura del talud, lo que puede indicar que la altura del talud puede limitar el tamaño del deslizamiento de loess y su extensión.	https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.005	Landslide, Size distribution, Local slope height, Slope morphology, Loess	Depósitos sedimentarios eólicos (loess)	Meseta de Loess, centro norte de China	Estadístico	Exponencial	Altura, volumen, área, confinamiento	Precipitaciones, presión de poro, humedad
2009	Artículo de revista académica	Q1	159	22	Hattanji y Moriwaki	Morphometric analysis of relic landslides using detailed landslide distribution maps: Implications for forecasting travel distance of future landslides	Geomorphology	Elsevier	Datos de 338 deslizamientos de tierra que se evaluaron en función de la relación H / L, es decir, el coeficiente de fricción equivalente. La relación H / L se correlaciona fuertemente con la pendiente inicial. Se concluye que el análisis morfométrico, de deslizamientos en un área determinada, nos permite predecir la posible longitud de viaje de una masa inestable en esa misma área.	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.07.009	Landslide map Morphometric analysis Mobility Travel distance Equivalent coefficient of friction	Lluvia	Japón	Estadístico	Trigonométrica	Coefficiente de fricción, ratios de longitud y altura, y parámetros relacionados al área.	Precipitación anual total (mm year-1)
2019	Artículo de revista académica	Q1	80	21	Aaron et al.	Two methodologies to calibrate landslide runout models	Landslides	Springer Verlag	Se necesitan métodos de calibración objetivos y repetibles para que este enfoque sea útil para la predicción del descentramiento de deslizamientos. El presente análisis describe la aplicación de la teoría de la optimización y la estadística bayesiana para calibrar este tipo de modelos.	https://doi.org/10.1007/s10346-018-1116-8	Runout modeling, flow-like landslides, hazard mapping, rock avalanche, lowslide	Flujo	Washing ton y Colorado, Estados Unidos	Estadístico	Algoritmo	Área, volumen, ancho, velocidad	Presión de poro, precipitación mensual promedio
2017	Artículo de revista académica	Q1	99	20	Zhan et al.	Empirical prediction for travel distance of channelized rock avalanches in the Wenchuan earthquake area	Natural Hazards and Earth System Sciences	European Geosciences Union	Estudio de 38 avalanchas de roca canalizadas, cuya ruta de viaje puede estar limitada por canales. Se evalúa la influencia de diferentes factores en la distancia de viaje y desarrolla modelos de predicción de las avalanchas de rocas canalizadas utilizando el método de regresión multivariado. Los resultados sugirieron que el movimiento de la avalancha de roca canalizada estuvo dominado por el volumen del deslizamiento, el relieve total y la pendiente del canal.	https://doi.org/10.5194/nhes-s-17-833-2017	ND	Terremoto y lluvias	Sichuan, centro sur de China	Estadístico	Exponencial y trigonométrica	Área, volumen, altura, ángulo de pendiente	Humedad
2016	Artículo de revista académica	Q1	118	19	Whittall et al.	Runout analysis and mobility observations for large open pit slope failures	Canadian Geotechnical Journal	National Research Council of Canada	Estudio con una base de datos de 105 deslizamientos. En un entorno tan controlado, la movilidad de los deslizamientos de tierra tiene una fuerte sensibilidad al ángulo de la pendiente, las propiedades del material y la altura de caída, y solo es moderadamente sensible al volumen. Las relaciones entre el ángulo de Fahrböschung y el volumen y el ángulo de Fahrböschung y el ángulo de la pendiente proporcionan estimaciones de desviación razonables.	https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0255	Open pit slope failure, rock slope stability, runout analysis, exclusion zones, landslide mobility	Mina a cielo abierto	Mundial	Estadístico	Trigonométrica	Volumen, ángulo de pendiente, energía potencial	presión de poro, de cohesión

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2019	Artículo de revista académica	Q1	80	15	Strom et al.	Rock avalanche mobility: optimal characterization and the effects of confinement	Landslides	Springer Verlag	Estudio con una base de datos de más de 600 deslizamientos. Dividiéndolas en tres categorías de confinamiento: frontalmente, lateralmente y no confinado. Presenta una caracterización cuantitativa de la movilidad de las avalanchas de rocas y su dependencia de los parámetros de control, como el volumen y la caída de altura.	https://doi.org/10.1007/s10346-019-01181-z	Rockslide, rock avalanche, mobility, confinement	Desprendimiento de rocas	Asia Central	Estadístico	Logarítmica	Altura, volumen, distancia, área, confinamiento	Humedad
2016	Artículo de revista académica	Q1	80	14	Von Ruetten et al.	Linking rainfall-induced landslides with predictions of debris flow runout distances	Landslides	Springer Verlag	Se usó un inventario de 34 deslizamientos en los Alpes Suizos, inducidos por lluvias. Para estimar la longitud de viaje usando métodos empíricos, se usó una función empírica del volumen inicial del flujo, propuesta por Corominas.	https://doi.org/10.1007/s10346-015-0621-2	Rainfall induced landslide, Debris flow, Landslide triggering, Runout distance	Lluvia	Suiza	Estadístico	Lineal	Diferencia de altura, ángulo de alcance crítico, volumen, masa, coeficiente de arrastre, ángulo de fricción	Contenido de agua saturada, porosidad, conductividad hidráulica saturada, curva característica suelo-agua, succión matricial, acumulaciones de lluvia diarias o de varios días, intensidad de lluvia
2020	Artículo de revista académica	Q1	248	13	Medwedeff et al.	Characteristic landslide distributions: An investigation of landscape controls on landslide size	Earth and Planetary Science Letters	Elsevier	Aproximación del tamaño de deslizamientos con aproximación log normal. El estudio compara datos obtenidos por simulaciones con datos empíricos estadísticos. Correlaciona la fuerza cohesiva con el relieve de la ladera. El tamaño de un deslizamiento depende de las dimensiones de las laderas del paisaje y del evento de forzamiento.	https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116203	Landslides, power-law, frequency-size scaling, hillslope relief, lognormal, scale invariant	Diversas causas	Mundial	Estadístico	N/D	Volumen, ángulo de pendiente, ángulo de fricción	Cohesión
2009	Artículo de revista académica	Q1	97	12	Kokusho	Travel distance of failed slopes during 2004 Chuetsu earthquake and its evaluation in terms of energy	Soil Dynamics and Earthquake Engineering	Elsevier	La distancia de viaje se vuelve más larga a medida que la pendiente se vuelve más suave y la masa de suelo derrumbada se hace más grande. Se modifica un enfoque basado en la energía, propuesto en investigaciones anteriores para evaluar la distancia de recorrido de taludes fallidos, agregando los resultados de la prueba del modelo e introduciendo un método de evaluación simple.	https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.02.001	Seismic slope failure, Travel distance, Energy-based approach, Mobilized friction coefficient	Terremoto	Japón	Estadístico	Algoritmo	Volumen, longitud, pendiente	Grado de saturación, humedad, presión de poro
2019	Artículo de revista académica	Q1	80	12	Mitchell et al.	Rock avalanche runout prediction using stochastic analysis of a regional dataset	Landslides	Springer Verlag	Datos de 49 avalanchas de rocas en Canadá, que habían sido descritas en la literatura, más no compiladas en un inventario. Se tuvo en cuenta el volumen, la altura de la caída, la longitud de viaje, área afectada y la relación entre dicha área total sobre la longitud de viaje, y por último datos cualitativos como topografía, material y geología. Halló que existe una fuerte relación entre la longitud de viaje prevista y el volumen, la altura de caída, y el confinamiento lateral. Estas relaciones se convirtieron en funciones y se implementaron en una herramienta informática para estimar los rangos de probabilidad para la longitud de viaje en avalanchas de rocas.	https://doi.org/10.1007/s10346-019-01331-3	Rock avalanche, runout, regression, stochastic prediction	Desprendimiento de rocas	Canadá	Estadístico	Logarítmica	Diferencia de altura, ángulo de alcance crítico, volumen, masa, coeficiente de arrastre, ángulo de fricción	N/D

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2017	Artículo de revista académica	Q2	118	12	Zou et. al.	Prediction of landslide runout based on influencing factor analysis	Environmental Earth Sciences	Springer Verlag	Datos de 55 deslizamientos en China para determinar cómo la topografía, el material, factores desencadenantes y volumen los afectan. Halló que los que son inducidos por la lluvia tienen mayor movilidad que lo son por la gravedad, y a su vez, estos últimos tienen mayor movilidad que los inducidos por terremotos. Se halló también una fuerte correlación entre el coeficiente de fricción y el volumen del deslizamiento.	https://doi.org/10.1007/s12665-017-7075-x	Runout prediction, Travel distance, Mobility influencing factors, Extra sum of squares analysis, Jiweishan landslide	Lluvia, gravedad y terremotos	China	Estadístico	Trigonométrica	Confinamiento, altura, pendiente, longitud, volumen	Humedad, presión de poro
2017	Capítulo de un libro	N/D	N/D	8	Strand et al.	Runout of Landslides in Sensitive Clays	Advances in Natural and Technological Hazards Research	Springer International Publishing AG	Datos de 109 deslizamientos en Noruega. Propone un modelo empírico para predecir longitudes de viaje en arcillas sensibles. Para una estimación fiable se requiere un modelo reológico detallado y parámetros, que rara vez o nunca, están disponibles. En el caso de las arcillas, se recomienda recurrir a métodos empíricos para predecir la longitud de viaje. Los datos usados están en la caja de herramientas del software geotécnico GeoSuite.	https://doi.org/10.1007/978-3-319-56487-6_26	Debris Flow, runout distance, slide debris, landslide type, landslide data	Deslizamientos de arcillas sensibles	Noruega	Estadístico	Lineal	Volumen, Ángulo de la pendiente crítica, fricción, altura, viscosidad	N/D
2021	Artículo de revista académica	Q1	100	7	Lyu y Wang	Probabilistic simulation of entire process of rainfall-induced landslides using random finite element and material point methods with hydro-mechanical coupling	Computers and Geotechnics	Elsevier	Se proporciona una simulación probabilística de deslizamientos de tierra inducidos por lluvia, utilizando métodos aleatorios de elementos finitos y punto material con acoplamiento hidromecánico. Se propone un método en dos etapas con el método de elementos finitos y el método de punto material, para simular un deslizamiento de tierra desde el desencadenamiento por la lluvia hasta la gran deformación del suelo posterior a la falla. Se encontró que la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica afecta significativamente las distribuciones de presión de agua intersticial en suelos bajo lluvia, y pueden determinar si un deslizamiento de tierra es provocado por la lluvia o no.	https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103989	Probabilistic analysis Landslides Rainfall Spatial Variability Material point method	Lluvia	Mundial	Probabilístico	Algoritmo	Cohesión y ángulo de fricción, volumen, pendiente	presión de agua intersticial, conductividad hidráulica, porosidad, duración de lluvia, parámetros de la curva característica del agua del suelo, cantidad de lluvia (no especificado)
2018	Relatoría de conferencia	N/D	N/D	6	Mitchell et. al.	New empirical-statistical tools for the analysis of rock avalanche runout	7th Canadian Geohazards Conference – Geohazards 7	Canadian Geotechnical Society (CGS)	Las avalanchas de rocas normalmente se caracterizan usando la relación entre la diferencia de elevación y la distancia horizontal entre la cresta del deslizamiento y su punta distal, es decir: H/L. Diversos investigadores también han propuesto una correlación inversa entre el volumen de la avalancha de rocas y H/L. Haciendo análisis de regresión se pueden obtener estimaciones probabilísticas de la longitud de viaje. Se usaron datos de cinco estudios anteriores, más 48 deslizamientos acaecidos en el oeste de Canadá.	https://www.researchgate.net/publication/325681363_New_empirical-statistical_tools_for_the_analysis_of_rock_avalanche_runout	N/D	Diversas causas	Mundial	Estadístico	Logarítmica	Volumen, Ángulo de la pendiente, longitud, altura, área	N/D

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2018	Artículo de revista académica	Q1	59	4	Qiu et al.	Developing empirical relationships to predict loess slide travel distances: a case study on the Loess Plateau in China	Bulletin of Engineering Geology and the Environment	Springer Verlag	Para obtener una relación empírica más precisa para predecir las distancias de viaje de los deslizamientos de loess, se desarrolló una base de datos de deslizamientos de loess para la meseta central de Loess utilizando una combinación de interpretaciones de imágenes de sensores remotos, conjuntos de datos existentes y un estudio de campo intensivo. El análisis estadístico reveló que la mayoría de los deslizamientos de loess, poseen una longitud de viaje menor a los 200 metros y que las correlaciones se ajustan bien a la ley de potencia. Se encontró que el volumen controla significativamente la longitud de viaje, mientras que existe una correlación negativa entre el coeficiente de fricción equivalente y la inclinación de la pendiente. Se comparó las relaciones empíricas para predecir la longitud de viaje y se encontró que los resultados que usan 3 variables independientes son más precisos que los que usan dos variables independientes.	https://doi.org/10.1007/s10064-018-1328-0	Comparison; Empirical relationships; Landslides; Loess; Travel distance	Lluvia	Meseta de Loess, centro norte de China	Estadístico	Exponencial	Volumen de deslizamiento, inclinación de pendiente, coeficiente de fricción, Altura de la pendiente.	Presión de agua de poros, precipitación anual promedio
2015	Artículo de revista académica	Q2	48	4	Mansour et al.	Morphometric analysis of landslides in the Ouarsenis area (west Algeria): implications for establishing a relationship between tectonic, geomorphologic, and hydraulic indexes	Arabian Journal of Geosciences	Springer Verlag	Datos de 46 deslizamientos. La pendiente de un talud y la longitud de viaje están fuertemente relacionados. Los coeficientes de fricción también hacen variar la longitud que puede alcanzar un deslizamiento.	https://doi.org/10.1007/s12517-014-1711-5	Ouarsenis, Tectonic fractures, Slope instabilities, Fluid flow, Landslide, Friction	Lluvia	Cordillera Ouarsenis, noroccidente de Argelia	Estadístico	Lineal	Altitud, distancia, área, perímetro, coeficiente de fricción, pendiente	Precipitación anual promedio, humedad, nivel freático, precipitación mensual promedio
2016	Artículo de revista académica	Q1	79	3	Wang et al.	Prediction of sliding distance of seismic landslides in Loess Plateau, China	Soils and Foundations	Japanese Geotechnical Society	Con el fin de evaluar el área de influencia de los deslizamientos de tierra sísmicos, se presenta un método para predecir la longitud de viaje de los deslizamientos de tierra sísmicos en la meseta de Loess, por medio de un modelo de información difuso basado en una base de 93 procesos de remoción en masa. Se estudiaron longitudes de viaje desde 23,12 metros hasta los 165,78 metros.	https://doi.org/10.3208/jgssp.208.jgssp.ATCI-3-13	Sliding distance, seismic landslide, prediction, loess plateau	Deslizamientos sísmicos	Meseta de Loess, centro norte de China	Estadístico	Logarítmica y trigonométrica	Intensidad sísmica, altitud relativa, ángulo de pendiente, cohesión relativa y ángulo interno de fricción.	Presión de los poros, permeabilidad, cohesión

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2021	Artículo de revista académica	Q1	57	2	Lin et. al.	National-scale data-driven rainfall induced landslide susceptibility mapping for China by accounting for incomplete landslide data	Geoscience Frontiers	China University of Geosciences (Beijing) and Peking University	Uso de datos incompletos para modelos estadísticos de deslizamientos en China. Investiga como contrarrestar el sesgo asociado a esta falta de información. Factores: litología, índice de humedad del suelo, precipitación media anual, uso de la tierra, entorno geológico. Los resultados muestran que la incompletitud del inventario de deslizamientos tuvo un impacto sustancial. Se concluye que ignorar la incompletitud de datos en un inventario de deslizamientos puede conducir a la generación de modelos poco fiables.	https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101248	Statistical modelling, Landslide susceptibility, Generalized additive model, Mixed-effects model, China	Lluvia	China	Estadístico	Logarítmica	Geología, topografía, clima, hidrología y uso del suelo se usaron como base para analizar los factores de influencia en un deslizamiento.	Precipitación anual, índice de humedad del suelo.
2021	Artículo de revista académica	Q1	99	2	Wegner et al.	Assessing the effect of lithological setting, block characteristics and slope topography on the runout length of rockfalls in the Alps and on the island of La Réunion	Natural Hazards and Earth System Sciences	European Geosciences Union	Se realizó una investigación comparativa de las propiedades morfológicas y distancias de salida de fragmentos de desprendimiento de rocas en regiones montañosas dentro de diferentes entornos litológicos. Para este análisis, se seleccionaron cuatro sitios con diferentes condiciones litológicas, diferente actividad de desprendimiento de rocas y otros datos existentes de muy alta calidad. Debido a las diferencias litológicas en los acantilados, se esperaba diferentes distribuciones estadísticas de tamaños de bloques y formas de bloques en las pendientes del talud. La rugosidad supone un factor de influencia a la hora de determinar la longitud de viaje de un deslizamiento.	https://doi.org/10.5194/nhes-21-1159-2021	N/D	Desprendimiento de rocas en regiones montañosas	Alpes (Europa) e Isla Reunión (África)	Morfometría y estadístico	N/D	Altitud, ángulo de pendiente, longitud, temperatura anual, ángulo de fricción, tensión de rotura	Precipitación media anual
2021	Artículo de revista académica	Q1	128	1	Zhang et. al.	Estimating landslide sliding distance based on an improved Heim sled model	Catena	Elsevier	Datos de 27 deslizamientos de tierra de loess en un estudio que considera el componente de energía potencial gravitatoria como trabajo adicional W, para la predicción de la longitud de viaje de un deslizamiento. El método empleado tiene una buena aplicabilidad para deslizamientos de loess con volúmenes menores a 106 metros cúbicos. Para una mayor precisión, sugiere usar una mayor cantidad de datos.	https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105401	Additional work W, Conservation of energy, Equivalent friction coefficient, Loess landslide sliding distance, Multivariate nonlinear regression	Lluvia y terremotos	Gansu, centro norte de China	Estadístico	Trigonométrica	Coefficiente de fricción, ángulo de pendiente, y ángulo interno de fricción. volumen	N/D
2021	Artículo de revista académica	Q1	40	1	Li et al.	Debris flows modeling using geo-environmental factors: developing hybridized deep-learning algorithms	Geocarto International	Taylor and Francis Ltd.	Datos de 72 deslizamientos de flujos de detritos en Corea del Sur. Se usó un modelo de aprendizaje profundo y sus diferentes formas híbridas. Se halló que el grado de pendiente, la edad de los árboles, el índice de potencia de la corriente, la geografía y el drenaje del suelo, fueron los factores detonantes más importantes del flujo de detritos, refutando la creencia de que las áreas boscosas son inmunes a deslizamientos. Concluye, que, en algunos casos, la forestación, puede ser contraproducente.	https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1912194	Debris flow, natural disasters, artificial intelligence, hybridized model, Umyeonsan	Flujo de detritos	Corea del Sur	Estadístico	Algoritmo	Ángulo de la pendiente.	Lluvias intensas, Precipitación anual

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS NO TROPICALES O COMBINADAS (48 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Método	Ecuación	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2021	Artículo de revista académica	Q2	2	0	Bhandari Y Dakal	A multidisciplinary approach of landslide characterization: A case of the Siwalik zone of Nepal Himalaya	Journal of Asian Earth Sciences: X	Elsevier	Caso de estudio en Nepal, desde un punto de vista multidisciplinario.	https://doi.org/10.1016/j.jaes.2021.100061	Siwalik Landslide characterization Multidisciplinary approach GIS	Lluvia	Himalaya, Nepal	Empírico	N/D	Distribución de deslizamientos a unidades geológicas, zonas de empuje, pendiente, y cantidad de lluvia continua junto a propiedades geotécnicas.	Precipitación promedio de la estación total, precipitación máxima en 24 h, precipitación anual total y distancia al mapa de drenaje, índice de humedad topográfica.
2022	Artículo de revista académica	Q1	136	0	Long et al.	A multi-feature fusion transfer learning method for displacement prediction of rainfall reservoir-induced landslide with step-like deformation characteristics	Engineering Geology	Elsevier	Se procesaron datos de monitoreo GPS y datos de factores desencadenantes de diciembre de 2008 a diciembre de 2012, en China, para aplicarse en un método de aprendizaje de fusión de características múltiples (MFTL), obteniéndose buenos resultados, fruto de la aplicación de este método.	https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106494	Landslide evolution state, Landslide deformation state, Multi-feature fusion transfer learning (MFTL) method, Displacement prediction, Step-like deformation characteristics	Lluvia	Provincia de Hubei, centro-este de China	empírico	Algoritmo	Ángulo de la pendiente, volumen	Lluvias intensas, precipitación acumulativa mensual.
2021	Artículo de revista académica	Q1	34	0	Zhuang et al.	Empirical relationships of the landslides in the Chinese Loess Plateau and affect factors analysis	Geomatics, Natural Hazards and Risk Geomatics, Natural Hazards and Risk	Taylor and Francis Ltd.	Datos de 20699 deslizamientos de loess, en la Meseta de Loess, en China. Las características de escala, movilidad de los deslizamientos, relación área-volumen y análisis de relación con la evolución de la cuenca fueron estudiados, para formular ecuaciones de correlación empíricas.	https://doi.org/10.1080/19475705.2021.2020174	Landslide size, landslide mobility, affect factors, empirical relationship, Chinese Loess Plateau	Depósitos sedimentarios eólicos (loess)	Meseta de Loess, centro norte de China	Estadístico	Exponencial	Volumen, pendiente.	Fuerza cohesiva, humedad, permeabilidad
2020	Relatoría de conferencia	N/D	N/D	0	Mitchell et al.	Development of a universal open access rock avalanche case study database	13th International Symposium on Landslides (ISL2020)	International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering	Búsqueda de una metodología universal para predecir el comportamiento de una avalancha de rocas. Se ha creado una base de datos de acceso abierto que contiene áreas de impacto digitalizadas, atributos descriptivos y referencias bibliográficas para un gran número de eventos, para de esta forma, desarrollar nuevas relaciones empíricas para las longitudes de viajes. Un análisis inverso también permitiría hallar el volumen del deslizamiento, teniendo entre otros datos, la longitud de viaje.	https://www.issmge.org/publications/publication/development-of-a-universal-open-access-rock-avalanche-case-study-database	N/D	Diversas causas	Mundial	Empírico	N/D	Volumen, Ángulo de la pendiente, longitud, altura, área	Humedad

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS TROPICALES (7 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
1999	Artículo de revista académica	Q1	118	116	Finlay	Landslide risk assessment; prediction of travel distance	Canadian Geotechnical Journal	National Research Council of Canada	Datos de más de 1100 deslizamientos. Se procesaron en modelos de regresión múltiple, basados en la geometría de la pendiente. Estos modelos pueden ser aplicables para otros lugares con una altura de talud, geometría o geología, similares. No se consideraron factores como el tipo de material, mecanismo de falla, agua subterránea.	https://doi.org/10.1139/9/199-012	Landslide, travel distance, risk, risk assessment	Diversas causas	Hong Kong	Ángulo de la pendiente, altura, profundidad máxima, volumen, coeficiente de fricción aparente	Precipitaciones
2003	Artículo de revista académica	Q1	174	40	Dai et al.	Characterization of rainfall-induced landslides	International Journal of Remote Sensing	Taylor and Francis Ltd.	La abundante precipitación de la zona de Lantau, en Hong Kong, la convierte en potencialmente peligrosa para la ocurrencia de deslizamientos. Se compararon deslizamientos ocurridos en dos tormentas: una en 1992 y otra en 1993, siendo los de 1993 más grandes en área y en longitud de viaje, atribuyéndose, a que la tormenta de estudio de 1993 fue más fuerte que la de 1992. Las pendientes en el rango que está entre los 30 grados y 40 grados, son más propensas a sufrirlos. También se halló que las pendientes con perfil cóncavo son más propensas, al igual que aquellas que están constituidas por roca y toba y las laderas entre los 50 y 400 metros de altura. Para estimar la longitud de viaje, se marcó el ancho máximo de cada deslizamiento.	https://doi.org/10.1080/014311601131000082424	N/D	Lluvia	Hong Kong	La inclinación de la pendiente, la elevación, el aspecto de la pendiente, la forma de la pendiente y la cubierta vegetal	Humedad del suelo, precipitaciones totales anuales (mm año-1), intensidad de las precipitaciones horarias, acumulaciones de precipitaciones diarias o multi-diarias, precipitaciones máximas diarias
2008	Artículo de revista académica	Q2	56	30	Devoli et al.	Statistical Analysis of Landslide Events in Central America and their Run-out Distance	Geotechnical and Geological Engineering	Springer Netherlands	Datos de 348 deslizamientos en Nicaragua y 19 más de otros países de Centroamérica. Los datos se analizan y presentan en forma de relaciones empíricas entre la distancia de salida, la caída vertical, el ángulo de desplazamiento y el volumen del deslizamiento de tierra. Luego, los datos centroamericanos se comparan con los propuestos en estudios anteriores. El estudio también destaca las diferencias en las distancias de salida observadas y la movilidad entre los diferentes tipos de deslizamientos de tierra y entre deslizamientos de tierra en áreas volcánicas y no volcánicas.	https://doi.org/10.1007/s10707-008-9209-0	Landslides, Debris flows, Lahars, Run-out distance, Nicaragua, Central America	Lluvia	Nicaragua y Centroamérica	Altura de caída (H) y distancia de salida (L) en función del volumen y la altura de caída, la distancia de salida, el área inundada, el ángulo de salida, la descarga máxima, la velocidad, la profundidad del flujo, el ángulo de desplazamiento, la pendiente, el coeficiente de fricción aparente, el volumen de masa.	Precipitación intensa, cohesiva, intensidad de la lluvia por hora
1999	Artículo de revista académica	Q1	118	15	Finlay et al.	Landslide risk assessment: prediction of travel distance	Canadian Geotechnical Journal	National Research Council of Canada	Más de 1100 eventos recopilados de una base de datos de deslizamientos de tierra de la Oficina de Ingeniería Geotécnica de Hong Kong en el período de 1984 a 1993. Se desarrolló modelos de regresión múltiple, teniendo en cuenta, la geometría de la pendiente. Las predicciones para la distancia de viaje muestran una gran incertidumbre, ya que, no se consideró tipo de material, mecanismo de falla, agua subterránea y geología.	https://doi.org/10.1139/9/199-012	Landslide, travel distance, risk, risk assessment	Granito y otras rocas volcánicas erosionadas, afectadas por la acción del hombre	Hong Kong	Pendiente, altura, volumen y ancho, fricción.	N/D

DOCUMENTOS A NIVEL DE ZONAS TROPICALES (7 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2018	Artículo de revista académica	Q1	159	11	Kang y Chan	A progressive entrainment runout model for debris flow analysis and its application	Geomorphology	Elsevier	Se presenta un modelo de arrastre progresivo que considera tanto los movimientos de rodadura como los de deslizamiento del material erosionable. Este modelo es sensible al tamaño de partícula característico, el ángulo de fricción basal y el coeficiente de turbulencia. Se usó mediciones de flujos de Tsingshan de 1990, para validar el modelo. Se concluyó que este modelo de arrastre progresivo fue más preciso que un modelo de arrastre dinámico.	https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.003	Debris flow Entrainment Tsingshan debris flow Runout modeling Landslides, granular flow	Flujo de detritos	Hong Kong	Altura, distancia horizontal de deslizamientos, precipitaciones	Precipitación
2021	Artículo de revista académica	Q1	80	1	Panday y Dong	Topographical features of rainfall-triggered landslides in Mon State, Myanmar, August 2019: spatial distribution heterogeneity and uncommon large relative heights	Landslides	Springer Verlag	Datos de 35 deslizamientos provocados por lluvia en el estado Mon, Myanmar. Se exploró la influencia de los aspectos de la pendiente que son relevantes para las condiciones meteorológicas en la concentración de deslizamientos. y se discutieron en profundidad los factores causantes relacionados con este deslizamiento de tierra. También con respecto al análisis de muestras representativas se observó una movilidad relativamente alta y que la relación entre la movilidad del deslizamiento y el ángulo de pendiente del área fuente del deslizamiento es similar a la de deslizamientos de tierra provocados por terremotos. Compara sus resultados, con los de los deslizamientos provocados por el terremoto de Wenchuan de 2008.	https://doi.org/10.1007/s10346-021-01758-7	Landslides, rainfall, slope angle of source, area, angle of reach	Lluvia	Myanmar	Ángulo de la pendiente, ángulo de fricción interna, ángulo de alcance	Acumulaciones de lluvia diarias o de varios días, presión intersticial, nivel freático, Cantidad de lluvia (no especificado), intensidad de lluvia, duración de lluvia (no especificado)
2021	Artículo de revista académica	Q1	136	0	Gao et al.	Topography and geology effects on travel distances of natural terrain landslides: Evidence from a large multi-temporal landslide inventory in Hong Kong	Engineering Geology	Elsevier	Base de datos de 19763 registros. Factores topográficos y geológicos que controlan las distancias de viaje de laderas abiertas usando inventario de deslizamientos (1984-2013), se proporcionan valores números de distancias de viajes. Los valores medios de laderas abiertas y de flujos canalizados fueron de 24,1 metros y 86,3 metros, respectivamente. El recorrido horizontal (L) y la altura de la caída (H) están estrechamente relacionadas. L aumenta a medida que aumenta H y el volumen. El uso de la expresión H/L en solitario, no se sugiere para Hong Kong.	https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106266	Travel distance Landslide Rain-induced landslides Debris flow Landslide risk	N/D	Hong Kong	Número de deslizamientos, distancia horizontal de deslizamientos, volumen, ángulo de deslizamiento, precipitaciones	Periodos de retorno de precipitación, acumulaciones de lluvia diarias o de varios días

DOCUMENTOS A NIVEL NACIONAL (4 DOCUMENTOS)

Fecha	Tipo	Q	H-index	Citas	Autor	Título	Publicación	Editor	Breve descripción	URI/DOI	Palabras claves	Detonante	País o región	Parámetros generales	Parámetros hidrológicos
2021	Trabajo de grado	N/D	N/D	0	Moncayo	Evaluación de la distancia de viaje de movimientos en masa en Colombia a partir de registros históricos	N/D	Universidad Nacional de Colombia	Datos de parámetros característicos de 199 deslizamientos en la Región Andina de Colombia, tomados del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) implementado por el Servicio Geológico Colombiano. El análisis muestra que dichos deslizamientos exhiben, mayormente, una movilidad limitada y una magnitud relativamente pequeña. Se usaron técnicas de regresión simple y múltiple. El estudio revela que factores tales como el volumen, ángulo del talud anterior a la falla, la altura vertical máxima y la geomorfología, son relevantes a la hora de evaluar la longitud de viaje. También el estudio halló una correlación entre el área planimétrica y el volumen del deslizamiento en cuestión.	https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80825	Deslizamientos, Distancia de viaje, Estudios de amenaza, Modelos empíricos, Movilidad, Empirical models, Hazard assessment, Mobility, Landslides, Travel distance	Lluvia	Región Andina, Colombia	Volumen, ángulo de la pendiente, Ángulo de fricción equivalente, ángulo de alcance	Contenido de agua, cohesión, presiones de poros de los fluidos intersticiales, humedad, intensidad de lluvia, precipitación media multianual
2000	Trabajo de grado	N/D	N/D	7	Arango	Relaciones – deslizamientos y zonificación geotécnica en la comunidad de la ciudad de Manizales	N/D	Universidad Nacional de Colombia	El artículo está centrado en analizar la forma en la que influyen los parámetros hidrológicos sobre el terreno y las fallas causando el deslizamiento. Se basa en datos de 318 deslizamientos relevantes, acaecidos desde 1960 hasta 1998. Se obtuvieron correlaciones estadísticas de lluvias, niveles freáticos y deslizamientos. En los datos de deslizamientos, se tuvo en cuenta las longitudes de viaje.	https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7037	Relaciones Lluvias, Deslizamientos, Umbrales de Precipitación, Umbrales de Niveles Freáticos, Zonificación Geotécnica, Sistemas de Alarmas	Lluvia	Caldas, Colombia	Ángulo de fricción, cohesión	lluvias anuales, mensuales, diarias y antecedentes, presiones intersticiales y el peso unitario, humedad, intensidad lluvia, duración lluvia, frecuencia lluvia, Periodos de retorno de precipitación, probabilidad de excedencia, lluvias mensuales, valores máximos medios y mínimos, lluvia máxima diaria
2020	Artículo de revista académica	N/D	9	0	Santa-Ramírez et al.	Correlación de variables morfométricas para deslizamientos en la cuenca del río Combeima, Colombia.	Ingeniería y Ciencia	Universidad EAFIT	Datos de 121 deslizamientos en la cuenca del Combeima (Tolima, Colombia). Se empleó una distribución Birnbaum-Saunders, y se halló que el área del deslizamiento se correlaciona con la longitud total, la longitud de línea central y el ancho de la superficie de la ruptura; información muy útil para predecir los efectos potenciales de un deslizamiento de esta zona.	https://doi.org/10.17230/ingenieria.16.31.7	Landslides, Morphometry, Remote sensing, GIS	Lluvia	Tolima, Colombia	Ancho, ancho de ruptura, área, perímetro	Precipitación media anual
2020	Artículo de revista académica	Q1	244	3	Grima et al.	Landslides in the Andes: Forests can provide cost-effective landslide regulation services	Science of the Total Environment	Elsevier	Datos tomados del Sistema de Información de Movimientos en Masa – SIMMA. 2540 deslizamientos ocurrieron entre 2013 y 2017, de los cuales 369 ocurriendo en zonas forestadas, y 2143 en zonas no forestadas (28 deslizamientos no tienen datos de cobertura vegetal). Explica como los bosques son fundamentales a la hora de proteger taludes y de esa forma, evitar deslizamientos, ya que hay casi seis veces más de probabilidad (581%) de que ocurran en tierras no boscosas, que en tierras boscosas.	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.1128	Andes, Landslides, Colombia, Tropical Forest conservation, Ecosystem services, Payments for ecosystem services	Lluvia	Región Andina, Colombia	Tectónico o volcánico, ángulo de la pendiente, la idea central va en torno al uso de los cultivos y cómo afecta en algunos casos negativamente y otros positivamente a la estabilidad del suelo, también en el caso de los bosques.	Precipitación