

Metodologías para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa como parte de los estudios básico de amenaza: caso de estudio municipio de Andes, Antioquia, Colombia

Edier Aristizábal¹ ; Paula Morales-García^{2*} ; Mariana Vásquez-Guarín¹ ;
Diana Ruíz-Vásquez¹ ; Johnnatan Palacio-Córdoba¹ ;
Flor Patricia Ángel-Cárdenas² ; Humberto Caballero-Acosta² ;
Oswaldo Ordóñez-Carmona² 

¹Grupo de Investigación en Geología Ambiental, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. evaristizabalag@unal.edu.co; mvasquezg@unal.edu.co; diruva123@gmail.com; japalacioc@unal.edu.co

²Grupo de Investigación en Georrecursos, Minería y Medio Ambiente, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. (*) paamoralesga@unal.edu.co; patto.angel@gmail.com; jhumberto.caballero@gmail.com; oswaldo.geologo@gmail.com

Resumen

Los estudios básicos de susceptibilidad y amenaza por la ocurrencia de movimientos en masa son un elemento fundamental para la actualización de los planes de ordenamiento de los municipios del territorio colombiano. Dado lo anterior, la Ley 1523 de 2012 establece la política marco, y el Decreto 1807 de 2014, compilado en el 1077 de 2015, establece los lineamientos técnicos que tales estudios deben seguir y las condiciones mínimas que se deben cumplir. Por este motivo, se realizó una selección de algunas metodologías reconocidas en la literatura, que, al ser adecuadas y validadas según las condiciones propias de cada municipalidad, pueden ser utilizadas para la realización de tales estudios, sean tanto para el área rural y para suelo urbano y de expansión, como para cada uno de los factores que pueden detonar estos eventos.

Palabras clave: Procesos de ladera; Gestión del riesgo; Planificación territorial; Andes (Antioquia).

Methodologies for landslides hazard assessment in basic hazard studies: case study municipality of Andes, Antioquia, Colombia

Abstract

Landslide susceptibility and hazard studies are essential for updating land use plans in the municipalities of the Colombian territory. Thereby, the law 1523 of 2012 that established the political framework and the decrees 1807 of 2014 and 1077 of 2015 have established the technical guidelines that such studies must follow and the minimum conditions that must be achieved. Therefore, a selection of some known methodologies in literature was done, which, being adapted and validated according to the specific conditions of each municipality, they are used to carry out these studies, for both rural, urban and expansion areas and for each factor that can detonate these events.

Keywords: Landslides; Risk management; Land use planning; Andes (Antioquia).

Forma de citar: Aristizábal, E.; Morales-García, P.; Vásquez-Guarín, M.; Ruíz-Vásquez, D.; Palacio-Córdoba, J.; Ángel-Cárdenas, F.P.; Caballero-Acosta, H.; Ordóñez-Carmona, O. (2022). Metodologías para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa como parte de los estudios básico de amenaza: caso de estudio municipio de Andes, Antioquia, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 199-217. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022009>

Introducción

Como ha sido decretado en la Ley 1523 de 2012 y en el Decreto 1077 de 2015, la integración del componente técnico en el esquema de planificación territorial y en la gestión del riesgo se realiza a través de los estudios básicos a nivel de amenaza y estudios detallados a nivel de riesgo. Los primeros deben ser incorporados en la revisión de los contenidos de medio y largo plazo o en la expedición de un nuevo plan, con el fin de que las políticas públicas se diseñen conforme las restricciones impuestas por el territorio y el modelo de desarrollo que se pretenda adoptar. Y los estudios detallados evalúan las condiciones de vulnerabilidad y riesgo para establecer la mitigabilidad o no de dichas condiciones y la posibilidad de urbanizar.

Para la evaluación y zonificación de la amenaza por movimientos en masa se utilizan enfoques cualitativos o cuantitativos (Soeters y van Westen, 1996; Aleotti y Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999; Dai *et al.*, 2001; Chacón *et al.*, 2006; Fell *et al.*, 2008). Los enfoques cualitativos están basados enteramente en el criterio y juicio de expertos, e incluyen análisis de decisiones multicriterio (Ayalew y Yamagishi, 2005), algebra de mapas (Carrara, 1983) y mapeo geomorfológico directo (Barredo *et al.*, 2000). Estos métodos se consideran altamente subjetivos y dependen completamente de la experiencia y conocimiento del experto sobre la ocurrencia de movimientos en masa en la región específica de estudio y sobre los factores de causa (Guzzetti *et al.*, 1999), por lo que son recomendables a escalas nacionales o regionales (Guzzetti *et al.*, 1999).

Los métodos cuantitativos utilizan expresiones matemáticas objetivas que producen factores de seguridad o probabilidades de la ocurrencia de movimientos en masa, correlacionando las causas y el inventario de eventos disponible (Aleotti y Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999). Para establecer dichas relaciones, utilizan modelos de base física o modelos estadísticos (Pack *et al.*, 1998; Godt *et al.*, 2008). Los métodos estadísticos evalúan la relación bivariada o multivariada entre los movimientos en masa y el factor detonante, a través de funciones de densidad, para predecir la probabilidad de su ocurrencia. Los métodos estadísticos más usados son bivariados (Aleotti y Chowdhury, 1999; Süzen y Doyuran, 2004; Lee, 2005), multivariados (Carrara, 1983; Gorsevski *et al.*, 2000; Lee y Pradhan, 2007) e inteligencia artificial (Lee *et al.*, 2004; Ermini *et al.*, 2005). Por su parte, los modelos de base física combinan análisis hidrológicos

y geotécnicos para evaluar la estabilidad de laderas usando el factor de seguridad en aplicaciones de escala local (Corominas *et al.*, 2005; van Westen *et al.*, 2008). Generalmente, utilizan el criterio de falla de Mohr-Coulomb y análisis de equilibrio límite mediante la ecuación de talud infinito, con modelos hidrológicos de flujo subsuperficial en un estado estacionario o transitorio en condiciones saturadas o parcialmente saturadas. Sin embargo, estos enfoques son limitados por la falta de parámetros geotécnicos e hidrológicos disponibles para el proceso de calibración y validación (Canli *et al.*, 2018).

En el presente artículo, en primer lugar, se describen a detalle las diferentes metodologías que, en cumplimiento de la normativa, pueden ser implementadas para evaluar y zonificar los fenómenos relacionados con la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, considerando la escala de estudio e información disponible; asimismo, se discriminan aquellas utilizadas tanto en la zona rural como en la zona urbana y de expansión, para cada uno de los factores detonantes. Finalmente, son presentados los resultados obtenidos de la implementación de las metodologías mencionadas en el municipio de Andes (Antioquia), y se da una discusión sobre los mismos.

Metodología

Para determinar la amenaza por movimientos en masa, es necesario realizar la distinción entre suelo urbano y rural, debido a que la unidad de análisis y las metodologías varían según esta naturaleza. De esta manera, la unidad de análisis, es decir, el área que posee una serie de condiciones diferentes a las de la unidad contigua, puede ser tratada según celdas regulares tipo ráster. Estas deben ser definidas para cada sitio de estudio, según la calidad de los datos que se disponga, pero siempre teniendo como limitante las disposiciones mínimas exigidas dentro de la reglamentación (Decreto 1807 de 2014).

En cuanto a los modelos de análisis, en los suelos urbanos y de expansión, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) recomienda en su guía (SGC, 2017) implementar aquellos con base física, que incorporen directamente dentro de su análisis el factor detonante. Para el suelo rural, se deben emplear métodos estadísticos, complementados con el análisis del factor detonante lluvia y sismo; para la lluvia se estiman umbrales críticos, y para el sismo se utiliza el método de Newmark (1965).

Evaluación y zonificación de la amenaza por movimientos en masa en suelo rural

Análisis de la amenaza por lluvia en suelo rural: la amenaza por movimientos en masa se relaciona con el grado de probabilidad de ocurrencia en una zona determinada y un periodo específico (Varnes, 1984). Según Erener y Düzgün (2013), la amenaza (H) puede ser calculada como el producto entre dos probabilidades: la probabilidad de que se supere un cierto umbral (P_t) y la probabilidad de ocurrencia de proceso de ladera en dicha región (P_f).

$$H = P_f \times P_t \quad (1)$$

Donde la probabilidad P_f puede ser formulada como:

$$P_f = P_s \times (P_l | P_t) \quad (2)$$

Donde P_s es la probabilidad espacial de un movimiento en masa y $P_l | P_t$ es la probabilidad condicionada de tener un movimiento en masa si un evento de lluvia detonante supera un valor de un umbral para un periodo determinado. Por lo tanto, la amenaza se puede estimar para un tiempo t como la siguiente probabilidad:

$$H = P_s \times (P_l | P_t) \times P_t \quad (3)$$

A continuación, se describe el método para estimar la probabilidad espacial (P_s) a través del análisis de susceptibilidad, y, dado el factor detonante lluvia, el método implementado para estimar la probabilidad que supere el umbral (P_t) y la probabilidad condicionada de tener un proceso de ladera ($P_l | P_t$).

Evaluación de la susceptibilidad (P_s): previo a la implementación de los métodos de susceptibilidad, se requiere realizar un mapa de procesos morfodinámicos y la selección de variables.

- **Mapa de procesos morfodinámicos**

Para la construcción del mapa de procesos morfodinámicos, se utilizan básicamente tres fuentes de información independientes y levantadas con técnicas diferentes, las cuales son:

Inventario histórico de eventos: puede ser realizado con base en fuentes de datos que tienen cobertura en el territorio colombiano: Sistema de Inventarios de Desastres (DesInventar) (<http://www.desinventar.org>) y Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) (<http://simma.sgc.gov.co>). También

existen bases de datos internacionales que pueden ser consultadas.

Fotointerpretación multitemporal: técnica mediante la cual se definen las condiciones geológicas y geomorfológicas, y se delimitan algunas áreas pobladas y usos del suelo. Las fotografías pueden ser tomadas de diferentes fuentes, tales como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), las corporaciones autónomas regionales (CAR), el SGC, las oficinas de catastro, entre otros, a diferentes escalas coherentes con la escala de trabajo 1:25.000 y de años distintos.

Levantamiento de campo: toma de información a través de una campaña de campo de verificación del mapa fotogeológico, geomorfológico y de procesos morfodinámicos. De allí, se establece el grado de actividad de cada proceso en el momento del levantamiento (activo, latente, relicto o inactivo).

- **Variables condicionantes**

Hace relación a la definición de variables que directa o indirectamente influyen en el desarrollo de movimientos en masa, y son definidas como las propiedades internas e inherentes del terreno que promueve la ocurrencia de procesos de ladera (van Westen *et al.*, 2008; Corominas *et al.*, 2014). Se utilizan, entre otras, como variables condicionantes:

Geología (GE): la geología del territorio puede inicialmente ser tomada de las planchas oficiales realizadas por el SGC a nivel regional, llevadas a la escala de trabajo a partir de estudios complementarios que se hayan realizado, bien sea por parte del mismo municipio o en estudios previos de otras entidades. También, es necesario llevar a cabo campañas de campo de verificación, validación y actualización de la información.

Coberturas vegetales (CO): puede ser realizado a partir de imágenes Rapideye, a través de un procesamiento visual y digital de las imágenes, mediante clasificaciones supervisadas y no supervisadas a una resolución espacial mínima, de acuerdo con las imágenes que se obtengan. Los resultados de este proceso pueden ser validados con mapas de coberturas vegetales del plan básico de ordenamiento territorial (PBOT) antiguos o del IGAC.

Pendiente (PE): para determinar la pendiente de la superficie del terreno, es decir, el ángulo entre esta y la horizontal, se puede emplear el algoritmo de Jones (1998), el cual puede ser implementado en *softwares* de

sistemas de información geográfica (GIS) y modelos de elevación digital (MED), disponibles en el IGAC, oficinas de planeación o del programa ALOS-PALSAR (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>), con resolución de 12,5 m.

Aspecto (AS): esta variable evidencia la dirección de la pendiente y la influencia de la luz solar en el terreno. Es calculada usando la derivada parcial de la elevación respecto a las direcciones X y Y. Es evaluada en forma circular por lo que da posición cardinal: norte, sur; este, oeste (Dai *et al.*, 2001).

Relieve relativo (RR): se expresa como la máxima diferencia entre la mayor y la menor elevación por metro.

Inclinación de la ladera (IL): se refiere a la inclinación, en términos de porcentaje, de las laderas del territorio de análisis. Puede ser determinada a partir de GIS.

Elevación relativa al cauce (EAS): se debe calcular como la elevación de cada celda de la cuadrícula en un ráster por encima de la celda de flujo más cercana.

Curvatura (CU): establece el nivel de convexidad (valores negativos) o concavidad (valores positivos) de la superficie, y define el rol de la topografía para condensar o diseminar el mayor valor registrado de eventos de lluvia en un sector específico de la ladera.

Rugosidad (RU): define la variación de la inclinación de una zona, y se relaciona con el grado de desviación del vector normal a la superficie de cada celda, expresando así la complejidad y ondulación del terreno. Cuando la rugosidad es igual a 1, se interpreta como nula; estos valores disminuyen conforme se incrementa la dispersión de los vectores.

Índice de posición topográfica (TPI): es un índice topográfico compuesto. Evalúa morfología en la posición relativa del cauce, y arroja la diferencia entre un valor de elevación de celda y la elevación promedio del vecindario alrededor de esta. Valores positivos reflejan una mayor elevación de la celda respecto a su entorno, mientras que los valores negativos significan que es más bajo.

Índice de humedad topográfico (TWI): evalúa el grado de propensión a la acumulación de agua (Gruber y Peckham, 2009); relaciona la humedad edáfica y la tendencia del suelo con la generación de procesos de escorrentía.

- **Análisis exploratorio de variables**

El grupo de variables, cuyo comportamiento incide directa o indirectamente en el desarrollo de movimientos en masa, está condicionado por la escala de análisis, sumado a las propiedades del área de interés y al tipo de movimientos en masa. Cada zona cuenta con unas propiedades en particular. Para la selección de las variables, se utiliza la correlación lineal entre variables a través del método de Spearman, el cual permite encontrar similitudes entre las variables, y el método de análisis de frecuencia de variables (Lee *et al.*, 2008), que refleja cómo es la conducta de cada variable bajo condiciones de aparición o no de movimientos en masa. Esta comparación permite seleccionar aquellas que mejor clasifican la ocurrencia y no ocurrencia de procesos de ladera, mejorando la eficiencia, desempeño y capacidad de predicción del modelo.

Una vez es determinada la anterior información, se puede proceder con la implementación de los métodos para la evaluación de la susceptibilidad. Para el área rural, se pueden usar dos metodologías independientes. La primera, el método estadístico multivariado, denominado regresión logística (Atkinson *et al.*, 1998; Gorsevski *et al.*, 2006), corresponde al método más ampliamente utilizado en el mundo. La segunda metodología incluye el método recomendado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), correspondiente al peso de la evidencia, el cual, combinado con el análisis jerárquico de procesos (AHP) que asigna los valores a las variables, permite obtener un método híbrido (van Westen, 1993; Ayalew *et al.*, 2004; Sützen y Doyuran, 2004).

- **Método híbrido**

El método híbrido corresponde al uso del análisis multivariado para la asignación de pesos a las variables, mediante el análisis jerárquico de procesos (AHP), combinado con el método estadístico bivariado peso de la evidencia (WoE) para asignar peso a las clases. A continuación, se describe cada uno de los métodos.

Método análisis jerárquico de procesos (AHP): método heurístico de toma de decisiones multicriterio, que permite convertir la relativa importancia de los factores condicionantes en la ocurrencia de movimientos en masa, a partir de evaluaciones subjetivas de expertos (Saaty, 2001). Se utiliza una matriz de comparación entre las variables condicionantes, a partir de la escala de evaluación e importancia propuesta por Saaty (1980), con valores de 1 a 9 (Tabla 1).

Tabla 1. Escala de importancia relativa. Modificada de Saaty (1980).

Escala	Descripción
1/3	Moderadamente poco importante
1/5	Muy poco importante
1/7	Fuertemente poco importante
1/9	Extremadamente poco importante
1	Igualmente, importante
3	Moderadamente importante
5	Fuertemente importante
7	Muy fuertemente importante
9	Extremadamente importante

Método peso de la evidencia (WoE): está fundamentado en la teoría de la probabilidad bayesiana, en la cual se examina el vínculo existente entre dos eventos, realizando la manipulación probabilística de condiciones (Olshausen, 2004), que, particularmente para los movimientos en masa, concierne a la correspondencia entre las zonas perjudicadas por los movimientos en masa y la distribución espacial de los factores condicionantes de la zona (Regmi et al., 2010; Sujatha et al., 2014). En este método, se requiere calcular el peso de cada una de las clases que constituyen las variables condicionantes (van Westen et al., 2003). Este valor denota el grado de incidencia de la categoría como parámetro en el desarrollo de eventos de remoción en masa (Regmi et al., 2010; Oh y Lee, 2011).

Los pesos asignados pueden ser valores positivos (W^+), lo cual refleja que la existencia de esta clase como parámetro favorece el desarrollo de movimientos en

masa, y su magnitud permite interpretar el grado de correlación, y negativos (W^-) que reflejan la inexistencia de la clase i . Cuando el valor corresponde a cero, se interpreta que no es relevante para la ocurrencia del movimiento en masa (Dahal y Hasegawa, 2008; Regmi et al., 2010). Para el cálculo de estos pesos, se utilizan las siguientes expresiones:

$$W^+ = Ln \frac{\frac{A1}{A1+A2}}{\frac{A3}{A3+A4}} \quad W^- = Ln \frac{\frac{A2}{A1+A2}}{\frac{A4}{A3+A4}} \quad (4)$$

Donde A1 es la cantidad de pixeles con movimientos en masa en la clase; A2, cantidad de pixeles con movimientos en masa que no existen en la misma clase; A3, cantidad de pixeles en la clase con ausencia de deslizamientos; y A4 es la cantidad de pixeles en la clase donde no se registran movimientos en masa y que además no están presentes en la misma clase (Ozdemir y Altural, 2013).

El peso final o peso de contraste (W_f) es la diferencia entre los dos pesos, el cual indica la medida de correlación entre el deslizamiento y la clase de la variable condicionante analizada (SGC, 2017).

$$W_f = W^+ - W^- \quad (5)$$

Con los pesos respectivos de las variables condicionantes (B_n), obtenidos mediante el método AHP, y los pesos de cada clase (X_n), obtenidos mediante el peso de contraste W_f , se estima la susceptibilidad (z_n) para cada celda, utilizando la siguiente ecuación:

$$z = B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + \dots + B_nX_n \quad (6)$$

- **Modelo de regresión logística (RL)**
Se define como un método estadístico multivariado que permite establecer el vínculo entre variables dependientes (desarrollo de movimientos en masa) de valores dicotómicos que representan la no ocurrencia (valor igual a 0) o la ocurrencia (valor igual a 1) del evento, con las variables independientes, puntualmente las que se denominan predictoras o condicionantes del terreno. La RL tiene como beneficio que las variables predictoras no necesitan presentar una distribución normal, además de poder ser discretas o continuas o una mezcla de ambas (Atkinson et al., 1998).

El vínculo de dependencia entre el desarrollo de movimientos en masa y las variables es calculado mediante la siguiente expresión:

$$P(y) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (7)$$

Donde $P(y)$ es la probabilidad espacial estimada del desarrollo de movimientos en masa y puede adquirir valores en un intervalo de 0 a 1. Y corresponde a una combinación lineal de las variables independientes:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_nx_n \quad (8)$$

Donde b_0 es el intercepto del modelo según el método de RL; los valores b_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) son los coeficientes de la regresión logística, es decir, los pesos de las variables, y los valores x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) son las variables independientes.

La RL constituye uno de los métodos estadísticos multivariados más usados para calcular la susceptibilidad por movimientos en masa a escalas medias a regionales (Ayalew y Yamagishi, 2005; Lee y Pradhan, 2007). Para ejecutar el método de RL se puede hacer uso del *software* SPSS del IBM, al cual se le ingresa un valor aproximado al 80% de los movimientos en masa del mapa de inventario compilado, y se selecciona aleatoriamente la misma cantidad de píxeles que no desarrollarán procesos de ladera. Esto, con el objetivo de reservar el 20% restante del inventario para obtener, al final, la capacidad de predicción del modelo.

Realizado lo anterior, se obtiene la información necesaria para la zonificación de la susceptibilidad.

- Mapa de susceptibilidad

En primer lugar, es necesario evaluar el desempeño y predicción de un modelo para realizar su aceptación o rechazo, debido a la presencia de diversos factores que pueden introducir incertidumbre al proceso de evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. Por lo anterior, se introduce el término de desempeño, el cual es definido por la Australian Geomechanics Society, AGC (Fell *et al.*, 2008), como la capacidad del modelo para describir el comportamiento del sistema y su sensibilidad ante cambios en los parámetros de entrada, además de la capacidad para predecir con exactitud los datos observados. Para ello, se implementan los métodos curva de éxito y curva de predicción (Davis *et al.*, 1990; Chung y Fabbri, 2003), área bajo la curva (AUC) (Fawcett, 2006; Carvalho *et al.*, 2014) y matriz de confusión (Chevalier *et al.*, 2013).

Evaluación del modelo de susceptibilidad: se debe analizar el rendimiento y ajuste del modelo con el registro de movimientos en masa utilizado, y con ello determinar si se obtiene un buen desempeño y capacidad de predicción del modelo escogido. Adicionalmente, al modelo definitivo de susceptibilidad por movimientos en masa se le debe calcular la matriz de confusión, que es un procedimiento de validación adicional que brinda la posibilidad de contrastar las observaciones elaboradas en el inventario de movimientos en masa con las predicciones del modelo.

Los aciertos del modelo, es decir, las celdas que este arroja como amenaza alta y que efectivamente en el mapa de procesos así figura, son denominados un “verdadero positivo”. Los “verdaderos negativos”, por su parte, corresponden a las zonas identificadas como de susceptibilidad baja o media por el modelo y que no presentan movimientos en masa en el mapa de procesos.

Entre tanto, el error del modelo se puede evaluar a través de los “falsos positivos”, que son aquellas celdas donde aparecen movimientos en masa en el inventario y que en el mapa obtenido presentan susceptibilidad media o baja. Por último, los “falsos negativos” son aquellas celdas que presentan susceptibilidad media o baja y que cuentan con movimientos en masa según el inventario de procesos.

Análisis del factor detonante lluvia ($P_t|P_t$ y P_t): la precipitación, especialmente en zonas montañosas tropicales, es el principal factor detonante de movimientos en masa (Aristizábal *et al.*, 2011). Para estimar la probabilidad de que el evento de lluvia exceda un umbral crítico definido (P_t), y la probabilidad condicionada de que ocurra un movimiento en masa para el caso en que el umbral de lluvia ($P_t|P_t$) sea superado, se utilizan metodologías empíricas y estadísticas propuestas por autores como Glade *et al.* (2000) y Guo *et al.* (2013), las cuales se basan en inventarios históricos de movimientos en masa y registros históricos de precipitaciones.

Para este análisis se emplean los mismos inventarios históricos de movimientos en masa que fueron utilizados para el mapa de procesos morfodinámicos (DesInventar y SIMMA), mientras que las series de precipitación son construidas a partir de la información disponible en las estaciones meteorológicas del IDEAM presentes en el municipio y sus alrededores, que posean información de precipitación histórica; la selección de las estaciones debe ser realizada a partir de la continuidad de la información y el área de influencia de cada una, que, a su vez, es establecido con ayuda de polígonos de Thiessen.

Para la construcción de la base de datos, dado que es habitual que exista diferencia entre los periodos de actividad de las estaciones, y que, además, puede haber porcentajes altos de datos faltantes en algunas de estas, se puede crear para cada día de registro un solo dato de precipitación, resultado de promediar los valores de lluvia de otras estaciones que tienen información disponible de dicho día, asumiendo así un valor de precipitación constante en todo el municipio.

Posteriormente, se debe determinar, por regiones, el umbral mínimo de lluvia crítico, que representa el valor de precipitación por encima del cual la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa aumenta significativamente, y el umbral máximo de lluvia, que consiste en las condiciones de precipitación, bajo las cuales se ha producido la mayor cantidad de eventos (Glade, 2000). Para ello, se debe realizar un análisis de umbrales de lluvia acumulada (LA), es decir, el valor correspondiente a la precipitación registrada en los días inmediatamente anteriores al evento, y lluvia acumulada antecedente (LAA), que refleja el valor asociado a la lluvia acumulada en las fechas precedentes a los definidos como lluvia acumulada (LA) (Aristizábal *et al.*, 2011).

Se puede realizar la correlación de LA de 1, 3, 5, 7 días y la LAA de 15, 30, 60 y 90 días para cada uno de los días que exista información histórica; a cada uno se le asigna el respectivo número de movimientos en masa ocurridos. Finalmente, se establece una separación entre las precipitaciones que no ocasionaron movimientos en masa de aquellos que ocasionaron uno o más, estableciendo la combinación de LA y LAA que más condiciona el desarrollo de deslizamientos y el umbral de lluvia para cada rango de tiempo en el municipio.

Por último, con LA y LAA determinados, se calcula la probabilidad de ocurrencia del movimiento, dado que el umbral de lluvia crítico de LA y LAA se sobrepasa ($(P_i/P_t) \times P_t$). Los umbrales son usados para construir las curvas de excedencia que permitan calcular la probabilidad de que cierta cantidad de lluvia acumulada en los días definidos por los umbrales sea alcanzada o superada (P_t) y la probabilidad de que suceda un evento cuando dicha cantidad de lluvia acumulada sea alcanzada (P_i/P_t).

- Verificación heurística y mapa de amenaza por movimientos en masa

Ahora bien, con las probabilidades P_s , P_i/P_t y P_t determinadas, se obtiene el nivel de amenaza por movimientos en masa (H), con base en la expresión que las relaciona, la cual fue determinada según la metodología adoptada.

Para la realización del mapa de amenaza, se deben seguir las recomendaciones del Decreto 1807 de 2014; según estas, pendientes con valor inferior a 5° y sin evidencias de susceptibilidad se consideran categoría baja, mientras que las zonas con presencia de procesos activos, se considera en la categoría alta.

Posteriormente, es necesario realizar la verificación heurística, pues dicho mapa es el resultado de la implementación del modelo estadístico, el cual está en función de los datos de entrada y las incertidumbres que presentan cada una de ellas. Considerando esto, se realiza un ajuste heurístico con criterio de expertos, basados en los recorridos de campo y herramientas de sensores remotos como las fotografías aéreas y las ortofotos disponibles. Este ajuste se realiza en las zonas en las que el modelo predijo amenaza baja o media, pero que tienen las condiciones y evidencias manifiestas.

Análisis de la amenaza por sismo en suelo rural: el análisis del sismo como factor detonante de movimientos en masa es realizado a través del método de Newmark, que es un índice que permite entender cómo una pendiente podría comportarse durante un evento sísmico (Jibson *et al.*, 2000). El método requiere evaluar los siguientes parámetros:

Factor de seguridad: Jibson *et al.* (2000) proponen un modelo de equilibrio límite de talud infinito en material friccionante y cohesivo para obtener el factor de seguridad mediante la siguiente relación:

$$FS = \frac{c'}{\gamma t \sin(\theta)} + \frac{\tan(\Phi)}{\tan(\theta)} - \frac{m \gamma_w \tan(\Phi)}{\gamma \tan(\theta)} \quad (9)$$

Donde c' es la variable que representa la cohesión efectiva; Φ , el ángulo de fricción; γ , el peso unitario de los materiales; θ , el ángulo asociado a la pendiente; t , el espesor del suelo normal a la pendiente; γ_w , el peso unitario del agua; y m es la proporción del suelo que está saturado.

Para la obtención de los parámetros, es ideal realizar la obtención primaria de la información, no obstante, en caso de que no sea posible, se puede hacer uso de datos geotécnicos libres, como la base de datos Geotechdata.info que estima valores típicos de los parámetros basados en diversos estudios, teniendo en cuenta diferentes ensayos de laboratorio. Así, a partir del tipo de suelo generado por las unidades geológicas de la zona, según la Unified Soil Classification System (USCS, por sus siglas en inglés) (ASTM D2487-17), se determinan los valores de cohesión c' (kN/m²), fricción Φ' (°), peso unitario γ_d (kN/m³) y permeabilidad k (m/s).

Aceleración crítica (a_c): Newmark (1965) mostró que la aceleración crítica de un bloque que potencialmente se puede deslizar depende del factor de seguridad estático y de la geometría del bloque, expresado como:

$$a_c = (FS - 1)\sin(\theta) \quad (10)$$

Donde a_c es la aceleración crítica en términos de g, la aceleración de la gravedad de la tierra; FS, el factor de seguridad, y θ el ángulo que forma la horizontal con el centro de masa del bloque, que generalmente se aproxima a la pendiente.

Aceleración máxima del terreno (PGA): es la amplitud de la aceleración más grande registrada en un acelerograma en un sitio durante un terremoto en particular. PGA es el parámetro de movimiento más simple a nivel de roca, por lo que no considera las posibles amplificaciones a lo largo del perfil de suelo. Finalmente, a partir de estos parámetros se calculan los desplazamientos de Newmark (Dn) a través de una regresión logarítmica estimada por [Jibson \(2007\)](#):

$$\text{Log } Dn = 0,215 + \log\left[\left(1 - \frac{a_c}{PGA}\right)^{2,341} \left(\frac{a_c}{PGA}\right)^{-1,438}\right] \pm 0,510 \quad (11)$$

Evaluación y zonificación de la amenaza por movimientos en masa en suelos urbanos y de expansión

La evaluación y zonificación de la amenaza en suelos urbanos y de expansión requiere de la obtención de los parámetros geotécnicos de cada uno de los sitios por analizar, los cuales describen las propiedades físicas y mecánicas del suelo, y, además, deben ser integrados como capas por medio de mapas ráster. Para ello, se caracterizan los suelos teniendo en cuenta información, tal como estudios de suelos realizados en el municipio y bibliografía; estos son clasificados y se ajustan según la geología, para acotar los parámetros geotécnicos que se utilizan en el análisis (cohesión c' (kN/m²), ángulo de fricción Φ' (°), peso unitario seco γ_d (kN/m³) y coeficiente de permeabilidad k (m/s)).

Análisis de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia en suelos urbanos y de expansión: para la evaluación de la amenaza en el área urbana y de expansión urbana se implementa el método determinístico y probabilístico con base física denominado *r.slope.stability*, desarrollado por [Mergili et al. \(2014\)](#) como un módulo ráster del *software* de código abierto GRASS GIS ([GRASS Team, 2017](#)). Con este método se modelan dos escenarios de ocurrencia de movimientos en masa: i) deslizamientos superficiales, mediante un análisis determinístico utilizando el modelo de estabilidad de talud infinito, en el cual la superficie de falla se supone planar; y

ii) deslizamientos profundos, mediante un análisis probabilístico, en el cual las superficies de falla son elipsoidales ([Mergili et al., 2014](#)).

El modelo adopta el modelo geotécnico de [Hovland \(1977\)](#), donde cada celda ráster es representada por una columna, la cual posee las características geotécnicas del suelo ingresadas por una serie de mapas ráster. El análisis hidráulico se realiza con el modelo tridimensional desarrollado por [King \(1989\)](#), donde las fuerzas de infiltración trabajan en la dirección del gradiente hidráulico (análisis probabilístico), y las fuerzas de infiltración se consideran paralelas a la superficie, en el caso del análisis determinístico con el modelo de talud infinito.

El modelo probabilístico de *r.slope.stability* se caracteriza por considerar una serie de superficies de falla elipsoidales generadas aleatoriamente; estos elipsoides son restringidos en tamaño (longitud, ancho y profundidad) por el usuario. Cada superficie de falla elipsooidal atraviesa varias columnas (celdas ráster). En cuanto al análisis probabilístico, este utiliza distribuciones de probabilidad de densidad para cada uno de los parámetros geotécnicos (c' , ϕ y profundidad), y determina la probabilidad de falla más alta y el factor de seguridad más bajo para cada columna, calculados con la siguiente ecuación.

$$FS = \frac{\sum(c' \cdot A + (G' \cos\beta_c + N_s)\tan\phi')\cos\beta_m}{\sum(G' \sin\beta_m + T_s)\cos\beta_m} \quad (12)$$

Donde c' es la cohesión efectiva; A, el área de la superficie de falla; G' es el peso del suelo húmedo; β_c , la inclinación de la superficie de falla; ϕ' , el ángulo de fricción interno; β_m , inclinación aparente de la

superficie de falla en la dirección de la ladera (α); N_s y N_t son la contribución de la fuerza de infiltración normal y cortante, respectivamente ([Mergili et al., 2014](#)).

Análisis de la amenaza por sismo en suelos urbanos y de expansión: para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo en áreas urbanas y de expansión, se propone el método pseudoestático. El método se fundamenta en el modelo de talud infinito, en el cual la unidad de análisis es un elemento vertical de ancho b y altura z . El factor de seguridad pseudoestático (F_{ss}) se calcula teniendo en cuenta las condiciones naturales del terreno, más una

fuerza lateral horizontal que actúa sobre la ladera, la cual depende del peso W del elemento vertical y del coeficiente sísmico k (Chowdhury *et al.*, 2009).

El cálculo de F_{ss} se realiza teniendo en cuenta una presión de poros u preevento sísmico, por lo que no se asume un exceso en la presión de poros durante el evento.

$$F_{ss} = \frac{c' + (\gamma z \cos^2 \beta - k\gamma z \sin\beta\cos\beta - u)\tan\phi'}{\gamma z \sin\beta\cos\beta + k\gamma z \cos^2\beta} \quad (13)$$

Donde:

- c' : cohesión efectiva
- z : altura del elemento vertical
- γ : peso específico
- β : pendiente de la ladera
- k : coeficiente sísmico
- ϕ' : ángulo de fricción efectiva
- u : presión de poros

Los valores para el coeficiente sísmico se basan en el análisis de registros históricos (Tabla 2). Para el caso de los municipios del territorio colombiano, se utiliza el k definido por la NSR-10, de acuerdo con el nivel de amenaza.

Tabla 2. Valores coeficiente sísmico k . Modificada de Chowdhury *et al.* (2009).

Severo	$k = 0,1$
Destructivo	$k = 0,25$
Catastrófico	$k = 0,5$

Definición de áreas con condición de riesgo y condición de amenaza

Mediante el cruce de los mapas de amenaza, obtenidos a través de las metodologías presentadas, con la cartografía del catastro municipal, es posible establecer las áreas con condición de riesgo y condición de amenaza, según los criterios mencionados en la normativa nacional.

Áreas con condición de amenaza ACA: de acuerdo con el Decreto 1807 de 2014, las ACA corresponden a aquellas zonas donde no hay elementos expuestos y

zonificadas en los estudios básicos de amenaza como alta y media, que se consideren como objeto de desarrollo. Es importante resaltar, como lo señala este mismo Decreto, que el desarrollo de dichas áreas dependerá de la información obtenida de los estudios detallados.

Áreas con condición de riesgo ACR: de acuerdo con el Decreto 1807 de 2014, las ACR corresponden a las zonas urbanizadas u ocupadas del municipio, catalogadas con amenaza alta; se incluyen también aquellas donde se tenga presencia de infraestructura del sistema vial y de servicios públicos y equipamientos de dotación del sector salud, educación, entre otros. Asimismo, dentro de la categoría de ACR se debe incluir aquellas áreas con amenaza media, donde en la revisión o expedición del POT se proponga una variación de densidad o una modificación en los usos del suelo que pueda ocasionar o acrecentar el riesgo en el área.

Caso de estudio

Las metodologías fueron aplicadas en el municipio de Andes, suroeste del departamento de Antioquia (Figura 1).

En cuanto a la evaluación y zonificación de la amenaza por movimientos en masa, esta fue elaborada a escala 1:10.000, mediante la implementación de métodos estadísticos. Para ello, se utilizaron en total 40 eventos históricos de movimientos en masa y 9 estaciones meteorológicas del IDEAM (Tabla 3). Adicionalmente, dada la homogeneidad en la geomorfología, el municipio fue dividido en zona este y zona oeste.

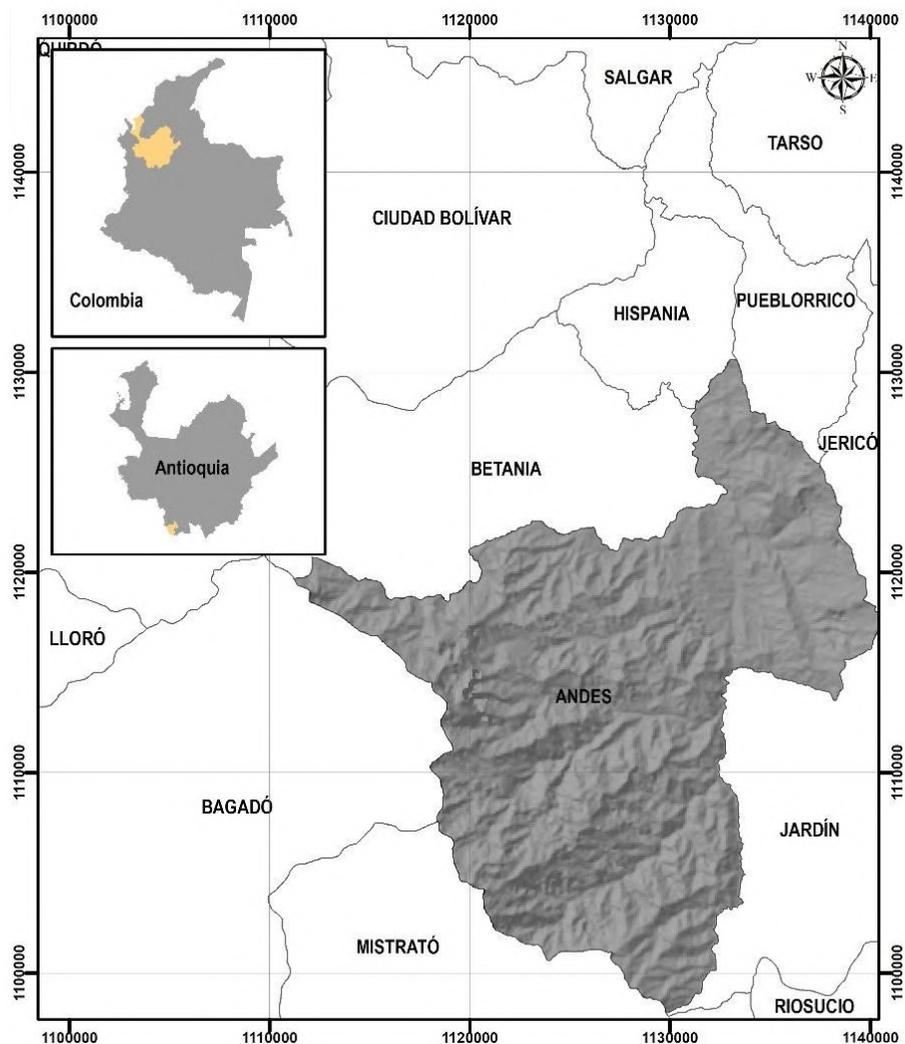


Figura 1. Esquema de localización del área de estudio. Tomada de UNAL (2018).

Tabla 3. Estaciones del IDEAM en el municipio de Andes y municipios cercanos de las cuales se analizan sus series de lluvias para el análisis de esta como detonante de movimientos en masa. Tomada de UNAL (2018).

Nombre de estación [Código]	Ubicación	Categoría	Estado
Campamento [26197010]	Río San Juan, Andes	Hidrológica limnigráfica	Activa
Campamento [26190120]	Río San Juan, Andes	Pluviométrica	Inactiva
ITA Andes [26195020]	Instituto Técnico Agropecuario, Andes	Climatológica ordinaria	Activa
Sta. Bárbara [26190100]	Corregimiento de Santa Inés, Andes	Pluviométrica	Activa
Betania - Volga [26190080]	Betania	Pluviométrica	Inactiva
El Jardín [26165030]	Jardín	Climatológica ordinaria	Activa
Betania - Las Guacas [26190090]	Betania	Pluviométrica	Activa
Pueblorrico [26170150]	Pueblorrico	Pluviométrica	Activa
La Mansa [26190130]	El Carmen, Chocó	Pluviométrica	Inactiva

De acuerdo con las curvas de éxito y desempeño, por el método WoE, se obtuvieron los mejores valores y se logró una mejor aproximación al terreno del territorio para la evaluación de la susceptibilidad (Figura 2). Al mapa obtenido mediante esta metodología se le realizó una clasificación, con el fin de obtener las categorías alta, media y baja. De esta forma, con base en la curva de éxito del modelo, en la categoría alta quedaron el 60% de los movimientos en masa (0-60%); en la media, el 30% (60-90%); y en la baja, el 10% restante (90-100%) (Figura 3).

La Figura 4 corresponde al mapa final de susceptibilidad, el cual, además de estar clasificado en susceptibilidad alta, media y baja, tiene las correcciones de unidad mínima cartografiada recomendadas por el SGC.

El mapa de susceptibilidad obtenido presenta un 36,7% del municipio en susceptibilidad alta, donde se localizan el 61,7% de los movimientos en masa inventariados, con una probabilidad espacial de ocurrencia de 0,0053.

El 52,3% del municipio se encuentra en un grado de susceptibilidad medio, donde se presenta el 32,6% de movimientos en masa, lo cual implica una probabilidad espacial de ocurrencia de 0,0028; y, finalmente, un 11% del área tiene susceptibilidad baja, con el 5,7% de movimientos en masa y probabilidad espacial 0,0015.

Ahora bien, en relación con el análisis de la amenaza con factor detonante lluvia, se obtuvo, utilizando las series de lluvia históricas y probabilidad condicionada, que la probabilidad temporal, dada una lluvia acumulada de tres días de 100 mm y una lluvia antecedente acumulada de 15 días de 200 mm, es de $3,79 \times 10^{-6}$. El mapa de amenaza obtenido, una vez realizado el ajuste heurístico, se muestra en la Figura 5, en donde se obtuvo un 14% del área en amenaza baja, con una probabilidad de $5,74 \times 10^{-9}$; zonas de amenaza media que comprenden el 42,7% del municipio, con una probabilidad de $1,08 \times 10^{-8}$; y un 43,3% del área en amenaza alta, con probabilidad de $2,02 \times 10^{-8}$.

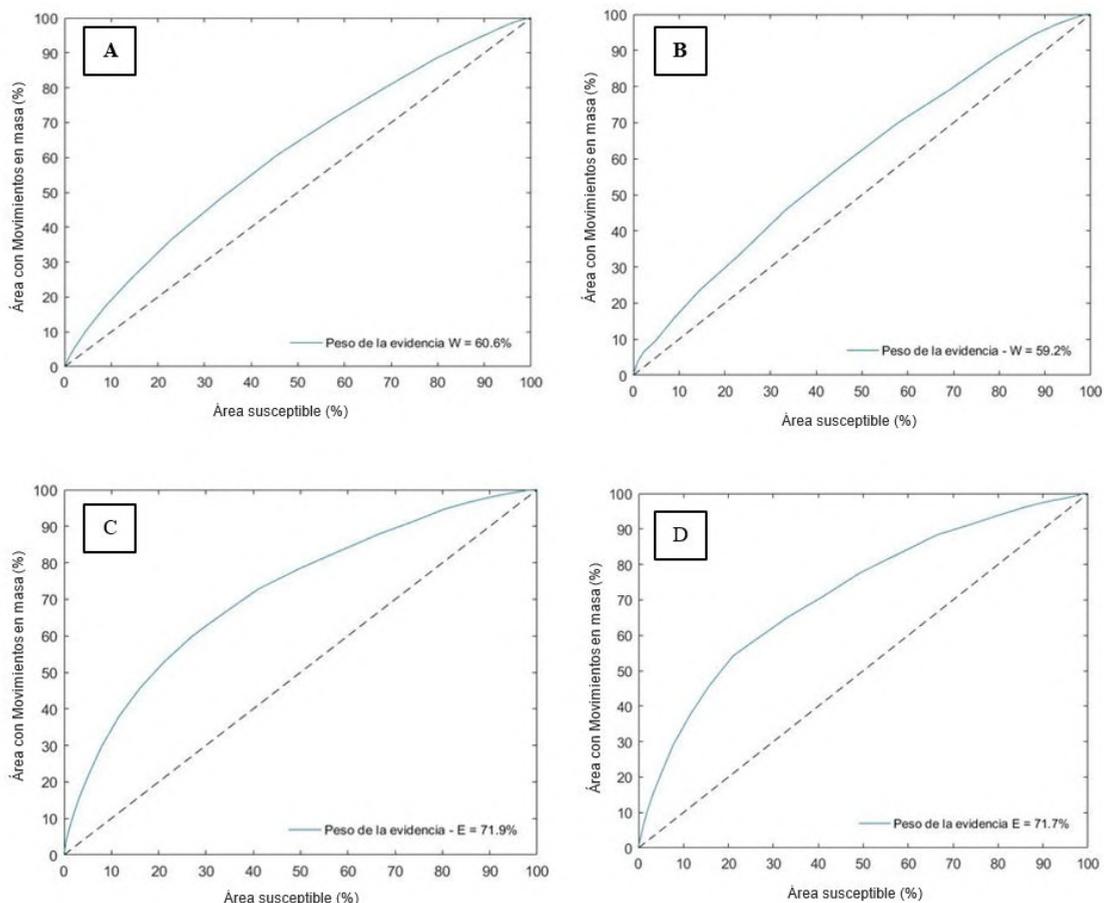


Figura 2. A. Curva y ABC de éxito del modelo WoE para la zona oeste (W). B. Curva y ABC de predicción del modelo WoE para la zona oeste (W). C. Curva y ABC de éxito del método WoE para la zona este (E). D. Curva y ABC de predicción del método WoE para la zona este (E). Tomada de UNAL (2018).

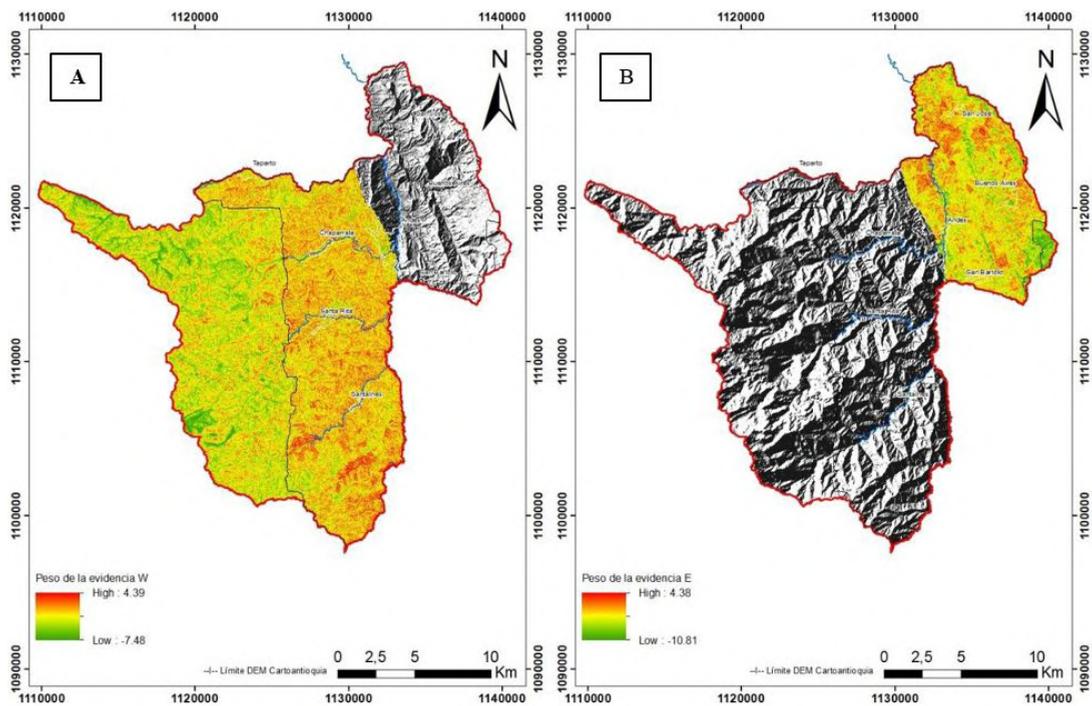


Figura 3. A. Mapa de susceptibilidad por el método WoE, zona oeste de Andes. B. Mapa de susceptibilidad por el método WoE, zona este de Andes. Tomada de UNAL (2018).

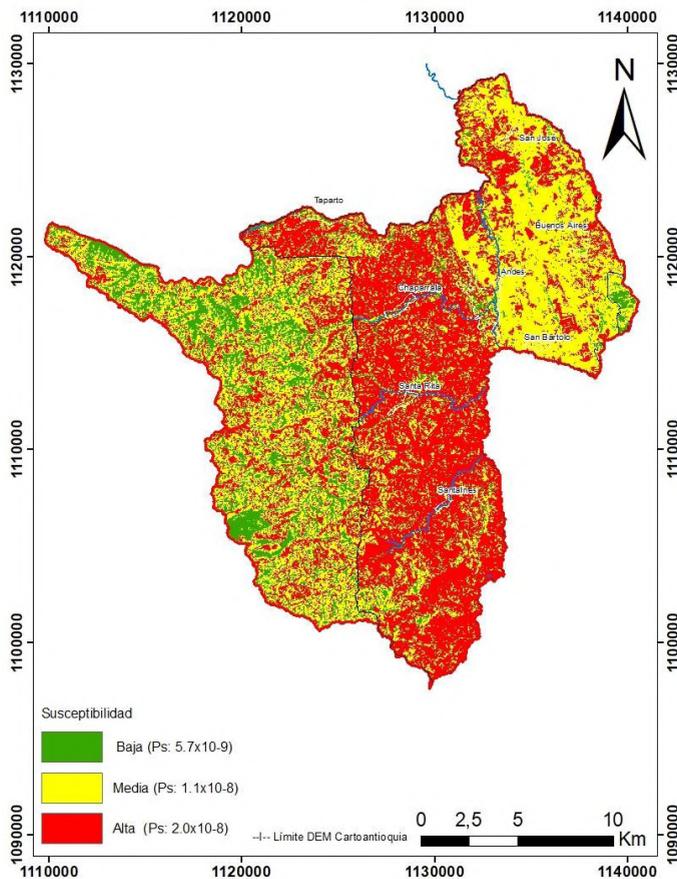


Figura 4. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para el municipio de Andes. Tomada de UNAL (2018).

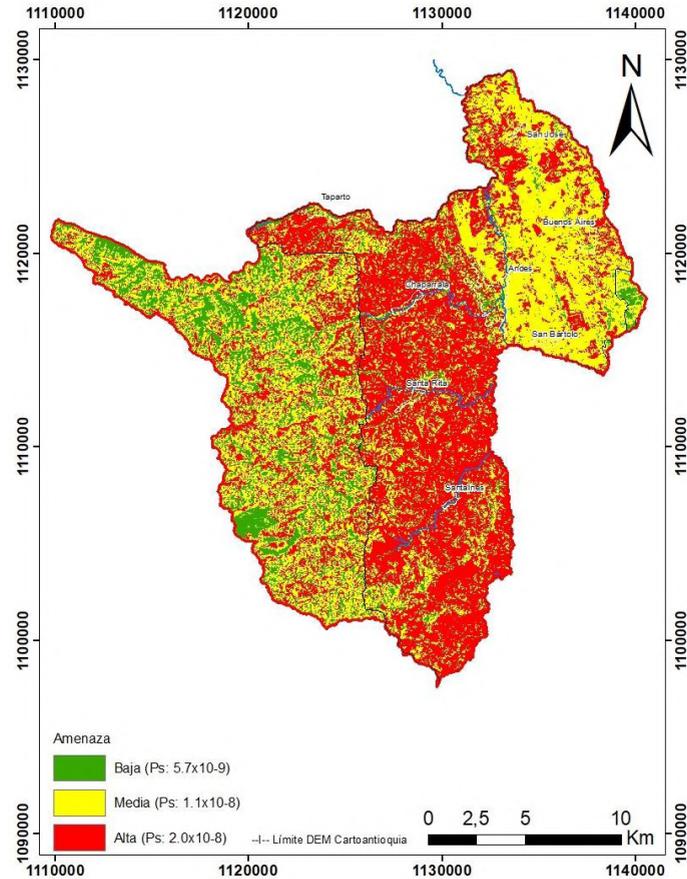


Figura 5. Mapa de amenaza por movimientos en masa para suelo rural del municipio de Andes, bajo factor detonante lluvia, para una lluvia acumulada de tres días de 100 mm y una lluvia antecedente acumulada de 15 días de 200 mm. Tomada de UNAL (2018).

En cuanto al factor detonante sismo para el área rural, la susceptibilidad ante movimientos en masa en suelo rural utilizó el método pseudoestático de Newmark, con dos sismos críticos para el municipio de Andes: el sismo del Eje Cafetero de magnitud 6,5 (MW), a una profundidad

de 64 km, y el sismo de Murindó de 7,1 (MW), a 5 km de profundidad. Los parámetros geotécnicos empleados se muestran en la [Tabla 4](#). El mapa de amenaza en condiciones secas se presenta en la [Figura 6A](#), y en condiciones saturadas en la [Figura 6B](#).

Tabla 4. Parametrización de Newmark para el análisis del factor detonante sismo en área rural. Tomada de UNAL (2018).

Sigla	Nombre	USCS	c' (kN/m ²)	Φ' (°)	Υd (kN/m ³)	k (m/s)
Kaa	Formación Penderisco (Miembro Urrao)	SC	30	30	18	0,00000005
Kvb	Formación Barroso	CL	30	28	23	0
Tcf	Batolito de Farallones	SC	30	30	18	0,00000005
Tmc	Formación Combia	GW	10	35	21	0,0005
Tom	Formación Amagá (Miembro Medio)	SC	30	30	18	0,00000005
Qal	Depósitos Aluviales	SW	10	31	20	0,00001
Qalt	Depósitos Aluviotorrenciales	SW	10	31	20	0,00001
Qfg	Depósito Fluvioglacial	GP	0	35	21	0,05
Qg/Qmg	Depósito de origen glaciar sin diferenciar y morrenas	GP	0	35	21	0,05
Qv	Depósito de vertiente	SM	20	30	20	0,000005

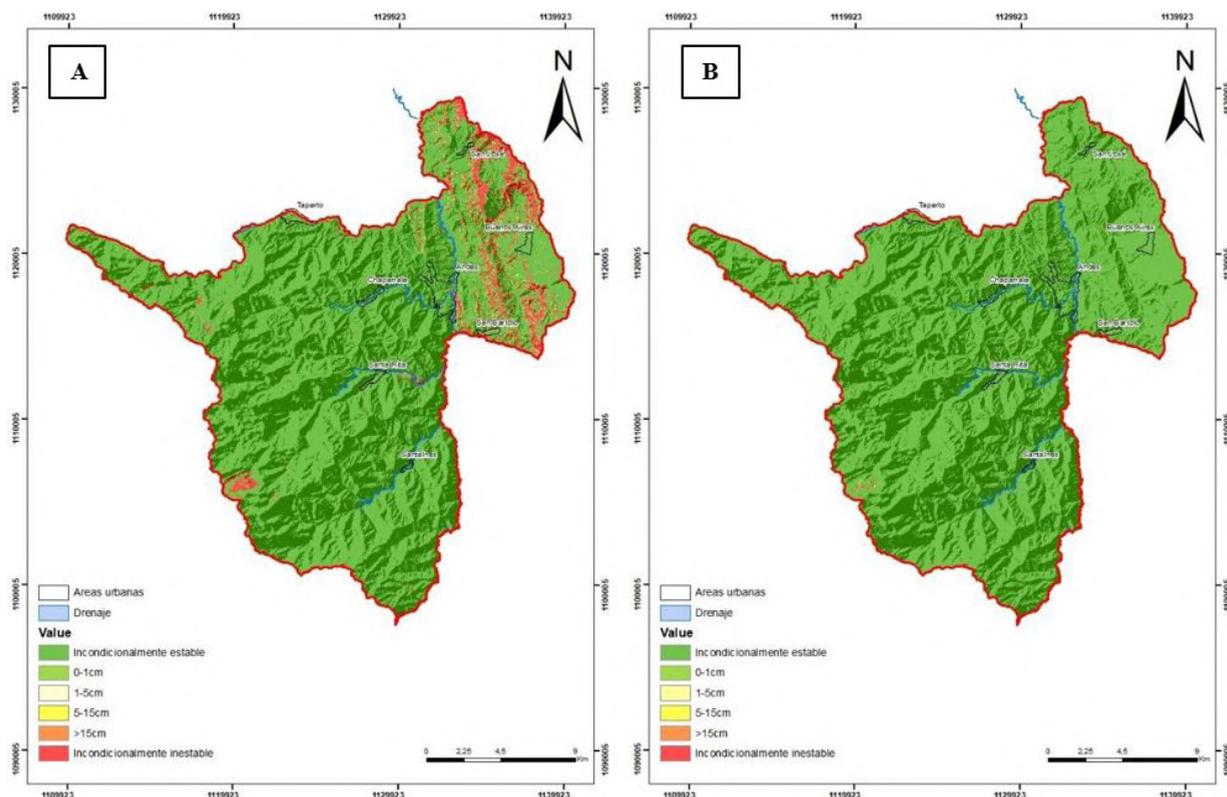


Figura 6. A. Mapa de amenaza por movimientos en masa para suelo rural del municipio de Andes, bajo factor detonante sismo (Murindó), en condiciones saturadas. B. Mapa de amenaza por movimientos en masa para suelo rural del municipio de Andes, bajo factor detonante sismo (Eje Cafetero), en condiciones secas. Tomada de UNAL (2018).

Para el análisis llevado a cabo sobre suelo urbano, de expansión urbana y centros poblados, se implementaron diferentes modelos con base física, de acuerdo con el factor detonante. Para el caso de lluvia, se utilizó el módulo ráster *r.slope.stability* (Mergili *et al.*, 2014), y para el factor detonante sismo se utilizó la metodología del factor de seguridad pseudoestático, que tiene en

cuenta la aceleración horizontal producida por los dos sismos por evaluar: Eje Cafetero y Murindó. Los parámetros geotécnicos empleados en el análisis del casco urbano se muestran en la [Tabla 5](#). El mapa de amenaza en condiciones secas se presenta en la [Figura 7A](#), y en condiciones saturadas en la [Figura 7B](#).

Tabla 5. Valores típicos de parámetros geotécnicos para el casco urbano de Andes. Tomada de UNAL (2018).

USCS	c' (kN/m ²)	Φ' (°)	γ_d (kN/m ³)	k (m/s)
GW	21	10	35	0,0005
SC	18	30	30	0
SW	20	10	31	0,00001
SM	20	20	30	0,000005

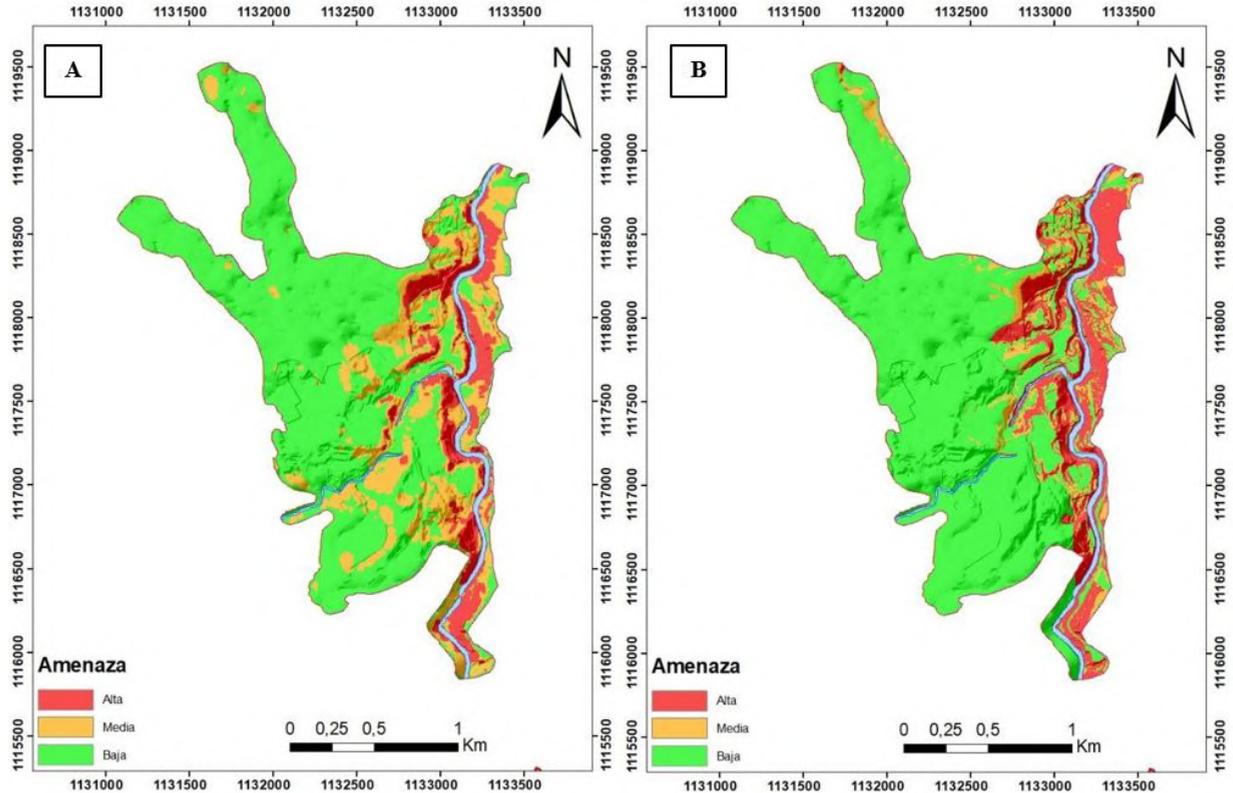


Figura 7. A. Mapa de amenaza por deslizamientos profundos en estado seco detonados por lluvia. **B.** Mapa de amenaza en condiciones saturadas para el sismo del Eje Cafetero en el municipio de Andes. Tomada de UNAL (2018).

Conclusiones

Las metodologías presentadas proveen herramientas de base para analizar la amenaza asociada con los movimientos en masa y su incorporación en los estudios básicos de las municipalidades del territorio colombiano. Estas han sido seleccionadas a partir de las exigencias de la normativa vigente, validadas a través de la aplicación en el caso de estudio presentado para el municipio de Andes, en donde se obtuvieron resultados satisfactorios.

Para evaluar los movimientos en masa y su incorporación en los estudios básicos de amenaza, existen en la literatura diversas metodologías que podrían ser empleadas para tal finalidad, y que además permiten cumplir con los lineamientos establecidos dentro de la normativa colombiana.

En cuanto a la evaluación y zonificación en suelo rural por factor detonante lluvia, es posible usar tres metodologías de análisis independientes: i) el método estadístico multivariado regresión logística, ii) el método del peso de la evidencia y iii) un método híbrido entre el peso de la evidencia y el método

heurístico análisis jerárquico de procesos. No obstante, la selección del modelo para la evaluación final de la amenaza puede ser realizada a partir de la evaluación del desempeño y predicción de cada uno de los métodos estudiados, de los cuales se selecciona el que mejores valores obtenga, con mayor aproximación al territorio.

El análisis de la amenaza por sismos en el suelo rural, por su parte, puede ser realizado a partir del método de Newmark (1965), el cual permite analizar el comportamiento de una pendiente ante un evento sísmico. Derivado de este método, también es posible estudiar aspectos propios de los elementos de análisis (taludes y suelo) como el factor de seguridad y las aceleraciones críticas y máxima del terreno.

Es conveniente que el análisis de la amenaza por lluvia en suelos urbanos y de expansión sea realizado a partir de un método con base física, determinístico y probabilístico (*r.slope.stability*), en donde se modelen tanto deslizamientos profundos como superficiales. No obstante, para el análisis de la amenaza por sismo, en este mismo tipo de suelos, es posible implementar un método pseudoestático fundamentado en el modelo de talud infinito.

Sin embargo, el éxito en los resultados no solo depende de la metodología utilizada, sino también de la calidad de la información de entrada y de la revisión heurística del grupo de trabajo, pues este componente debe ser transversal en este tipo de estudios, con el fin de proveer un método de validación adicional de los resultados.

Agradecimientos

Un agradecimiento a la Alcaldía del Municipio de Andes, Colombia, quien permitió presentar los resultados del proyecto desarrollado en su territorio por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Referencias

- Aleotti, P.; Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- 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. *Revista EIA*, 15, 95-111.
- ASTM D2487-17. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- Atkinson, P.; Jiskoot, H.; Massari, R.; Murray, T. (1998). Generalized linear modelling in geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(13), 1185-1195. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199812\)23:13<1185::AID-ESP928>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199812)23:13<1185::AID-ESP928>3.0.CO;2-W)
- Ayalew, L.; Yamagishi, H.; Ugawa, N. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1(1), 73-81. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0006-9>
- Ayalew, L.; Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Barredo, J.; Benavides, A.; Hervás, J.; van Westen, C.J. (2000). Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(1), 9-23. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85022-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85022-9)
- Canli, E.; Mergili, M.; Thiebes, B.; Glade, T. (2018). Probabilistic landslide ensemble prediction systems: Lessons to be learned from hydrology. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2183-2202. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2183-2018>
- Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3), 403-426. <https://doi.org/10.1007/BF01031290>
- Carvalho, L.F.; Fernandes, G.; de Assis, M.V.O.; Rodrigues, J.J.P.C.; Lemes Proença, M. (2014). Digital signature of network segment for healthcare environments support. *IRBM*, 35(6), 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2014.09.001>
- Chacón, J.; Irigaray, C.; Fernández, T.; El Hamdouni, R. (2006). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), 341-411. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0064-z>
- Chevalier, G.G.; Medina, V.; Hürlimann, M.; Bateman, A. (2013). Debris-flow susceptibility analysis using fluvio-morphological parameters and data mining: Application to the Central-Eastern Pyrenees. *Natural Hazards*, 67(2), 213-238. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0568-3>
- Chowdhury, R.; Flentje, P.; Bhattacharya, G. (2009). *Geotechnical slope analysis*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203864203>
- Chung, C.J.F.; Fabbri, A.G. (2003). Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451-472. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b>

- Corominas, J.; Moya, J.; Ledesma, A.; Lloret, A.; Gili, J.A. (2005). Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides*, 2(2), 83-96. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0049-1>
- Corominas, J.; van Westen, C.; Frattini, P.; Cascini, L.; Malet, J.P.; Fotopoulou, S.; Catani, F.; Van Den Eeckhaut, M.; Mavrouli, O.; Agliardi, F.; Pitilakis, K.; Winter, M.G.; Pastor, M.; Ferlisi, S.; Hervás, J.; Smith, J.T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Dahal, R.K.; Hasegawa, S. (2008). Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100(3-4), 429-443. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.014>
- Dai, F.C.; Lee, C.F.; Li, J.; Xu, Z.W. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3), 381-391. <https://doi.org/10.1007/s002540000163>
- Davis, P.A.; Price, L.L.; Wahi, K.K.; Goodrich, M.T.; Gallegos, D.P.; Bonano, E.J.; Guzowski, R.V. (1990). Components of an overall performance assessment methodology. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA). Div. of High-Level Waste Management; Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA); GRAM, Inc., Albuquerque, NM (USA); Science Applications International Corp., Albuquerque, NM (USA). <https://doi.org/10.2172/7262608>
- Decreto 1807 de 2014. 19 de Septiembre de 2014. Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Vivienda, Colombia.
- Erener, A.; Düzgün, H.B.S. (2013). A regional scale quantitative risk assessment for landslides: Case of Kumluca watershed in Bartın, Turkey. *Landslides*, 10(1), 55-73. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0317-9>
- Ermini, L.; Catani, F.; Casagli, N. (2005). Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66(1-4), 327-343. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.025>
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861-874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z. (2008). Guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- Glade, T. (2000). Modelling landslide-triggering rainfalls in different regions of New Zealand-The Soil Water Status Model. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 122, 63-84.
- Glade, T.; Crozier, M.; Smith, P. (2000). Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". *Pure and Applied Geophysics*, 157(6-8), 1059-1079. <https://doi.org/10.1007/s000240050017>
- Godt, J.W.; Baum, R.L.; Savage, W.Z.; Salciarini, D.; Schulz, W.H.; Harp, E.L. (2008). Transient deterministic shallow landslide modeling: requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Engineering Geology*, 102(3-4), 214-226. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.019>
- Gorsevski, P.V.; Gessler, P.; Foltz, R.B. (2000). Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS. *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: applications for the 21st Century*, Denver, Colorado.
- Gorsevski, P.V.; Gessler, P.E.; Foltz, R.B.; Elliot, W.J. (2006). Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis. *Transactions in GIS*, 10(3), 395-415. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2006.01004.x>
- GRASS Team. (2017). GRASS Development Team 2011. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://grass.osgeo.org/>

- Gruber, S.; Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. *Developments in Soil Science*, 33, 171-194. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00007-X)
- Guo, X.; Cui, P.; Li, Y. (2013). Debris flow warning threshold based on antecedent rainfall: a case study in Jiangjia Ravine, Yunnan, China. *Journal of Mountain Science*, 10(2), 305-314. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2521-z>
- Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Hovland, H.J. (1977). Three-dimensional slope stability analysis method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 103, 693-395. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000493>
- Jibson, R.W.; Harp, E.L.; Michael, J.A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58(3), 271-289. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00039-9)
- Jibson, R.W. (2007). Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91(2-4), 209-218. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.013>
- Jones, K.H. (1998). A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. *Computers & Geosciences*, 24(4), 315-323. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(98\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(98)00032-6)
- King, G.J.W. (1989). Revision of effective-stress method of slices. *Géotechnique*, 39(3), 497-502. <https://doi.org/10.1680/geot.1989.39.3.497>
- Lee, S.; Ryu, J.H.; Won, J.S.; Park, H.J. (2004). Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*, 71(3-4), 289-302. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00142-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00142-X)
- Lee, S. (2005). Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), 1477-1491. <https://doi.org/10.1080/01431160412331331012>
- Lee, S.; Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33-41. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y>
- Lee, C.T.; Huang, C.C.; Lee, J.F.; Pan, K.L.; Lin, M.L.; Dong, J.J. (2008). Statistical approach to storm event-induced landslides susceptibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(4), 941-960. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-941-2008>
- Mergili, M.; Marchesini, I.; Rossi, M.; Guzzetti, F.; Fellin, W. (2014). Spatially distributed three-dimensional slope stability modelling in a raster GIS. *Geomorphology*, 206, 178-195. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.008>
- Newmark, N.M. (1965). Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Géotechnique*, 15(2), 139-160. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>
- Oh, H.J.; Lee, S. (2011). Landslide susceptibility mapping on Panaon Island, Philippines using a geographic information system. *Environmental Earth Sciences*, 62(5), 935-951. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0579-2>
- Olshausen; B.A. (2004). Bayesian probability theory. The Redwood Center for Theoretical Neuroscience, Helen Wills Neuroscience Institute at the University of California at Berkeley, Berkeley.
- Ozdemir, A.; Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180-197. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.12.014>
- Pack, R.T.; Tarboton, D.G.; Goodwin, C.N. (1998). The SINMAP approach to terrain stability mapping. *8th Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver, Canada.
- Regmi, N.R.; Giardino, J.R.; Vitek, J.D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado,

- USA. *Geomorphology*, 115(1-2), 172-187. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.002>
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill International Book Co.
- Saaty, T.L. (2001). The seven pillars of the analytic hierarchy process. In: M. Köksalan, S. Zionts (eds.). *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium* (pp. 15-37). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56680-6_2
- SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa Escala 1: 25 000. 1-160. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>
- Soeters, R.; van Westen, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. In: A.K. Turner, R.L. Schuster (eds.). *Landslide: Investigations and Mitigation (Transportation Research Board, National Research Council)* (pp. 129-177). Special Report, 247. National Academy Press.
- Sujatha, E.R.; Kumaravel, P.; Rajamanickam, G.V. (2014). Assessing landslide susceptibility using Bayesian probability-based weight of evidence model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(1), 147-161. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0537-9>
- Süzen, M.L.; Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: A method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71(3-4), 303-321. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00143-1)
- UNAL. (2018). Estudio básico de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en el municipio de Andes, como base para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial. Medellín.
- van Westen, C.J. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. PhD Thesis, Delft University of Technology.
- van Westen, C.J.; Rengers, N.; Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30(3), 399-419. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e>
- van Westen, C.J.; Castellanos, E.; Kuriakose, S.L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3-4), 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Unesco.

Fecha de recibido: 13 de septiembre de 2020
Fecha de aprobado: 02 de septiembre de 2022
