

A methodological proposal for landslide susceptibility mapping in linear projects: A study case, Medellin – Turbo highway, Section 2

Johanna Andrea Jiménez & Edier Aristizábal

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jajimenez@unal.edu.co, evaristizabal@unal.edu.co

Received: May 08th, 2017. Received in revised form: November 11th, 2017. Accepted: December 13th, 2017.

Abstract

Although in the literature there are several methods for the determination landslide susceptibility, very few consider the particularities of linear projects. In the present work, it is proposed the combination of heuristic, statistical and physically based modeling methods to evaluate and mapping landslide susceptibility in linear projects, considering regional and local scales. For the regional zoning, the conditional analysis method using Unique Condition Unit (UCU) is proposed, and for local scale physical models: SHALSTAB for soil slopes and the TOBIA index for rock slopes. The validation of the methodology was performed by the area under the curve (AUC) method. The result indicates an adequate performance, and the obtaining of valuable information prior to the construction of the project, but also during the operation, allowing to define sectors of special attention considering the scale of the project.

Keywords: Landslide; linear projects; Shalstab; heuristic; susceptibility.

Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: Caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo

Resumen

Aunque en la literatura existen diferentes métodos para la determinación de la susceptibilidad por movimientos de masas, pocos han considerado las particularidades de los proyectos lineales. En el presente trabajo se propone la combinación de métodos heurísticos, estadísticos y modelación física para evaluar y zonificar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales, teniendo en cuenta su escala regional y local. Para la zonificación regional se propone el método de Análisis Condicional, y para la zonificación local modelos con base física: el método de SHALSTAB para laderas en suelo, y el índice de TOBIA para laderas en roca. La validación de la metodología fue realizada utilizando la Curva de Éxito y el área bajo la curva (AUC). Los resultados arrojan un adecuado desempeño de los modelos implementados, y la obtención de valiosa información necesaria previa a la construcción del proyecto y operación, permitiendo definir sectores críticos.

Palabras clave: Movimientos en masa; proyectos lineales; Shalstab, heurístico; susceptibilidad.

1. Introducción

Los movimientos en masa son una de las principales causas de pérdidas económicas y humanas alrededor del mundo, principalmente en zonas de montaña y ambientes tropicales [1,2]. Gran parte de estas pérdidas se presentan a lo largo de infraestructuras lineales para el transporte de productos y servicios públicos, especialmente en vías [3].

Colombia cuenta con una red vial de 166.233 km de longitud, de los cuales 16.786 km corresponden a la red primaria, 66.082 km pertenecen a la red secundaria, y 74.746 km pertenecen a la red terciaria [4]. En los últimos 40 años se han registrado cerca de 75 mil kilómetros de vías afectadas, donde el 52% de los registros se relacionan con movimientos en masa [5]. Solo en los años 2010-2011 durante el fenómeno de La Niña, que golpeó gran parte del

How to cite: Jiménez, J.A. and Aristizábal, E., Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 14-23, Enero, 2018.

territorio colombiano, 1600 km de infraestructura vial fueron afectados, de los cuales el 9,7% correspondió a la red primaria, el 24,7% a la red terciaria y el 0,9% a la red concesionada [4]. Un indicador de la magnitud de la problemática en Colombia es que las mayores inversiones públicas para la reducción del riesgo se realizan por parte del INVIAS, del orden de US\$350 millones en promedio anual entre el periodo 1999-2008, superado solo por las Corporaciones Autónomas Regionales para la conservación de cuencas [5]. Sin embargo, aunque la reconstrucción de un kilómetro de vía puede valer hasta cinco veces el costo de realizar un buen mantenimiento preventivo [6], el 91% de las inversiones se destina a la atención y rehabilitación de vías y solo el 9% se invierte en la prevención [7].

Una de las medidas más importantes para la prevención y reducción de pérdidas por movimientos en masa se refiere a la zonificación de la susceptibilidad y amenazas del territorio. Estos mapas, para el caso de proyectos de infraestructura vial, permiten no solo un trazo y diseño que consideren las restricciones del territorio a intervenir, sino además identificar los sectores de mayor criticidad y que requieren atención especial durante la operación.

Los métodos de evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa se dividen en métodos directos o cualitativos y métodos indirectos o cuantitativos [8-12].

Los métodos directos-cualitativos están basados enteramente en el criterio y evaluación de un experto para definir el grado de susceptibilidad, y comprenden los métodos de cartografía geomorfológica directa [13], análisis jerárquico [14], y ponderación de mapas [15]. Aunque permiten incorporar en el análisis una gran cantidad de variables complejas, en muchos casos no cartografiables, son 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 los factores de causa [10]. Se pueden utilizar cuando no existen inventarios de movimientos en masa y se recomiendan a escalas nacionales o regionales [10].

Los métodos indirectos-cuantitativos utilizan expresiones matemáticas objetivas produciendo factores de seguridad o probabilidades de la ocurrencia de movimientos en masa, correlacionando las causas y el inventario de eventos disponible [9,10]. Estos métodos están generalmente agrupados en métodos estadísticos y métodos determinísticos o con base física. Los métodos con base física utilizan modelos matemáticos geotécnicos, y en algunas ocasiones son acoplados con modelos hidrológicos, para estimar el factor de seguridad de cada unidad de análisis [16,17]. Generalmente utilizan el criterio de falla de Mohr-Coulomb y análisis de equilibrio límite mediante la ecuación de talud infinito, la cual permite ser implementada para regiones específicas utilizando sistemas de información geográfica y mapas con grillas regulares tipo raster [18]. A su vez, los métodos estadísticos establecen relaciones funcionales entre factores de inestabilidad y la distribución pasada y presente de los movimientos en masa. Estas relaciones generalmente corresponden a funciones de densidad de movimientos en

masa que pueden ser establecidas para cada factor individual, denominados métodos estadísticos bivariados, o relaciones combinadas entre una variable dependiente (ocurrencia de movimientos en masa) y variables independientes (factores de causa), denominados métodos estadísticos multivariados [10]. Aunque estos métodos se han convertido de amplia aplicación a escalas regionales, exigen tener un exhaustivo inventario de movimientos en masa. Entre los métodos estadísticos bivariados se destacan Radio de Frecuencia [19], Índice Estadístico [20], Peso de la Evidencia [21,22], Funciones de Favorabilidad [20]. Los métodos multivariados de mayor uso son Análisis Discriminante [23], Regresión Logística [14], y Análisis Condicional [24,25].

Adicional a la definición del método, la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza requiere la selección con anterioridad de la unidad de análisis [26,10,27]. Hansen [28] define la unidad de análisis como una porción de terreno que contiene un conjunto de condiciones que difieren de la unidad adyacente a lo largo de límites diferenciados. En la mayoría de casos por su facilidad de manejo en sistemas de información geográfica se selecciona el uso de mallas de celdas tipo raster [15]; sin embargo, existen otras unidades de análisis, tales como: Unidad de Terreno [29], Unidad de Laderas [15], y Unidad de Condiciones Únicas (UCU) [30].

Aunque las diferentes metodologías de evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza, al igual que las unidades de análisis, son recurrentemente implementadas para proyectos lineales; en realidad estas no han sido acondicionadas para este tipo de proyectos, lo que trae consigo una serie de dificultades durante su implementación, y posteriormente durante la definición de medidas de mitigación. La principal diferencia y dificultad se refiere a la escala de trabajo. Los proyectos lineales se caracterizan por tener una escala longitudinal al proyecto, que puede ser considerada de nivel regional (1:100.000 – 1:25.000), mientras que perpendicular al proyecto se requiere una escala detallada generalmente (<1:10.000), a nivel de ladera o talud. En términos de gestión del riesgo, las diferencias de escala exigen un mapa a escala regional para identificar los sectores críticos del proyecto, y otro mapa a escala local que permita identificar las laderas o taludes con mayor inestabilidad.

Considerando por lo tanto la grave problemática de los proyectos lineales, específicamente sobre las vías, y la necesidad de metodologías que consideren las particularidades de este tipo de proyectos, el presente trabajo propone la combinación de métodos heurísticos, estadísticos y con modelación física para evaluar y zonificar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a lo largo de proyectos lineales. Para la zonificación regional se propone el método de Análisis Condicional, el cual utiliza como unidad de análisis la UCU, y para el análisis local se utilizan dos métodos con base física: el método SHALSTAB [18] para laderas en suelos, y el índice de TOBIA [31] para laderas en roca. Utilizando en ambos como unidad de análisis la malla de celdas regulares. La combinación de ambos análisis permite establecer un mapa de unidad de laderas críticas a lo largo del proyecto lineal. Para la verificación del

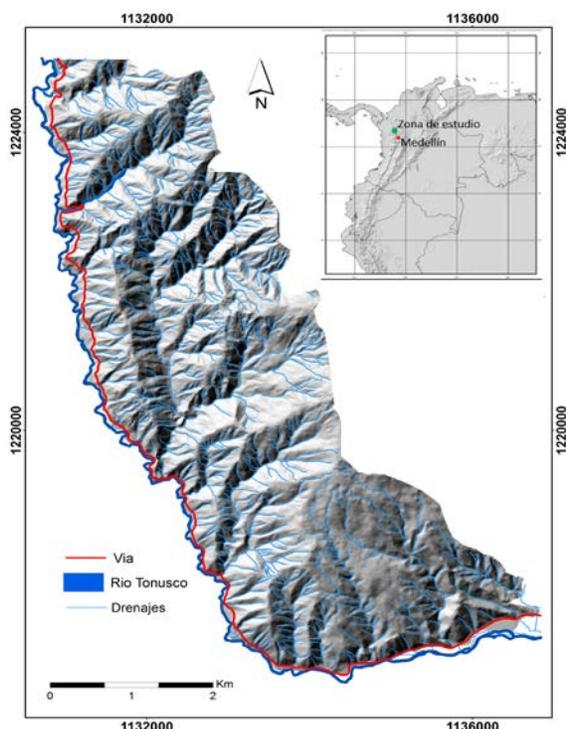


Figura 1. Localización de la zona de estudio.
Fuente autores.

desempeño y coherencia del modelo propuesto se utilizan las curvas de éxito y el área bajo la curva (AUC) propuestos por Chung & Fabbri [19]. El método es implementado en el Tramo 2 de la vía que comunica la ciudad de Medellín con el mar caribe, sobre el noroccidente de los Andes colombianos.

2. Zona de estudio

El área de estudio, con un área aproximada de 22.14 km², corresponde al Tramo 2 del proyecto de las Autopistas de Cuarta Generación (4G) en la cordillera occidental de los Andes Colombianos, a una altura que varía desde 570 a 1740 m sobre el nivel del mar, y que comunica la ciudad de Medellín con el mar Caribe. (ver Fig. 1). La vía del presente estudio corresponde al trazo inicialmente considerado en los diseños paralelo al río Tonusco sobre la margen occidental. Sin embargo el trazo fue modificado sobre la margen oriental del río y no corresponde al trazo del presente estudio.

La temperatura promedio de la zona se encuentra alrededor de los 27°C, con precipitación media anual de 1,100 mm, y factor de erosividad de $3.128 \pm [(KJ/m^2)(mm/h)/año]$ [32]. La topografía es típica de zonas montañosas, con fuertes pendientes y relieve relativo alto, con alta densidad de drenajes cubiertos en su mayoría por vegetación de bosque seco [33, 34].

Geológicamente en el área afloran horizontes de meteorización IB - IC a partir de rocas de la Formación Barroso definida por Álvarez y Gonzales [35] constituido por: derrames lávicos basálticos y andesíticos intercalados con tobas, aglomerados y paquetes sedimentarios; el Batolito

de Sabanalarga descrito por Hall et al., [36] y Gonzales et al., [37] formado por vulcanitas de arco correspondiente a la formación barroso y bloques de chert-caliza, litoarenita-lodolitas intercalados con diabasas y lavas almohadilladas.

3. Metodología

El método propuesto se fundamenta en la combinación de diferentes métodos de zonificación, que se ajustan de forma eficiente a las necesidades de escala regional y local que este tipo de proyectos demanda. Por lo que se ejecutan de manera secuencial, y basado en diferentes unidades de análisis del territorio (Fig. 2).

Inicialmente el análisis heurístico es utilizado para generar el inventario de movimientos en masa y para definir las Unidades de Ladera, las cuales permiten obtener un mapa final para la gestión del riesgo que logre identificar los sectores de mayor criticidad. El inventario de movimientos en masa además de permitir implementar el análisis estadístico para evaluar y zonificar la probabilidad espacial de la ocurrencia de movimientos en masa, permite validar cuantitativamente el desempeño y robustez del modelo.

Para el inventario de movimientos en masa se utilizaron fotografías aéreas del año 2010 y a escala 1:10.000, con un exhaustivo trabajo de verificación y levantamiento de campo. Para cada movimiento en masa fue diferenciado la corona y el cuerpo del movimiento en masa. Para el análisis estadístico sólo se utilizó la corona del movimiento en masa. El cuerpo no fue considerado ya que no representa las condiciones originales asociadas a la ocurrencia del movimiento en masa [40].

A partir del inventario de movimientos en masa y con el fin de obtener las condiciones de susceptibilidad del área de influencia del proyecto, se realizó un análisis estadístico multivariado, a partir del método denominado Análisis Condicional definido por Clerici et al. [25] y De Graff et al. [24]. El Análisis Condicional utiliza como subdivisiones del terreno las UCU's (30). Las cuales se determinan subdividiendo cada variable condicionante en clases, para posteriormente ser cruzadas y obtener todas las posibles combinaciones de clases, es decir las UCU's [38]. La probabilidad espacial de la ocurrencia de un movimiento en masa (L), dada una combinación única de clases (UCU) está dada por la densidad de los movimientos en masa en la UCU [25].

$$P(L/UCU) = \text{área de los movimientos en masa} / \text{área de la UCU}$$

De acuerdo con las condiciones de escala de los proyectos lineales, es necesario además realizar una zonificación a escala local, donde se incluya un análisis considerando el tipo de material de las laderas o taludes del proyecto: roca o suelo. De acuerdo con Sarkar et. al., [38] y Coast et. al., [39] el método SHALSTAB [19] es un método ampliamente utilizado, con excelente precisión y rápido para evaluar la estabilidad por deslizamientos superficiales planares detonados por lluvia en suelo. Para su desarrollo se utilizan los parámetros que caracterizan el comportamiento

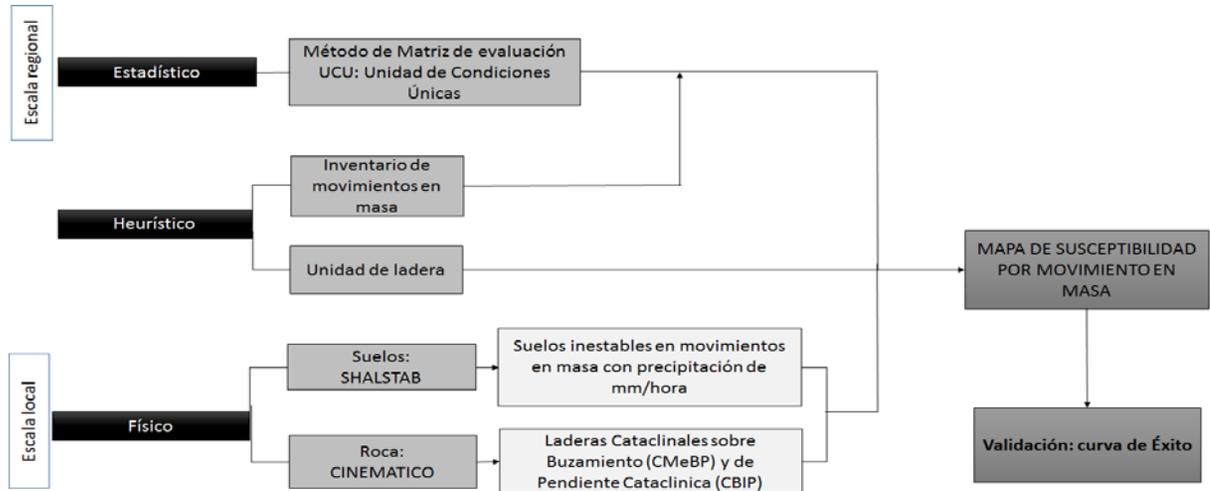


Figura 2. Esquema de metodología. Fuente autores.

Tabla 1. Parámetros geomecánicos del suelo donde: C, cohesión; γ , peso unitario; ϕ , ángulo de fricción; K, permeabilidad; L, espesor del suelo. Fuente autores.

Litología	C (KN/m ²)	γ (KN/m ³)	ϕ (rad)	K (cm/h)	L (m)
Deposito Aluvial	4	21	0.61	1.2	12.5
Deposito. Vertiente	21.3	19	0.59	0.06	15
Terraza Aluvial	43	14	0.4	0.06	2
SR. Fm. Barroso	28	21	0.06	0.06	4
SR. Bat. Sabanalarga	9	22	0.52	1.2	10

Fuente autores.

geomecánico de los materiales, específicamente: cohesión, fricción, peso unitario del suelo, permeabilidad, profundidad del suelo residual y datos de precipitación (ver Tabla 1.). El modelo permite evaluar diferentes condiciones de lluvia o eventos detonantes. Para el caso de la zona de estudio se utilizó una intensidad de 30mm/h, con un periodo de retorno de 10 años de acuerdo con la curva IDF de Páez, E. & Barreiro, H., [41].

Para calcular la susceptibilidad a deslizamientos planares en rocas, se utilizó el método cinemático a través del índice de TOBIA [42]. Este método relaciona las estructuras geológicas que caracterizan el macizo rocoso (diaclasas, estratificaciones, falla) con el aspecto y pendiente de la ladera. Las laderas Anaclinales se caracterizan por tener la dirección de buzamiento de las estructuras formando un ángulo de 180 grados con el aspecto de la ladera. Las laderas Ortoclinales tienen la dirección de buzamiento ortogonal al aspecto de la ladera; y laderas Cataclinales la dirección de buzamiento de las estructuras es paralelo al aspecto de la ladera. Las laderas Cataclinales, que por sus características son las más susceptibles a causar deslizamientos planares en roca, se subdividen en: Cataclinal de menor buzamiento a la

pendiente (CMeBP), Cataclinal de buzamiento igual a la pendiente (CBIP) y Cataclinal de mayor buzamiento a la pendiente (CMeBP). Las CMeBP y CBIP se consideran de mayor susceptibilidad a generar deslizamientos planares de roca. A partir de datos de familias de diaclasas de la zona de estudio suministrados por Consorcio Antioquia al mar [33], se utilizaron 3 familias de diaclasa (F1:N50E/ 65SE, F2: N60W/63SW, F3: N30E/65NW). Para cada familia de diaclasa se realizó un mapa cinemático identificando los tipos de laderas (Anaclinal, Cataclinal y Ortoclinal), y se seleccionaron las laderas de mayor susceptibilidad: CMeBP y CBIP.

Con el fin de identificar los sectores de mayor criticidad, los resultados del mapa por el método estadístico de Análisis Condicional se combinan con los mapas generados por los modelos SHALSTAB e Índice de Tobia. Para esto se utiliza como unidad de análisis la Unidad de Ladera, utilizada en múltiples estudios de susceptibilidad y amenaza, y que representan de una forma más adecuada la física de la problemática involucrada en la ocurrencia de este tipo de eventos [43]. Para cada unidad de ladera se calculó el grado de criticidad que varía entre 1-100 a partir del número de celdas con susceptibilidad alta del método estadístico, las zonas inestables producto del método SHALSTAB, y las ladera CMeBP y CBIP de acuerdo con el Índice de Tobia.

Para evaluar el desempeño y robustez del modelo se utilizó la Curva de Éxito para el mapa de susceptibilidad y el mapa de unidad de laderas críticas [20]. La curva de éxito consiste en un criterio independiente de los rangos y valores de corte seleccionados. El eje Y representa el porcentaje de celdas correctamente clasificadas, y el eje X el porcentaje de área clasificada inestable. El Área bajo la Curva de Éxito (AUC) es utilizado como una medición para evaluar la calidad total del modelo [44]. Entre mayor sea el área bajo la curva, en un rango de 0 a 1, se considera mejor el desempeño del modelo.

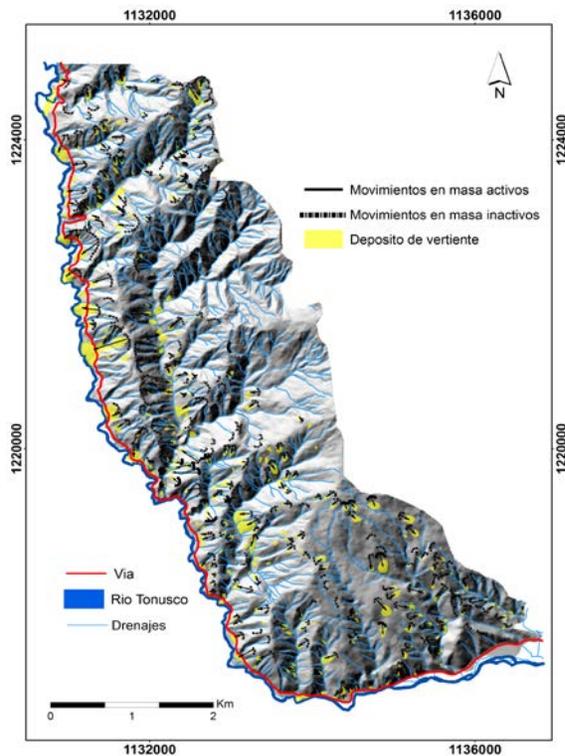


Figura 3. Inventario de movimientos en masa. Fuente autores.

3. Resultados

La Fig. 3 presenta el inventario de movimientos en masa elaborado mediante fotointerpretación y trabajo de campo. Se identificaron 286 movimientos en masa que ocupan un porcentaje de 4.12% del área total. En el inventario predominan los movimientos activos con un 10% y los inactivos con 90%, con una densidad aproximada de 13 movimientos en masa/km². El 17% afectan de forma directa la vía y 83% indirectamente.

La Fig. 4 presenta el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa a partir del método estadístico. El 18% del área total de la zona se clasifica como susceptibilidad muy alta y ocupa 4.1 km². Contiene 87 movimientos en masa inventariados que ocupan 0.2 km² de esta zona. Tiene una densidad de 21 movimientos en masa/km² con una probabilidad espacial de 0.04. La zona de susceptibilidad alta ocupa un área total de 10.5 km², que corresponde al 47% de la zona de estudio. Se ubican 149 movimientos en masa inventariados que ocupan un área de 0.23 km². Tienen una probabilidad espacial de 0.02 y densidad de 25 movimientos en masa/km². Por otra parte, el 28% del área de estudio se clasifica como susceptibilidad moderada, con un área de 6.2 km². Contiene 59 movimientos en masa, que ocupan 0,01 km² con una densidad de 10 movimientos en masa/km² y probabilidad espacial de 0.01. Finalmente, la susceptibilidad baja ocupa 1.3 km² del área total, lo que equivale al 7% del terreno y es la única zona sin movimientos en masa inventariado. Adicionalmente, la susceptibilidad muy alta se

concentra entre los kilómetros 7 y 10 desde Santa Fe de Antioquia, que correspondiente al 30% del área de estudio.

Las Figs. 5 y 6 presentan los resultados de la zonificación a nivel local, realizadas a partir de los métodos SHALSTAB y el índice de TOBIA, para movimientos en masa en suelo y roca respectivamente. En la Fig. 5 se presenta el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa de suelo donde se observan las zonas inestables ante un evento de lluvia de 30 mm/h que corresponde a un periodo de retorno de 10 años. Las zonas en color amarillo corresponden a las celdas potencialmente inestables ante el factor detonante lluvia, pero que podrían fallar ante un evento de lluvia de mayor intensidad. Las áreas de suelo clasificadas como incondicionalmente estables o incondicionalmente inestables son aquellas en las cuales sus condiciones de estabilidad son independientes de la precipitación.

La Fig. 6 presenta la distribución de las laderas CBIP y CMeBP asociadas a las tres familias de diaclasas analizadas (F1, F2, y F3). Las laderas Cataclinales de la F1 son abundantes, especialmente en la zona sur oriente, entre los kilómetros 7 y 10 desde Santa Fe de Antioquia. A lo largo de la zona de estudio no se observa que este tipo de laderas afecten de modo directo a la vía, sin embargo, en zonas alejadas a la carretera se presenta una concentración de laderas con F2 y F3 que podrían generar flujos de escombros o lodos y que en su desplazamiento afecten la vía.

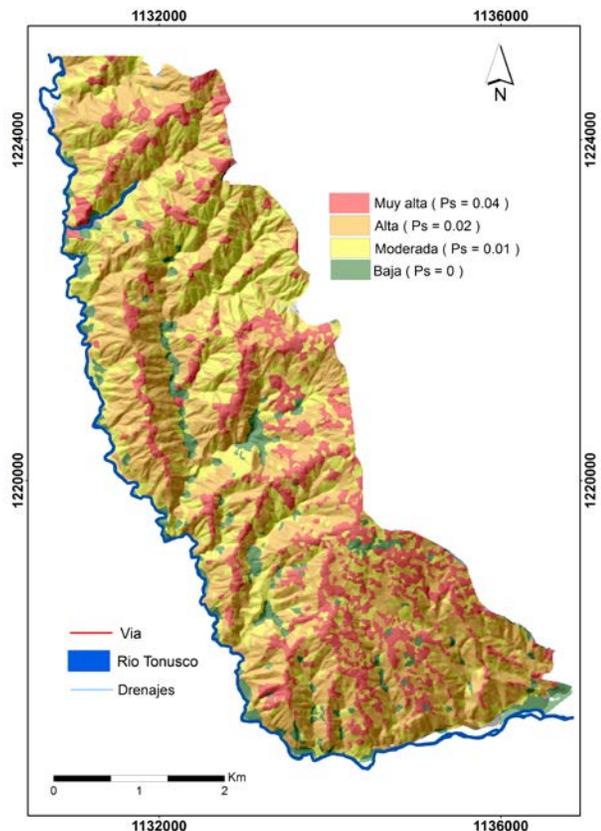


Figura 4. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. Ps: Probabilidad espacial. Fuente autores.

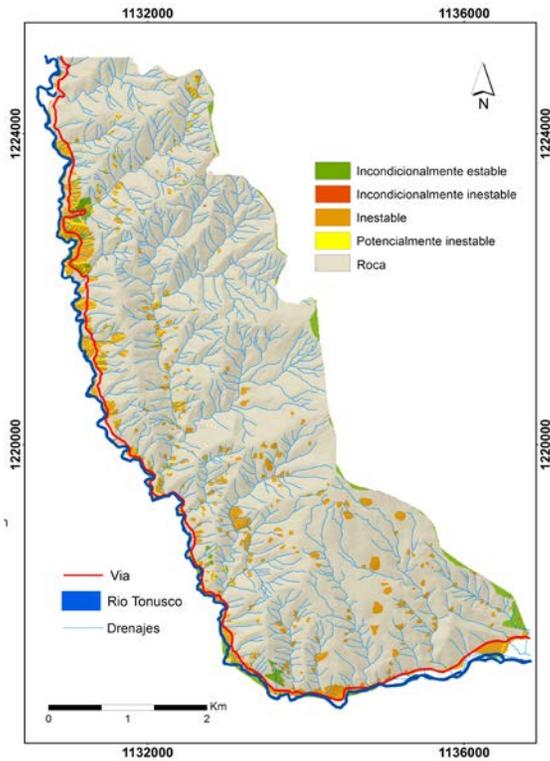


Figura 5. Mapa de amenaza por movimiento en masa para laderas en suelo utilizando el método SHALSTAB para un evento de lluvia de 30 mm/h. Fuente autores.

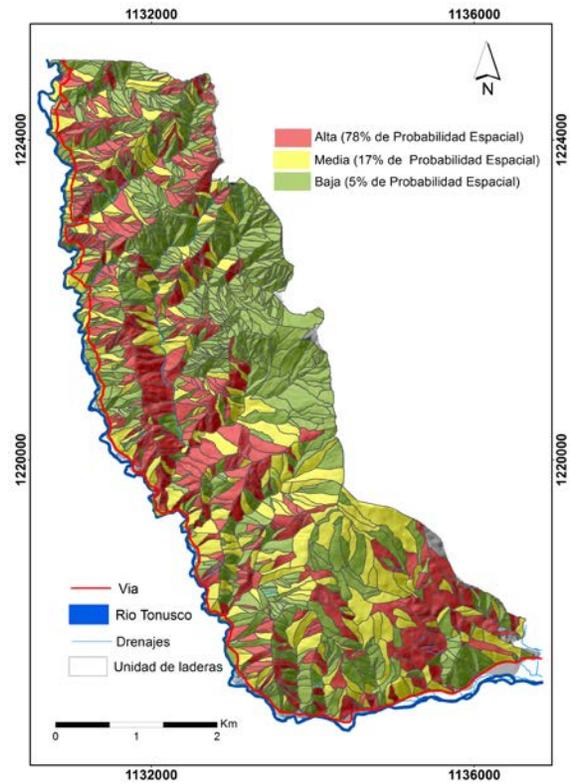


Figura 7. Mapa de unidades de laderas críticas por movimiento en masa. Fuente autores.

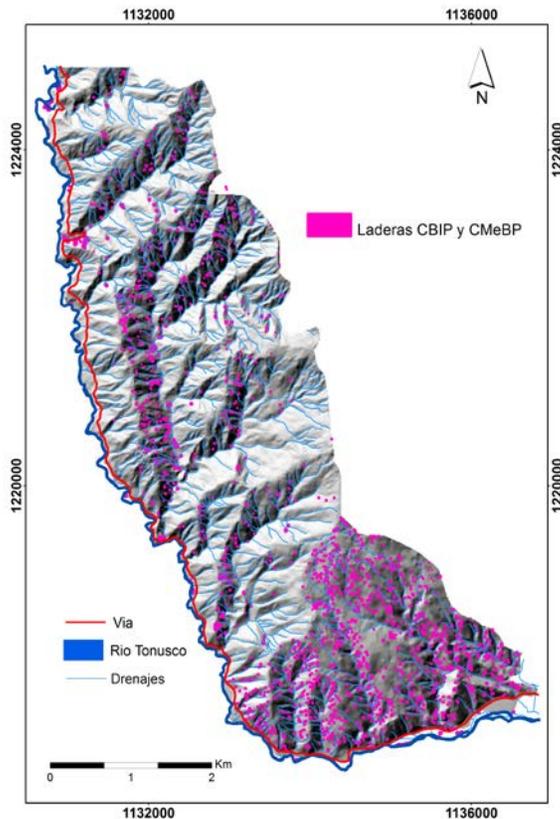


Figura 6. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para laderas en roca utilizando el método del Índice de Tobia. Fuente autores.

La Fig. 7 presenta el mapa de criticidad del proyecto lineal, en el cual se combinan los resultados del mapa estadístico y con base física. Se definieron 1806 Unidades de Ladera en las que se le determinó a cada una, un rango de criticidad entre 0 y 100. La criticidad alta se encuentra en 686 laderas, que ocupan un área total de 6,91 km² correspondiente al 30% del terreno. Contiene 205 movimientos en masa inventariados, que ocupan 0,34 km² siendo el 7% activos. Su densidad es de 29 movimientos en masa/km² con una probabilidad espacial de 0,05, siendo la más alta entre los demás rangos. En esta zona se identifica que el 22% de las celdas presenta susceptibilidad muy alta a alta, el 2% laderas son inestables y el 31% son CBIP y CMeBP. Por otra parte, la criticidad baja ocupa un área de 10 km² correspondiente al 45% del área total. En 903 laderas pertenecientes a esta zona existen 9 movimientos en masa, que ocupan 0.03 km² del área de estudio. Tienen una densidad de 1 movimiento en masa/km² y una probabilidad espacial del 0.002. La criticidad media tiene un área de 5,5 km² y contiene 210 laderas, que ocupan el 19% del área del terreno. Existen 75 movimientos en masa ubicados en 0.1 km² de la zona, con una densidad 14 movimientos/km² y probabilidad espacial del 0,02. Adicionalmente el 24% de las laderas de esta zona tienden a ser inestables.

El AUC para el mapa de susceptibilidad por el método estadístico arrojó un valor de 0.60, señalando un buen ajuste y desempeño de modelo a los datos de inventario de movimientos en masa utilizados (Fig. 8a). De acuerdo con la

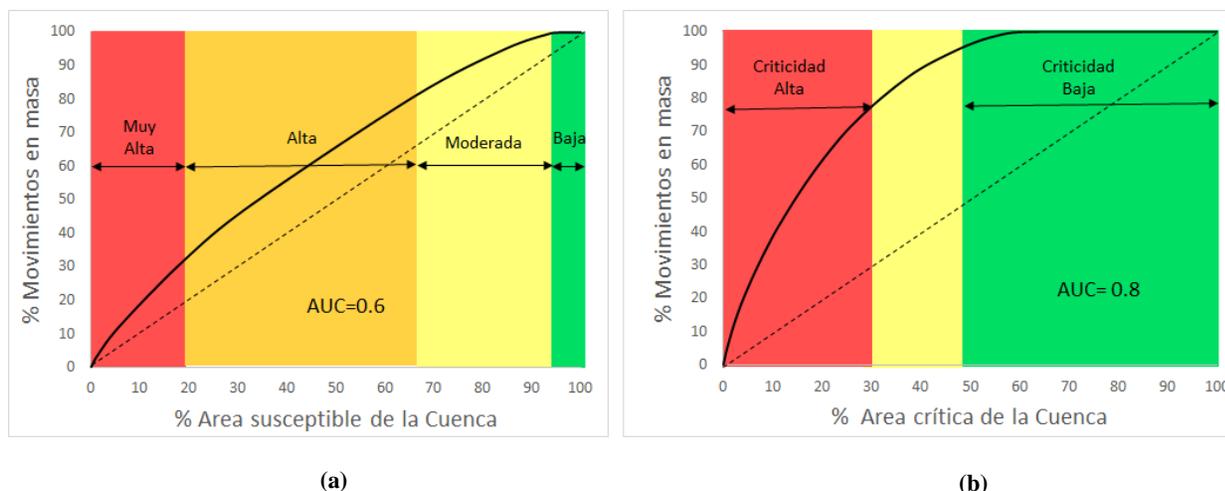


Figura 8. Gráficos de curvas de éxito. (a). Análisis condicional, (b). Criticalidad. Fuente autores.

propuesta de Guzzetti et al. [46] la Curva de Éxito fue además utilizada para establecer los rangos de susceptibilidad con criterio cuantitativo en términos de probabilidad espacial de ocurrencia. El rango definido como susceptibilidad muy alta fue definido para el 20% del área de la cuenca donde se localiza el 31% de los movimientos en masa de acuerdo con el inventario de eventos. El rango de susceptibilidad alta corresponde al 47% del área de la cuenca donde se localiza el 49% de los movimientos en masa. El rango de susceptibilidad moderada está definido para el 25% del área de la cuenca donde se localiza el 20% de los movimientos en masa. Y Finalmente el rango de susceptibilidad baja se definió para el 8% del área de la cuenca donde no se presenta ningún movimiento en masa del inventario.

Para el mapa de criticidad el AUC (Figura 8b) arrojó un valor de 0,82. Donde el 78% de los movimientos en masa inventariados se encuentran en el 30% del área de la cuenca, por lo cual se clasificó este rango como de criticidad alta. De criticidad media se definió el 13% de la cuenca, en el que se encuentra el 20% de movimientos en masa; y el resto de la zona, se ubica tan solo el 2% de movimientos en masa clasificándose como de criticidad baja.

4. Discusión

La metodología propuesta para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales permite una mirada a diferentes escalas de forma independiente pero que en conjunto permite no solo establecer las zonas de susceptibilidad y amenaza, sino además definir áreas de condiciones críticas para el proyecto. El análisis estadístico permite establecer relaciones de causa y efecto a nivel regional entre las variables condicionantes seleccionadas y la ocurrencia de movimientos en masa, permitiendo identificar cuáles son aquellas condiciones naturales del terreno que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa, con el fin

de ser evitadas o mitigadas. En el caso de los métodos físicos, estos permiten identificar las zonas con materiales, en suelo o roca, de menor competencia de acuerdo con sus propiedades geomecánicas, o características estructurales.

Para el caso de estudio el sector suroriental presenta el mayor número de celdas susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa basado en la recurrencia de los eventos inventariados. Este sector presenta el mayor número de laderas CBIP y CMeBP, lo que señala la estrecha relación entre la disposición estructural y la ocurrencia de movimientos en masa. Relación que no se puede establecer directamente a partir del método estadístico. La combinación de ambos modelos permite explicar adecuadamente la causa de los movimientos en masa en el área de influencia, y por lo tanto valorar con especial cuidado las tendencias estructurales de las laderas de la vía.

Los resultados no señalan una relación entre el inventario de movimientos en masa y las laderas en suelo inestables para una lluvia de 30 mm/h, lo cual es coherente con los relativos bajos niveles de lluvia característicos en la zona. Sin embargo, los resultados permiten identificar aquellas laderas más propensas a fallar ante eventos de lluvia y que deben ser monitoreadas o establecer medidas de manejo de aguas superficiales y subsuperficiales.

Es importante destacar la diferencia de los métodos en cuanto al uso del inventario de movimientos en masa. Mientras el método estadístico construye su modelo basado en el inventario, los métodos físicos no utilizan para su desarrollo dicho inventario.

En la metodología propuesta se utiliza para el análisis estadístico el método Análisis Condicional, y para el caso de los métodos físicos se utiliza el modelo SHALSTAB para laderas en suelo, y el Índice de Tobia para laderas en roca, sin embargo, los métodos implementados podrían ser diferentes. Existen una gran cantidad de métodos estadísticos bivariados y multivariados que han sido implementados en una misma área obteniendo resultados muy similares [21];

45]. En el presente estudio se seleccionó el método Análisis Condicional ya que permite utilizar una unidad de análisis diferente a las grillas de celdas regulares. El uso de diferentes unidades de análisis permite dar una mirada a la susceptibilidad y amenaza independiente de la unidad de análisis. Los resultados se confirman debido a la independencia del método y la unidad de análisis.

Se destaca además de la metodología propuesta, la posibilidad de evaluar las condiciones de susceptibilidad a escala regional a través del método estadístico, y la amenaza a escala local a través de métodos con base física. La susceptibilidad es la probabilidad espacial de ocurrencia dado una combinación de variables condicionantes sin considerar el factor detonante dentro del análisis [47]. Por otra parte, la amenaza establece no solo la probabilidad espacial, sino también la probabilidad temporal, por lo cual debe considerarse dentro de su análisis el factor detonante [48]. La susceptibilidad debe ser el primer acercamiento hacia la evaluación de la amenaza, ya que explica la distribución espacial de los movimientos en masa [49]. Y la amenaza corresponde a un acercamiento posterior a una mayor escala para conocer la frecuencia y magnitud de la ocurrencia de movimientos en masa [50]. Los términos, amenaza y susceptibilidad han sido erróneamente usados como sinónimos, lo que conlleva a una inadecuada aplicación, y uso erróneo de los mapas de zonificación que se generan. Esta comprensión pasa por entender los movimientos en masa como el resultado de las condiciones naturales del terreno y las modificaciones de estas condiciones por procesos exógenos que reducen las condiciones de equilibrio gradualmente, hasta la presencia de un factor que detona el movimiento [8].

Para el caso de estudio se consideró como factor detonante la lluvia, sin embargo, y de acuerdo a las condiciones propias del área de estudio, se puede seleccionar o complementar con métodos que incorporen como factor detonante los sismos. El modelo SHASTAB permite utilizar diferentes escenarios de lluvia como factor detonante. En este caso se seleccionó el evento con periodo de retorno de 10 años como una ventana de mediano plazo para un proyecto lineal. Evaluar escenarios de largo plazo es altamente recomendable ya que permiten al proyecto lineal definir o tomar medidas con suficiente anterioridad que reduzcan las condiciones de riesgo.

Se consideró importante en el desarrollo metodológico la incorporación de un análisis que combinara los resultados a escala regional y local, utilizando como unidad de análisis una región diferente a las unidades de análisis utilizadas en ambas escalas, y que respondiera a una división del terreno con significado físico. La unidad de celdas regulares no responde a una división natural del terreno, sino a la conveniencia en la aplicación matemática de los métodos bajo sistemas de información geográfica. En este sentido la Unidad de Laderas responde adecuadamente a estas necesidades, ya que define una región de la cuenca con respuesta hidrológica y geomorfológica similar, por lo tanto, permite suponer que sus condiciones de estabilidad son generales para toda la región, y que cualquier cambio en

dicha región podría modificar las condiciones de estabilidad para toda la región misma. Este concepto es similar al utilizado por Chica [51] y AMVA et al., [52] denominado Unidad Morfodinámica Independiente, y que por lo tanto podría también ser una unidad adecuada de análisis para la definición de zonas críticas. Desde el punto de vista de gestión del riesgo, es importante identificar la unidad de análisis o intervención que responde a una misma condición de estabilidad, ya que permite establecer la región del espacio donde deben ser implementadas las medidas de mitigación, o por el contrario identificar la región en la cual cualquier intervención podría desencadenar procesos en una región mayor.

El mapa obtenido de unidad de laderas críticas identifica tres sectores críticos de la vía. El sector sur oriental, identificado claramente en el mapa de susceptibilidad y dominado por laderas cataclinales, pero también resalta el sector central entre los kilómetros 14 y 17, y el sector noroccidental. Estos dos últimos sectores señalan una potencial afectación indirecta. Ya que la mayor parte de las laderas de criticidad alta no drenan directamente a la cuenca. Sin embargo, los problemas de inestabilidad y ocurrencia de movimientos en masa podrían desencadenar flujos de escombros o lodos, que se propaguen a lo largo del cauce principal de la cuenca, y que afectaría la vía. Esto señala la necesidad de evaluar y zonificar áreas por fuera del área de influencia directa del proyecto. Es decir que este tipo de mapas ayudan a la selección del área de influencia del proyecto.

Finalmente, el desarrollo metodológico propuesto incorpora dentro de su análisis la validación del método estadístico y el mapa de criticidad. El presente estudio utiliza la curva de éxito porque permite no solo la evaluación del desempeño del modelo en un solo valor estimado por el área bajo la curva, sino además definir con un criterio cuantitativo los niveles de susceptibilidad y criticidad en términos de probabilidad espacial. Para la evaluación y generación de los mapas de susceptibilidad o amenaza, es necesario siempre definir los rangos o intervalos de la escala en los cuales será dividido el mapa. Esos rangos son definidos generalmente con criterios subjetivos o estadísticos dados directamente por las herramientas de información geográfica utilizada, tales como intervalos de confianza o métodos de vecindad. La curva de éxito permite definir dichos rangos o intervalos de acuerdo con los resultados obtenidos, siendo a su vez la curva independiente de los rangos seleccionados.

El área bajo la curva del mapa de unidades de ladera crítica es mayor indicando un mejor ajuste a la ocurrencia histórica de movimientos en masa representado por el inventario de movimientos en masa, lo que señala que la combinación de ambas escalas permite un mejor modelo de la ocurrencia de movimientos en masa a lo largo del proyecto lineal.

5. Conclusión

Este trabajo presenta un modelo metodológico para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad y amenaza de

acuerdo con las características propias de los proyectos lineales. Se combinan diferentes análisis disponibles en la literatura con criterios independientes en términos de la escala, y uso del inventario de movimientos en masa y la unidad de análisis, permitiendo comparar sus resultados y coherencia en la distribución de la ocurrencia de movimientos en masa. La propuesta metodológica complementa además los resultados obtenidos con un nuevo mapa, denominado de unidad de laderas críticas, que combina los resultados de ambos métodos, y que permite definir sectores de especial cuidado y atención a escala del proyecto.

Los resultados de la implementación del modelo señalan un adecuado desempeño, y la obtención de valiosa información necesaria previa a la construcción del proyecto, pero también durante la operación.

Considerando las críticas condiciones de estabilidad de las vías de nuestro país es necesario seguir avanzando en propuestas metodológicas aplicadas a proyectos lineales que permitan reducir las condiciones de riesgo y pérdidas humanas y económicas asociadas a movimientos en masa a lo largo de proyectos lineales.

Bibliografía

- [1] Petley, D.N., Global patterns of loss of life from landslides, *Geology*, 40, pp. 927-930, 2012.
- [2] Aristizábal, E. y Gomez, J., Inventario de emergencias y desastres en el valle de Aburrá: originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007. *Gestión y Ambiente*, 10(2), pp. 17-30, 2007.
- [3] Montero, J., Beltrán, L. y Cortes, R., Inventario de deslizamientos en la red vial colombiana. *Ingeniería e Investigación*, 17, pp. 16-27, 1988.
- [4] Banco Mundial. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: Un aporte para la construcción de políticas públicas. Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. Bogotá. 2012. Retrieved from <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>.
- [5] Corporacion OSSO y Universidad EAFIT., Base de datos de perdidas historicas en Colombia (periodo 1970-2011).2011.[en linea] Disponible en: <http://online.desinventar.org>.
- [6] DNP. Plan Maestro de Transporte 2010-2032. Bogotá, Colombia. 2010.
- [7] INVIAS. Informe presupuestal de la oficina de Prevención y Atención de Emergencias. Bogotá, Colombia. 2009.
- [8] Soeters, R., and van Westen, C.J., Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. *Landslides Investigation and Mitigation*. TRB Special Report 247. National Academy Press, Washington D.C. pp. 129-177. 1996.
- [9] Aleotti, P. and Chowdhury., Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, pp. 21-44, 1999.
- [10] Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, pp.181-216, 1999.
- [11] Chacón, J., Irigaray, C., Fernandez, T. and El Hamdouni, R., Engineering geology maps: Landslide and geographical information systems. *Bull Eng Geol Environ*, 65, pp. 431-411, 2006.
- [12] Fell, R., Corominas, J., Bonnard, Ch., Cascini, L., Leroi, E. and Savage, W.Z., On behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. 2008a. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, pp. 85-98, 2008.
- [13] Barredo, J.I., Benavidez, A., Hervhl, J. and van Westen, C.J., Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 2(1), pp. 9-23, 2000.
- [14] Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H. and Kanno, T., Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81(4), pp. 432-445. 2005.
- [15] Carrara, A., Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15(3), pp. 403- 426. 1983.
- [16] van Asch, T.W.J., Malet, J.P., Van Beek, L.P.H. and Amitrato, D., Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard. *Bull. Soc. géol.* 178(2), pp. 65-88, 2007.
- [17] Casadei, M., Dietrich, W.E. and Miller, N.L., Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation on soil mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(9), pp. 925-950, 2003.
- [18] Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E., A physically-based model for topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* 30 (4), pp. 1153-1171, 1994.
- [19] Chung, C.F. and Fabbri, A.G., Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Nat Hazards* 30(3), pp. 451-472, 2003.
- [20] Chen, W., Chai, H., Sun, X., Wang, Q., Ding, X., and Hong, H., A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(204), 16 P, 2016. DOI: 10.1007/s12517-015-2150-7
- [21] van Westen, C.J., Application of geographic information systems to landslide hazard zonation, PhD. Thesis Dissertation, Technical University Delft, Holanda, 245 P, 1993.
- [22] Lee, S., Ryu, J.H., Min, K. and Won, J.S., Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, pp. 1361-1376, 2003.
- [23] Gorsevski, P.V., Gessler, P. and Foltz, R.B., 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. 2000.
- [24] De Graff, J.V., Romesburg, H.C., Ahmad, R. and McCalpin, J.P., Producing landslide-susceptibility maps for regional planning in data-scarce regions. *Natural Hazards*, 64(1), pp. 729-749. DOI: 10.1007/s11069-012-0267-5. 2012.
- [25] Clerici, A., Perego, S., Tellini, C. and Vescovi, P., A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48(4), pp. 349-364, 2002. DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00079-X
- [26] Meijerink, A.M., Data acquisition and data capture through mapping units. *ITC Journal*, 1, pp. 23-44, 1988.
- [27] Erener, A. and Düzgün, H.S.B., Landslide susceptibility assessment: What are the effects of mapping unit and mapping method?. *Environmental Earth Sciences*, 66, pp. 859-877, 2012.
- [28] Hansen, A., Landslide hazard analysis. In: Brunden, D. and Prior, D.B., *Slope Instability*, Wiley, New York, pp. 523-602, 1984.
- [29] Hansen, A., Franks, C.A.M., Kirk, P.A., Brimicombe, A.J. and Tung, F., Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslide in Hong Kong. Ed. Carrara, A., Guzzetti, F., *Geographical Information system in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 135-175, 1995.
- [30] Bonham-Carter, G.F., Geographic information system for geoscientists (modelling with GIS). Geological Survey of Canada. Published by Pergamon (Elsevier Science Ltd), 1994.
- [31] Meentemeyer, R. and Moody, A.W., Automated mapping of conformity between topographic and geological surfaces, *Comput. Geosci.* 26, pp. 815-829, 2000.
- [32] Perez, J.D. y Mesa, O.J., Estimacion del factor de erosividad de la lluvia en Colombia. XV Seminario Nacional de Hidraulica e Hidrologia, 2010.

- [33] Consorcio Antioquia al mar. Estudios y diseños fase III construcción del proyecto Túnel del Toyo y sus vías de acceso en fase de pre-construcción, Capítulo 4. Geología. Medellín. 2016.
- [34] Arango, Y., Dinámica del clima y la vegetación de los últimos 200 años del Holoceno en el humedal La Bramadora (Antioquia-Colombia). Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2016.
- [35] Álvarez, E. y Gonzáles, H., Geología y geoquímica del Cuadrángulo I-7(Urrao). Ingeominas. Informe 1761, Medellín, 347 P., 1978.
- [36] Hall, R., Álvarez, J. and Rico, II., Geología de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-zona IIA). Bol. Geol. INGEOMINAS, Bogotá, 20(1), 85 P, 1972.
- [37] González, H, Restrepo, J., Toussaint, J. and Linares, E., Edad radiométrica K/Ar del Batolito de Sabanalarga. U. Nal., Publ. Esp. Geol., 8, pp.1-4, 1978.
- [38] Sarkar, S., Roy, A.K. and Raha, P., Deterministic approach for susceptibility assessment of shallow debris slide in the Darjeeling Himalayas, India. Catena, 142, pp. 36-46. 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.02.009.
- [39] Coast, N., Water, R., Control, Q., Rosa, S., Weppner, E., Associates, P.W. and Geoscience, H., Slope stability modeling and landslide hazard in freshwater creek and ryan slough Humboldt County , California, July 2008. Humboldt County, 2008.
- [40] Hussin, H.Y., Zumpano, V., Reichenbach, P., Sterlacchini, S., Micu, M., van Westen, C. and Bâlceanu, D., Different landslide sampling strategies in a grid-based bi-variate statistical susceptibility model. Geomorphology, 253, pp. 508-523. 2016. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.10.030
- [41] Páez, E. y Barreiro, H., Analisis del regimen de lluvias de la estacion experimental "El Espinal" centro Cotove. Tesis de grado, Facultad de Agronomia, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 1989.
- [42] Santangelo, M., Marchesini, I., Cardinali, M., Fiorucci, F., Rossi, M., Bucci, F. and Guzzetti, F., A method for the assessment of the influence of bedding on landslide abundance and types. Landslides, 12(2), pp. 295-309. 2015. DOI: 10.1007/s10346-014-0485-x
- [43] Xie, M., Esaki, T. and Zhou, G., GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model. Natural Hazards, 33(2), pp. 265-282. 2004. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000037036.01850.0d
- [44] Hanley, J.A. and McNeil, B.J., The meaning and use of the area under a receive operating characteristic (ROC) CURVE. Radiology, 143(1), pp. 29-36, 1982.
- [45] Ozdemir, A. and Altural, T., 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, pp. 180-197, 2013. DOI: 10.1016/j.jseaes.2012.12.014
- [46] Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. and Galli, M., Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology, 81(1-2), pp. 166-184, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.04.007
- [47] van Westen, C.J., van Asch, T.W.J. and Soeters, R., Landslide hazard and risk zonation - Why is it still so difficult?, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65(2), pp. 167-184, 2006. DOI: 10.1007/s10064-005-0023-0
- [48] Varnes, D.J., Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. Natural Hazards, 1984. DOI: 10.1016/B978-008043013-3/50018-3
- [49] Griffiths, J.S., Mather, A.E. and Hart, A.B., Landslide susceptibility in the Rio Aguas catchment SE Spain. Quart. J Engng. Geol., 35, pp. 9-17, 2002.
- [50] Brunsten, D., The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: Some insights into a old game. Quart. J. of Engng. Geol. 35, pp. 101-142, 2002.
- [51] Chica, A., Apuntes de geotecnia: Curso de geotecnia y practicas geotecnicas. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, pp. 1-120, 1989.
- [52] Area Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA), Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y Universidad de Medellín. Procedimientos tecnicos y metodologicos de los estudios para intervenciones en zonas de ladera en el Valle de Aburra. Medellín, pp. 1-88, 2012.

J. Jiménez, es Ing. Geóloga de la Universidad Nacional Colombia, sede Medellín, actualmente se desempeña como consultora independiente en temas de gestión del riesgo.
orcid: 0000-0003-1108-410X.

E. Aristizábal, es Ing. Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Esp. en Riesgos Geológicos y asociados con el clima de la Universidad de Ginebra (Suiza), MSc. en Ingeniería y Ciencias de la Universidad de Shimane (Japón) y Dr. en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Se desempeña como docente del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
Orcid: 0000-0002-2648-2197.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de
Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105