

# Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial, temporal, y magnitud

Edier Aristizábal<sup>1\*</sup>, Sandra López<sup>1</sup>, Oscar Sánchez<sup>1</sup>, Mariana Vásquez<sup>1</sup>, Felipe Rincón<sup>1</sup>, Diana Ruiz-Vásquez<sup>1</sup>, Sebastián Restrepo<sup>1</sup>, Johan Sebastián Valencia<sup>1</sup>

doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019004> 

**Forma de citar:** Aristizábal, E., López, S., Sánchez, O., Vásquez, M., Rincón, F., Ruiz-Vásquez, D., Restrepo, S., y Valencia, J.S. (2019). Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial, temporal, y magnitud. *Boletín de Geología*, 41(3), 85-105. doi: 10.18273/revbol.v41n3-2019004.

## RESUMEN

Los movimientos en masa detonados por lluvia son una de las amenazas que cobra el mayor número de víctimas anuales en terrenos montañosos y ambientes tropicales, como los Andes colombianos. En el presente estudio, se evaluó la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias en el Valle de Aburrá, localizado en el norte de los Andes colombianos, donde se asienta un número importante de viviendas y familias en áreas altamente susceptibles. Por esta razón, se presenta un método cuantitativo que permite evaluar de forma holística la amenaza combinando la probabilidad espacial, temporal y magnitud. Para la probabilidad espacial de ocurrencia, se utiliza el método estadístico bivariado denominado Peso de la Evidencia. Para la probabilidad temporal, se identificaron los umbrales de lluvia detonante y lluvia antecedente requerida para detonar un movimiento en masa y su probabilidad temporal diaria, y finalmente, para la probabilidad de magnitud, se utilizó la curva magnitud-frecuencia de acuerdo con el inventario multitemporal de movimientos en masa elaborado. Los resultados obtenidos señalan que la categoría de amenaza alta representa el 75% de los movimientos en masa del inventario elaborado y abarca el 37% del área de estudio, la categoría media representa 28% de los movimientos en masa del inventario y el 56% del área de estudio, y finalmente la categoría de amenaza baja representa tan solo el 25% de los movimientos en masa del inventario y el 7% del área de estudio.

**Palabras clave:** amenaza; movimientos en masa inducidos por lluvia; Peso de la Evidencia.

## Landslide hazard assessment triggered by rainfall in a Colombian Andes region estimating spatial, temporal and magnitude probability

## ABSTRACT

The hazard generated by rainfall-induced landslides causes a larger number of victims each year in mountainous and tropical environments, such as the Colombia Andes. The aim of this study is to generate hazard maps for rainfall-induced landslides in the Aburrá Valley, located in the north of the Colombia Andes, which is occupied by a huge number of people living in landside-prone slopes. This paper presents not just the quantitative analysis of landslide hazard with the estimation of space, temporal, and magnitude probability, but also the verification and validation of the results. In terms of the space probability, the Weight of Evidence (WoE) method was used; for the temporal probability, rainfall thresholds for landslide occurrence and their daily temporal probability were identified. Finally, for magnitude probability, the magnitude-frequency curve was used according to the multitemporal inventory of landslide elaborated. The hazard map shows that the high hazard corresponds to 75% of the landslides occurring in 37% of the study area. The medium hazard corresponds to 28% of the landslide within 56% of the study area. Lastly, the low hazard corresponds to 25% of the landslide within 7% of in the study area.

**Keyword:** hazard; rainfall-induced landslide; Weight of Evidence.

<sup>1</sup> Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.  
(\*): [evaristizabal@unal.edu.co](mailto:evaristizabal@unal.edu.co), [smlopez@unal.edu.co](mailto:smlopez@unal.edu.co), [oisanchezp@unal.edu.co](mailto:oisanchezp@unal.edu.co), [mvasquezg@unal.edu.co](mailto:mvasquezg@unal.edu.co), [lfrincond@unal.edu.co](mailto:lfrincond@unal.edu.co), [druizvasquezr@gmail.com](mailto:druizvasquezr@gmail.com), [srestrepoa@unal.edu.co](mailto:srestrepoa@unal.edu.co), [josvalenciaag@unal.edu.co](mailto:josvalenciaag@unal.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

El acelerado aumento de la población urbana en las últimas décadas ocupando terrenos susceptibles a fenómenos de origen natural ha generado un considerable aumento en el número de pérdidas humanas y económicas por desastres (Changnon *et al.*, 2000; Hoppe y Pielke, 2006; Morss *et al.*, 2011). Por esta razón, la evaluación y zonificación de la amenaza se ha convertido en una herramienta fundamental para la ordenación del territorio, permitiendo así reducir efectivamente las condiciones de riesgo actual, y prevenir la configuración de nuevas condiciones de riesgo.

De acuerdo con Dilley *et al.* (2005), 820.000 km<sup>2</sup> del planeta son considerados como zonas de alto riesgo por la ocurrencia de movimientos en masa, donde se localizan 66 millones de habitantes que corresponden aproximadamente al 5% de la población mundial. Entre tanto, en la base de datos de desastres (EM-DAT) del Centro de Investigaciones en Epidemiología y Desastres (CRED por sus siglas en inglés), los movimientos en masa corresponden al 17% del total de víctimas mortales por amenazas de origen natural. Entre los años 2004 y 2010, Petley (2012) registra en el mundo 2.620 movimientos en masa fatales que dejaron un saldo de 32.322 muertos, y resalta, entre los países más afectados por movimientos en masa, a Italia, Japón, China, Nepal, Brasil y Colombia, encontrando como elementos comunes de dichos países: terrenos montañosos, lluvias intensas y una alta densidad poblacional urbana.

Los movimientos en masa son una de las principales amenazas en el territorio colombiano y cobra el mayor número de víctimas fatales y pérdidas económicas (Sepúlveda y Petley, 2015). El Banco Mundial y GFDRR (2012) presentaron un informe general sobre las causas y pérdidas de los desastres en Colombia durante el período 1970-2011, encontrando que los porcentajes más altos de vidas perdidas y casas destruidas corresponden a movimientos en masa e inundaciones. Sánchez y Aristizábal (2017) compilaron para Colombia un total de 32.022 movimientos en masa entre los años 1900 y 2016, de los cuales el 93% de los movimientos registrados se concentran en el 33% del país, la región andina, donde precisamente se encuentra alrededor del 80% de la población de Colombia.

Una de las áreas más afectadas por movimientos en masa en la región andina corresponde al Valle de Aburrá. En los últimos 50 años, los municipios que conforman el Valle han experimentado un crecimiento poblacional acelerado, dando como resultado el incremento de

asentamientos sobre zonas susceptibles a fenómenos tipo movimientos en masa. Esto, sumado a las condiciones geológicas e hidrometeorológicas que han formado y modelado el Valle, hacen de este territorio un área altamente susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa, y que en muchos casos han generado grandes desastres. Los más destacados son Media Luna en 1954 con más de 100 muertos, Santo Domingo en 1974 con más de 70 muertos (Aristizábal y Gómez, 2007), Villatina en 1987 con más de 500 muertos (Tokuhiko, 1999) y La Gabriela en 2010 con 85 muertos.

Aunque la ocurrencia de movimientos en masa ha afectado la población del Valle de Aburrá desde principios del siglo pasado, estudios que evalúen las condiciones de susceptibilidad y amenaza ante movimientos en masa solo surgen a partir de la década de los 80. Los primeros estudios dirigidos a entender los depósitos originados por grandes movimientos en masa y su relación con el origen del valle fueron los trabajos de Shelmon (1979) y Hermelin (1984). Este último autor planteó la necesidad de llevar a cabo estudios de zonificación de amenaza en las laderas y establecer una reglamentación para la construcción basada en las condiciones de amenaza y riesgo del Valle de Aburrá. Sin embargo, solo después de la ocurrencia del desastre de Villatina en 1987, se inicia la elaboración de estudios de amenaza por movimientos en masa en el Valle de Aburrá. Entre estos estudios se destacan Chica (1989), INGEOMINAS (1990) y Flórez *et al.* (1996), quienes aplican esencialmente métodos heurísticos utilizando variables morfológicas. En la primera década del presente siglo, se da inicio a los estudios de amenaza para su incorporación en los planes de ordenamiento territorial basados en métodos heurísticos. Posteriormente, el AMVA-UNAL (2009) implementó modelos de redes neuronales para evaluar la amenaza por movimientos en masa. Recientemente, se vienen implementando nuevos métodos probabilísticos a nivel local que incorporan dentro del análisis los sismos y la lluvia como factor detonante, tales como el estudio de Vega e Hidalgo (2016) en las laderas nororientales de la ciudad de Medellín.

En el presente trabajo, se presentan la evaluación y zonificación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias en los suelos rurales del Valle de Aburrá a escala 1:5.000. La metodología implementada estima la amenaza a través de la probabilidad espacial, temporal y de magnitud de la ocurrencia de movimientos en masa a partir de un inventario de movimientos en masa multitemporal. Los resultados obtenidos fueron validados mediante

técnicas de análisis ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) (Fawcett, 2006; Cantarino *et al.*, 2019) y matrices de confusión (Ho y Lee, 2017; Cantarino *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2007) para evaluar el desempeño del modelo elaborado y la capacidad de predicción del mapa de amenaza obtenido.

## ÁREA DE ESTUDIO

El Valle de Aburrá está localizado en la Cordillera Central de los Andes colombianos, con una longitud aproximada de 80 km y una amplitud variable de 30 km en el sector más ancho y 10 km en el sector más angosto (FIGURA 1). Comprende un área de 1.173 km<sup>2</sup>, de los cuales el 30% aproximadamente corresponde a áreas urbanizadas (AMVA, 2007). A lo largo de este valle, se localizan 10 municipios con una población total de 3,9 millones de habitantes (DANE, 2005), de los cuales 7 corresponden al área donde se evaluaron los modelos de susceptibilidad y amenaza. En este trabajo, se presenta la metodología general utilizada para los siete municipios, pero se presentan los resultados sólo para el municipio de La Estrella (TABLA 1).

En cuanto a la geomorfología, el Valle de Aburrá se caracteriza por ser un cañón entallado entre un sistema de altiplanos, el cual está conformado por una sucesión escalonada de superficies de erosión separadas por escarpes regionales que marcan pulsos del levantamiento de la Cordillera Central. El Valle de Aburrá está segmentado en tres partes: valle superior, valle medio y valle inferior. De acuerdo con las características generales de forma, ancho, orientación y contexto geomorfológico al interior de cada segmento, se identifican diferentes geformas relacionadas genéticamente (AMVA, 2007). Geológicamente, el valle se caracteriza por la presencia de rocas desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, que incluyen rocas metamórficas tipo esquistos, anfibolitas, neises y migmatitas con fuerte afectación tectónica. Las rocas ígneas están representadas por cuerpos intrusivos de edades cretácicas y triásicas de composición ácida a intermedia. Finalmente, se tienen rocas volcano sedimentarias y un conjunto de depósitos del Neógeno – Cuaternario, que se agrupan en depósitos de flujos, depósitos aluviales, depósitos aluviotorrenciales y llenos antrópicos (AMVA, 2007).

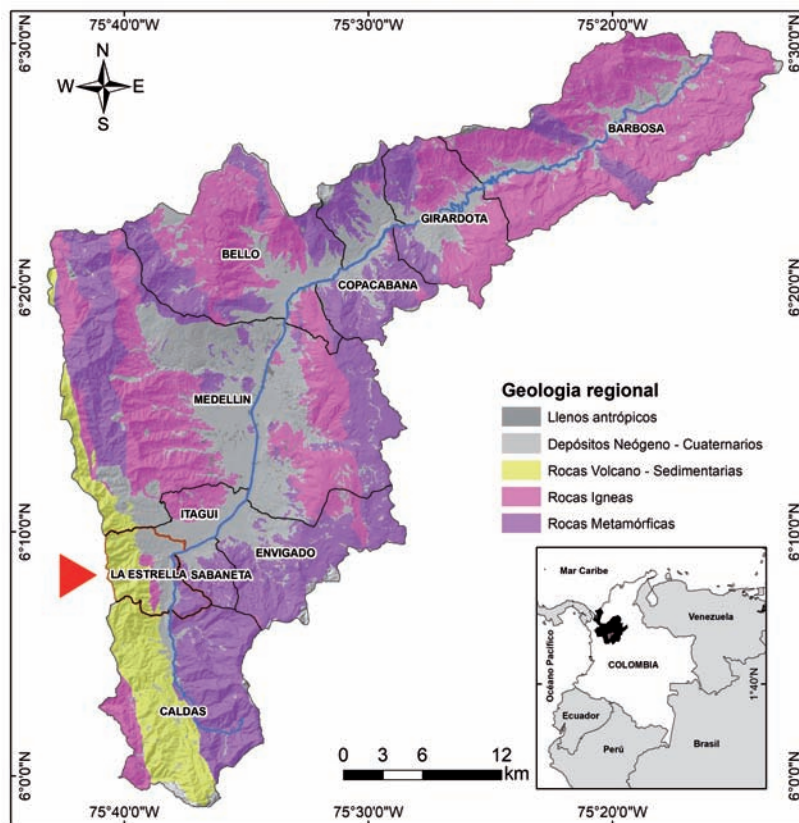
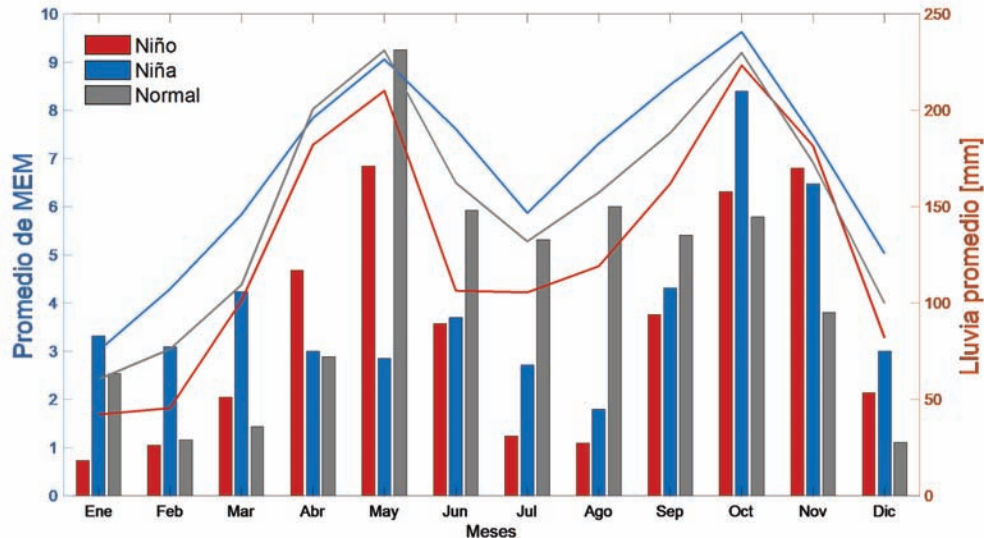


FIGURA 1. Localización del municipio de La Estrella en el Valle de Aburrá (flecha roja) y Geología regional agrupada en los principales tipos de rocas (AMVA, 2007).

**TABLA 1.** Información general sobre los municipios del Valle de Aburrá (tomado de la proyección del DANE, 2005).

Municipio	Área (km <sup>2</sup> )	Número de habitantes	Densidad poblacional (hab/km <sup>2</sup> )
Barbosa	206	50.052	243
Bello	149	482.255	3.236,6
Caldas	135	80.538	596,6
Copacabana	68	72.739	1.069,7
Envigado	79	238.173	3.014,8
Girardota	83	58.017	699
Itagiú	21	276.936	13.187,4
La Estrella	36	65.303	1.814
Medellín	380	2.529.403	6.656,3
Sabaneta	16	53.913	3.369,6
<b>Total</b>	<b>1173</b>	<b>3.907.329</b>	<b>33.887</b>

La FIGURA 2 presenta el ciclo anual de la precipitación en el Valle de Aburrá de acuerdo con la fase del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y la relación con la ocurrencia de movimientos en masa. El ciclo de la precipitación, al igual que la ocurrencia de movimientos en masa, presenta una tendencia bimodal, tanto en las fases extremas del ENSO (El Niño y La Niña) como en la fase Normal. Los mayores cambios en el régimen de precipitación mensual se presentan para trimestres de menor lluvia acumulada (DEF y JJA). Para los meses donde se presentan los picos de lluvia, los valores de precipitación tienden a ser similares, independiente de la fase del ENSO, con una ligera reducción en los años El Niño.



**FIGURA 2.** Distribución mensual de la precipitación en el Valle de Aburrá (en líneas) y la ocurrencia de movimientos en masa de acuerdo con la fase del ENSO (en barras). Los valores mensuales medios se obtuvieron a partir de las estaciones de lluvia de EPM, y la ocurrencia de movimientos en masa a partir del inventario histórico de eventos del DesInventar con datos entre los años 1950 y 2016.

## DATOS Y METODOLOGÍA

La amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino dentro de un periodo de tiempo específico y dentro de un área dada (Varnes, 1984). A dicha definición, Guzzetti *et al.* (1999) le adiciona la inclusión de la magnitud del evento. Por lo tanto, la definición de la amenaza por movimientos en masa incorpora los conceptos de localización, tiempo y magnitud. Como consecuencia, una completa evaluación de la amenaza debe predecir de forma cuantitativa dónde un movimiento en masa

ocurrirá, cuándo o qué tan frecuente será su ocurrencia, y qué tan grande será el evento.

Considerando estos tres elementos, la probabilidad de amenaza por movimientos en masa en una área dada puede ser obtenida a partir de la probabilidad espacial ( $P_s$ ), que señala la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa en un determinado lugar; de la probabilidad temporal ( $P_T$ ), que señala la probabilidad de ocurrencia de un factor detonante que genera movimientos en masa; y de la probabilidad de magnitud ( $P_M$ ), que señala la probabilidad que un movimiento en



masa pueda ser de un cierto tamaño (Guzzetti y Tonelli, 2004; Jaiswal *et al.*, 2010; Wu y Chen, 2013). La amenaza (H) entonces puede ser calculada asumiendo independencia entre las tres probabilidades utilizando la siguiente ecuación:

$$H = P_M \times P_S \times P_T \quad (1)$$

Para el cálculo de cada una de estas probabilidades, se utilizaron las siguientes metodologías, partiendo de un inventario de movimientos en masa para todo el Valle de Aburrá.

### Inventario de movimientos en masa

La evaluación de cada una de las probabilidades se realiza a partir de un inventario de movimientos en masa. Además, constituye la principal fuente de información con fines de validación de los resultados de los mapas de zonificación de la amenaza. El inventario de movimientos en masa corresponde a un registro detallado de los eventos que han ocurrido en el pasado proporcionando información útil sobre su distribución y características (Eeckhaut y Hervás, 2012).

El inventario de movimientos en masa del presente estudio está conformado por tres tipos de eventos levantados con técnicas y fuentes de información independientes: i) inventario histórico de eventos, ii) fotointerpretación multitemporal, y iii) levantamiento de campo.

La realización del inventario histórico de movimientos en masa se basa principalmente en dos fuentes de información que operan a nivel nacional: el Sistema de Inventarios de Desastres (DesInventar) (LA RED y OSSO, 2017) y el Sistema de Información de Movimientos en Masa – SIMMA- (SGC, 2017). DesInventar (<http://www.desinventar.org/>) es un software que permite la sistematización, organización, recolección y visualización de los desastres históricos y el análisis de estos desde un punto de vista espacial y temporal (OSSO y LARED, 2009). A su vez, el SIMMA (<http://simma.sgc.gov.co/>) ha sido desarrollado e implementado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), y dispone de registros de movimientos en masa desde el año 1917 (SGC, 2015).

Para el inventario de movimientos en masa por fotointerpretación, se utilizaron aproximadamente 540 fotografías aéreas con resolución de 0,3 m para el área rural y 340 fotografía aéreas con resolución de 0,15 m para la zona urbana, de los años 2009 a 2012. El proceso

de fotointerpretación estuvo enfocado en identificar los procesos morfodinámicos activos o inactivos, y estos últimos en latentes, estabilizados o relictos, de acuerdo con las definiciones de Cruden y Varnes (1996). Aunque se levantaron la totalidad de eventos, para el modelo de susceptibilidad solo se utilizaron las cicatrices activas y latentes o estabilizadas, ya que, aunque no se encuentran activas, señalan que las condiciones actuales dan lugar a dichos eventos. Finalmente, se realizó una campaña de campo durante el 6 y 11 de diciembre de 2017 para la verificación de los eventos históricos, fotointerpretados, además de identificar los movimientos en masa ocurridos después del 2012, fecha de las últimas fotos interpretadas.

### Estimación de la probabilidad espacial

Para la evaluación de la probabilidad espacial, se utilizó el método estadístico bivariado Peso de la Evidencia (Chung y Fabbri, 1999; Van Westen *et al.*, 2003), basado en la teoría de la probabilidad Bayesiana, donde se analiza la relación entre las áreas afectadas por los movimientos en masa y la distribución espacial de los factores condicionantes del terreno (Sujatha *et al.*, 2014; Regmi *et al.*, 2010). Este método arroja los pesos de las clases que conforman las variables condicionantes (Van Westen *et al.*, 2003), indicando la presencia e influencia de la clase como parámetro en la ocurrencia del movimiento en masa (Regmi *et al.*, 2010; Oh y Lee, 2011). Los pesos positivos ( $W^+$ ) indican la presencia de la clase como parámetro que favorece los movimientos en masa y su magnitud indica su correlación. El peso negativo ( $W^-$ ) indica la ausencia de la clase en la ocurrencia de movimientos en masa. Los pesos son definidos por:

$$W^+ = Ln \frac{\frac{A_1}{A_1 + A_2}}{\frac{A_3}{A_3 + A_4}} \quad (2)$$

$$W^- = Ln \frac{\frac{A_2}{A_1 + A_2}}{\frac{A_4}{A_3 + A_4}} \quad (3)$$

Dónde  $A_1$  es el número de píxeles con movimientos en masa en la clase,  $A_2$  número de píxeles con movimientos en masa que no están presentes en la misma clase,  $A_3$  número de píxeles en la clase que no hay movimientos en masa y  $A_4$  es el número de píxeles en la clase donde no hay movimientos en masa y que no está presente en

la misma clase (Ozdemir y Altural, 2013). Para cada variable, entonces, se estima el Peso de Contraste ( $C$ ) dado por:

$$C = W^+ - W^- \quad (4)$$

Donde  $C$  refleja el espacio de asociación respecto a la clase en la predicción del movimiento en masa, la cual es cero cuando la clase no afecta, es positivo cuando existe una correlación directa y negativo cuando existe una correlación inversa con la distribución de movimientos en masa (Rodríguez *et al.*, 2017).

Como factores condicionantes del terreno, se utilizaron como variables continuas: pendientes, aspecto, rugosidad, índice de humedad topográfica, índice de relieve relativo, índice de posición topográfico, elevación relativa al cauce, curvatura perfil y curvatura tangente. Dichas variables fueron obtenidas a través del Modelo Digital de Elevación (MDE) elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi con resolución espacial 5 m x 5 m. Como variables categóricas, se utilizó la geología elaborada por el AMVA (2007), además de distancia a vías, distancia a fallas y coberturas de la tierra obtenida del estudio AMVA-UNAL (2018). Es importante resaltar que la variable distancia a vías es analizada como una variable categórica ya que no existe evidencia o cartografía que permita establecer una escala continua de valores; en el caso de la variable distancia a fallas es considerada como categórica debido a que no se tiene una caracterización en detalle que permita obtener una variación del macizo rocoso de acuerdo con la distancia al sistema de fallas.

Estas variables fueron seleccionadas a partir de un estudio exploratorio, donde se realizaron cuatro tipos de análisis: análisis de frecuencia, análisis de matriz de correlación, análisis de componentes principales y análisis discriminantes, y cuyos resultados indicaron que estas variables presentan un buen comportamiento frente a la ocurrencia de movimientos en masa en el Valle de Aburrá.

### Estimación de la probabilidad temporal

La lluvia es el factor desencadenante principal que promueve la ocurrencia de movimientos en masa en ambientes tropicales y terrenos montañosos como los Andes colombianos (Sánchez y Aristizábal, 2017). Por esta razón, la herramienta principal para estimar la probabilidad temporal de la ocurrencia de movimientos en masa son los umbrales de lluvia, los cuales son definidos como las condiciones de precipitación que,

al ser alcanzadas, muy posiblemente desencadenen movimientos en masa (Glade *et al.*, 2000; Guzzetti *et al.*, 2008). Los umbrales deben ser establecidos para regiones específicas, ya que varían dependiendo de la influencia de factores de estabilidad inherentes a cada región, como geología, cobertura de suelos, nivel de intervención antrópica, entre otras (Bai *et al.*, 2014).

Los umbrales de lluvia se pueden definir desde un punto de vista físico (basados en los procesos o umbrales conceptuales), o desde un punto de vista empírico (históricos o umbrales estadísticos) (Corominas, 2000; Aleotti, 2004; Wieczorek y Glade, 2005; Guzzetti *et al.*, 2007). Para el presente trabajo, se utilizaron umbrales empíricos obtenidos a partir de 2.117 movimientos en masa del inventario histórico de eventos para todo el Valle de Aburrá, y la base de datos del registro histórico de lluvias de 16 estaciones pluviométricas distribuidas a lo largo del Valle de Aburrá, pertenecientes a Empresas Públicas de Medellín (EPM), con resolución temporal horaria. Existen series con datos desde el año 1948, por ejemplo para las estaciones Villa Hermosa, Chorrillos y Las Palmas, hasta algunas estaciones con series más cortas, desde el año 1996 como las estaciones Pedregal y Gerona. Para la definición de los umbrales, se asociaron los registros de movimientos en masa al área de influencia de cada estación de lluvia de acuerdo con los polígonos de Thiessen. Esto permite que el evento sea evaluado estadísticamente para la lluvia registrada en el pluviómetro más cercano. De esta forma, y de acuerdo con Düzgün y Grimstad (2007), la probabilidad temporal de ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias  $P_T$  está dada por la probabilidad de que se supere un umbral de lluvia definido  $P(B)$ , y la probabilidad condicionada de que dado que se supere dicho umbral de lluvia se presente un movimiento en  $P(A/B)$ , mediante la siguiente ecuación:

$$P_T = P(B) \times P(A|B) \quad (5)$$

Para estimar la probabilidad temporal  $P_T$ , es necesario definir en primera instancia un umbral de lluvia crítico ( $B$ ) asociado a la zona de estudio. Para esto, se realizó un análisis de umbrales de lluvia acumulada ( $LA$ ), también conocida como lluvia detonante o de corto plazo, y lluvia acumulada antecedente ( $LAA$ ), también conocida como lluvia histórica o lluvia de largo plazo (Aristizábal *et al.*, 2011). De esta forma, el umbral de lluvia crítico ( $B$ ) describe el cumplimiento de dos condiciones de precipitación en simultáneo, es decir, que se exceda una cantidad de lluvia detonante  $LA \geq X_i$  y a su vez se exceda una cantidad de lluvia antecedente  $LAA \geq X_j$ .

### Estimación de la probabilidad de magnitud

Para la probabilidad de magnitud, se utilizó la metodología estadística propuesta por Malamud *et al.* (2004), que relaciona la frecuencia de ocurrencia de los movimientos en masa del inventario con el área deslizada. La frecuencia se expresa mediante la siguiente función de densidad de probabilidad:

$$P(A_L) = \frac{1}{N_{TL}} * \frac{\partial N_L}{\partial A_L} \quad (6)$$

Donde  $P(A_L)$  es la función de densidad de probabilidad,  $N_{TL}$  es el número total de movimientos,  $\partial N_L$  es el número total de movimientos contemplados en un intervalo y  $\partial A_L$  es el tamaño del intervalo. Malamud *et al.* (2004) utilizan múltiples inventarios de movimientos en masa alrededor del mundo, con el fin de calibrar una distribución de densidad de probabilidad que se ajuste al comportamiento de las áreas con su probabilidad de frecuencia. Esta probabilidad es expresada por medio de la función Gamma Inversa que se presenta a continuación:

$$P(A_L; \rho; a; s) = \frac{1}{\Gamma(\rho)} \left( \frac{a}{A_L - s} \right)^{\rho+1} * \exp \left( - \frac{a}{A_L - s} \right) \quad (7)$$

Donde  $\gamma(\rho)$  es la función gamma y los parámetros  $a$ ,  $s$  y  $\rho$  son coeficientes que influyen la forma de la curva de distribución. El parámetro  $\rho$  controla la disminución de la ley potencial para las áreas de movimientos en masa grandes y medianos, el parámetro  $a$  controla la ubicación del valor máximo de la distribución de probabilidad y el parámetro  $s$  controla la caída exponencial para movimientos de zonas pequeñas.

### Evaluación del desempeño y capacidad de predicción espacial del modelo

Finalmente, para evaluar el desempeño y capacidad de predicción del mapa de susceptibilidad obtenido con los modelos implementados, se utilizaron la Curva de Éxito, Curva de Predicción (Chung y Fabbri, 2003; Davis y Goodrich, 1990) y Área Bajo la Curva (AUC) (Fawcett, 2006). Para esto, se dividió el total de movimientos en masa del inventario en 80% para la construcción del modelo de susceptibilidad y evaluación del desempeño, y el 20% restante de movimiento inventariados para evaluar la capacidad de predicción del modelo obtenido. Las Curvas de Éxito y Predicción se construyen estimando el porcentaje de movimientos

en masa contra el porcentaje del área de la cuenca para diferentes valores de susceptibilidad. El Área Bajo la Curva (AUC), el cual varía de 0 a 1, representa un valor global del desempeño o predicción del modelo, independiente de la clasificación en categorías de susceptibilidad del mapa. Curvas cercanas a la esquina superior izquierda presentan valores de AUC cercanos a 1 señalando un excelente desempeño del modelo, y valores cercanos a la diagonal, con AUC de 0,5, indican un pobre desempeño o predicción del modelo. Para la zonificación de la amenaza en alta, media y baja, se utilizó la Curva de Éxito como criterio cuantitativo en términos de probabilidad espacial.

## RESULTADOS

### Evaluación de la probabilidad espacial

La FIGURA 3 presenta el inventario de movimientos en masa históricos y fotointerpretados utilizado para el análisis de susceptibilidad en el municipio de La Estrella. Para todo el Valle de Aburrá, se compilaron 2.117 movimientos en masa históricos y 19.671 movimientos en masa fotointerpretados. Específicamente para el municipio de La Estrella, en el inventario histórico se reportan 47 movimientos en masa, 4 avenidas torrenciales y 44 inundaciones, entre los años de 1969 y 2014, y 1.366 movimientos en masa fotointerpretados, de los cuales el 31% pertenecen a coronas activas, el 66% a coronas latentes o inactivas y solo el 3% a coronas antiguas. Para la construcción del modelo de susceptibilidad, se utilizaron solo los movimientos en masa activos y latentes; los movimientos relictos se considera que no representan las condiciones geomorfológicas e hidrometeorológicas actuales del Valle de Aburrá. Los tipos de movimientos que predominan en el municipio son los deslizamientos de tipo rotacional y los flujos. Los deslizamientos de tipo rotacional se encuentran hacia la vertiente occidental en rocas volcánicas y rocas ígneas ultramáficas, mientras que hacia la vertiente oriental se encuentran en el suelo residual y saprolito asociado a rocas metamórficas. También se presentan en los depósitos de vertiente más antiguos en la zona, derivados de rocas ultramáficas. Por otro lado, los movimientos en masa tipo flujos predominan en la parte alta de la vertiente occidental en laderas de pendientes abruptas a escarpadas, asociados a rocas volcánicas y volcanosedimentarias, y en la vertiente oriental.

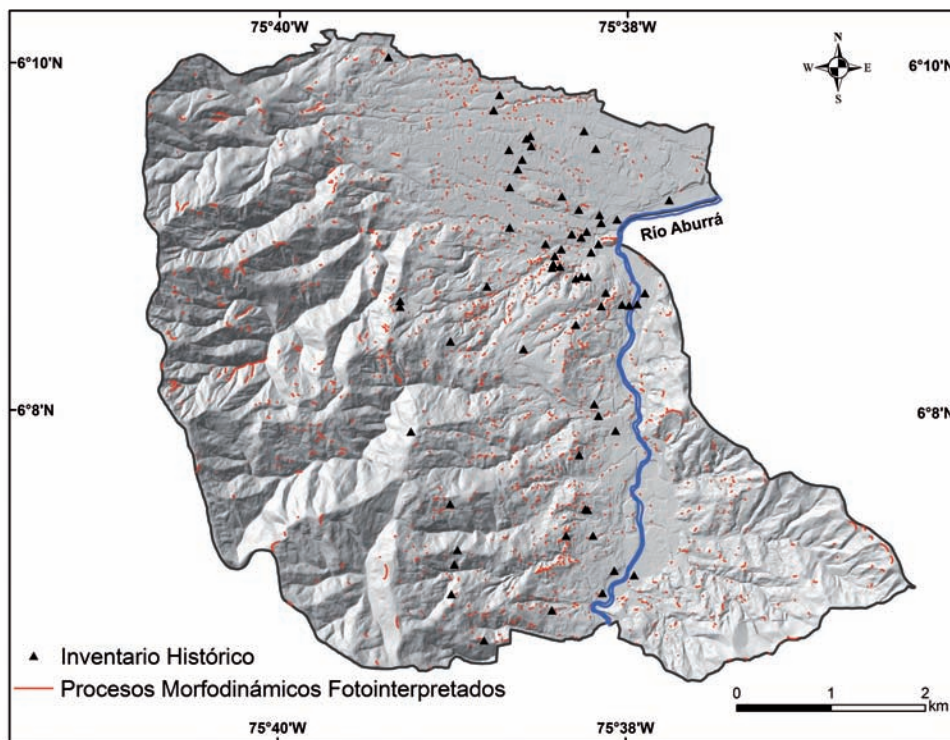


FIGURA 3. Distribución de procesos morfológicos en el municipio de La Estrella (para el contexto regional del municipio, remitirse a la FIGURA 1).

La FIGURA 4 presenta la distribución espacial y rangos de 6 de las 13 variables condicionantes utilizadas para la construcción del modelo de susceptibilidad en el municipio de La Estrella. Las variables categóricas utilizadas son geología, coberturas de la tierra, distancia a fallas y distancia a vías y las variables continuas son pendiente, curvatura tangente, curvatura perfil, índice de relieve relativo, índice de posición topográfica, índice de humedad topográfico, rugosidad, elevación relativa al cauce y aspecto.

Por medio del método Peso de la Evidencia, se obtiene el peso de cada clase de cada una de las 13 variables. Para cada celda que compone el área del proyecto, se estima el Índice de Susceptibilidad (IS) mediante la suma de sus respectivos pesos de contraste (C), como lo muestra la siguiente ecuación:

$$IS = \sum C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (8)$$

Para los pesos de cada clase, se utilizó el valor del peso de contraste (C). Es decir, para una determinada celda cuya pendiente es igual a 12 grados, se adoptará un valor C de pendiente igual a 0,7, puesto que este es el valor de C correspondiente al rango al cual pertenece

el valor de pendiente de la celda (*i.e.*, 12 pertenece al rango de pendiente de 11 a 19). La TABLA 2 presenta los valores obtenidos para la zona en la cual se desarrolla el modelo.

La FIGURA 5 presenta el mapa de susceptibilidad obtenido para el municipio de La Estrella clasificado en tres categorías, de acuerdo con los valores propuestos para Colombia por Rodríguez *et al.* (2017). La amenaza alta corresponde al área bajo la curva que comprende el 75% de los movimientos en masa, la amenaza media al área bajo la curva entre 75% y 98% de los movimientos en masa, y finalmente la amenaza baja corresponde al área con el 2% de los movimientos en masa. La probabilidad espacial para cada categoría se estima como la relación entre el número de celdas que corresponden a movimientos en masa y el número total de celdas que conforma dicha categoría. Por ejemplo, en la categoría de amenaza alta, se contabilizó un área de 227,77 km<sup>2</sup>, de los cuales 5,16 km<sup>2</sup> presentan movimientos de ladera. Por tanto, su probabilidad espacial es de 2,26% (ver TABLA 3). A partir del análisis regional de la susceptibilidad, se obtiene un consolidado general del modelo obtenido para los 7 municipios del Valle de Aburrá (TABLA 3).



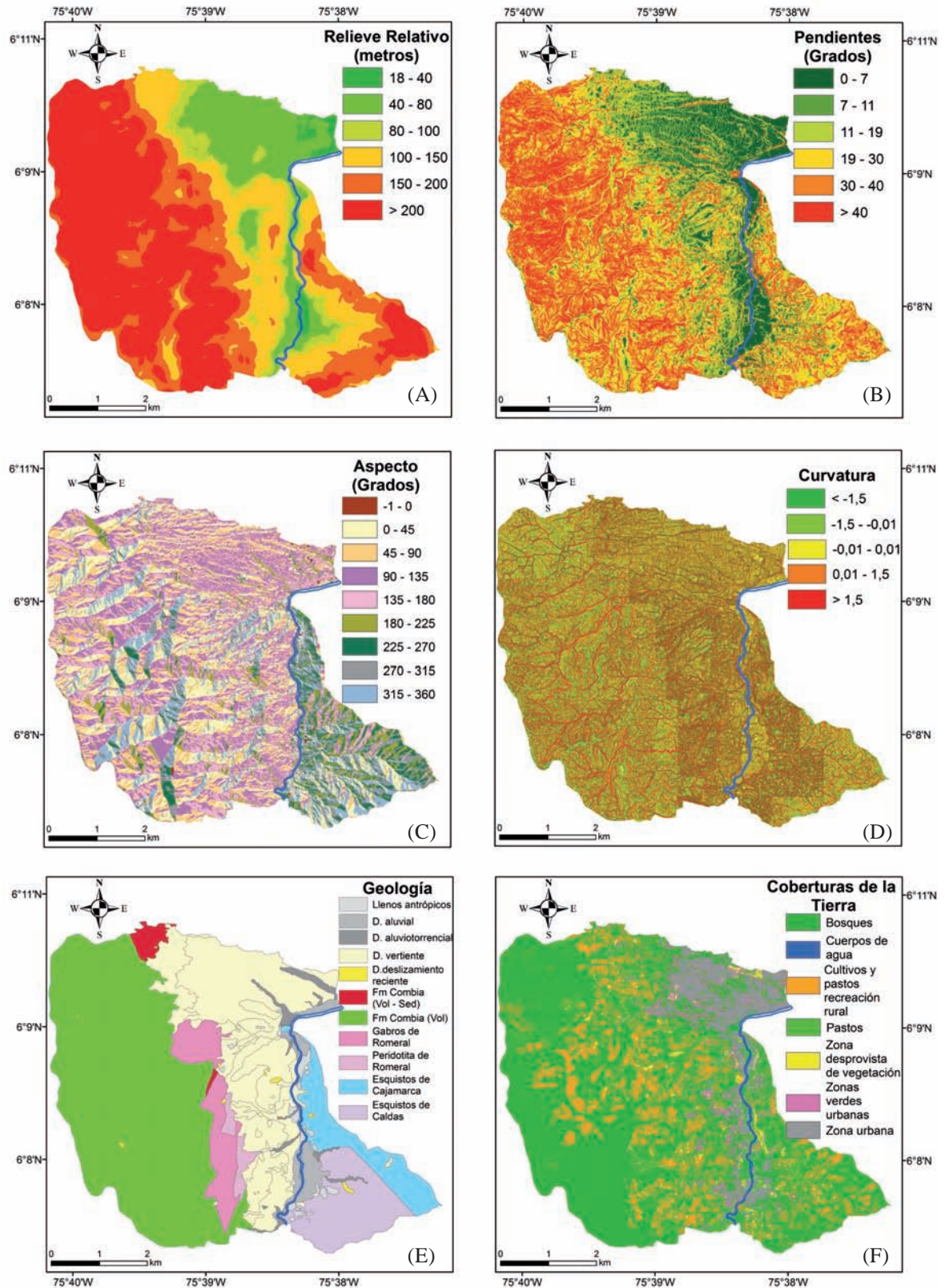


FIGURA 4. Distribución espacial de algunas de las variables utilizadas en el modelo de susceptibilidad. A. Relieve relativo. B. Pendientes. C. Aspecto. D. Curvatura. E. Geología. F. Coberturas de la tierra.

TABLA 2. Factor calculado por Peso de la Evidencia para las categorías de los mapas temáticos del Valle de Aburrá.

Variable	Rango	C	Variable	Rango	C	Variable	Rango	C
<b>Rugosidad</b>	< 0,985	0,46	<b>Índice de humedad topográfico TWI</b>	< 2	0,78	<b>Geología</b>	Anfibolitas	-0,26
	0,985 - 0,99	0,76		2 - 6	-0,03		Batolitos	0,51
	0,99 - 0,995	0,8		6 - 8	-0,67		Depósito Aluviotorrencial	-1,16
	0,995 - 0,9975	0,71		8 - 10	-1,02		Depósito de vertiente	-0,26
	0,9975 - 0,9985	0,51		10 - 13	-1,35		Depósitos aluviales	-2,24
	0,9985 - 1	-0,96		13 - 25	-2,83		Dunita y peridotita	-0,08
<b>Índice de relieve relativo</b>	0 - 40	-2,12	<b>Pendiente</b>	0 - 7	-2,19	Esquistos	-0,08	
	40 - 60	-0,48		7 - 11	-1,18	Gabros	0,26	
	60 - 80	-0,09		11 - 19	0,7	Llenos antrópicos	0,09	
	80 - 100	-0,03		19 - 30	0,62	Metabasitas	1	
	100 - 150	0,21		30 - 40	0,4	Neises y migmatitas	0,26	
	150 - 200	0,24		> 40	-0,31	Río Aburrá	-6,63	
> 200	-0,12				Volcánico	-0,26		
<b>Curvatura Tangente</b>	< -1,5	0,26	<b>Curvatura Perfil</b>	< -1,5	1,39	Vulcano sedimentario	-0,4	
	-0,1	-0,06		-0,1	-0,27	Zona urbana	-0,37	
	0,1	-1,09		0,1	-1,31	Zona desprovista de vegetación	0,39	
	1,5	-0,35		1,5	-0,82	Cuerpos de agua	-3,31	
> 1,5	0,41		> 1,5	-0,7	<b>Cobertura de la Tierra</b>	Pastos	0,27	
<b>Índice de posición topográfica TPI</b>	< -10	-5,48	<b>Elevación relativa al cauce DDS</b>	0 - 15		-1,31	Zonas verdes urbanas	0,03
	-10 - -1	-1,29		15 - 30		-0,3	Bosques	-0,18
	-1 - 0,5	-0,71		30 - 50		0,38	Cultivos y pastos recreación rural	0,14
	-0,5 - 0,5	-0,75		50 - 70	0,59	-1 - 0	-2,42	
0,5 - 1	0,34	70 - 100	0,33	0 - 45	0,06			
1 - 10	1,36	100 - 180	-0,04	45 - 90	0,08			
> 10	-0,49	> 180	-0,41	90 - 135	0,07			
<b>Distancia a vías</b>	0 - 7	0,19	<b>Distancia a falla</b>	0 - 100	-0,06	<b>Aspecto</b>	135 - 180	0,19
	7 - 15	0,27		100 - 300	0,13		180 - 225	0,1
	15 - 30	0,18		300 - 500	0		225 - 270	-0,1
	30 - 45	0,06		500 - 1500	-0,14		270 - 315	0,28
	45 - 60	-0,01		> 1500	0,1		315 - 360	-0,14
	> 60	-0,34						

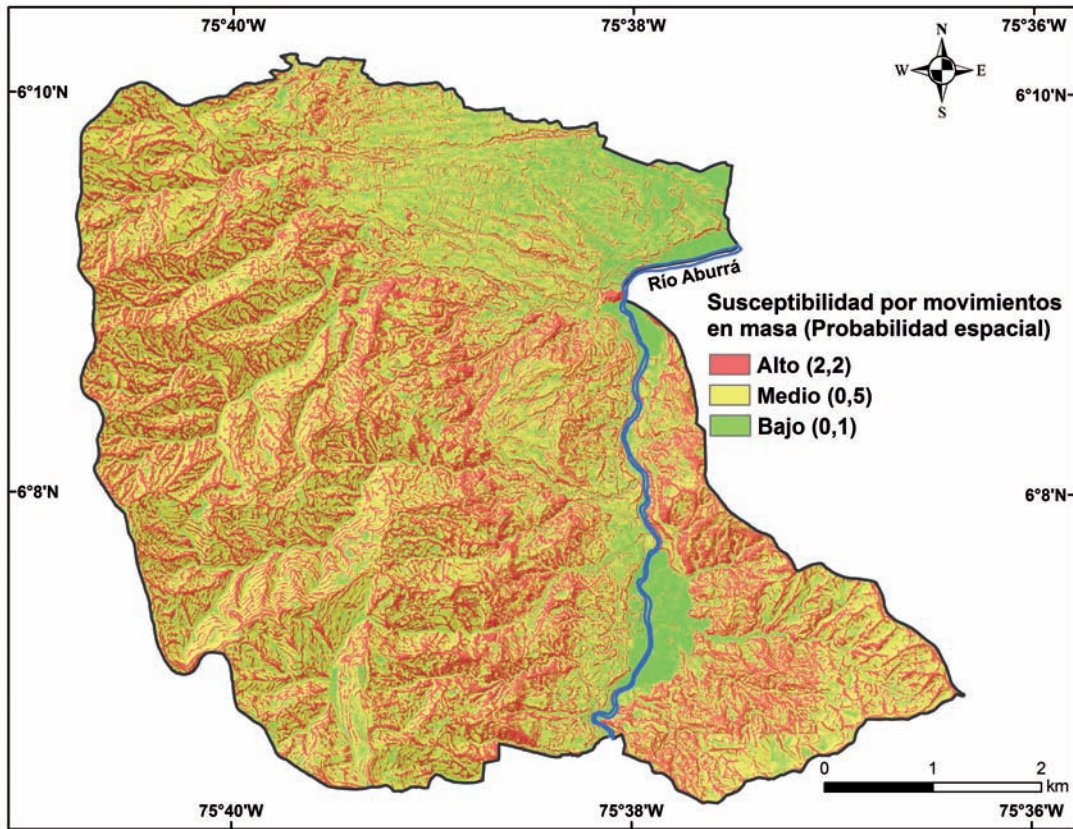


FIGURA 5. Susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de La Estrella.

TABLA 3. Consolidado general de la susceptibilidad.

Susceptibilidad	Probabilidad espacial*	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área de MenM* (km <sup>2</sup> )	Área de MenM* (%)	Densidad de MenM* (MenM/km <sup>2</sup> )
Alta	2,2	227,77	33,30	5,16	71,13	66,12
Media	0,5	342,88	50,13	1,87	25,84	14,13
Baja	0,1	113,28	16,56	0,22	3,03	4,38

\*MenM: Movimiento en masa

En el mapa de susceptibilidad del municipio de La Estrella predomina la categoría media con un 53%, seguida de la categoría alta con 33% y categoría baja con 14%. Las categorías alta y media están fuertemente relacionadas y se localizan en ambos márgenes del río Aburrá, sobre las laderas que llegan desde los extremos oriental y occidental del municipio hasta el fondo del valle; la susceptibilidad baja se identifica en inmediaciones del río y al norte del municipio, en cercanías con Itagiú.

La FIGURA 6 presenta la curva de éxito (A) y curva de predicción (B) elaboradas con el 80% y 20% respectivamente de los movimientos en masa. El AUC para la Curva de Éxito es del 77,5% y para curva de predicción del 77,8%, lo cual indica un adecuado desempeño y capacidad de predicción del modelo de susceptibilidad elaborado.



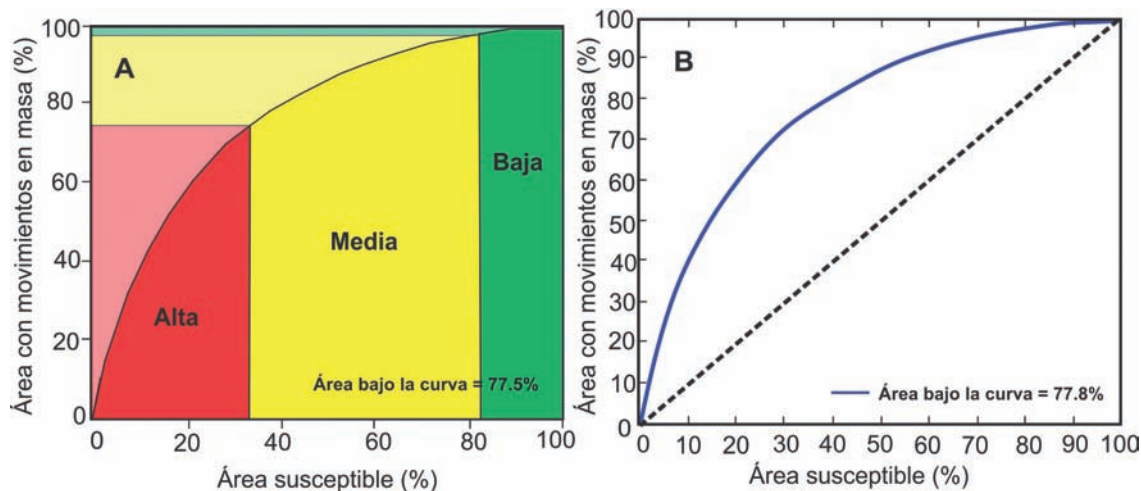


FIGURA 6. A. Curva de éxito con un área bajo la curva (AUC) de 77,5%, utilizada para la clasificación en categorías de alto, medio y bajo. B. Curva de predicción que indica la capacidad de predicción del modelo de susceptibilidad obtenido (77,8%).

### Evaluación de la probabilidad temporal

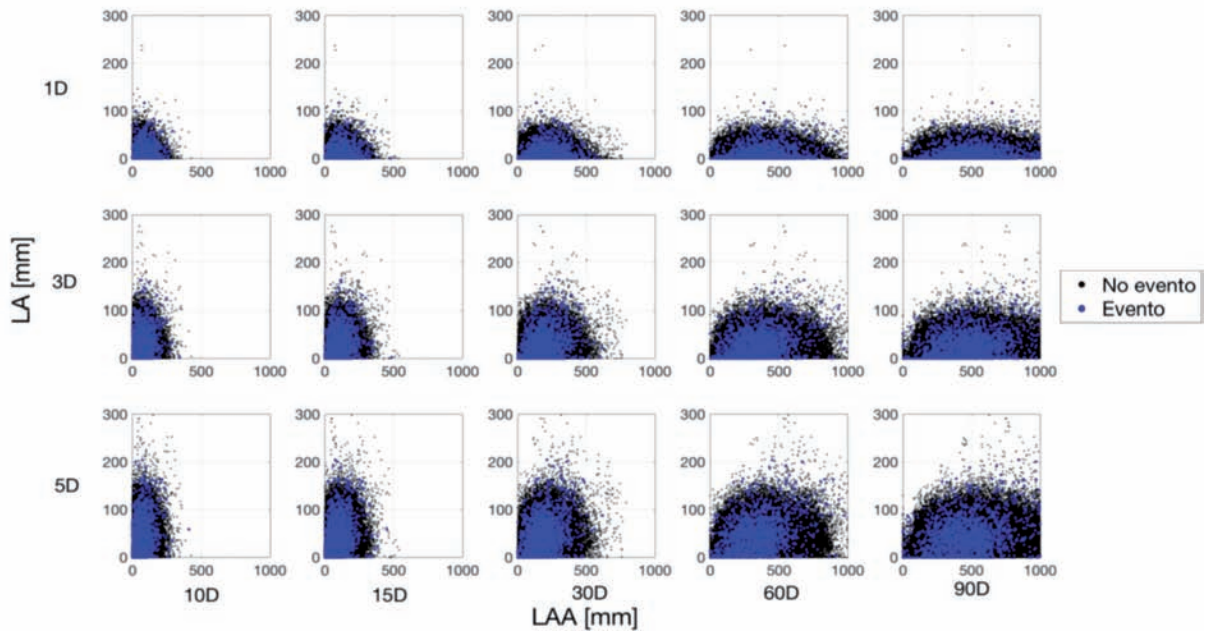
Con el fin de seleccionar la combinación de lluvia acumulada antecedente (LAA) y lluvia acumulada (LA) que mejor represente la ocurrencia de movimientos en masa, y de esta manera estimar la probabilidad temporal de ocurrencia de una manera detallada en el Valle de Aburrá, se construyeron gráficos que relacionan la cantidad de lluvia que se acumuló para combinaciones de LA de 1, 3 y 5 días y LAA de 10, 15, 30, 60 y 90 días, y la ocurrencia o ausencia de movimientos en masa para cada día (FIGURA 7). En color azul se presentan las combinaciones de lluvia de los días que presentaron movimientos en masa, y los puntos negros representan las combinaciones de lluvia de los días que no presentaron movimientos en masa. Cada punto en cada gráfica representa una combinación de LA y LAA. Es decir, un punto azul en la figura 5D vs 90D, significa inicialmente que se consulta la lluvia acumulada de 95 días previos al movimiento en masa, donde en el eje LA 5D se tiene la lluvia acumulada del día del movimiento en masa más los cuatro días anteriores, y en el eje 90D se tiene la lluvia acumulada en los 90 días anteriores a los 5 días de LA.

Analizando todas las posibilidades resultantes, se seleccionó mediante inspección visual la combinación lluvia acumulada de un día versus la lluvia acumulada antecedente de 30 días (LA1 - LAA30) como escenario de amenaza, considerando que dicha combinación en la FIGURA 7 permite separar relativamente bien las

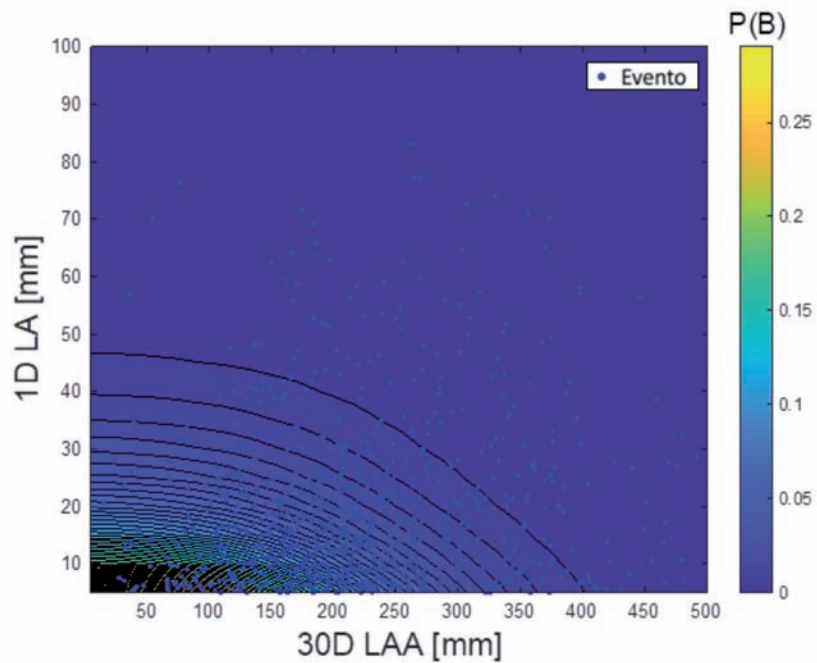
lluvias de los días que no se presentaron movimientos en masa de las lluvias en los días que si se presentaron movimientos en masa. Sin embargo, es importante aclarar que cualquier combinación puede ser utilizada de acuerdo con el escenario que se desee estimar.

La FIGURA 8 presenta la relación entre la ocurrencia de movimientos en masa con respecto a la distribución de la probabilidad de ocurrencia del evento de lluvia para la combinación LA1 - LAA30 seleccionada. La mayor concentración de los movimientos en masa se distribuye entre 100 y 250 mm de lluvia en 30 días de lluvia acumulada antecedente (LAA) y desde pocos mm de lluvia hasta 30 mm en 1 día de lluvia acumulada (LA). En general, se observan probabilidades máximas entre 0,2-0,1 para combinaciones de lluvia entre 0-10 mm para 1D y 0-100 mm para 30D; sin embargo, en estos rangos se presenta tan solo el 1,8 % de los movimientos en masa. Es decir, el mayor número de movimientos en masa se presenta para combinaciones de lluvia menos frecuentes. Por último, se observa también para valores entre 0 y 100 mm de LAA la reducción de las probabilidades de ocurrencia de eventos de lluvia a medida que incrementa la LA, llegando a valores cercanos a cero para lluvias acumuladas de 1D por encima de 30 mm. De forma similar, se observa una fuerte reducción en las probabilidades de ocurrencia de eventos de lluvia a partir de valores de LAA por encima de 100 mm, alcanzando valores cercanos a cero para lluvias superiores a 250 mm de LAA.





**FIGURA 7.** Combinación LAA vs LA que mejor representa la ocurrencia y no ocurrencia de eventos. Los puntos negros corresponden a días sin movimientos en masa, y los puntos de color azul a días con ocurrencia de movimientos en masa (Lluvia acumulada de 1D: un día, 3D: tres días, 5D: 5 días; y lluvia acumulada antecedente de 10D: 10 días, 15D: 15 días, 30D: 30 días, 60D: 60 días, 90D: y 90 días).



**FIGURA 8.** Relación de la ocurrencia de movimientos en masa y probabilidad de ocurrencia de combinaciones de lluvia. Los puntos azules corresponden a los días con ocurrencia de movimientos en masa. Las líneas negras representan isolíneas de valores de  $P(B)$ .

La FIGURA 9 presenta la distribución de  $P(A|B)$  para un LA1-LAA30. Inicialmente, el acercamiento muestra mayores probabilidades de que ocurran movimientos en masa para combinaciones 350 y 400 mm en 30 LAA y 30 mm en 1 LA. Finalmente, la FIGURA 10 presenta  $P_T$  la probabilidad diaria de que se presente una combinación de lluvia de 1D vs 30D y que dado dicha combinación se presente un movimiento en masa. En este sentido, por ejemplo, si en un día se registra 30 mm de lluvia diaria, y la lluvia acumulada de 30 días es de 635 mm, existe un 0,0006 % de probabilidad de que ocurra un movimiento en masa. En la figura se

observa que para valores de 1D menores a 30 mm, la probabilidad diaria de ocurrencia de un movimiento en masa aumenta rápidamente a medida que aumenta la LAA de 30D, y por el contrario, para valores superiores a 30 mm, se presentan probabilidades de ocurrencia muy bajas, independiente de LAA. Esto corrobora lo observado en la FIGURA 8 donde LAA en 30D por encima de 250 mm son muy poco probables; la mayor ocurrencia de movimientos en masa se presenta para valores inferiores a 250 mm en 30 días y lluvia entre 0 y 30 mm para un día.

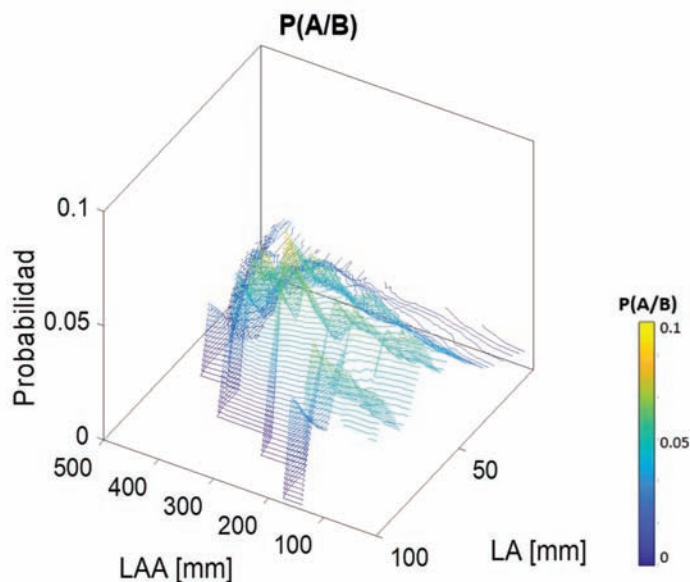


FIGURA 9. Probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa dada una condición de lluvia para LA1-LAA30. Los colores significan un aumento en la probabilidad con la misma escala de la FIGURA 7.

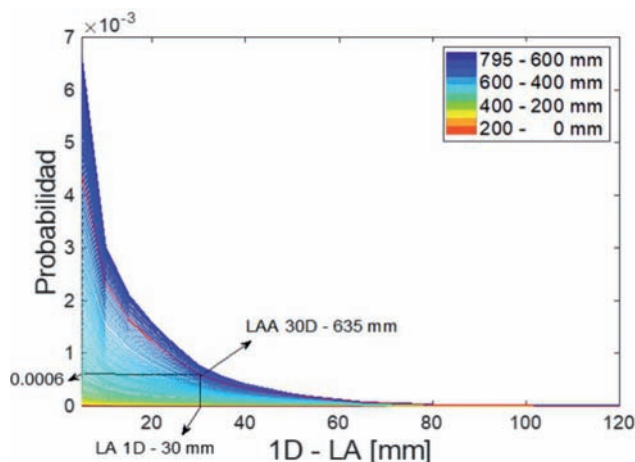


FIGURA 10.  $P_T$  Probabilidad diaria de que se exceda un evento de lluvia LA1 y LAA30 y que dada dicha condición se presente un movimiento en masa. Los colores de las líneas representan LAA.

### Evaluación de la probabilidad de magnitud

Para la construcción de la curva magnitud-frecuencia, se utilizó el inventario de movimientos en masa realizado para todo el Valle de Aburrá. Del total de movimientos en masa (19.671), se eliminaron aquellos eventos demasiado pequeños para la escala de trabajo y resolución espacial del modelo de elevación digital, obteniendo como número total de movimientos en

masa 14.919. Los rangos para la clasificación de los movimientos en masa según su área se definieron con base en la regla de Sturges, la cual sugiere que el número de clases a ser considerado para elaborar un histograma depende de la cantidad de datos. Para 14.919 datos, se obtienen 15 clases. En la TABLA 4, se presentan los resultados del cálculo de densidad de probabilidad experimental.

**TABLA 4.** Número de deslizamientos y densidad de probabilidad por intervalo de área de deslizamiento.

$A_L$ (km <sup>2</sup> )		$\Delta N_L$	$P(A_L)$ (km <sup>-2</sup> )
<3,00E-05		591	1,32E+03
3,00E-05	4,00E-05	1.147	7,69E+03
4,00E-05	6,00E-05	1.986	6,66E+03
6,00E-05	8,00E-05	1.602	5,37E+03
8,00E-05	1,00E-04	1.299	4,35E+03
1,00E-04	2,00E-04	3.740	2,51E+03
2,00E-04	4,00E-04	2.510	8,41E+02
4,00E-04	6,00E-04	836	2,80E+02
6,00E-04	8,00E-04	417	1,40E+02
8,00E-04	1,00E-03	194	6,50E+01
1,00E-03	2,00E-03	375	2,51E+01
2,00E-03	4,00E-03	139	4,66E+00
4,00E-03	6,00E-03	46	1,54E+00
6,00E-03	8,00E-03	16	5,36E-01
8,00E-03	3,00E-02	21	6,40E-02
$N_{LT}$		14.919	

$A_L$ : intervalos de clases,  $\Delta N_L$ : número de movimientos en masa definidos en el intervalo de áreas.  $P(A_L)$ : densidad de probabilidad para dicho intervalo a partir de la Ecuación 6 y datos de la TABLA 5.

Para obtener una función teórica que se ajuste a los movimientos en masa de Valle de Aburrá, se modificaron los valores de  $a$ ,  $s$  y  $\rho$  propuestos por

Malamud *et al.* (2004) que rigen la función Gamma Inversa de tres parámetros (TABLA 5).

**TABLA 5.** Parámetros de la función Gamma inversa ajustados para el AMVA.

Parámetro	Valor
$a$ (km <sup>3</sup> )	0,00045
$\rho$	1,7
$s$ (km <sup>2</sup> )	-0,000047
Gamma ( $\rho$ )	0,90863873

Bajo esta parametrización, se construyeron las gráficas que relacionan la densidad de probabilidad con sus áreas. En la FIGURA 11, se presenta el comportamiento estadístico de las áreas de los movimientos en masa de la zona de estudio, como una función de densidad de probabilidad e ilustra la diferencia entre la curva teórica por Malamud *et al.* (2004), el ajuste para los municipios, y la curva experimental que distribuye los movimientos en masa.

Diferentes trabajos han señalado que aunque las relaciones área-frecuencia presentan distribuciones similares, con una frecuencia mayor a medida que aumentan el área de los movimientos en masa y un quiebre para movimientos en masa de áreas pequeñas, también se ha observado que dicha tendencia varía de acuerdo con el factor detonante y su magnitud, la

completitud de la base de datos, la mecánica de los movimientos en masa incorporados en el análisis y las condiciones geológicas y ambientales del área de estudio (Zhang *et al.*, 2019; Malamud *et al.*, 2004). La FIGURA 11 muestra que la curva gris que corresponde al Valle de Aburrá exhibe una mayor frecuencia para los eventos pequeños que la curva teórica propuesta por Malamud (curva negra), lo cual puede estar asociado a la alta resolución espacial de las fotografías aéreas utilizadas en el inventario y que permite fotointerpretar eventos pequeños. Por el contrario, para movimientos en masa de mayor área se observa una frecuencia menor, o que podría señalar un inventario de menor magnitud como lo propone Malamud *et al.* (2004), o incluso la omisión involuntaria de movimientos de gran área o cambios propios de las condiciones ambientales y geológicas del Valle de Aburrá.

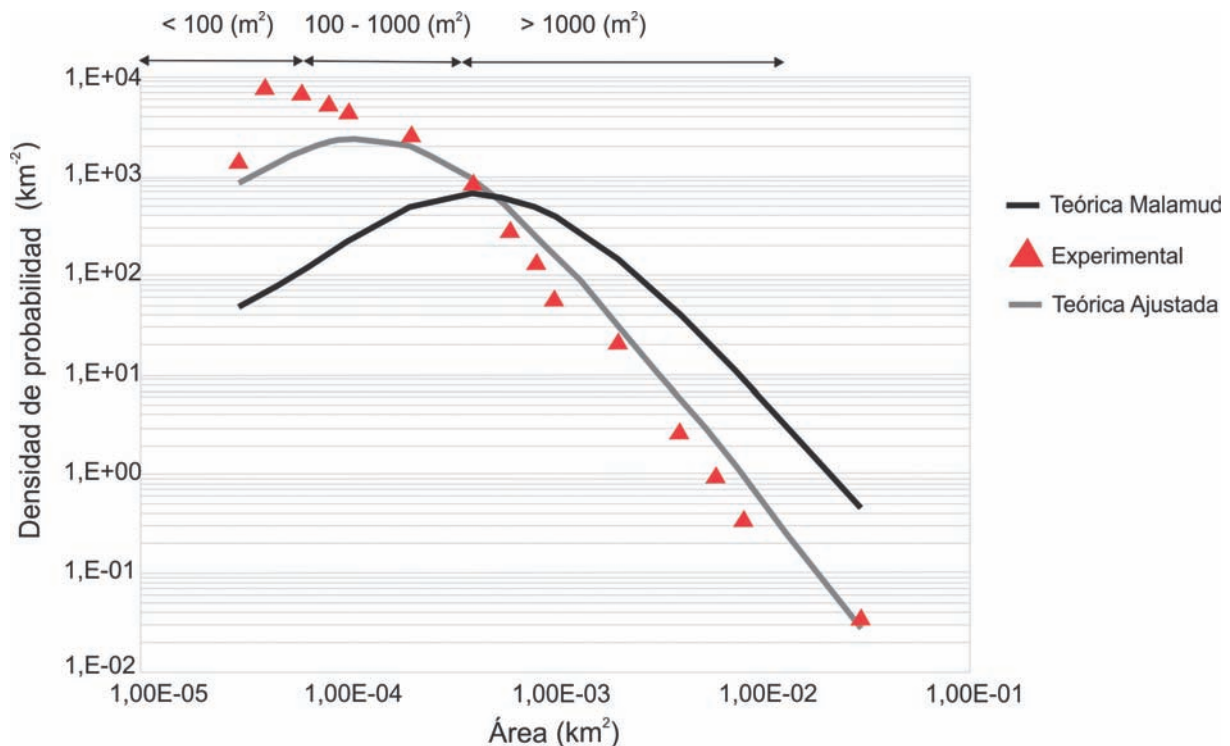


FIGURA 11. Comparación entre la propuesta teórica de Malamud *et al.* (2004) (línea negra) y la curva adaptada a AMVA (línea gris que sigue la tendencia marcada por los triángulos anaranjados).

Como las gráficas representan densidad de probabilidad, para el cálculo de la probabilidad de magnitud de los movimientos en masa, se obtiene el área bajo la curva experimental en los intervalos de área menores a 100

m<sup>2</sup>, de 100 m<sup>2</sup> a 1.000 m<sup>2</sup> y mayores a 1.000 m<sup>2</sup>. En la TABLA 6, se presentan los valores de la probabilidad para los intervalos descritos.



**TABLA 6.** Probabilidad de magnitud de movimientos en masa.

$A_L$ (m <sup>2</sup> )	$\Delta N_L$	$P(A_L)$ (%)
< 100	7.367	45,01
100 – 1.000	8.526	52,10
> 1.000	473	2,89

En la TABLA 6,  $A_L$  son los intervalos de área estudiados,  $\Delta N_L$  es el número de movimientos en masa contemplados en los intervalos y  $P(A_L)$  es la probabilidad asociada a los intervalos o la probabilidad de magnitud.

Los movimientos en masa con áreas menores a 100 m<sup>2</sup> ocasionan daños de baja magnitud a las estructuras y las personas. Eventos mayores a los 1.000 m<sup>2</sup> tienen menor probabilidad de ocurrencia. Para fines de este proyecto, se adoptó el valor de probabilidad de magnitud para eventos contemplados en el intervalo

de 100 m<sup>2</sup> a 1.000 m<sup>2</sup> para el mapa de amenaza. Esto implica que el mapa de amenaza corresponde a un escenario más probable en términos de magnitud de los movimientos en masa, por lo tanto, no al escenario más crítico.

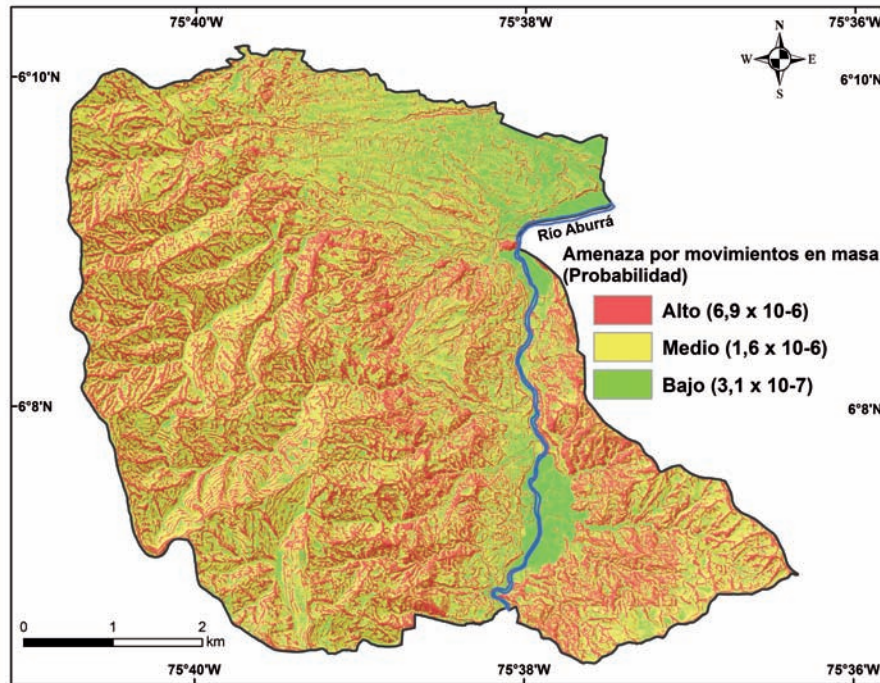
### Estimación y clasificación de la amenaza

La amenaza por movimientos en masa detonados por lluvia en suelo rural es obtenida a partir del producto de la probabilidad espacial, la probabilidad temporal y la probabilidad de magnitud. La FIGURA 12 presenta la amenaza por movimientos en masa detonada por lluvia en el municipio de La Estrella, clasificada en categoría alta, media y baja, utilizando la Curva de Éxito (ver FIGURA 6A), cuyas probabilidades de ocurrencia son de  $6,9 \times 10^{-6}$ ,  $1,6 \times 10^{-6}$  y  $3,0 \times 10^{-7}$ , respectivamente. En la TABLA 7 se presentan las características más relevantes relacionadas con cada categoría.

**TABLA 7.** Aspectos de cada categoría de amenaza.

Categoría	Movimientos en masa en el inventario (%)	Densidad (MenM/km <sup>2</sup> )*	Área del municipio (%)
Alta	77	25	37
Media	22	7	56
Baja	1	< 1	7

\*MenM: movimientos en masa



**FIGURA 12.** Mapa de amenaza para el municipio de La Estrella por movimientos en masa con una magnitud entre 100 m<sup>2</sup> y 1.000 m<sup>2</sup> y un evento de lluvia acumulada diaria de 30 mm y lluvia acumulada de 30 días antecedentes de 635 mm.

La amenaza alta y media están ampliamente dispersas en todo el municipio, en ambas márgenes del río Aburrá, asociadas a las zonas de fuertes pendientes y desarrollo de lomos con topes angostos y largos; la categoría baja se identifica en el fondo de los valles de las principales quebradas y al norte del municipio en límites con el área urbana y de expansión.

## CONCLUSIONES

La evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias requiere la estimación cuantitativa, tanto de la probabilidad espacial de ocurrencia de un movimiento en masa, al igual que la probabilidad temporal del factor detonante, en este caso la lluvia, y finalmente la probabilidad de la magnitud del evento. En el estado del arte, se han presentado en los últimos años metodologías que permiten evaluar de forma independiente cada una de estas probabilidades, sin embargo, se han realizado pocos estudios que han integrado los métodos para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa. En parte, esto se debe a las restricciones de información requeridas para estimar de forma cuantitativa las diferentes probabilidades necesarias, las cuales se fundamentan esencialmente en la elaboración inicial de un completo inventario de movimientos en masa.

Para el caso del Valle de Aburrá, se elaboró un detallado trabajo de levantamiento histórico y fotografías aéreas que permitió estimar la amenaza para un escenario de movimientos en masa con un área entre 100 y 1.000 m<sup>2</sup> detonados por una lluvia de un día acumulado de 30 mm y de 30 días antecedentes acumulados de 635 mm. Las probabilidades diarias encontradas varían en órdenes de magnitud entre 10<sup>-6</sup>, para las categorías alta y media donde se concentra el 99% de los movimientos en masa inventariados, y 10<sup>-7</sup> para la categoría baja. El método implementado, además de considerar y evaluar cuantitativamente la amenaza en términos espaciales, temporales y de magnitud, y verificar en el modelo su desempeño y capacidad de predicción, permite establecer múltiples escenarios de amenaza por movimientos en masa detonado por lluvias para los diferentes procesos de planeación. Se puede considerar un umbral de lluvia mayor o menor, o una magnitud del evento diferente a la seleccionada en el escenario de amenaza utilizado en el presente estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el marco del contrato N° 715 de 2017, celebrado entre el Área Metropolitana

del Valle de Aburrá y la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

## REFERENCIAS

- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73(3-4), 247-265. doi: 10.1016/j.enggeo.2004.01.007.
- AMVA. (2007). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. 745 p. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- AMVA-UNAL. (2009). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá - Libro I. 124 p. Área Metropolitana del Valle de Aburrá – Universidad Nacional de Colombia.
- AMVA-UNAL. (2018). Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial. Informe técnico. Área Metropolitana del Valle de Aburrá – Universidad Nacional de Colombia.
- Aristizábal, E., y Gómez, J. (2007). 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), 17-30.
- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J., Vélez, J., Martínez, H., and Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 8(15), 95-111.
- Bai, S., Wang, J., Thiebes, B., Cheng, C., and Yang, Y. (2014). Analysis of the relationship of landslide occurrence with rainfall: a case study of Wudu County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(4), 1277-1285. doi: 10.1007/s12517-013-0939-9.
- Banco Mundial y GFDRR. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Global Facility for Disaster Reduction and

- Recovery - Sistema Nacional de Información Para La Gestión Del Riesgo de Desastres. 436 p. Bogotá, Colombia: Banco Mundial.
- Cantarino, I., Carrion, M.A., Goerlich, F., and Martínez, V. (2019). A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. *Landslides*, 16(2), 265-282. doi: 10.1007/s10346-018-1063-4.
- Corominas, J. (2000). Landslides and climate. In: Bromhead EN (ed) *VIII International Symposium on Landslides Cardiff UK*, keynote lectures CD-ROM 200.
- Cruden, D.M., and Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. In: A.K. Turner, R.L. Schuster (eds.). *Landslides: investigation and mitigation* (pp. 36-75). Chapter 3. Transportation research board special report. Vol. 247.
- Changnon, S., Pielke, R.Jr., Changnon, D., Sylves, R., and Pulwarty, R. (2000). Human factors explain the increased losses from weather and climate extreme. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 437-442.
- Chica, A. (1989). Apuntes de geotecnia: cursos de geotecnia y prácticas geotécnicas, Facultad de Minas, Ed. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Chung, C.F., and Fabbri, A.G. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(12), 1389-1399.
- Chung, C.F., and Fabbri, A.G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451-472. doi: 10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b.
- DANE. (2005). Censo 2005. Consultado el 15 de febrero de 2018. [www.dane.gov.co/censo/](http://www.dane.gov.co/censo/).
- Dilley, M., Chen, R., Deichmann, U., Lerner-Lam, A., and Arnold, M. (2005). *Natural disaster hotspots. A global risk analysis*. Washington: World Bank.
- Davis, P.A., and Goodrich, M.T. (1990). A proposed strategy for the validation of ground-water flow and solute transport models. Technical Report, Sandia National Labs. Albuquerque, NM (USA).
- Düzgün, H.S.B. and Grimstad, S. (2007). Reliability-based stability analysis and risk assessment for rock slides in Ramnefjell. *Proceedings of Applications and Statistics and Probability in Civil Engineering ICASPI0*, Tokyo, Japan.
- Eeckhaut, M., and Hervás, J. (2012). Landslide inventories in Europe and policy recommendations for their interoperability and harmonisation. JRC Scientific and Policy Reports, Report EUR 25666.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861-874. doi: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.
- Flórez, M., Molina, M., y Ramírez, I. (1996). Método cualitativo para la determinación de los niveles de amenaza por movimientos en masa de la ciudad de Medellín, ladera occidental. Alcaldía de Medellín, 90 p.
- Glade, T., Crozier, M., and 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. doi: 10.1007/s000240050017.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and 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. doi: 10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
- Guzzetti, F., and Tonelli, G. (2004). Information system on hydrological and geomorphological catastrophes in Italy (SICI): a tool for managing landslide and flood hazards. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(2), 213-232. doi: 10.5194/nhess-4-213-2004.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3-4), 239-267. doi: 10.1007/s00703-007-0262-7
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5(1), 3-17. doi: 10.1007/s10346-007-0112-1.

- Hermelin, M. (1984). Riesgo geológico en el Valle de Aburrá. *Conferencia sobre Riesgos Geológicos en el Valle de Aburrá*, Medellín, Colombia.
- Ho, J.Y., and Lee, K.T. (2017). Performance evaluation of a physically based model for shallow landslide prediction. *Landslides*, 14(3), 961-980. doi: 10.1007/s10346-016-0762-y.
- Hoppe, P., and Pielke, R.A.Jr. (2006). Climate Change and Disaster Losses Workshop: Understanding and Attributing Trends and Projections. Hohenkammer, Germany, 234 p.
- INGEOMINAS. (1990). Zonificación de aptitud del suelo para el uso urbano costado occidental de Medellín. Reporte interno, 91 pp.
- Jaiswal, P., van Westen, C., and Jetten, V. (2010). Quantitative landslide hazard assessment along a transportation corridor in southern India. *Engineering Geology*, 116(3-4), 236-250. doi: 10.1016/j.enggeo.2010.09.005.
- LA RED y OSSO. (2017). DesInventar. Consultado el 25 de septiembre de 2017. <http://www.desinventar.org/es/>
- Liu, C., Frazier, P., and Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 606-616. doi: 10.1016/j.rse.2006.10.010.
- Malamud, B.D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711. doi: 10.1002/esp.1064.
- Morss, R.E., Wilhelmi, O.V., Meehl, G.A., and Dilling, L. (2011). Improving societal outcomes of extreme weather in a changing climate: An integrated perspective. *Annual Review of Environment Resources*, 36, 1-25. doi: 10.1146/annurev-environ-060809-100145.
- Oh, H.J., and Lee, S. (2011). Landslide susceptibility mapping on Panaon Island, Philippines using a geographic information system. *Environmental Earth Science*, 62(5), 935-951. doi: 10.1007/s12665-010-0579-2.
- OSSO y LA RED. (2009). DesInventar. Sistema de inventario de desastres. Guía Metodológica.
- Ozdemir, A., and 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. doi: 10.1016/j.jseaes.2012.12.014.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927-930. doi: 10.1130/G33217.1.
- Regmi, N.G., Giardino, J.R., and Vitek, J.D. (2010). Modeling susceptibility to landslide using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1-2), 172-187. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.10.002.
- Rodríguez, E.A., Sandoval, J.H., Chaparro, J.L., Medina, E., Ramírez, K.C., Castro, E., Castro, J.A., y Ruiz, G.L. (2017). Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- Sánchez, O., y Aristizábal, E. (2017). Análisis de los impactos por movimientos en masa en Colombia. *XVI Congreso Colombiano de Geología*, Santa Marta, Colombia.
- Sepúlveda, S.A., and Petley, D.N. (2015). Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8), 1821-1833. doi: 10.5194/nhess-15-1821-2015.
- SGC. (2015). Guía Metodológica para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- SGC. (2017). SIMMA. Servicio Geológico Colombiano. Retrieved from <http://simma.sgc.gov.co/#/>
- Shelmon, R. (1979). Zonas de deslizamientos en los alrededores de Medellín, Antioquia (Colombia). Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS. 45 pp.



- Sujatha, E.R., Kumaravel, P., and 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. doi: 10.1007/s10064-013-0537-9.
- Tokuhiro, H. (1999). Landslide in Villa Tina, Medellín City, Colombia. In: K. Sassa (ed.). *Landslides of the World* (pp. 198-201). Japan Landslide Society, Kyoto University Press.
- Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. Natural Hazards. Paris: UNESCO.
- Van Westen, C.J., Rengers, N., and Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30(3), 399-419. doi: 10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e.
- Vega, J.A., and Hidalgo, C.A. (2016). Quantitative risk assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings. *Geomorphology*, 273, 217-235. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.07.032.
- Wieczorek, G.F., and Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: M. Jakob, O. Hungr (eds.). *Debris-flow hazards and related phenomena* (pp. 325-362). Heidelberg: Springer.
- Wu, C.Y., and Chen, S.C. (2013). Integrating spatial, temporal, and size probabilities for the annual landslide hazard maps in the Shihmen watershed, Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2353-2367. doi: 10.5194/nhess-13-2353-2013.
- Zhang, J., van Westen, C., Tanyas, H., Mavrouli, O., Ge, Y., Bajrachary, S., Gurung, D.R., Dhital, M.R., and Khana, N.R. (2019). How size and trigger matter: analyzing rainfall- and earthquake-triggered landslide inventories and their causal relation in the Koshi River basin, Central Himalaya. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(8), 1789-1805. doi: 10.5194/nhess-19-1789-2019.

---

---

Edier Aristizábal  
ORCID: 0000-0002-2648-2197

Sandra López  
ORCID: 0000-0002-3354-0914

Oscar Sánchez  
ORCID: 0000-0001-5112-5725

Mariana Vásquez  
ORCID: 0000-0001-6774-9903

Felipe Rincón  
ORCID: 0000-0002-6851-2120

Diana Ruiz-Vásquez  
ORCID: 0000-0002-3396-3298

Sebastián Restrepo  
ORCID: 0000-0003-2847-4980

Johan Sebastián Valencia  
ORCID: 0000-0003-4460-4837

---

---

Trabajo recibido: febrero 18 de 2019  
Trabajo aceptado: agosto 01 de 2019