Assessment of heuristic and statistical methods for landslides hazard zonation at intermediate scales.

Marco Fidel Gamboa Ramírez

Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. mgamboa@eafit.edu.co

Abstract
There are several methods for landslides hazard zonation; in Colombia mainly the studies used qualitative methods, the results vary according to the criteria of each expert, as they depend on the knowledge and experience of researchers, therefore it is necessary to use quantitative methods to reduce the level of subjectivity, improve the accuracy and reliability of predictions and in this way, more criteria to guide public policies for risk management. The aim of this study is to evaluate different methods for landslides hazards zonation at intermediate scales in two municipalities of Antioquia department (Colombia) and statistically compare the results obtained with each of the methodologies used. The comparison of these types of maps in other studies, has demonstrated better predictability with statistical models compared with heuristic models.

Keywords: hazard zonation; heuristic and statistical methods, landslides

Evaluación de métodos heurísticos y estadísticos para zonificación de amenazas por movimientos en masa a escalas intermedias.

Resumen
Existen diferentes métodos para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa; en Colombia la mayor parte de los estudios utilizan métodos cualitativos, cuyos resultados varían de acuerdo al criterio de cada experto, ya que dependen del conocimiento y la experiencia de los investigadores, por lo tanto se hace necesario utilizar métodos cuantitativos para reducir el nivel de subjetividad, mejorar la precisión y confiabilidad de las predicciones y de esta manera, poder orientar con más criterio las políticas públicas de gestión del riesgo. El objetivo de este trabajo es evaluar distintos métodos de zonificación de amenazas por movimientos en masa a escalas intermedias en dos municipios del departamento de Antioquia (Colombia) y comparar estadísticamente los resultados obtenidos con cada una de las metodologías utilizadas. La comparación de este tipo de mapas en otros estudios, ha demostrado una mejor capacidad de predicción con modelos respecto a modelos heurísticos.

Palabras clave: métodos de zonificación de amenaza; métodos heurísticos, métodos estadísticos, movimientos en masa.

1 Introducción

La gestión del riesgo en Colombia se basa en tres pilares fundamentales, el conocimiento, la reducción del riesgo, y el manejo de los desastres. Esta concepción de la gestión del riesgo pasa de un enfoque basado en la atención de las emergencias, a uno donde la prevención se hace a partir del conocimiento de las amenazas y riesgos asociados en el territorio, permitiendo una adecuada gestión del mismo, por medio de dos instrumentos fundamentales, los planes de gestión del riesgo y los planes de ordenamiento territorial.

En este orden de ideas, y dado que aproximadamente el 30% del territorio nacional presenta niveles de amenaza muy alta, alta y moderada por movimientos en masa [1], se plantea como una necesidad el conocimiento detallado de las amenazas por este fenómeno. Sin embargo, en el país las metodologías empleadas contemplan un alto grado de subjetividad, lo que genera poca precisión y confiabilidad en dichos estudios. Este trabajo permite aplicar y comparar diferentes metodologías de zonificación, como lo son: métodos heurísticos, estadísticos univariados, bivariados y los métodos multivariados, en dos municipios del departamento de Antioquia afectados por estos fenómenos, con el fin de establecer cuál de estos métodos se ajusta mejor a las características del territorio y a partir de datos estadísticos comparar sus resultados.

Finalmente, esto permitirá establecer cual metodología de zonificación representa mejor la condición de amenaza por movimientos en masa, para que sea aplicada en los municipios de estudio y servirá para que otros municipios del país

implementen diferentes metodologías, comparen sus resultados y de esta manera mejoraren el conocimiento de los territorios y así puedan gestionar mejor los recursos para la adecuada gestión del riesgo, dentro de sus planes municipales de gestión del riesgo y en sus planes de ordenamiento territorial.

1.1 Área de estudio

El área de estudio comprende los municipios de Ciudad Bolívar y Concordia, los cuales hacen parte de la subregión suroeste del departamento Antioquia y se localizan en el flanco oriental de la cordillera occidental del país; ocupando un área de 260,63 km^2 y 249,23 km^2 respectivamente. En la Fig. 1 se presenta el mapa de la localización de la zona de estudio.

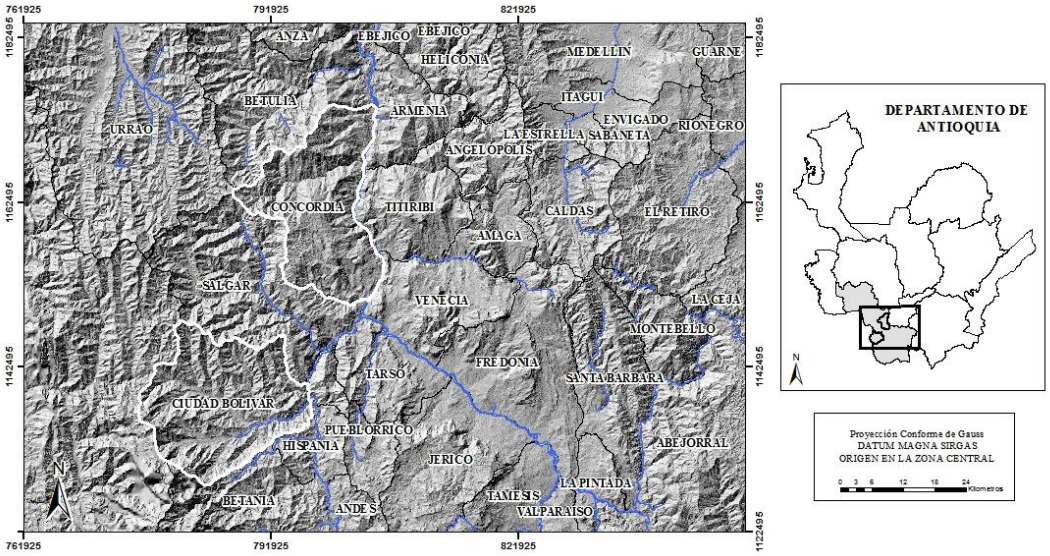


Figura 1. Localización área de estudio

2 Variables

Las variables a utilizar en los diferentes modelos de zonificación de amenaza, corresponden a el inventario de los movimientos en masa,, la información geológica, geomorfológica, morfométrica, de distancia a fallas, distancia a drenajes, distancia a vías y como detonante se seleccionó la lluvia máxima diaria para el Tr=50 años. Es importante anotar que para poder comparar los distintos métodos se utilizó la misma base de variables. A continuación se describe cada una de ellas.

2.1 Movimientos en masa

Se cartografiaron un total de 488 movimientos en masa en el municipio de Ciudad Bolívar y 1628 en Concordia, que corresponden a deslizamientos. En el caso de Ciudad Bolívar afectan principalmente las unidades geomorfológicas de espolones que se desarrollan sobre suelos residuales del Miembro Urrao (Formación Penderisco). En el municipio de Concordia afectan esencialmente las unidades geomorfológicas de espolones faceteados y festoneados que se encuentran sobre la Formación Barroso.

2.2 Geología

En el municipio de Ciudad Bolívar afloran rocas desde el Cretácico superior hasta el Cuaternario, cuyo mayor predominio está asociado a la Formación Penderisco – Miembro Urrao (Ksaau), la cual ocupa el 90% del área total del municipio y corresponde a unidades sedimentarias, compuesta por interestratificaciones de lutitas, limolitas, lodolitas, areniscas, cherts y conglomerados polimícticos; con intercalaciones puntuales de tobas[2]. También se encuentran importantes unidades de depósitos fluvio-torrenciales (6%), asociadas principalmente a las cuencas de los ríos Bolívar y Farallones, y la quebrada La Arboleda en los alrededores del centro poblado de Villa Alegría.

Asimismo el municipio de Concordia presenta rocas con edades que van desde el Cretácico superior hasta el Cuaternario. La unidad que mayor representatividad tiene en el municipio es la Formación Barroso (Ksvb) con un 58% del área total. Está compuesta por una secuencia volcánica de flujos de basaltos, aglomerados y tobas de cristales con inter-estraficaciones de chert oscuro de poco espesor. También se presenta el Miembro Urrao (19%) y la Formación Combia (18%). Esta última se caracteriza por ser una secuencia de rocas volcanoclásticas del Paleógeno, conformada por conglomerados, brechas, areniscas, arcillolitas, aglomerados, shales, tobas, entre otros [2].

2.3 Geomorfología

De acuerdo con el esquema de jerarquización geomorfológica, propuesto por [3], para ambos municipios, se define una unidad de relieve denominada Cañón del Río Cauca – San Juan, la cual se divide en 4 macrounidades, definidas como vertientes altas, medias y bajas de la margen oeste y fondo para el municipio de Ciudad Bolívar y las

macrounidades, vertientes altas, medias y bajas de la margen oeste, y vertientes con influencia volcánica y de influencia tectónica para el municipio de Concordia. Partiendo de estos rasgos regionales se delimitaron las diferentes unidades y subunidades geomorfológicas a escala 1:25.000. Estas unidades se definieron según el ambiente geomorfológico principal, ya sea denudacional, fluvial, estructural, antropogénico, entre otros.

En el municipio de Ciudad Bolívar predominan las unidades del ambiente estructural como los espolones, espolones faceteados y espolones festoneados (69%). De igual manera tienen gran importancia los planos aluvio-torrenciales del ambiente fluvial (4%)

Para el municipio de Concordia tienen mayor representatividad las unidades del ambiente estructural, como espolones faceteados, espolones festoneados y espolones (61%), seguido de las unidades del ambiente denudacional, como lomo denudado (8%) y ladera erosiva (5%).

2.4 Coberturas terrestres

Esta variable temática, contiene la información sobre las coberturas terrestres identificadas por interpretación del experto en trabajo de campo y oficina. Está basado en el sistema de clasificación CORINE Land Cover adaptado para Colombia [4]. Para el municipio de Ciudad Bolívar la cobertura terrestre con mayor representatividad son los pastos limpios (28%), seguido del bosque natural fragmentado (22%) y el mosaico de pastos y cultivos (19%).

En el municipio de Concordia predominan los pastos limpios (32%), seguido del mosaico de pastos y cultivos (22%) y el bosque fragmentado (21%). Es de anotar que en los dos municipios el cultivo de mayor distribución es el café.

2.5 Pendientes

Se define como el ángulo de la ladera con respecto a la horizontal, en términos de grados o en términos de porcentaje. Se relaciona con la ocurrencia de movimientos en masa debido a que estos constituyen un fenómeno de tipo gravitacional, en los cuáles las pendientes de rangos moderados a fuertes están asociadas a valores de aceleración de la gravedad mayores. La ocurrencia de estos movimientos se relaciona también con la generación de suelo, que se desarrolla de manera general en condiciones de menor inclinación y en menor proporción en zonas de inclinaciones mayores, con menores o nulos espesores en zonas abruptas a muy abruptas, donde predominan los fenómenos de caída de roca, por lo tanto, el comportamiento cualitativo que más se ajusta a esta variable está relacionado con una función de carácter sinoidal.

Para el municipio de Ciudad Bolívar, esta variable muestra un predominio de pendientes abruptas a muy abruptas (67%), distribuidas a lo largo de toda el área de estudio.

En el municipio de Concordia, tienen mayor representatividad las pendientes muy abruptas a abruptas (68%).

2.6 Relieve Relativo

Se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor en una unidad determinada de superficie, cuya máxima diferencia se expresa en metros. Esta diferencia de altura se presenta con relación a un nivel base del terreno, midiendo su variación indiferentemente de su altura con respecto al nivel del mar. Esta variable está directamente relacionada con la resistencia de los materiales a nivel superficial, ya que materiales con mayor resistencia desarrollan un relieve con intervalos de altura extremadamente altos y pendientes escarpadas y abruptas.

Esta variable muestra para el municipio de Ciudad Bolívar, el predominio de zonas con índice de relieve bajo (88%), en el rango de valores menores a 20 m.

De igual manera para el municipio de Concordia, predominan las zonas con índice de relieve bajo (88%), en el rango entre 20 y 50m.

2.7 Rugosidad

Variable asociada a la diferencia de la pendiente en un área determinada en términos de celdas (25X25 celdas). Matemáticamente, se define como la desviación del vector normal a la superficie de cada una de las celdas, en valores normalizados de 0 a 1, asociando los valores más altos a una rugosidad menor, y los valores más bajos a una rugosidad más alta, ya que aumenta la dispersión de los vectores. En términos de amenaza, esta variable se relaciona con la definición de formas asociadas a taludes y diferencias entre las laderas, las crestas y los valles, asociando de manera general con una mayor susceptibilidad por movimientos de masa a aquellas laderas con mayor rugosidad.

Esta variable muestra para el municipio de Ciudad Bolívar predominancia de las zonas con rugosidad muy alta y alta (67%) y por lo tanto su distribución se da en la mayoría de veredas que lo conforman. De igual manera, para el municipio de Concordia, predominan las zonas de rugosidad muy alta y alta (88%).

2.8 Distancia a fallas

Contiene la distancia en metros, a las fallas geológicas que tienen influencia sobre la zona de estudio para los municipios de Ciudad Bolívar y Concordia. En la Tabla 1 se encuentran los rangos de las distancias utilizados para esta variable.

Tabla 1.
Distancia a fallas

Distancia a fallas (m)
0-100
100-350
350-500
500-1000
>1000

Fuente: Adaptado de [5]

2.9 Distancia a drenajes

Contiene la distancia en metros a los drenajes principales para los municipios de Ciudad Bolívar y Concordia. En la Tabla 2 se encuentran los rangos de las distancias utilizados para esta variable.

Tabla 2.
Distancia a drenajes

Distancia a drenajes (m)
< 25
25-50
50-100
100-250
>250

Fuente: Adaptado de [5]

2.10 Distancia a vías

Contiene la distancia en metros a las vías principales, para los municipios de Ciudad Bolívar y Concordia. En la Tabla 3 se encuentran los rangos de las distancias utilizados para esta variable.

Tabla 3.
Distancia a vías

Distancia a vías (m)
< 20
20-40
40-100
100-350
>350

Fuente: Adaptado de [5]

2.11 Detonante lluvia

Esta variable presenta los valores máximos diarios de precipitación en milímetros. La información se extrajo del análisis de la frecuencia de las estaciones de lluvia ubicadas en la zona de estudio. El análisis de frecuencia, consistió en determinar los parámetros de las distribuciones de probabilidad y determinar con el factor de frecuencia, la magnitud del evento para un período de retorno dado. En ambos municipios fueron probados los diferentes periodos de retorno (2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años), encontrando que para los dos municipios el Tr=50 años, era el que mejor representatividad lograba de las condiciones observadas en campo, y el que estadísticamente concentraban la mayor cantidad de movimientos en la menor área.

3 Métodos de Zonificación

La selección del método de zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, más adecuado depende en general de la relación que existe entre factores como disponibilidad, calidad y exactitud de los datos, la resolución de zonificación, los resultados requeridos, la escala de la zonificación, etc. [6].

3.1 Método Heurístico

Para los modelos heurísticos, se utilizan las opiniones de expertos, con el fin de estimar el potencial de movimientos en masa, a partir de datos de las variables independientes del lugar analizado. El diseño de este tipo de modelos requiere un análisis exhaustivo de los factores causales y su relación en el área de estudio [7].

Se pueden realizar dos tipos de análisis heurísticos, el análisis geomorfológico directo, en el cual la amenaza se determina directamente por los expertos en el trabajo de campo, calificando las unidades geomorfológicas en relación con los movimientos en masa [8], y el denominado AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) que consiste en un método semicualitativo que involucra una comparación por pares, realizada por los expertos a partir de una matriz de atributos o variables que contribuyen a la generación de los movimientos en masa [9]. En el sentido estricto, el método geomorfológico directo, corresponde a una evaluación de susceptibilidad. El análisis heurístico introduce un grado de subjetividad que imposibilita la comparación de documentos producidos por diferentes autores [6].

3.2 Método Estadístico Univariado

El método estadístico univariado es una aproximación cuantitativa para estimar la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa en diferentes zonas de una región dada. Este método utiliza como variable independiente el mapa de densidad de movimientos en masa, el cual se aplica donde se tiene un buen registro de movimientos en masa actuales y pasados.

Este método de zonificación se basa principalmente en identificar y determinar cuantitativamente, el grado de influencia que cada variable o factor intrínseco, tiene en la generación de los movimientos en masa cartografiados. Este valor se determina, calculando la sumatoria de las áreas de los movimientos en masa que se encuentren dentro de las áreas que abarca cada unidad cartográfica de parámetro, ec. (1).

$$W\% = DZX * 100/S \qquad (1)$$

Fuente: [10]
Dónde,
W= peso o susceptibilidad de la unidad cartográfica respecto al movimiento en masa analizado.
DZX= superficie acumulada de movimiento en masa de tipo X (km^2) que hay sobre la unidad cartográfica.

S= superficie total de la unidad cartográfica (km^2).

Para aplicar este método de análisis, se contrasta cada una de las variables condicionantes, con cada uno de los tipos de movimientos en masa definidos en el mapa de los fenómenos de remoción en masa.

3.3 Método Estadístico Bivariado

El análisis estadístico bivariado, se fundamenta principalmente en un método cuantitativo, en el cual se calculan los valores ponderados de densidades de movimientos en masa, para cada clase de cada factor condicionante. Este valor de peso se conoce como Wi, que es el logaritmo natural de la densidad de movimientos en masa dentro de la clase, dividido por la densidad de movimientos en masa en general en todo el mapa [11]. A continuación se presenta la expresión utilizada para la calificación de las unidades al interior de los diferentes factores, ec. (2).

.

$$W_i = ln\left(\frac{Densclas}{Densmap}\right) = ln\left[\frac{\frac{Npix\ (Si)}{Npix\ (Ni)}}{\frac{\sum Npix\ (Si)}{\sum Npix\ (Ni)}}\right] \qquad (2)$$

Fuente: [3, 8, 11]

Dónde,

Wi = ponderación dado a determinado parámetro de clase (ejemplo, tipo de roca).
Densclas = densidad de los movimientos en masa dentro del parámetro de clase.
Densmap =densidad de los movimientos en masa dentro del todo el mapa.
Npix (Si) = número de pixeles que contienen movimientos en masa dentro de un determinado parámetro de clase.
Npix (Ni) = número total de pixeles en un determinado parámetro de clase.

Para el método bivariado se utiliza el parámetro de la correlación entre las variables y las ocurrencias de movimientos en masa. El factor de contraste es 0, cuando el patrón de deslizamientos y el patrón del mapa de clase se sobreponen solamente por la cantidad atribuida al azar, positivo cuando existe una asociación positiva entre los dos patrones y negativo cuando la asociación entre los dos patrones es negativa [5]. Este factor de contraste se explica en la ec. (3).

$$C_W = W^+ - W^- \quad (3)$$

Fuente: [5]

Dónde,

C_W = factor de contraste
W^+ = presencia de movimientos en masa.
W^- = ausencia de movimientos en masa.

3.4 Método Estadístico Multivariado

Los modelos estadísticos multivariados evalúan la relación combinada entre una variable dependiente (la ocurrencia de movimientos en masa) y una serie de variables independientes (factores que controlan los movimientos en masa) [12]. En este tipo de análisis, todos los factores relevantes son muestreados, ya sea sobre una cuadrícula o en unidades cartográficas temáticas. Para cada unidad muestreada se asignan valores de 0 o 1, según la presencia o ausencia de movimientos en masa. La matriz que resulta, se analiza usando regresiones múltiples, regresión logística, análisis discriminantes o aprendizaje activo, y los resultados se pueden expresar en términos de probabilidad [13]. Con estas técnicas se han tenido buenos resultados en zonas homogéneas o en áreas con pocos tipos de movimientos en masa [6].

3.4.1 Regresión Logística

La regresión logística, resulta útil para los casos en los que se desea predecir la presencia o ausencia de una característica o resultado según los valores de un conjunto de predictores. Es similar a un modelo de regresión lineal, pero está adaptado para modelos en los que la variable dependiente es dicotómica.

Como la probabilidad de un evento es un número entre 0 y 1, para modelar probabilidades no es práctico usar la técnica de regresión lineal, puesto que ésta modelación permite que la variable respuesta tome cualquier valor dentro y fuera de éste intervalo. La regresión logística, es un tipo de modelo lineal generalizado que extiende el modelo de regresión lineal al enlazar el rango de los números reales al intervalo (0,1). Para ello, el algoritmo de regresión logística, comienza transformando la variable dependiente en una variable logit (el logaritmo natural del odds de la ocurrencia o no ocurrencia de la variable dependiente), para luego usar estimación por máxima verosimilitud y estimar los coeficientes de la regresión. De ésta manera, la regresión logística estima la probabilidad de que un cierto evento ocurra [14].

Se empieza por considerar una variable continua Z, que se puede definir como la "propensión hacia el evento de interés", en este caso, deslizamiento, con valores mayores de Z correspondientes a mayores probabilidades de deslizamiento. En el modelo de regresión logística la relación entre Z y la probabilidad del evento de interés es descrita por la función de enlace, ec. (4).

$$\pi_i = \frac{1}{1+e^{-z_i}} \qquad (4)$$

Fuente: [14]

Donde

π_i = la probabilidad que la i-ésima área experimente un deslizamiento, y
z_i = el valor de la variable continua para la i-ésima área.

El modelo asume que Z está relacionada linealmente con las variables predictoras, esto es, ec. (5).

$$z_i = b_o + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \cdots + b_p x_{ip} \quad (5)$$

Fuente: [14]

Donde

x_{ij} = el valor del j-ésimo predictor para la i-ésima área

b_0 = corresponde al intercepto,

b_{ij} = el j-ésimo coeficiente, y

p = el número de predictores.

La presencia de deslizamientos en el municipio de Concordia representa el 3.65% del área de estudio, y en el municipio de Ciudad Bolívar el 3.71%, las cuales son cientos de veces menor que su ausencia, por lo que es considerada un evento raro. Para sortear ésta dificultad, se trabajó con el cociente R, ec. (6).

$$R = \frac{Presencia\ de\ deslizamiento}{Ausencia\ de\ deslizamiento} \qquad (6)$$

Fuente: [15,16]

Para este cociente se recomienda tomar $\mathrm{R} = 1$ (i.e., igual proporción de presencias y ausencias) en la base de entrenamiento [15, 16]; aunque otros autores recomiendan proporciones desiguales de ellos [14, 16, entre otros]. Se llevó a cabo una serie de análisis de sensitividad usando los valores $\mathrm{R} = 1, 2, 3$. Para ello, todas las locaciones con presencia de deslizamiento fueron usadas y para $\mathrm{R} = 1$ se eligieron aleatoriamente igual número de locaciones con ausencia de deslizamiento (para $\mathrm{R} = 2$ el doble, y para $\mathrm{R} = 3$ el triple). Ambos conjuntos se reunieron en una sola base, agregándose una variable binaria que indicaba la presencia o ausencia de deslizamiento. Luego, para medir la validez de los resultados del modelo de predicción de deslizamientos, se seleccionaron aleatoriamente 80% de los datos de cada base para ser usados en la calibración del modelo (training set) y el restante 20% se usó para la validación (testing set), de forma que se puediera corroborar que el algoritmo haya sido bien utilizado y que no existiera una adaptación del modelo a los datos. Lo anterior se repitió cuatro veces, generando cuatro bases correspondientes a cada valor del cociente R.

4 Resultados

La comparación de los diferentes modelos de amenaza se realizó teniendo en cuenta la localización de los movimientos en masa y los diferentes mapas de movimientos en masa obtenidos para cada modelo. Para esta comparación, se utilizó una gráfica del área acumulada de movimientos en masa vs el porcentaje de área afectada por amenaza (organizado de mayor a menor).

Se consideran como modelos de mayor exactitud, aquellos que tuvieron una mayor área bajo la curva, y que presentaron una mayor pendiente en los porcentajes más bajos (lo que indicaría que hay una mayor cantidad de área afectada en un área de amenaza de menor extensión); en otras palabras, que los valores altos del mapa de amenaza se concentren en el área de mayor afectación por movimientos en masa.

4.1 Ciudad Bolívar

Una vez evaluados los seis modelos de zonificación de la amenaza por movimientos en masa, se encontró que en el municipio de Ciudad Bolívar los métodos de mayor exactitud correspondieron a los métodos bivariados (con valores de área bajo la curva de 0,816 y 0,81 para el Wi, y el Cw respectivamente). El método multivariado (regresión logística, con área de 0,81) se ubicó muy cercano al primero de estos. De manera contraria, los métodos con menor capacidad para predecir los movimientos en masa, correspondieron a los métodos de análisis jerárquico y al estadístico univariado (con valores de área bajo la curva de 0.69 y 0.677 respectivamente). Finalmente, el método geomorfológico directo presentó valores para el área de 0.728. Ver Tabla 4.

Tabla 4.
Área bajo la curva para cada método de zonificación en el municipio de Ciudad Bolívar.

Método de zonificación	Área bajo la curva
Geomorfológico Directo	0,728
Análisis Jerárquico	0,690
Univariado	0,677
Bivariado Wi	0,816
Bivariado Cw	0,810
Multivariado-Regresión Logística	0,810

De igual manera, para analizar los resultados de los diferentes métodos, se compararon los valores del porcentaje de área de amenaza acumulada con el porcentaje de área acumulada de movimientos en masa (Ver Fig. 2 y Tabla 5). Esto nos indica que tanto concentró el método los movimientos en masa respecto al área del territorio analizado. En el caso del municipio de Ciudad Bolívar, se encontró que para un porcentaje de área acumulada de amenaza (PAAA) del 30% se obtienen valores de porcentaje de área acumulada de movimientos en masa (PAAMM) de 80.5, 78 y 66%, para los métodos bivariado Wi, Bivariado Cw y multivariado – regresión respectivamente. Indicando, que para este municipio los métodos bivariados concentran en áreas pequeñas, porcentajes importantes de movimientos en masa.

En general se observó que a medida que se aumenta el PAAA, el método que muestra mayores valores de porcentaje de área acumulada de movimientos en masa es el de regresión logística, por ejemplo para un PAAA del 50% se tienen valores del 94% de PAAMM, contra valores de 90% de los métodos bivariados. Sin embargo, lo mejor en términos de zonificación de amenazas es que se tenga un porcentaje de área acumulada de movimientos en masa alto en pequeños valores de porcentaje de área acumulada de amenaza. Ver Tabla 5.

En la Fig. 2 se presenta la gráfica que compara el comportamiento de cada uno de los diferentes métodos para el municipio de Ciudad Bolívar, según el porcentaje de área acumulada de deslizamientos y el porcentaje de área acumulada

de amenaza. En la Fig. 3 se muestran los mapas obtenidos con cada uno de los métodos.

Tabla 5.
Porcentaje de área acumulada de deslizamiento para cada método de zonificación en el municipio de Ciudad Bolívar.

	Porcentaje de área acumulada de deslizamientos								
Porcentaje área acumulada de amenaza (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Geomorfológico Directo	22	43	64,5	77,5	84,5	92	97	98	99
Análisis Jerárquico	21,5	39	55	67,5	78	86,5	93,5	97,5	99
Univariado	3	29	57	74	84	90	95	97,5	99,3
Bivariado Wi	47	66,5	80,5	86,3	90	94	96	98	99,7
Bivariado Cw	48	67	78	85	90	94	96	98	99,5
Multivariado-Regresión Logística	38,5	60	76	86	94	98	99	100	100

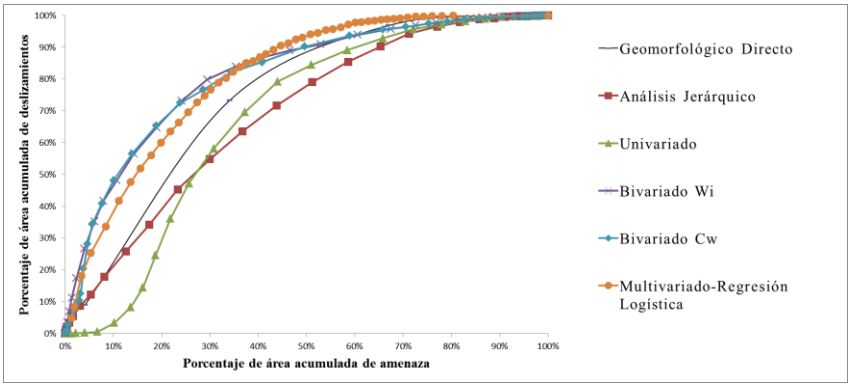
G 

Figura 2. Evaluación de la exactitud de cada uno de los métodos de zonificación de amenaza por el total de los movimientos en masa para el municipio de Ciudad Bolívar.

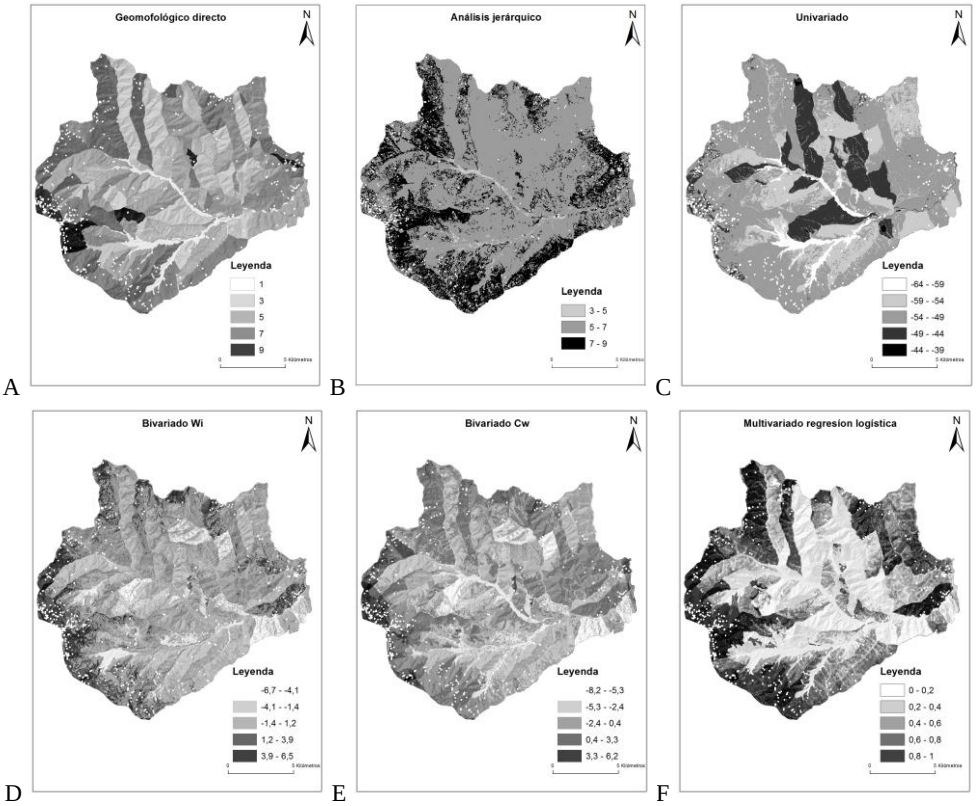


Figura 3. Mapas de amenaza municipio de Ciudad Bolívar. A) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método heurístico - geomorfológico directo. B) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método heurístico de análisis jerárquico. C) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método estadístico univariado. D) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método estadístico bivariado Wi. E) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método estadístico bivariado Cw. F) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método estadístico multivariado. Los colores oscuros, muestran los niveles de mayor amenaza para cada método

4.2 Concordia

Para el caso del municipio de Concordia, la evaluación de los seis modelos de amenaza por movimientos en masa arroja resultados similares al municipio de Ciudad Bolivar, con los métodos estadísticos bivariados y multivariados arrojando los mayores valores de precisión. En este caso, el método estadístico multivariado de regresión logística presenta los valores más altos de áreas bajo la curva con 0.816, seguido del bivariado Cw con 0,802 y del Wi con 0,798.

El método de precisión más bajo para este municipio fue el geomorfológico directo con 0.612 seguido del análisis jerárquico con 0.622. Es importante resaltar que ambos métodos son de tipo heurístico. Ver Tabla 6.

Tabla 6.
Área bajo la curva para cada método de zonificación en el municipio de Concordia.

Método de zonificación	Área bajo la curva
Geomorfológico Directo	0,612
Análisis Jerárquico	0,622
Univariado	0,773
Bivariado Wi	0,798
Bivariado Cw	0,802
Multivariado-Regresión Logística	0,816

Al comparar los valores del porcentaje de área de amenaza acumulada con el porcentaje de área acumulada de movimientos en masa se encontró que para un porcentaje de área acumulada de amenaza (PAAA) del 30% se obtienen valores de porcentaje de área acumulada de movimientos en masa (PAAMM) de 77, 74 y 73.5% para los métodos multivariado, bivariado Cw y bivariado Wi, respectivamente. Esto nos muestra que el método multivariado concentra de mejor manera en áreas pequeñas porcentajes importantes de movimientos en masa. Ver Tabla 7.

En la Fig. 4 se presenta la gráfica que compara el comportamiento de cada uno de los diferentes métodos para el municipio de Concordia, según el porcentaje de área acumulada de deslizamientos y el porcentaje de área acumulada de amenaza. En la Fig. 5 se muestran los mapas obtenidos con cada uno de los métodos.

Tabla 7.
Porcentaje de área acumulada de deslizamiento para cada método de zonificación en el municipio de Concordia

	Porcentaje de área acumulada de deslizamientos (%)								
Porcentaje área acumulada de amenaza (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Geomorfológico Directo	13	28	43	58	73	82	87	92	96
Análisis Jerárquico	18	32	45	56	67	76	85	92,5	98
Univariado	40	59	70,5	80	85,5	90	94	97	99
Bivariado Wi	48,5	63	73,5	81	86,5	91	94,5	97	99
Bivariado Cw	50	64,5	74	82	88	91	95	97,5	99
Multivariado-Regresión Logística	47	66	77	85	91	94,2	97	99	100

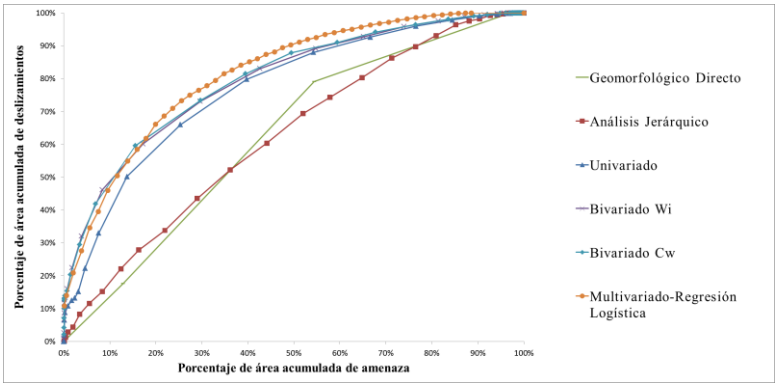
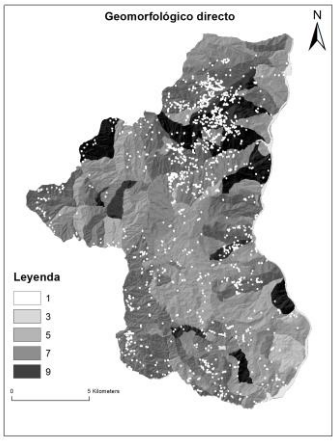
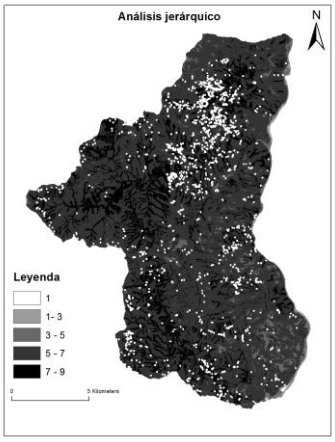
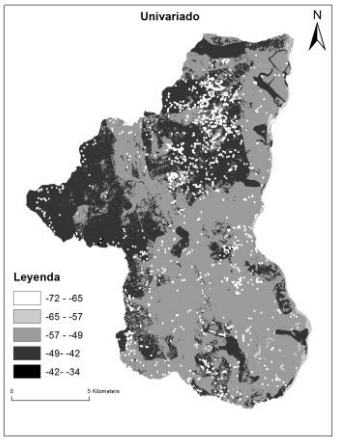
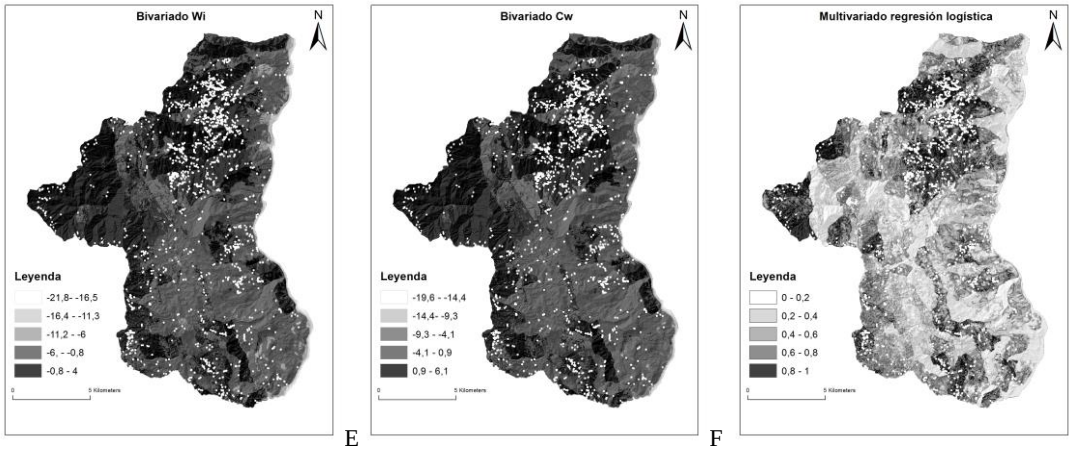
G 

Figura 4. Evaluación de la exactitud de cada uno de los métodos de zonificación de amenaza por el total de los movimientos en masa para el municipio de Concordia.

A 

B 

C 



D E F

Figura 5. Mapas de amenaza municipio de Concordía. A) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método heurístico - geomorfológico directo. B) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método heurístico de análisis jerárquico. C) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método estadístico univariado. D) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método estadístico bivariado Wi. E) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método estadístico bivariado Cw. F) Mapa de amenaza por movimientos en masa, desarrollado con el método estadístico multivariado. Los colores oscuros, muestran los niveles de mayor amenaza para cada método.

5 Discusión

En el presente estudio fueron probados 6 métodos de zonificación de amenaza por movimientos en masa para dos municipios. El análisis de los resultados determina que los métodos de mejor predicción son los estadísticos bivariados y multivariados.

El método geomorfológico directo se diferencia de los otros métodos, ya que sólo utiliza como variable la geomorfología y en el sentido estricto no podría considerarse como un método de amenaza sino como un método de susceptibilidad. Sin embargo, su empleo como amenaza es generalizado. Las bajas precisiones de este método radican en que la geomorfología agrupa características morfogenéticas, morfodinámicas y morfométricas, por lo cual las áreas son relativamente grandes y generalizan todas las características anteriormente mencionadas en un solo valor de amenaza.

El método heurístico de análisis jerárquico a pesar de utilizar las mismas variables que los métodos estadísticos, presenta precisiones bajas debido a la asignación empírica de los pesos y errores en las apreciaciones de los expertos.

Los métodos estadísticos reducen la subjetividad en el cálculo de los pesos de las variables a partir de formulaciones estadísticas, pero es mucho mayor la precisión de estos métodos, cuando se comparan entre sí más variables. Por lo anterior, los métodos multivariados y bivariados presentan mejor comportamiento que los univariados lo cual se vio reflejado en los resultados obtenidos en los dos municipios.

Los métodos estadísticos univariados y bivariados están basados en análisis de densidad, por lo que se puede sobreestimar o subestimar los pesos si las áreas son muy pequeñas o muy grandes y los deslizamientos no están levantados equitativamente, o se tiene información de sensores remotos de escalas o temporalidad diferente.

Para el método estadístico multivariado (regresión logística) la selección de la muestra de entrenamiento y de validación es de suma importancia y puede alterar sustancialmente los resultados. En nuestro caso, debido a que la proporción de pixeles con movimientos en masa respecto a la muestra total es tan baja, trabajar con todos los datos llevaría a que el modelo se sesgara y subvalorara gran parte de las combinaciones primando en los resultados las áreas con baja amenaza. Por lo anterior fue necesario trabajar con el cociente R (ec. 6), generando cuatro bases correspondientes a cada valor del cociente, con las cuales se pudo establecer si había convergencia en los resultados del análisis de regresión logística obtenido para cada base [11].

Es importante anotar que en el método de regresión logística, entre las variables consideradas relevantes arrojadas por el modelo, no se encuentra la geomorfología, esto se explica porque hay otras variables que la describen, como son la pendiente, el relieve relativo, la rugosidad.

La intervención antrópica se encuentra representada por las variables coberturas vegetales y la distancia a vías. Estas variables son las únicas dentro del modelo que pueden presentar variaciones significativas en el tiempo, por lo que actualizar estas variables y los movimientos en masa permitiría una actualización de los modelos y evaluar su influencia real sobre la amenaza en el tiempo. Dada esta variabilidad, podría considerarse que la intervención antrópica no es una variable de la susceptibilidad, sino un detonante, por ello es que desde el ordenamiento territorial se busca regular el uso del suelo.

Para este modelo de amenazas el detonante lluvia se tomó como una variable adicional dentro de los modelos, específicamente la lluvia máxima diaria para el periodo de retorno de 50 años. Esto porque no se pudo establecer la

distribución temporal de la mayoría de los movimientos. Sin embargo, esta es una condición muy común en nuestros municipios, por lo que es importante profundizar en el análisis de este detonante cuando no es posible establecer la relación temporal con los movimientos en masa. En este caso en particular, se asocia una relación espacial (distribución de movimientos en masa) a un comportamiento temporal del detonante lluvia (periodo de retorno). En este sentido, [17] ha propuesto el empleo de métodos probabilísticos como el de Poisson o binomial para el cálculo de la recurrencia, sin embargo para ello se requiere de un análisis multitemporal de los movimientos en masa que abarque un periodo de tiempo amplio.

6 Conclusiones y recomendaciones

Probados los 6 métodos de zonificación de amenaza, se encontró que los de mejor precisión correspondieron a los estadísticos bivariados y multivariados. En el caso de Ciudad Bolivar el método estadístico bivariado Wi arrojo la mejor precisión, mientras que en Concordia el método multivariado de regresión logística presentó los mejores valores.

El método estadístico bivariado arroja valores muy similares al método multivariado de regresión logística, sin embargo, el primero requiere de procesamientos estadísticos menos complejos y no requiere de programación. Por lo cual, resultaría mucho más fácil por parte de los municipios aplicar un método bivariado.

En el método estadístico bivariado, los valores de Wi o Cw no son comparables para diferentes áreas, esto sólo es posible si los pesos son estandarizados o si se convierten a probabilidades.

Los métodos heurísticos y el estadístico univariado presentaron bajos valores de predicción, por ello para poder concentrar porcentajes de área de movimientos en masa similares a los obtenidos para los métodos bivariados y multivariado se requiere de al menos un 20% más del área de los municipios.

Para este trabajo, fueron tomados como áreas de amenaza alta aquellos valores que concentraran un 70% del total del área de los movimientos en masa. Como amenaza media, los valores que concentraban entre el 70 y el 90% del área de los movimientos en masa. En este sentido, es necesario profundizar en un método que permita tomar esta decisión en función de la distribución de los datos y no con criterio experto.

Debido a la escala de los modelos empleados en este análisis, se zonifica la amenaza como la probabilidad de que se presenten movimientos en masa en un lugar determinado, pero estos no contemplan la distancia de viaje o el Run out.

Los diferentes métodos utilizados en este trabajo pueden ser aplicados a otras áreas con condiciones similares, sin embargo, se recomienda a los municipios el uso de métodos estadísticos bivariados o multivariados para la evaluación de la susceptibilidad y la amenaza, no obstante, es importante tener en cuenta que el éxito de estos métodos está en la calidad del inventario de movimientos en masa y en la información temática de las variables.

Agradecimientos

El autor agradece a los docentes María Isabel Marín y Geovany Bedoya Sanmiguel del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT, por su asesoría y revisión en el proceso de elaboración de este artículo.

Referencias

[1] Mundial, B. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. In Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco Mundial.

[2] INGEOMINAS, 1980. Geología y Geoquímica de la Plancha 166, Jericó. Memoria Explicativa. Escala 1:100.000. 250 Pág

[3] CORANTIOQUIA - EAFIT. (2015). Convenio 1502-6. Aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de Corantioquia. Anexo 1. Documento metodológico. 73 Pág.

[4] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá D.C. 72p

[5] Regmi, N. R., Giardino, J. R., & Vitek, J. D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. Geomorphology, 115(1), 172-187.

[6] SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). (2013). Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza relativa por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000. Bogotá. 158 Pág.

[7] Abella, E. A. C., & Van Westen, C. J. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. Geomorphology, 94(3), 453-466.

[8] Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., & Gupta, R. P. (2012). Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping–A Review.

[9] Roa, J. G. (2006). Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela. Revista AGORA. Trujillo, (Venezuela), 9(2).

[10] CVC e INGEOMINAS. (2001). Guía Metodológica para la zonificación de amenazas por Fenómenos de Remoción en Masa – Método Univariado - y Escenarios de Riesgo por Avenidas Torrenciales, Convenio 003. Bogotá. 154 Pág.

[11] Van Westen, C. J. (1997). Statistical landslide hazard analysis.ILWIS, 2, 73-84.

[12] Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. Landslides, 4(1), 33-41.

[13] Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., ... & Pitilakis, K. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of engineering geology and the environment, 73(2), 209-263.

[14] Atkinson, P.M., Massari, R., 1998. Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. Computers and Geosciences 24, 373-385.

[15] Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Durmaz, S., 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). Geomorphology 94, 410-418.

[16] Süzen, M.L., Doyuran, V., 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using Geographical Information Systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. Engineering Geology 71, 303-321.

[17] Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology 81, 166–184.
[18] Domínguez-Cuesta, M.J., Jiménez-Sánchez, M., Berrezueta, E., 2007. Landslides in the Central Coalfield (Cantabrian Mountains, NW Spain): geomorphological features, conditioning factors and methodological implications in susceptibility assessment. Geomorphology 89, 358-369.
[19] Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., & Vandekerckhove, L. (2006). Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). Geomorphology, 76(3), 392-410.
[20] Van Den Eeckhaut, M., Marre, A., & Poesen, J. (2010). Comparison of two landslide susceptibility assessments in the Champagne–Ardenne region (France).Geomorphology, 115(1), 141-155.

Marco Fidel Gamboa Ramírez, Ingeniero Geólogo Universidad Nacional de Colombia Medellín 1998, especialista en sistemas de información geográfica Universidad de San Buenaventura Medellín 2007. Estudiante de la Maestría en Ciencias de la Tierra de la universidad EAFIT. Consultor del sector público y privado en áreas de geología ambiental y planificación territorial y ambiental, docente del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT desde el 2012 en las asignaturas de teledetección, geomorfología y geología ambiental.