

**COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS BIVARIADO Y
MULTIVARIADO PARA LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR
MOVIMIENTOS EN MASA EN ESCALA 1:10.000 EN EL MUNICIPIO DE LA
ESTRELLA - ANTIOQUIA**

PROYECTO DE GRADO

Autoras:

PAULA ANDREA CORTÉS SALAZAR

SARA GRAJALES RUIZ

Asesor:

MARCO FIDEL GAMBOA RAMÍREZ

MEDELLÍN - ANTIOQUIA

UNIVERSIDAD EAFIT

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Medellín, 11 de mayo de 2018

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	5
INTRODUCCIÓN	6
PREGUNTA DE TRABAJO	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1. LOCALIZACIÓN	9
2. ANTECEDENTES	10
3. MARCO REGIONAL	13
4. OBJETIVOS	14
4.1 OBJETIVO GENERAL	14
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
5. MARCO TEÓRICO	15
6. METODOLOGÍA	18
6.1 VARIABLES METODOLÓGICAS	19
6.1.1 Pendiente.....	19
6.1.2 Relieve relativo	21
6.1.3 Curvatura en perfil.....	22
6.1.4 Distancia a drenajes	23
6.1.5 Distancia a fallas	26
6.1.6 Distancia a vías	27
6.1.7 Geología local.....	28
6.1.8 Geomorfología	36
6.1.9 Usos del suelo	44
6.1.10 Morfodinámico	48
7. MÉTODO BIVARIADO (PESO DE LA EVIDENCIA)	53
8. MÉTODO MULTIVARIADO (REGRESIÓN LOGÍSTICA)	54
9. MÉTODOS PARA LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS	56
9.1 CURVA ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC)	56
9.2 CURVA DE ÉXITO	56
10. RESULTADOS	58
10.1 MÉTODO BIVARIADO (PESO DE LA EVIDENCIA)	58

10.1.1 Susceptibilidad alta.....	58
10.1.2 Susceptibilidad media.....	58
10.1.4 Susceptibilidad baja.....	59
10.1.5 Curva de éxito.....	60
.....	60
10.2 MÉTODO MULTIVARIADO (REGRESIÓN LOGÍSTICA).....	60
10.2.1 Susceptibilidad alta.....	61
10.2.2 Susceptibilidad media.....	61
10.2.3 Susceptibilidad baja.....	61
10.2.4 Curva de éxito.....	62
10.3 CURVA ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC).....	63
11. DISCUSIÓN.....	65
12. CONCLUSIONES.....	67
13. RECOMENDACIONES.....	69
14. BIBLIOGRAFÍA.....	70

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de localización del Municipio de La Estrella-Antioquia. Programa SIG. Elaboración propia (2018).	9
<i>Ilustración 2. Mapa de Pendiente-Municipio de La Estrella, por medio de SIG. Elaboración propia (2018)</i>	20
Ilustración 3. Mapa de Relieve Relativo del Municipio de La Estrella. Realizado por medio de SIG, elaboración propia (2018)	21
Ilustración 4. Mapa de Curvatura del Municipio de La Estrella. Realizado por medio de SIG, Elaboración propia (2018)	22
Ilustración 5. Mapa de Distancia a Drenajes del Municipio de La Estrella,	

usando SIG. Elaboración propia (2018).	24
Ilustración 6. Mapa de Distancia a Fallas del Municipio de La Estrella, usando SIG. Elaboración propia (2018).....	26
Ilustración 7. Mapa de Distancia a Vías del Municipio de La Estrella, usando SIG. Elaboración propia (2018).....	27
Ilustración 8. Esquistos de Caldas vía Variante de Caldas	29
Ilustración 9. Esquistos de Caldas vía Variante de Caldas	30
Ilustración 10. Roca serpentizada como protolito la peridotita de Romeral - vereda La Esperanza	31
Ilustración 11. Gabro de Romeral - Cerca de la antigua cantera Maraca	32
Ilustración 12. Gabro de Romeral - Cerca de la antigua cantera Maracay	32
Ilustración 13. Afloramiento de rocas volcanosedimentarias de Quebradagrande, en la vía de la quebrada La Culebra.	33
Ilustración 14. Basaltos (Formación Quebradagrande) con presencia de metamorfismo dinámico- reserva El Romeral	34
Ilustración 15. Depósitos aluviales - Urbanización Villas de Ensueño	35
Ilustración 16. Depósitos aluviales - Barrio Tarapacá, quebrada La Ospina..	35
Ilustración 17. Mapa de Geología del Municipio de La Estrella modificado de la Microzonificación sísmica (2016)	36
Ilustración 18. Mapa de Geomorfología del Municipio de La Estrella, usando SIG. Elaboración propia (2018).....	44
Ilustración 19. Evidencia de erosión por sobrepastoreo	47
Ilustración 20. Presencia de cultivo de plátano en una ladera del sector Tablaza.....	47
Ilustración 21. Mapa de Uso del Suelo del Municipio de La Estrella, elaborado por las autoras usando SIG (2018)	48
Ilustración 22. Deslizamiento rotacional, finca La Florencia, Pueblo Viejo	49
Ilustración 23. Deslizamiento rotacional, finca La Florencia, Pueblo Viejo	50
Ilustración 24. Flujo de lodo - vereda La Esperanza (parte alta).....	50
Ilustración 25. Flujo de lodo, vereda La Esperanza (parte alta).....	51

Ilustración 26. Flujo de lodos finca La Cuesta, vereda Tierra Amarilla.....	51
Ilustración 27. Deslizamiento traslacional cerca de la planta de tratamiento de agua del sector Pueblo Viejo.	52
Ilustración 28. Mapa de Movimiento en Masa del Municipio de La Estrella, elaborado por las autoras usando SIG (2018)	52
Ilustración 29. Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa.	59
Ilustración 30. Curva de éxito del mapa de susceptibilidad por el método bivariado.	60
Ilustración 31. Mapa de susceptibilidad 1 RL.....	62
Ilustración 32. Curva de éxito del mapa 1 LG.....	63
Ilustración 33. Curva ROC.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores para la reclasificación del mapa de pendiente.....	20
Tabla 2. Valores para la reclasificación del mapa de Relieve Relativo	22
Tabla 3. Valores para la reclasificación del mapa de Curvatura.....	23
Tabla 4. Valores para la reclasificación del mapa de distancia drenajes	25
Tabla 5. Valores para la reclasificación del mapa de distancia fallas	27
Tabla 6. Valores para la reclasificación del mapa de distancia vías	28
Tabla 7. Tabla de curva ROC Tomada de García, 2017.....	56

AGRADECIMIENTOS

Un gran agradecimiento a nuestro asesor, familiares, amigos, y a todas las personas que de una u otra forma influyeron en el desarrollo de este proyecto.

INTRODUCCIÓN

En el municipio de La Estrella, Antioquia, se presentan constantemente procesos morfodinámicos, en su mayoría movimientos en masa, asociados principalmente a un fuerte control estructural, las altas pendientes y a la presencia de una litología con alto grado de meteorización.

En los últimos años la densidad poblacional del Municipio de la Estrella ha incrementado notablemente, por lo que el desarrollo urbanístico, ambiental y social debe ser proporcional a dicho crecimiento y en concordancia con las restricciones geológicas que presenta el territorio. Para esto se deben generar mapas de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, pues éstos son una herramienta importante para la planificación y desarrollo de un territorio, pues indican cuáles áreas pueden llegar a verse afectadas ante un evento de este tipo al representar la probabilidad de ocurrencia en el espacio. Además, los entes a cargo de la gestión del riesgo han cobrado importancia relevante en los últimos años, puesto que es necesario contar con un plan de gestión del riesgo y recursos suficientes para afrontar los riesgos. En ese orden de ideas, por medio de mapas en escala 1:10.000 se pretende realizar la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de un análisis estadístico según dos metodologías (bivariado y multivariado), con el fin de generar una comparación entre ambas e identificar el modelo que más se ajuste a la realidad de la zona y que pueda servir de insumo para la toma de decisiones en cuanto a la gestión del riesgo.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

Los mapas de susceptibilidad pueden generarse por diversas metodologías, entre las cuales se encuentran los métodos heurísticos (directo y jerárquico), que se basan en el criterio y el conocimiento del experto, y los métodos estadísticos (univariado, bivariado y multivariado), que se fundamentan en análisis cuantitativos de las variables seleccionadas.

Debido a que los métodos heurísticos tienen un alto nivel de subjetividad, se cuenta con los métodos cuantitativos y determinísticos que generan una mayor confiabilidad en los resultados. Sin embargo, hay un debate sobre cuál de estos métodos se ajusta más a la realidad, puesto que la diferencia radica en factores como: variables utilizadas, características intrínsecas de la localidad y los métodos que se comparen. Como ejemplo de esto, Nandi y Shakoor (2010) realizan una comparación entre un método bivariado y uno multivariado, señalando que es más preciso el método multivariado, lo cual es validado por Schicker y Moon (2012), además Fotheringham *et. al.*, (2001), Erner *et. al.*, (2010) realizaron estudios que reafirman que estos métodos tienen una alta precisión. Sin embargo, Nampak *et. al.*, (2014), Pradhan *et. al.*, (2014) y Hong *et. al.*, (2016), indican que los métodos bivariados tienen mayor exactitud que los multivariados.

Este trabajo pretende demostrar que los métodos Peso de la Evidencia y Regresión Logística, deben tener un alto nivel de precisión y similitud en los resultados, puesto que se trata de dos modelos estadísticos.

PREGUNTA DE TRABAJO

¿Qué método estadístico, entre el del Peso de la Evidencia (bivariado) y el de Regresión Logística (multivariado), presenta una mayor confiabilidad para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:10000 del Municipio de La Estrella, Antioquia?

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los movimientos en masa son fenómenos naturales que pueden generarse por

intervenciones antrópicas o mecanismos naturales, y son de particular interés para los entes gubernamentales ya que una mayor comprensión de tales eventos permitirá mitigar o evitar desastres al facilitar las respectivas gestiones.

En los últimos años el uso de los métodos estadísticos se ha incrementado, siendo el método bivariado el más usado debido a su facilidad para procesar los datos, a pesar de ello, el método multivariado puede presentar un alto nivel de precisión, por lo anterior se realiza una comparación entre ambas metodologías para así identificar cuál de los métodos previamente mencionados es más preciso según las características de la zona de estudio.

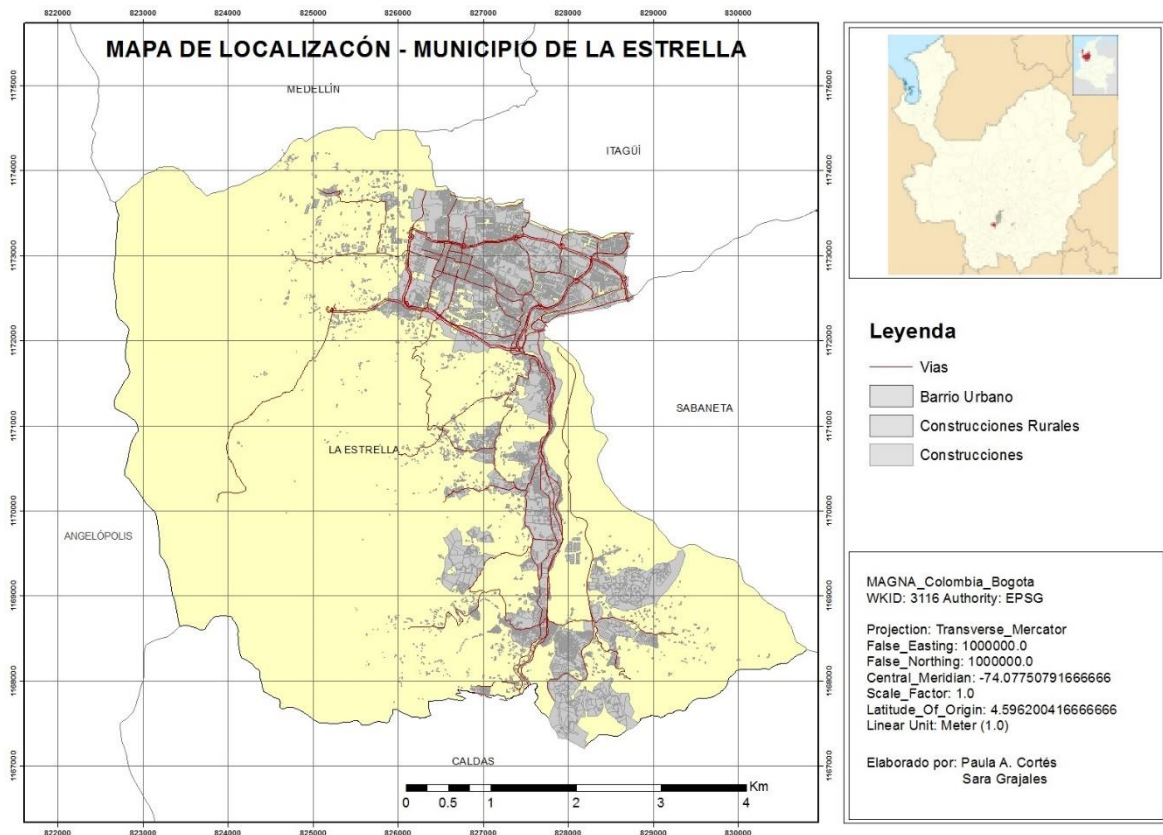
En el municipio de La Estrella se asienta una importante cantidad de viviendas que pueden llegar a verse afectadas por movimientos en masa, y en simultánea se evidencia un marcado aumento en nuevas construcciones, lo cual incrementa el riesgo de la población. Este aumenta por la falta de estudios que indiquen el cómo o el por qué se pueden generar dichos fenómenos, siendo necesario realizar un análisis de las condiciones intrínsecas del área, mediante dos métodos estadísticos con el fin de facilitar la gestión del riesgo en el Municipio y así convertirse en un insumo para el desarrollo del mismo.

1. LOCALIZACIÓN

El municipio de La Estrella se encuentra ubicado al Suroeste del Valle de Aburrá, en el Departamento de Antioquia, limita con los municipios de Caldas, al Sur, Itagüí y Medellín, al Norte, al Este con Sabaneta y al Oeste con Angelópolis.

Este municipio abarca parte de la vertiente occidental del río Aburrá y un área menor de la vertiente oriental (Microzonificación sísmica, 2006). Cuenta con una extensión de 34.88 km², con un área urbana de 3.68 km² y una rural de 31.32 km² y cuya principal vía de acceso es la Autopista Sur.

Ilustración 1. Mapa de localización del Municipio de La Estrella-Antioquia. Programa SIG. Elaboración propia (2018).



2. ANTECEDENTES

Existe un gran soporte bibliográfico con respecto a los métodos bivariados y multivariados. Van Westen ha empleado esta metodología repetidas veces y uno de sus trabajos fue el desarrollado en 2015, en este se evalúa el método de Peso de la Evidencia para dos áreas con características diferentes, allí se analiza cómo se comporta el método en la cuenca al Oeste de los Alpes Italianos y en el condado de Buzau en Rumania; asimismo Chen *et. al.* (2016) realizan una comparación entre varios métodos bivariados para zonificar áreas con susceptibilidad a movimientos en masa en el monte Taibai, en China. Por otro lado, Erner *et. al.* (2010) realiza en Noruega una zonificación de procesos morfodinámicos por medio de una metodología multivariada (Regresión Logística); también Catani *et. al.* (2013) utiliza la metodología multivariada para el mapeo de susceptibilidad en la cuenca Arnor, en Italia central, el artículo se enfoca en determinar los factores que condicionan las variables que se emplean.

Además, se han realizado otros estudios donde se comparan diferentes metodologías, como el de Hong *et. al* (2016) que contrasta dos métodos bivariados y dos multivariados, también Schicker y Moon (2012) hacen uso de estas metodologías a una escala regional en Waikato, por su parte Nandia y Shakoor, (2010), Shahabi y Ahmad (2013), confrontan estas dos metodologías en Ohio y en Azerbaijani respectivamente.

En Colombia, se utiliza principalmente el método bivariado puesto que el Servicio Geológico Colombiano ha elaborado guías metodológicas para realizar la zonificación de susceptibilidad por movimiento en masa a diferentes escalas, como en el caso del estudio de Alvarado *et. al* (2012) donde se realiza una zonificación de amenaza por movimientos en masa aplicando un método heurístico y un bivariado en la cuenca del río Combeima en Ibagué (Tolima); además, se encuentran trabajos de grado que abordan esta temática entre ellos,

el trabajo de González (2015) y el de Guisao (2015).

El Municipio de La Estrella no cuenta con análisis en los cuales se utilicen métodos estadísticos, pero sí con otros estudios generales que incluyen “El evento del 29 y 30 de mayo de 2000 en La Estrella y Sabaneta (Antioquia)” (Cadavid y Hermelin, 2005), el *Diagnóstico ambiental municipal* (2005), el Estudio de áreas degradadas (2006), el *Plan Básico de Ordenamiento Territorial* (2008) y La *Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá* (2006).

En el Diagnóstico ambiental municipal y en la microzonificación sísmica se encuentran descritas las unidades que conforman el marco geológico del municipio de La Estrella. Estas corresponden a Esquistos de Caldas (PZeC), Esquistos de Cajamarca (TReC), Peridotita de Romeral (JuR), Gabro de Romeral (JgR) y rocas volcanosedimentarias y volcánicas del Complejo Quebradagrande (KvQG y KvsQG), además de las coberturas de depósitos de vertiente (Qdv), depósitos aluviales (Qal) y llenos antrópicos (QII). Por su parte, dentro del Diagnóstico ambiental municipal (2005), se identifica la Secuencia sedimentaria de La Culebra - La Llorona y dunita serpentinizada.

Para el Municipio de La Estrella se definen como principales geoformas la unidad de terrazas y llanuras de inundación, unidad de conos de deyección, unidad de laderas suaves, unidad de laderas colinadas, unidad de colinas bajas y vertientes largas, unidad de colinas bajas y vertientes cortas, unidad de colinas medias, unidad de colinas altas, unidad de filos largos, unidad de filos cortos; esto, según el diagnóstico Ambiental Municipal y la microzonificación sísmica.

En este municipio habitan 64.323 habitantes (DNP, 2016), por tanto, cuenta con un Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), puesto que la Ley 388 de 1997, en el artículo 9° numeral C, estipula: “Los Planes Básicos de Ordenamiento Territorial deben ser elaborados y adoptados por las autoridades de los municipios con población entre 30.000 y 100.000 habitantes”. De igual modo, en el Acuerdo que adopta el Plan Básico, se indican las zonas con amenaza, riesgo alto, medio y

bajo por movimiento en masa y demás fenómenos naturales.

Por otro lado, en el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Aburrá (POMCA, 2005) y en el estudio de Áreas Degradadas se reglamentan los retiros a quebradas urbanas con base en cuatro criterios: definición de llanuras de inundación, geomorfología, retiros ambientales y retiros de redes de servicios públicos.

3. MARCO REGIONAL

La zona de estudio se encuentra ubicada en un área de alta actividad tectónica, por interacción de las placas Nazca, Suramericana y Caribe, generando una estructura cortical con un complejo sistema de fallas regionales (Microzonificación sísmica, 2006). Además, ha sufrido distintos eventos acrecionales, orogénicos, erosivos y depositacionales, por lo que la cordillera Central ha presentado a lo largo del tiempo estos diversos procesos.

En el extremo Norte de esta zona montañosa se encuentra la microplaca del Bloque Andino, allí se ubica el Municipio de la estrella que a su vez hace parte del Valle de Aburrá. La zona Sur cuenta con la expresión del sistema de fallas de Romeral, donde se observan evidencias de la falla San Jerónimo con una expresión NS, la cual separa la corteza continental (Cajamarca) de la oceánica (Quebradagrande), en el área también se encuentran evidencias de las fallas Santa Isabel con una dirección NS, que separa los esquistos de Cajamarca con las Anfibolitas de Caldas, Ancón con una dirección de N50W que muestra algunas zonas brechosas en el área de Ancón Sur, La Reventona pertenece al sistema de fallas de San Jerónimo con una dirección NS y se observa en los sectores de La Tablaza y Pueblo Viejo y, Tierra Amarilla que se encuentra en la parte alta del municipio en la vereda Quebradagrande donde se observan drenajes alineados N60W (Microzonificación sísmica, 2006).

En el área afloran las siguientes litologías. El complejo Quebradagrande que nace de un sistema arco volcánico cuenca marginal durante el cretácico temprano (Álvarez, 1987), complejo Ofiolítico del Romeral que no tiene una edad definida, pero se relaciona con el Gabro de Pueblito y de Heliconia con una edad de enfriamiento del cretácico temprano, el complejo Cajamarca que cuenta con una gran dispersión de fechas que van desde el Paleozoico hasta el Cenozoico y los depósitos aluviales y de vertiente (Microzonificación sísmica, 2006).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar, zonificar y comparar por medio de dos métodos estadísticos (Peso de la Evidencia y Regresión Logística) la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:10.000 a la que se encuentra expuesto el municipio de La Estrella, Antioquia.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compilar y analizar la cartografía, las fotografías aéreas e imágenes satelitales, además de la información sobre estudios en el municipio de La Estrella y los documentos referentes a la metodología a emplear.
- Actualizar los estudios geomorfológicos de la zona de estudio.
- Corroborar estudios geológicos previos del área a escala 1:10.000
- Generar las variables morfométricas y de distancia del área de estudio, a partir de la cartografía base y los mapas preliminares al trabajo de campo, con la ayuda de la herramienta SIG.
- Zonificar y analizar la susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de La Estrella, al aplicar los métodos estadísticos bivariado y multivariado por medio de la herramienta SIG y el software MATLAB.
- Analizar, interpretar y comparar los resultados obtenidos por cada uno de los métodos para generar conclusiones y recomendaciones.

5. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta el glosario de términos que abarca el presente proyecto:

5.1 AMENAZA: peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. (Ley 1523, 2012).

5.2 ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO: implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. Se estima el valor de los daños y las pérdidas potenciales, y se compara con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo y preparación para la respuesta y recuperación (Ley 1523, 2012).

5.3 ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO: corresponden a las zonas o áreas del territorio municipal clasificadas como de amenaza alta que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos (salud, educación, otros) e infraestructura de servicios públicos. Estas áreas requieren de estudios de riesgo de detalle para definir tanto su mitigabilidad o no, como el nivel de riesgo de los elementos expuestos. Igualmente, aquellos tramos de quebradas que están conducidos por estructuras

hidráulicas, sobre las cuales se encuentran construidas edificaciones. (Decreto 1807, 2014)

5.4 INTERVENCIÓN: corresponde al tratamiento del riesgo mediante la modificación intencional de las características de un fenómeno con el fin de reducir la amenaza que representa o de modificar las características intrínsecas de un elemento expuesto con el fin de reducir su vulnerabilidad. (Ley 1523, 2012)

5.5 EMERGENCIA: situación caracterizada por la alteración o interrupción intensa y grave de las condiciones normales de funcionamiento u operación de una comunidad, causada por un evento adverso o por la inminencia del mismo, que obliga a una reacción inmediata y que requiere la respuesta de las instituciones del Estado, los medios de comunicación y de la comunidad en general. (Ley 1532, 2012)

5.6 EXPOSICIÓN (ELEMENTOS EXPUESTOS): se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza. (Acuerdo 48, 2014).

5.7 MOVIMIENTOS EN MASA: incluyen todos aquellos movimientos ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de tierras, como caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos, propagaciones laterales y reptaciones. (Acuerdo 48, 2014).

5.8 RECURRENCIA: tiempo promedio entre dos eventos de iguales características que han ocurrido en el pasado. (Acuerdo 48, 2014).

5.9 RIESGO DE DESASTRES: corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un periodo de

tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad (Acuerdo 48, 2014).

5.10 SUSCEPTIBILIDAD: es una estimación en términos cuantitativos y cualitativos que se hace de una región en la que pueden o no producirse fenómenos de remoción en masa. Esta evaluación se genera a partir de la correlación entre las variables que influyen en mayor medida en el desarrollo de movimientos en masa, para así determinar la relación entre las características del terreno y la ocurrencia de los eventos de movimientos (SGC, 2013). Cabe anotar que en el análisis de susceptibilidad no se tiene en cuenta el periodo de retorno.

5.11 VULNERABILIDAD: es la predisposición y fragilidad física, económica, política o social que presenta una comunidad de ser afectada o que se produzcan daños en su infraestructura y cómo puede reponerse dicha comunidad ante tales eventos (Cardona, 2001).

6. METODOLOGÍA

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en el Municipio de La Estrella se tuvo en cuenta la siguiente metodología:

- Revisión bibliográfica de estudios desarrollados por el Municipio de La Estrella, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia, Universidad Nacional de Colombia y la Universidad EAFIT.
- Uso de evidencias geomorfológicas en relación con los datos históricos que permitan evaluar la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa.
- Recopilación de información cartográfica, fotografías aéreas, imágenes satelitales e información en formato SIG en escala 1:10.000.
- Fotointerpretación de la zona de los años 1996 y 2014, para generar una base de datos histórica a través del inventario de procesos morfodinámicos, en los cuales se define su identificación (código de movimientos en masa), tipo (características del fenómeno), nombre de la cuenca donde se generó (La Grande, La Bermejala, San Miguel, La Raya), actividad (activo, inactivo), profundidad (superficial, profundo), uso y cobertura (tipo de vegetación).
- Generación de mapas temáticos preliminares de geología, geomorfología y procesos morfodinámicos, por medio de información secundaria y del análisis geológico y geomorfológico de la zona, aplicando los Sistemas de Información Geográfica y sensores remotos.
- Elaboración de un mapa geomorfológico al nivel de unidades.
- Realización de visitas de campo para corroborar y complementar los mapas previamente generados, a través del levantamiento geológico y geomorfológico en escala 1:10.000 y 1:25.000 respectivamente.
- Para la selección de los parámetros del mapa de susceptibilidad se sabe que los movimientos en masa pueden generarse por diferentes factores;

unos más influyentes que otros, por lo cual es necesario identificar los que permitirán la predicción de este tipo de eventos (Ozdemir y Altural, 2013)

- Integración de los datos previamente obtenidos para generar los mapas de susceptibilidad utilizando ambos métodos estadísticos (Bivariado y Multivariado), por medio de las herramientas de SIG y del software *Matrix Laboratory* (MATLAB).
- Validación de los mapas de susceptibilidad implementando el método de área bajo la curva, mediante el uso de la Curva Receiver Operating Characteristic (ROC) y la Curva de Éxito.
- Realización de un análisis de los resultados y generación de un informe final con dicho estudio, para posteriormente realizar la sustentación oral del proyecto.

6.1 VARIABLES METODOLÓGICAS

Para el desarrollo de los modelos mencionados anteriormente se tuvieron en cuenta las siguientes variables según las características de la zona.

6.1.1 Pendiente

Esta variable corresponde al ángulo que se forma entre un plano horizontal y la superficie del terreno, en términos de grados o porcentaje y es uno de los factores más importantes en la ocurrencia de mapas de susceptibilidad por remoción en masa (Chen *et al.*, 2016). El ángulo de pendiente tiene una relación con la generación de deslizamientos debido a que constituyen un fenómeno de tipo gravitacional, en donde las pendientes con rangos altos están asociados a valores de aceleración mayores.

El rango de pendientes para el Municipio de La Estrella se adaptó de la tabla de clasificación de INGEOMINAS (2011) (Tabla 1). Las clases de esta variable presentan una variación de la pendiente de 4° y van desde 5° hasta 50°. En el municipio de La Estrella, las zonas que representan las pendientes mayores se ubican en la parte occidental del territorio, donde se encuentra un tramo del Distrito Integral de Manejo Integral (DMI) de la reserva El Romeral; mientras las

pendientes menores se ubican en la parte central del municipio en las zonas aledañas al río Aburrá (Figura 2).

Ilustración 2. Mapa de Pendiente-Municipio de La Estrella, por medio de SIG.
Elaboración propia (2018)

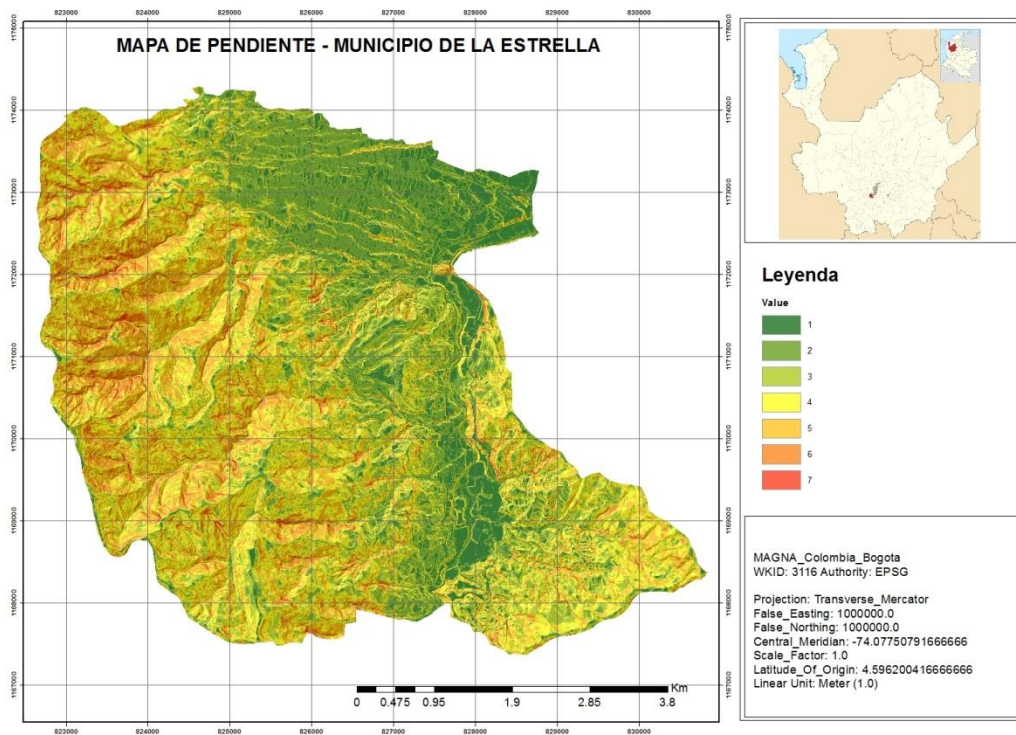


Tabla 1. Valores para la reclasificación del mapa de pendiente

Old values	New values
<5°	1
6°-10°	2
11°-15°	3
16°-20°	4
21°-30°	5

31°-45°	6
>45°	7

6.1.2 Relieve relativo

Esta variable se define como la diferencia entre la mayor y menor elevación de una unidad determinada. Se mide por la diferencia de alturas entre la parte más baja y más alta. El Relieve Relativo está directamente relacionado con la resistencia de los materiales a nivel superficial; si el material se encuentra muy disectado se genera un relieve con notables intervalos de altura (CORANTIOQUIA, 2015). Se observa que, hacia el área de El Romeral, La Esperanza y Pueblo Viejo se encuentran las mayores diferencias de elevación. Para este estudio se clasificó esta variable según criterio técnico (Tabla 2) (Figura 3).

Ilustración 3. Mapa de Relieve Relativo del Municipio de La Estrella. Realizado por medio de SIG, elaboración propia (2018)

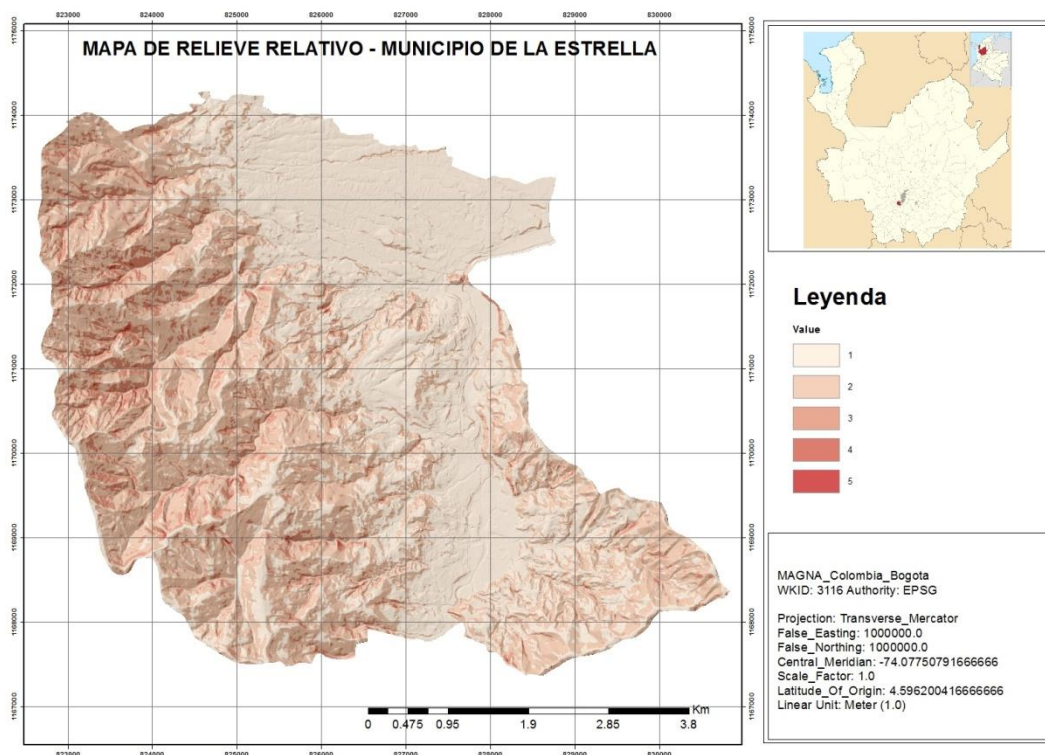


Tabla 2. Valores para la reclasificación del mapa de Relieve Relativo

Old values	New values
0 - 10.4479	1
10.4479 - 20.895801	2
20.895801 - 31.343701	3
31.343701 - 41.791602	4
41.791602 - 52.239502	5

6.1.3 Curvatura en perfil

Esta variable representa la concavidad y la convexidad del terreno; cuando los valores son positivos significa que la curvatura es cóncava como se observa en el mapa las áreas con los valores 5, 6 (tabla 3) (figura 4), cuando son negativos indica que es una curvatura convexa las cuales se observan en menor proporción en el mapa con los números 2, 3 (tabla 3), y cuando son cercanos a cero la superficie es plana indicado en el mapa con el número 4. Es importante contar con este factor para la zonificación de la susceptibilidad para fenómenos de remoción en masa, ya que se relaciona a la concentración de agua, donde superficies cóncavas pueden retener mayor volumen de agua a diferencia de las convexas.

Para el Municipio de La Estrella, se reclasifico la curvatura basándose en la observación del histograma para identificar donde se acumulaban los datos y así poder realizar las subdivisiones entre cóncavo, plano y convexo. Donde se obtuvieron seis (6) zonas de susceptibilidad para esta variable (Tabla 3) (Figura 4).

Ilustración 4. Mapa de Curvatura del Municipio de La Estrella. Realizado por medio de SIG, Elaboración propia (2018)

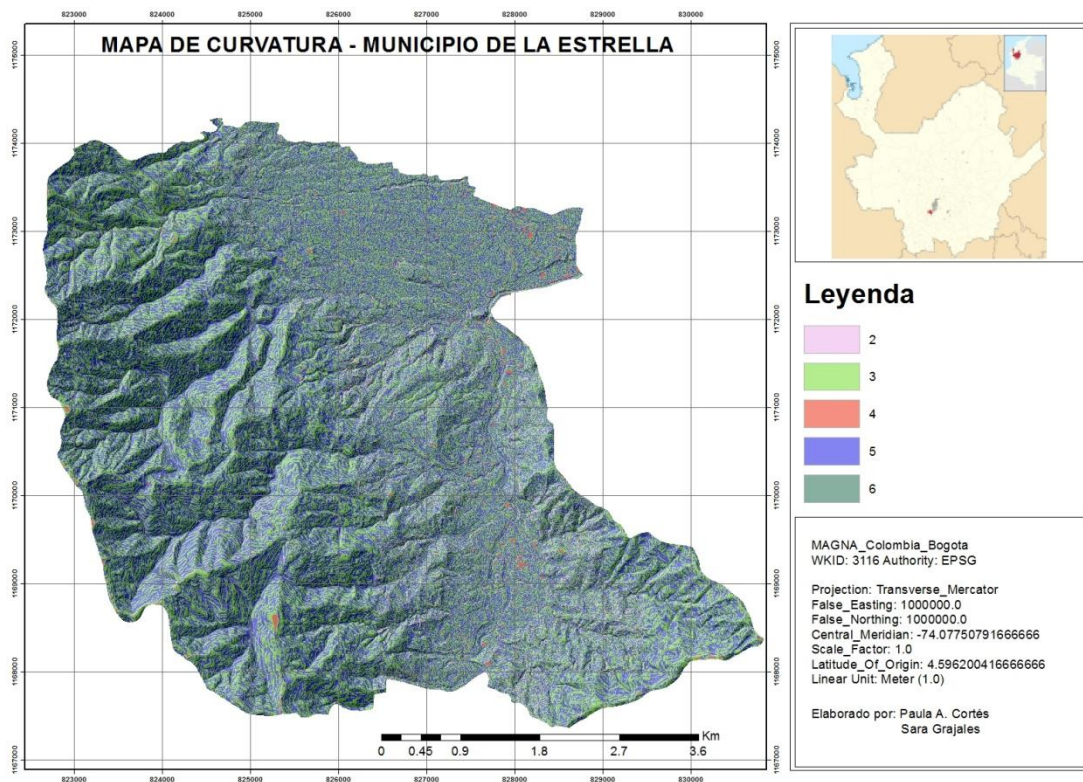


Tabla 3. Valores para la reclasificación del mapa de Curvatura

Old values	New values
-648.943542 - -8	2
-8 - -0.001	3
-0.001 - 0.001	4
0.001 - 8	5
8 - 674	6

6.1.4 Distancia a drenajes

La escorrentía juega un papel fundamental como desencadenante de fenómenos de remoción en masa, ya que los ríos son un mecanismo importante para el desarrollo de eventos, sobre todo en regiones montañosas (Chen *et al.*, 2016). Por

lo tanto, esta variable se tuvo en cuenta para la zonificación de susceptibilidad, puesto que hay registro de la presencia de varios afluentes, al igual que significativo sistemas montañosos.

El mapa de distancia a drenajes incluye zonas que se presentan en los márgenes del área de estudio, los cuales se distribuyen uniformemente en el municipio. A menor distancia (colores claros) se genera más susceptibilidad ante movimientos en masa. En contraparte, a mayor distancia (colores fuertes) se reduce la posibilidad de movimientos en masa. Esto es debido a que en cercanía con los afluentes los niveles freáticos aumentan, y a medida que se alejan, el nivel freático se va profundizando. Es importante mencionar que, la intercepción del nivel freático con la superficie terrestre aumenta la posibilidad de fenómenos de remoción en masa si se presenta en un terreno inclinado. La reclasificación para la distancia a drenaje se adaptó modificó con base en Regmi *et al.*, 2010, utilizándose cinco (5) diferentes (Tabla 4) (Figura 5).

Ilustración 5. Mapa de Distancia a Drenajes del Municipio de La Estrella, usando SIG. Elaboración propia (2018).

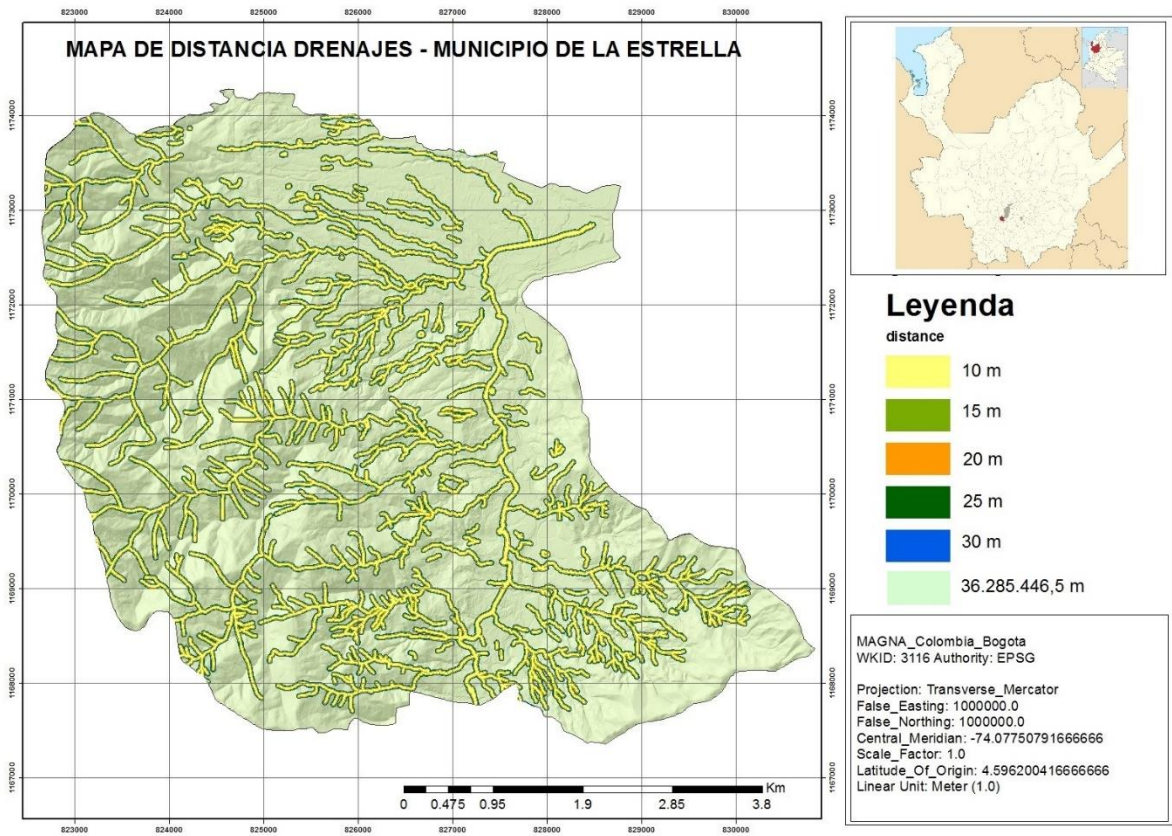


Tabla 4. Valores para la reclasificación del mapa de distancia drenajes

Old values	New values
10-15m	1
15-20m	2
20-25m	3
25-30m	4
30-36285446m	5

6.1.5 Distancia a fallas

Esta variable puede ser la responsable de la presencia de eventos de inestabilidad puesto que, la actividad tectónica genera planos de debilidad en la roca, lo cual ocasiona que el material se meteorice y erosione con mayor facilidad.

El Municipio de La Estrella presenta un sistema de falla en sentido NS que se concentra principalmente en la parte nororiental; las distancias euclidianas para el Municipio se reclasificaron basándose en Regmi *et al.*, 2010 y adaptándolo a las distancias requeridas para el lugar, donde los valores cercanos indican una mayor susceptibilidad ante un evento movimiento en masa. A diferencia de las distancias mayores, las cuales son menos susceptibles. Para este Municipio las clases de la variable presentan una variación de 10 metros (Tabla 5) (Figura 6).

Ilustración 6. Mapa de Distancia a Fallas del Municipio de La Estrella, usando SIG. Elaboración propia (2018).

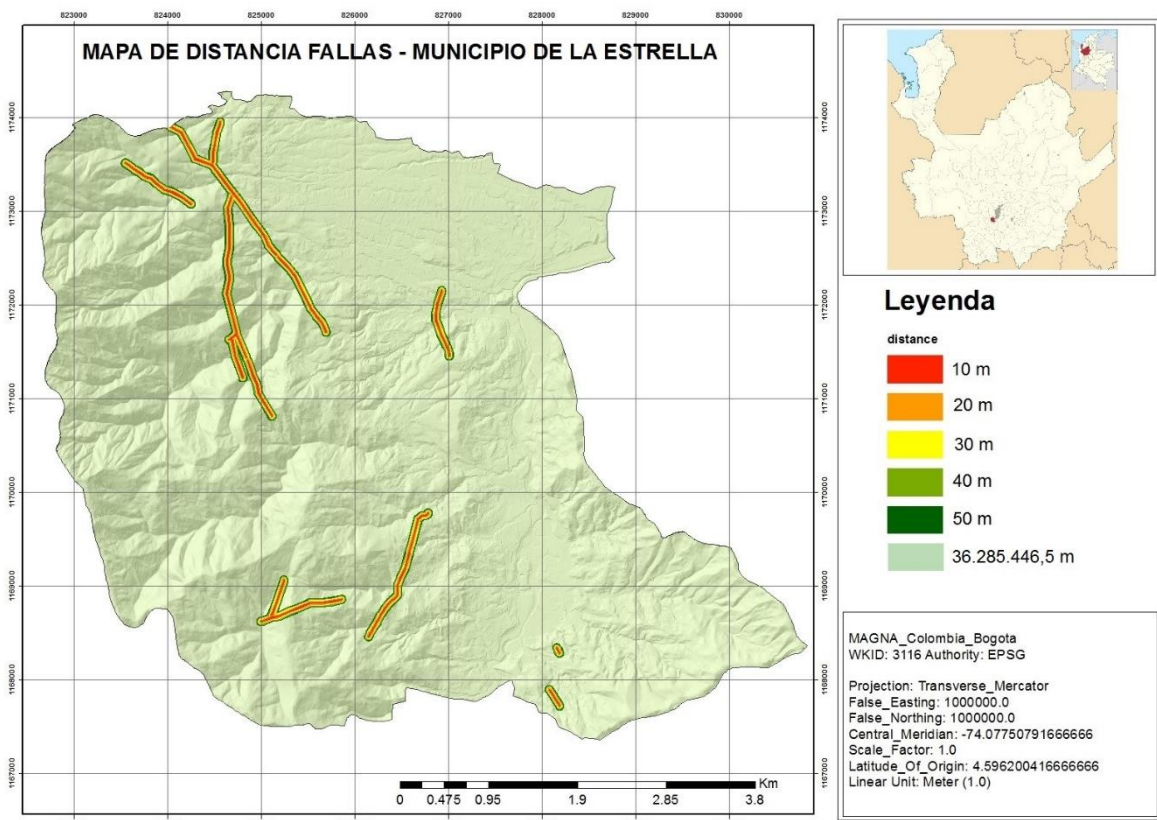


Tabla 5. Valores para la reclasificación del mapa de distancia fallas

Old values	New values
10-20m	1
20-30m	2
30-40m	3
40-50m	4
50-36285446m	5

6.1.6 Distancia a vías

Las vías están asociadas a las intervenciones antrópicas que pueden llegar a desarrollar procesos de inestabilidad, esto se produce debido a los cortes generados, ya que estos pueden ocasionar una mayor inestabilidad en el terreno si no se realizan de acuerdo con los parámetros geotécnicos especificados, o por la vibración que generan los vehículos de carga pesada.

La reclasificación para la variable de distancia a vías se adaptó y modificó con base en Regmi et al., (2010) y se utilizaron cinco rangos diferentes, donde, las distancias menores podrían indicar una mayor susceptibilidad ante un fenómeno de movimiento en masa. En contraparte, las distancias mayores son menos susceptibles (Tabla 6) (Figura 7).

Ilustración 7. Mapa de Distancia a Vías del Municipio de La Estrella, usando SIG. Elaboración propia (2018).

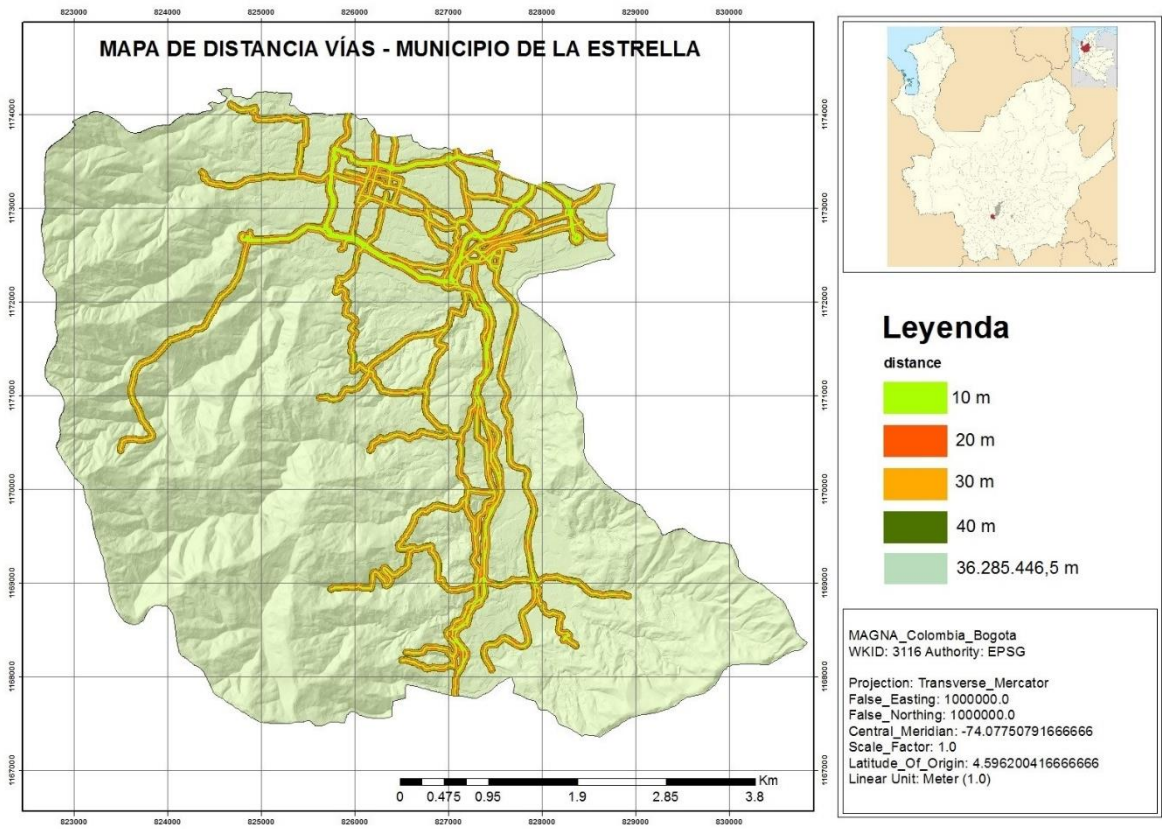


Tabla 6. Valores para la reclasificación del mapa de distancia vías

Old values	New values
10-20 m	1
20-30m	2
30-40m	3
40-36285446m	4

6.1.7 Geología local

Las unidades que conforman el marco geológico del municipio de La Estrella corresponden a esquistos de Caldas (PZeC), esquistos de Cajamarca (TReC),

Peridotita de Romeral (JuR), Gabro de Romeral (JgR) y rocas volcanosedimentarias y volcánicas del Complejo Quebradagrande (KvQG y KvsQG), además de las coberturas de depósitos de vertiente (Qdv), depósitos aluviales (Qal) y llenos antropicos (QII) (Microzonificación sísmica, 2006).

6.1.7.1 Esquistos de Caldas (PZeC): se encuentran ubicados hacia la zona más sur del área de estudio, donde se observan afloramientos con alto grado de diaclasamiento; además se pueden percibir espesores de suelos que varían entre 1-3m de altura, siendo de mayor espesor los que están ubicados en el límite Caldas - La Estrella. Las litologías que se presentan en el área son: esquistos cuarzosericíticos, esquistos moscovíticos y minerales con alteración a clorita, estas rocas están en contacto fallado inferido con los esquistos de Cajamarca y lo suprayace los depósitos aluviales, estos últimos visualizados al lado Oeste en las inmediaciones de la Autopista Sur (Imagen 1).



Ilustración 8. Esquistos de Caldas vía Variante de Caldas

6.1.7.2 Esquistos de Cajamarca (TReC): la roca está fuertemente meteorizada, con presencia de diaclasas y altamente cizallada hacia la parte Suroeste. Esta litología presenta franjas intercaladas de esquistos negros, esquistos cuarzosericíficos y en algunas zonas (en menor proporción) esquistos verdes. La unidad cuenta con perfiles de meteorización de gran espesor (aproximadamente 3m), con suelos de coloración parda a gris, en algunas áreas se evidencia el material parental y alta presencia de cristales de cuarzo. Las rocas se encuentran en contacto fallado inferido con los esquistos de Caldas y hacia el Noroeste lo suprayace depósitos aluviales y depósitos de vertiente (Imagen 2).



Ilustración 9. Esquistos de Cajamarca vía Variante de Caldas

6.1.7.3 Peridotita de Romeral (JuR): cuerpo elongado ubicado en la vertiente occidental del río Aburrá, la roca se presenta masiva, de grano fino, coloración verdosa y con presencia de olivino, en algunas zonas presenta un alto grado de meteorización además de un fuerte control estructural ya que el material está cizallado. Cerca al sector de La Esperanza se observa una serpentinita que puede ser producto de metamorfismo hidrotermal en la peridotita, en la vía paralela a la quebrada La Culebra se encuentra la roca más masiva, de coloración verde oscura, el perfil de suelo cuenta con un espesor de aproximadamente 1- 4m con difícil delimitación por encontrarse cubierta mayoritariamente con depósitos de vertiente, presentando una coloración pardo-grisáceo, con fragmentos del material

parental y matriz arcillosa, la roca está en contacto fallado inferido con los gabros de Romeral hacia el oeste (Imagen 3).



Ilustración 10. Roca serpentizada como protolito la peridotita de Romeral - vereda La Esperanza

6.1.7.4 Gabro de Romeral (JgR): esta unidad se localiza en el centro del área de estudio hacia la vertiente occidental del río Aburrá. La roca está aflorando en la parte Occidental de la Carrera 60, la cual conduce al Colegio Colombo Francés. Se observaron gabros de grano medio a fino, cuya composición se ve definida por anfíboles y plagioclasa en forma de cristales y venillas. Además, se encuentra foliada en algunas zonas, indicando procesos dinámicos en el sector. De igual modo, la roca está altamente fracturada y alterada. En la vía a la vereda La Virgen se hallan perfiles de suelo en donde se observa la roca altamente descompuesta hasta llegar al saprolito de coloración pardo a roja. Los gabros están en contacto con la peridotita de Romeral hacia el oriente y con Quebradagrande hacia el

occidente (Imagen 4 - 5).



Ilustración 11. Gabro de Romeral - Cerca de la antigua cantera Maracay



Ilustración 12. Gabro de Romeral - Cerca de la antigua cantera Maracay

6.1.7.5 Rocas volcanosedimentarias y volcánicas del Complejo Quebradagrande (KvQG y KvsQG): estas rocas están en gran parte de la zona de estudio, la mayoría de estas se encuentran ubicadas sobre todo el lado Occidental del municipio, abarcando gran parte de la reserva El Romeral. Este Complejo se divide en rocas volcanosedimentarias, de las cuales se observan

tobas con pequeñas franjas de chert e intercalaciones de basaltos. Por otro lado, en la quebrada La Culebra esta litología está en contacto con el Miembro volcánico.

Hacia la reserva El Romeral, se observa el Miembro volcánico, una roca masiva de coloración gris oscuro-verde de textura afanítica. Por otra parte, en algunas zonas como en la vía que conduce al barrio Tarapacá en la vereda San José, la roca está fuertemente cizallada, este miembro se está en contacto con el miembro volcanosedimentario en la quebrada La Culebra y con los gabros cerca de la reserva El Romeral en la misma vereda (Imagen 6 - 7).



Ilustración 13. Afloramiento de rocas volcanosedimentarias de Quebradagrande, en la vía de la quebrada La Culebra.



Ilustración 14. Basaltos (Formación Quebradagrande) con presencia de metamorfismo dinámico- reserva El Romeral

6.1.7.6 Depósitos de vertiente (Qdv): estos depósitos se están en casi todo el Municipio concentrándose principalmente en la franja central del mapa, generando un suavizamiento en la pendiente. Hacia la vertiente occidental del río Aburrá, estos depósitos se encuentran intercalados con perfiles de suelo, en el lugar se visualizan depósitos de flujos de lodo y escombros compuestos en su mayoría por lodos, arena y diferentes fragmentos líticos de tamaño grava, también se observan depósitos de deslizamientos los cuales muestran evidencias cerca a la vereda tierra amarilla, la raya, ancón sur y la esperanza,

6.1.7.7 Depósitos aluviales (Qal) y aluvio-torrenciales (Qat): esta litología se localiza en las laderas de algunos de los afluentes del municipio y corresponden a depósitos asociados a la dinámica depositacional de dichas corriente. Generalmente se visualizan perfil matriz soportados, cuyos clastos varían de tamaño según la energía del drenaje, dichos fragmentos son sostenidos por matriz areno - arcillosos. Los fragmentos de mayor tamaño se observaron en las laderas aledañas al río Aburrá (Imagen 9 - 10). En cuanto a los depósitos aluviotorrenciales se hallaron materiales clasto-soportados subangulares hasta redondeados, con fragmentos líticos y de mala selección, matriz limo-arenosa, los cuales fueron depositados allí por los afluentes de las quebradas La Raya, La

Grande y la Llorona, las cuales a su vez han sido objeto de avenidas aluvio - torrenciales.

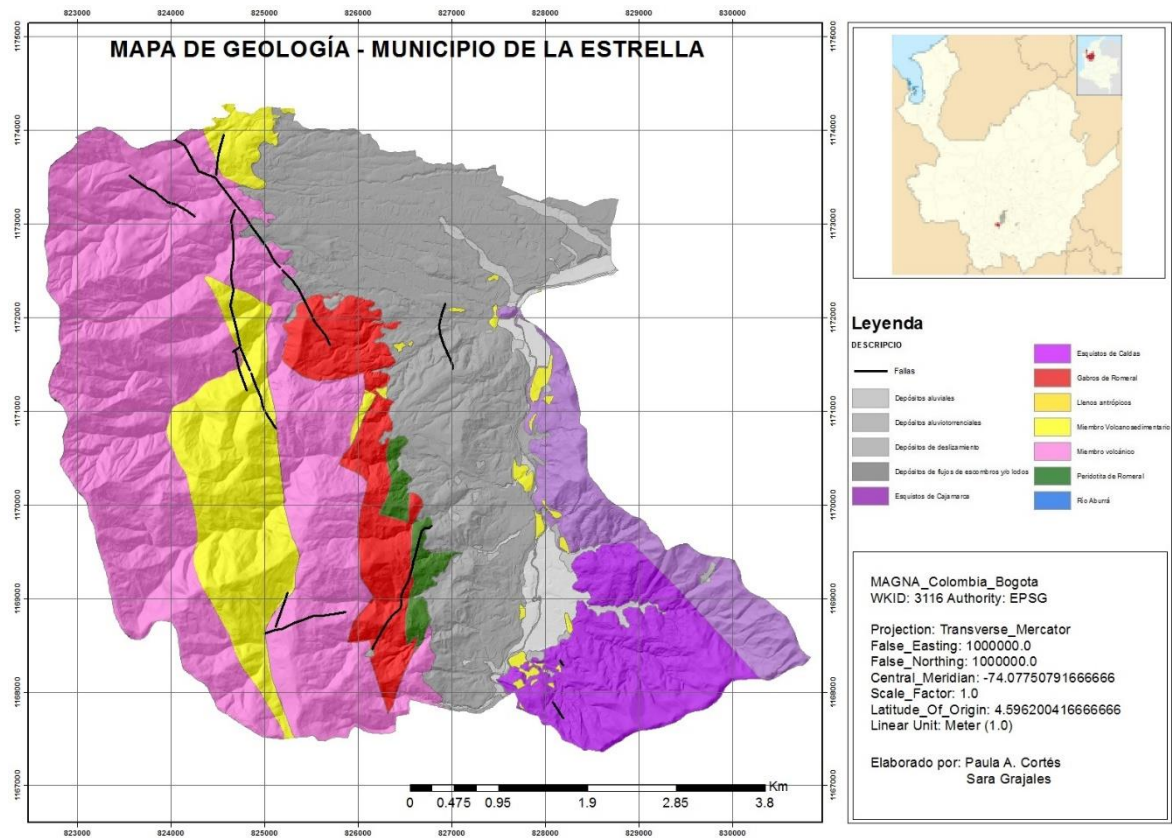


Ilustración 15. Depósitos aluviales - Urbanización Villas de Ensueño



Ilustración 16. Depósitos aluviales - Barrio Tarapacá, quebrada La Ospina

Ilustración 17. Mapa de Geología del Municipio de La Estrella modificado de la Microzonificación sísmica (2016)



6.1.8 Geomorfología

Esta variable se generó a partir de la interpretación del modelo de elevación digital y, Google Earth Pro. Posteriormente, esta información se confirmó con visitas de campo en el lugar de estudio.

El nombre de cada subunidad se tomó del glosario del Servicio Geológico Colombiano; para el caso del Municipio de La Estrella se definieron cuatro ambientes geomorfológicos, siendo los que más predominan el ambiente denudacional y el ambiente estructural, y en menor proporción se presentan los ambientes fluviales y antropogénicos.

6.1.8.1 Ambiente denudacional

6.1.8.1.1 Colina residual (Dcr): Esta geoforma se encuentra ubicada en el centro del municipio de La Estrella, conformado por el Complejo Quebradagrande y los Gabros de Romeral, además esta unidad cuenta con un importante desarrollo de movimientos en masa (aproximadamente en un 18% del área), en su mayoría procesos rotacionales. Del mismo modo, tiene una longitud aproximada de 1.220 m. y una elevación del terreno entre 200 y 250 metros sobre su nivel de base local, con cimas limitadas por laderas cortas a moderadamente largas de pendientes muy inclinadas a muy abruptas, de forma cóncava localmente a recta, con un índice de relieve bajo. Su origen se relaciona con lineamientos asociados al Sistema de Fallas Romeral y a la acción conjunta de periodos de denudación y meteorización ligados a factores litológicos locales.

6.1.8.1.2 Cerro remanente o relicto (Dcrem): Esta subunidad se localiza cerca del cambio brusco de dirección del río Aburrá y se desarrolla en los esquistos de Cajamarca. Prominencia topográfica aislada de morfología colinada con un relieve relativo moderado, presenta cimas redondeadas con pendientes muy abruptas a escarpadas, de longitud moderadamente corta y forma convexa. Su origen se asocia a procesos de erosión y meteorización diferencial acentuada y antigua (SGC, 2013).

6.1.8.1.3 Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt): La unidad se ubica en parte del barrio El Pedrero y la vereda Tierra Amarilla, conformada por el miembro volcánico de Quebradagrande, en la cual se visualiza la cicatriz de un antiguo movimiento en masa en masa. Es una estructura en forma de cono o lóbulo de longitud corta, irregular y pendientes abruptas a escarpadas. Su origen es relacionado a la acumulación de tierra y bloques producto de antiguos deslizamientos (SGC, 2013).

6.1.8.1.4 Escarpe de erosión mayor (Deem): Esta unidad se ubica en la parte superior de la reserva El Romeral en el miembro volcánico de la formación

Quebradagrande, rodeado por geoformas de ambiente tectónico, con baja presencia de movimientos en masa. Ladera de pendiente escarpada a muy escarpada posiblemente generada por acción tectónica del Sistema de Fallas Romeral y procesos gravitacionales. Asimismo, presenta longitudes largas de forma cóncava y recta, con un relieve relativo moderado.

6.1.8.1.5 Escarpe de erosión menor (Deeme): Esta unidad presenta una longitud aproximada de 876 m, allí se ubica la parcelación El Himalaya donde se observa un evento de remoción. Esta geoforma cuenta con laderas muy inclinadas de longitud corta con forma cóncavo-convexa y de relieve relativo bajo. Es originada por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo del drenaje (SGC, 2013).

6.1.8.1.6 Ladera erosiva (Del): Esta subunidad se encuentra distribuida en la parte central y baja del municipio conformadas por depósitos de vertiente y se identifican once movimientos en masa en la parte central. La superficie del terreno tiene pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a largas, de formas cóncavas y convexas, con un relieve relativo bajo, cuyo patrón de drenaje es de tipo dendrítico. Presenta procesos erosivos intensos como cárcavas y surcos. Estas laderas no necesariamente están asociadas a una geoforma mayor o una estructura (SGC, 2013).

6.1.8.1.7 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft): Estas geoformas se desarrollan cerca del río Aburrá en Ancón Sur-Pueblo Viejo, con baja densidad de movimientos en masa (cuatro). Esta estructura tiene forma de abanico de morfología convexa, con una longitud larga y pendientes muy inclinadas a abrupta de relieve relativo bajo. Su origen es relacionado a fenómenos de torrencialidad. Su depósito está constituido por bloques rocosos angulares a subredondeados de tamaños métricos embebidos en matriz arenosa arcillosa.

6.1.8.1.8 Lomo denudado bajo de longitud corta (Dldebc): Estas geoformas se desarrollan en la vereda Pueblo Viejo, presentan en su mayoría movimientos

rotacionales de gran tamaño, y se localiza en el miembro volcánico de La Formación Quebradagrande. Esta tiene un conjunto de lomos ubicados a diferentes alturas de pendientes muy inclinadas a escarpadas y con índice de relieve relativo bajo; además son de formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal presenta fuertes procesos de erosión generando laderas de formas cóncavas convexas (SGC, 2013).

6.1.8.1.9 Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl): Esta geoforma se ubica en la zona oriental de La Estrella en las veredas Sagrada Familia y San Isidro, en el límite con el municipio de Caldas. Esta tiene conjuntos de lomos de formas alargadas con un relieve relativo bajo a moderado, de pendientes muy inclinadas a abruptas y con una longitud del eje principal mayor de 1450 m; esta unidad se presenta en dirección perpendicular al río Aburrá.

6.1.8.1.10 Lomo denudado bajo de longitud media (Dldebm): Esta geoforma se localiza en la vereda El Guayabo, en los Gabros de Romeral donde se identifican siete movimientos en masa de tipo planar y rotacional. esta tiene un conjunto de lomos con un relieve relativo bajo, de pendientes muy inclinadas a abruptas y el eje principal tiene una longitud de 1010 m; de forma alargada en dirección perpendicular al río Aburrá.

6.1.8.1.11 Lomo denudado moderado de longitud media (Dldemm): La mayor parte de esta geoforma se encuentra en la vereda La Esperanza sobre el miembro volcánico de La Formación Quebradagrande con una alta densidad de movimientos en masa (quince). Esta tiene una forma alargada con conjuntos de lomos ubicados a diferentes alturas de pendientes entre abrupta a escarpada, con un índice de relieve relativo moderado y el eje principal tiene una longitud entre 850m y 950m; en dirección perpendicular al río Aburrá.

6.1.8.1.12 Ladera ondulada (Dlo): La geoforma se desarrolla en depósitos de flujo de lodos y escombros y en el miembro volcanosedimentario de la Formación Quebradagrande cuenta con una baja densidad de movimientos en masa de tipo

flujos, esta principalmente en la parte central del municipio en las veredas San José, La Culebra y cerca de la zona urbana. Esta unidad tiene una superficie en declive de morfología alomada, pendiente inclinada a escarpada, la longitud varía entre corta y larga y con un patrón de drenaje subdendrítico.

6.1.8.1.13 Loma residual (Dlor): Estas geoformas se ubican en la unidad deportiva INDERE, y en los alrededores de la calle 87 donde se encuentra la parcelación La Aldea y el edificio Senderos del Bosque. Prominencia topográfica con una altura entre 180 - 200 m sobre su nivel de base local, con una morfología alomada y elongada de laderas cortas, convexas y pendientes muy inclinadas. Su origen se relaciona con procesos intensos de meteorización y erosión diferencial (SGC, 2013).

6.1.8.1.14 Lomo residual (Dires): Esta subunidad se desarrolla sobre depósitos de flujo de escombros y lodos, se localiza cerca a parte del centro poblado Pueblo Viejo y del barrio Campo Alegre. La elevación del terreno está entre 150 a 200 metros con morfología alomada y alargada, laderas cortas a moderadamente largas, convexas a eventualmente cóncavas y pendientes muy inclinadas a muy abruptas, de longitud aproximada de 1370 m y con drenaje dendrítico, desarrollada de manera general, sobre materiales afectados por meteorización diferencial intensa (SGC, 2013).

6.1.8.1.15 Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo): elevación del terreno con una altura entre 50 - 80 m sobre su nivel de base local, con una morfología plana a cóncava o convexa, suavemente inclinada. Su origen es relacionado a procesos de meteorización y erosión intensa sobre depósitos de vertiente, dispuestos de manera horizontal a ligeramente inclinados (SGC, 2013). Esta subunidad se encuentra al occidente del río Aburrá.

6.1.8.1.16 Pedimentos de acumulación (Dpa): En el municipio de La Estrella, estas geoformas se ubican en el cambio de dirección del río Aburrá, en el sector La Tablaza y en Ancón Sur. Tiene una superficie de acumulación de sedimentos

de longitud larga con 3320m, en montículos redondeados con laderas suavemente inclinadas y un relieve relativo bajo. Su origen es relacionado a la acumulación del material fino procedente de depósitos de flujo de lodos y escombros (SGC, 2013).

6.1.8.2 Ambiente estructural

6.1.8.2.1 Espolón festoneado (Sefes): Estas geoformas se encuentra en la vereda Tablacita sobre los esquistos de Cajamarca y de Caldas. Esta tiene laderas simétricas de morfología alomada, pendiente inclinada a muy abrupta, forma recta a cóncava, dispuestas perpendicularmente al rumbo de las estructuras geológicas del Sistema de Fallas Romeral definiendo salientes cortas y largas. La geoforma está constituida por la alternancia de niveles duros y blandos altamente disectados (SGC, 2013).

6.1.8.2.2 Espolón festoneado bajo de longitud larga (Sefesbl): Esta unidad se localiza en las veredas Peñas Blancas, La Culebra, Calle Vieja y San Miguel, tiene laderas simétricas de morfología alomada, dispuestas perpendicularmente al rumbo del Sistema de Falla Romeral definiendo salientes cortas y largas, sobre rocas del miembro volcánico de la Formación Quebradagrande, Gabro de Romeral y depósitos de vertiente hacia la parte más norte del área de estudio. Las pendientes son abruptas a escarpadas con formas rectas y cóncavas, con desarrollo de un 50% movimientos en masa en el área. Esta presenta un relieve relativo moderado y una longitud del eje principal del espolón de 2.350 m.

6.1.8.2.3 Espolón festoneado bajo de longitud media (Sefesbm): Esta subunidad se encuentra al oriente del municipio en la reserva El Romeral y las veredas El Guayabo, La Raya y San Isidro; tiene aproximadamente cuarenta y cinco movimientos predominantemente rotacionales. Del mismo modo, cuenta con laderas simétricas de morfología alomada dispuestas perpendicularmente al rumbo del Sistema de Falla Romeral, que definen salientes cortas sobre los esquistos de Caldas y los esquistos de Cajamarca. Las pendientes son muy escarpadas con formas cóncavas. Esta unidad presenta un relieve relativo alto y

una longitud del eje principal del espolón de 910 m.

6.1.8.2.4 Espolón festoneado moderado de longitud larga (Sefesml): La mayor parte se localiza en la reserva El Romeral y en la parte oriental de las veredas San José y Tierra Amarilla, además se observan movimientos en masa (veintiuno) en esta geoforma. Tiene laderas simétricas de morfología alomada dispuesta perpendicularmente al rumbo del Sistema de Falla Romeral que definen salientes largas, sobre rocas del miembro volcánico y miembro volcanosedimentario de La Formación Quebradagrande. Las pendientes varían entre muy inclinadas a muy abruptas con formas cóncavas con un relieve relativo alto y la longitud del eje principal del espolón es de 2.400 m.

6.1.8.2.5 Espolón moderado de longitud media (Sesmm): Esta geoforma se ubica al norte del municipio en la reserva El Romeral. Cuenta con una saliente de morfología alomada, dispuesta perpendicularmente al Sistema de Falla Romeral. Se desarrolla sobre rocas ígneas del miembro volcánico de La Formación Quebradagrande y limitado por drenajes subparalelos, con pendientes abruptas por intensos procesos denudativos, tiene un relieve relativo bajo a moderado y la longitud del eje principal del espolón es de 640 m.

6.1.8.2.6 Espolón bajo de longitud corta (Sesbc): Esta geoforma se ubica en el centro del municipio en la vereda Pueblo Viejo. Tiene una saliente de morfología alomada, dispuesta perpendicularmente a la tendencia estructural general de la región, desarrollados sobre el gabro del Romeral limitado por drenajes subparalelos, con pendientes de inclinadas a abruptas por intensos procesos denudativos. Esta unidad presenta un relieve relativo bajo y la longitud del eje principal del espolón de 200 m.

6.1.8.2.7 Gancho de flexión (Sgf): Esta geoforma se localiza en La reserva El Romeral, relacionada a la Falla San Jerónimo y las veredas San Isidro y La Tablacita y se relaciona a un lineamiento, se desarrolla sobre el miembro volcánico y miembro volcanosedimentario de La Formación Quebradagrande. Espolón estructural de morfología alomada, con una geometría en planta en forma

de gancho. Su origen se relaciona al efecto combinado generado por el desplazamiento lateral a lo largo de una falla de rumbo y su posterior incisión erosiva (SGC, 2013), presenta una longitud de aproximadamente 2.300m y pendientes abruptas a escarpadas y un relieve relativo moderado.

6.1.8.3 Ambiente fluvial

6.1.8.3.1 Plano o llanura de inundación (Fpi): Esta geoforma se encuentra ubicada hacia el suroeste en cercanías con el municipio de Sabaneta. Tiene una superficie de morfología plana, baja y eventualmente inundable. Se localiza bordeando el cauce del río Aburrá. Su depósito está constituido por depósitos aluviales originados durante eventos de inundación (SGC, 2013).

6.1.8.3.2 Terraza de acumulación (Fta): Esta unidad se localiza en la margen occidental del río Aburrá cerca de Ancón Sur y La Tablaza. Cuenta con una superficie elongada, plana a suavemente ondulada, de pendiente suavemente inclinada y de relieve relativo bajo, modelada sobre sedimentos aluviales. Su origen es relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su formación incluye fases de acumulación, incisión y erosión vertical. (SGC, 2013).

6.1.8.3.3 Terraza de erosión (Fte): En el municipio de La Estrella se ubica en el cambio de dirección del río Aburrá. Tiene una superficie elongada, suavemente ondulada, con pendiente suavemente inclinada y de relieve relativo bajo, está limitada por geoformas de diferente altura a lo largo del cauce del río Aburrá. Su origen es relacionado a procesos de erosión aluvial lateral (SGC, 2013).

6.1.8.4 Ambiente antropogénico

6.1.8.4.1 Planos y campos de llenos antrópicos (Ar): En el municipio de La Estrella, esta subunidad se encuentra en la margen Oriental del río Aburrá en la vereda Sagrada Familia, cuenta con un plano hecho artificialmente con material de relleno para acondicionar terrenos para la construcción de una bodega; posiblemente están contruidos de escombros y desechos de construcción (SGC,

cuenta para la evaluación de estos fenómenos.

En el municipio de La Estrella se identificaron 6 tipos de uso del suelo (Figura 9). Caracterizadas como: cultivos permanentes, cultivos transitorios, construcciones, forestal productor, forestal protector y pecuario, siendo el forestal protector el que ocupa mayor área con 43,5% y en menor proporción el cultivo permanente con 0,00014%; cabe anotar que los suelos con mayor vegetación (forestal protector y forestal productor) impiden que el agua de escorrentía proveniente de la precipitación erosionen el suelo al ser el dosel quien recibe el impacto; además estos tipos de cobertura retienen mayor cantidad de agua, impidiendo que el nivel freático sobrepase la pendiente, por lo que es el tipo de uso menos susceptible ante la generación de un movimiento en masa. Por otro lado, suelos con actividad antrópica representados en el mapa como: forestal productor, cultivos, construcciones y pecuario; se encuentran más propensos a los fenómenos de remoción en masa.

El mapa de usos del suelo del área de estudio se agrupó en seis rangos:

6.1.9.1 Forestal protector: es la cobertura más representativa del área de estudio y se localiza principalmente en la reserva El Romeral. Este tipo de usos presentan características generalmente a favor, puesto que los árboles pueden retener agua impidiendo que aumente el nivel freático y que se forme el movimiento en masa, pero en algunas ocasiones puede llegar a generar fenómenos de remoción de material puesto que aumenta el peso del sustrato. En el área forestal se presentan movimientos en masa pero en menor escala, debido a las fuertes pendientes y al peso del componente arbóreo, además el control, manejo o mitigación de este material es casi nulo debido a su naturaleza.

6.1.9.2 Pecuario: este uso del suelo se encuentra distribuido por todo el municipio predominando en el área central, lo que incrementa los fenómenos erosivos (Imagen 11).

6.1.9.3 Forestal productor: esta se define como las plantaciones comerciales que

se encuentran distribuidas espacialmente en pequeños sectores del municipio. Las especies que allí se cultivan son principalmente eucalipto, ciprés y pino patula; este tipo de vegetación presenta inhibidores que impiden la germinación de nuevas especies. Cabe anotar, que esta vegetación no es nativa, por lo que influye en la degradación del suelo, se ubican en la vereda La Esperanza, Pueblo Viejo y San José.

6.1.9.4 Agrícola - cultivo permanente: es el uso que ocupa la menor área en el municipio, estos cultivos generan un menor impacto ya que permite cosechas por un periodo de tiempo prolongado sin necesidad de sembrar de nuevo, lo cual puede ayudar a que la cobertura de suelo permanezca por un mayor tiempo, pero también puede generar problemas dependiendo del cultivo, puesto que si no se cuenta con un buen sistema de drenaje el suelo puede acumular gran cantidad de agua. (Imagen 12).

6.1.9.5 Agrícola - cultivo transitorio: se presentan en menor proporción, este tipo de cultivos cuenta con un ciclo corto de siembra y cosecha, esto indica un factor detonante al momento de hablar de movimientos en masa ya que la capa más superficial es removida constantemente dejando los suelos desprotegidos.

6.1.9.6 Construcciones: la infraestructura está concentrada al Noreste del municipio, esto favorece la formación de movimientos en masa ya que no retiene el agua de lluvia lo que permite que aumente el nivel freático facilitando los deslizamientos.

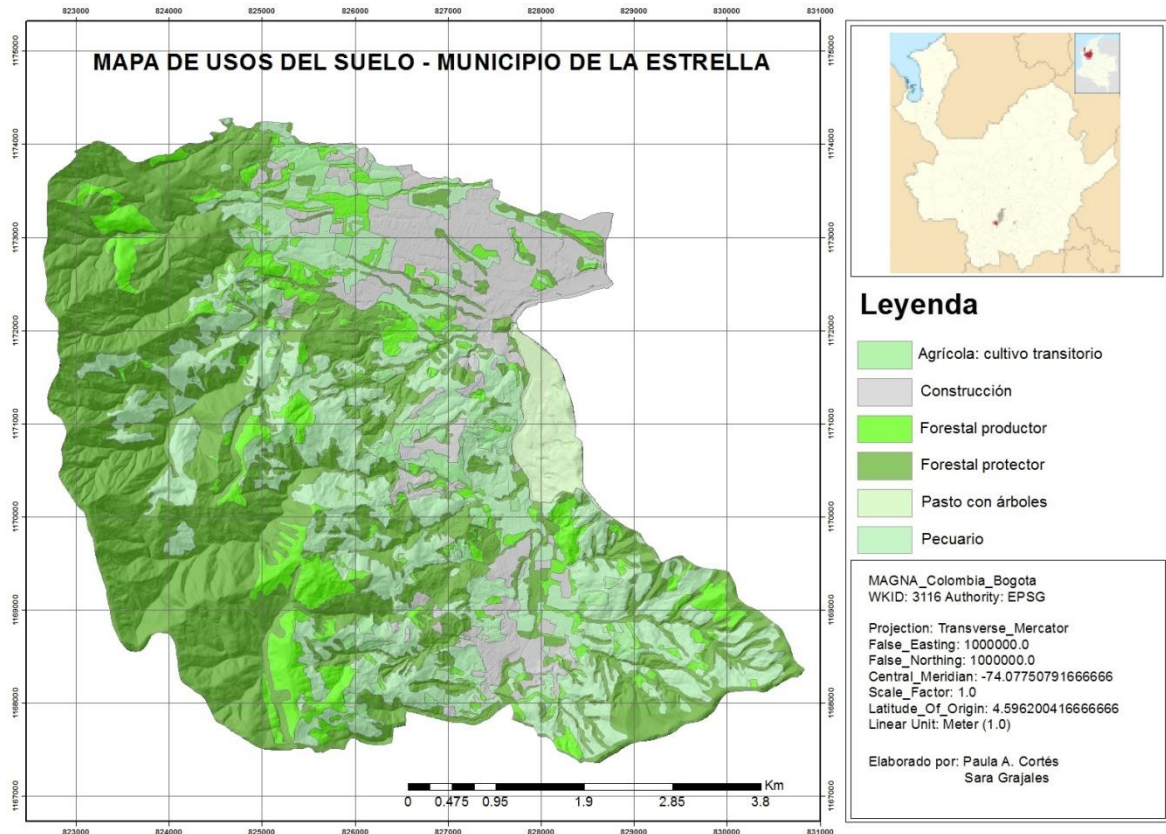


Ilustración 19. Evidencia de erosión por sobrepastoreo



Ilustración 20. Presencia de cultivo de plátano en una ladera del sector Tablaza

Ilustración 21. Mapa de Uso del Suelo del Municipio de La Estrella, modificado de la Microzonificación sísmica (2006).



6.1.10 Morfodinámico

Para esta variable se tuvo en cuenta el análisis de fotografías aéreas y ortofotos, con ellas se realizó un inventario de movimientos en masa de los años 1996 y 2014 en escala (1:7.000 y 1:8.000), donde se identificaron doscientos setenta y cuatro (274) movimientos predominantemente de tipo rotacional y en menor proporción planares y flujos; del mismo modo, se clasificaron según sus características como: actividad, cobertura, pendiente y presencia o ausencia de depósito. Además, se realizaron visitas de campo, con el fin de corroborar la información que se había obtenido mediante la fotointerpretación y la información brindada por el Consejo Municipal de Gestión del Riesgo (CMGRD) (Figura 10).

Los movimientos en masa se presentan en mayor frecuencia en la zona central del

Municipio, esta cuenta con pendientes abruptas, laderas cortas y litología diversa (depósitos de vertiente, gabros de Romeral y Quebaradagrande), además pasan las fallas San Jerónimo, Pueblo Viejo y Tierra Amarilla, las cuales generan zonas de cizalla y allí se observa la roca meteorizada y con grandes espesores de perfil de suelos. Otro motivo para la generación de estos fenómenos es la afectación en el uso del suelo, ya que las áreas más degradadas por agricultura y uso pecuario se ubican en el parte central. Por otro lado, en la reserva El Romeral, se presentan en menor medida dichos procesos, posiblemente debido a las fuertes pendientes y el cambio del uso del suelo a forestal productivo. Es de mencionar, que cerca del límite con el Municipio de Caldas y en la parte central se observan algunos rastros de sobrepastoreo.

Teniendo en cuenta algunas características de los fenómenos de remoción en masa, se decidió añadir a este documento los movimientos más importantes según su magnitud (Imagen 13 - 18).



Ilustración 22. Deslizamiento rotacional, finca La Florencia, Pueblo Viejo



Ilustración 23. Deslizamiento rotacional, finca La Florencia, Pueblo Viejo



Ilustración 24. Flujo de lodo - vereda La Esperanza (parte alta)

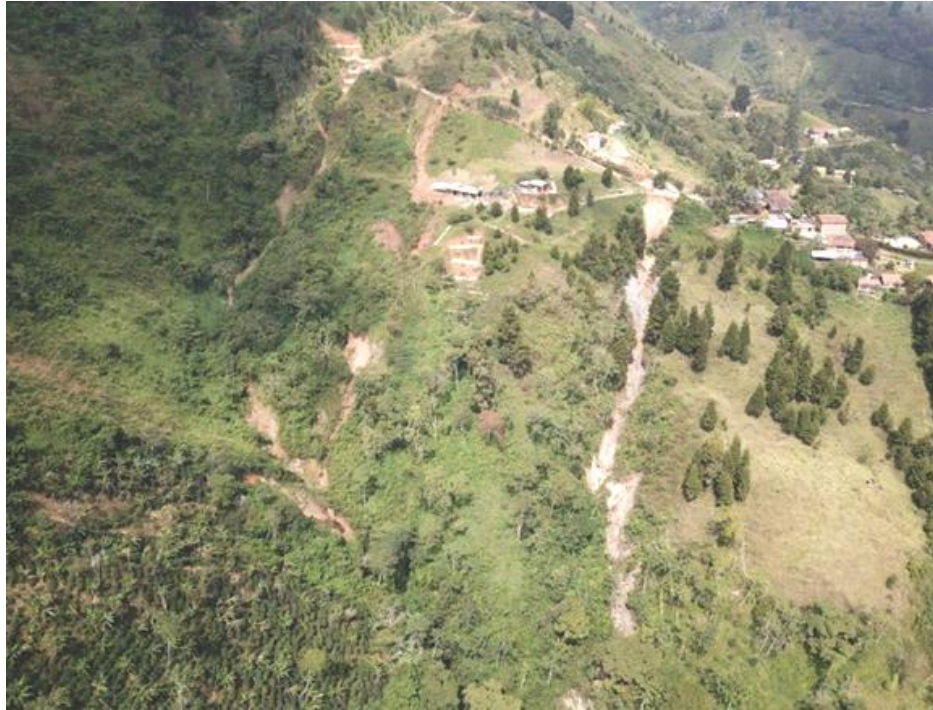


Ilustración 25. Flujo de lodo, vereda La Esperanza (parte alta)

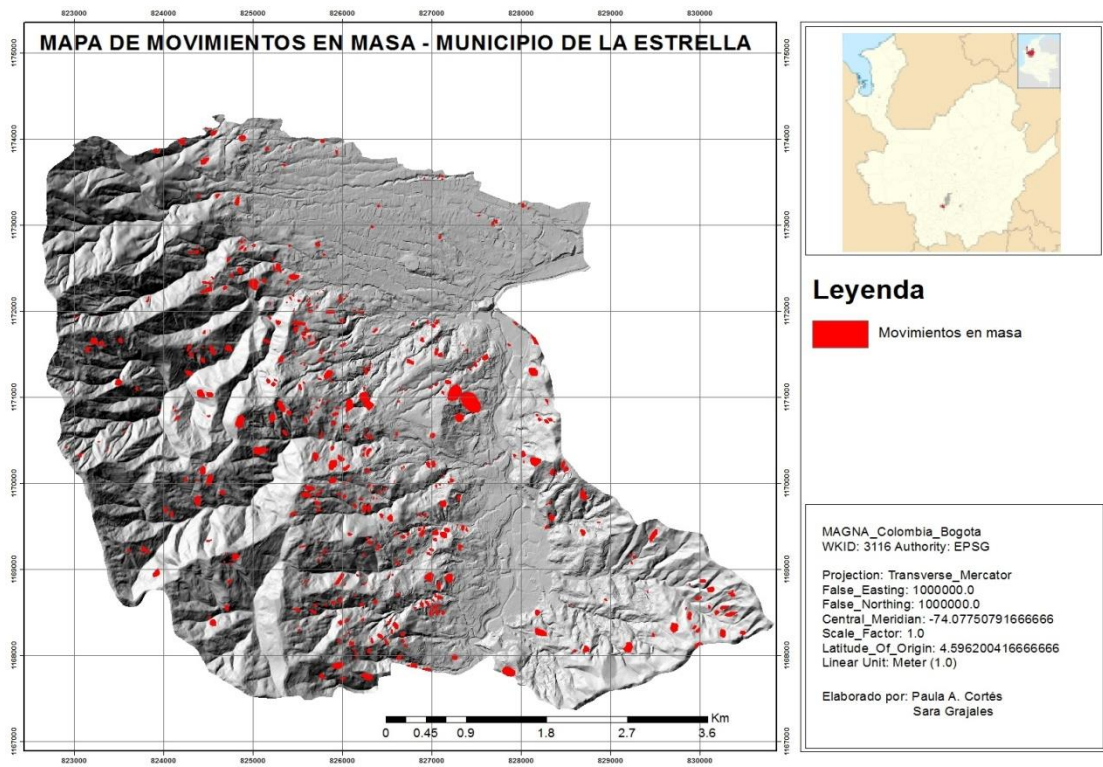


Ilustración 26. Flujo de lodos finca La Cuesta, vereda Tierra Amarilla



Ilustración 27. Deslizamiento traslacional cerca de la planta de tratamiento de agua del sector Pueblo Viejo.

Ilustración 28. Mapa de Movimiento en Masa del Municipio de La Estrella, elaborado por las autoras usando SIG (2018)



7. MÉTODO BIVARIADO (PESO DE LA EVIDENCIA)

Este método se basa en el teorema bayesiano y la evaluación de la relación entre el espacio, la distribución de las zonas afectadas por deslizamientos de tierra y la distribución de los factores condicionantes que causan los deslizamientos (Chen, *et. al.*, 2016)

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}}$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}}$$

Donde P es la probabilidad y ln es el log natural, B es la presencia de un potencial factor de deslizamiento de tierra, \bar{B} es la ausencia de un factor potencial de deslizamiento de tierra, D es la presencia de deslizamiento de tierra, y \bar{D} es la ausencia de un deslizamiento de tierra. W^+ y W^- son las ponderaciones de la evidencia cuando la variable está presente y ausente en los lugares de deslizamiento de tierra. La desviación estándar de W es calculada con:

$$S(C) = \sqrt{S^2 W^+ + S^2 W^-}$$

Donde $S^2(W^+)$ y $S^2(W^-)$ son variaciones de W^+ y W^- , respectivamente. La diferencia entre los dos pesos es conocida como el contraste de peso, C ($C = W^+ - W^-$). $C / S(C)$ proporciona una medida de la fuerza de la correlación entre la variable analizada y los deslizamientos. (Chen, *et.al.* 2016).

Una vez se obtiene el C de cada variable se reclasifica con estos valores en la tabla de atributos y se procede a realizar un álgebra de mapas donde se hace una sumatoria y se obtiene el mapa final de susceptibilidad

8. MÉTODO MULTIVARIADO (REGRESIÓN LOGÍSTICA)

Este es un tipo de análisis con el cual se calcula la probabilidad de una de las clases de la variable binaria dependiente, en este caso serían los movimientos en masa, en función de las variables independientes que serían los demás mapas temáticos. Este método es eficaz cuando se desea predecir la presencia o ausencia de una característica, esto de acuerdo a los valores en un grupo de predictores. Cabe mencionar, que, aunque este modelo es similar a uno de regresión lineal se adapta a la variable dependiente binaria.

Para implementar el modelo se utilizó el software MATLAB, para generar el modelo se debe obtener una relación entre la ocurrencia de movimientos en una unidad de terreno y cuál es la dependencia con el grupo de variables predictoras, esto sería igual al logaritmo de la razón de Odds:

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}$$

$$\text{Odds} \rightarrow \frac{p(x)}{1 - p(x)} = e^{\alpha + \sum Bx} \quad \text{Log odds "logit"} \rightarrow \ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki}$$

[range=0 to ∞] [range=-∞ to +∞]

$$\log\left(\frac{P}{1 - p}\right) = \beta_0 + \beta_1 v_1(r) + \beta_2 v_2(r) + \dots + \beta_m v_m(r) + \varepsilon$$

Donde β_0 es el intercepto del modelo, β_n son los coeficientes del modelo de Regresión Logística, y v_n son las variables independientes (predictoras) y E es el error.

Donde, P es la probabilidad de Bernoulli que indica que una unidad de terreno pertenece al grupo de ausencia de movimientos o al grupo de presencia de movimientos. P varía de 0 a 1 en forma de curva "S" (logística). Además es

necesario determinar si las características son totalmente independientes o no, para ello se relacionan las variables de geología, geomorfología, cobertura vegetal, procesos morfodinámicos para este modelo se utilizaron las cicatrices ya que el tamaño del pixel es de 2,2 x 2,2m lo que corresponde a un buen detalle y al usar el polígono , pendiente, relieve relativo, curvatura en perfil y las distancias a drenajes, fallas y vías; esto se realiza mediante el análisis de los valores estadísticos P y T, con el software MATLAB, para los valores estadísticos de P se identifica si la variable no es significativa si el valor es mayor a 0.05 y para los valores estadísticos de T la variable no es significativa si esta fuera del rango -2 y 2. Para el modelo, el valor estadístico P y el valor estadístico T indican que la curvatura no es una variable significativa.

Debido a que el porcentaje de área sin movimientos en masa es mucho mayor al área con movimientos es necesario calibrar el modelo. En este caso se utilizó el un R: 2 (todos los movimientos en masa y el doble de áreas sin movimiento en masa), por otro lado se realizó un mapa de susceptibilidad con la totalidad de los datos con la cual se obtuvo una mejor curva de validación.

9. MÉTODOS PARA LA VALIDACIÓN DE RESULTADOS

9.1 CURVA ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC)

El análisis de dicha gráfica facilita la selección del modelo que más se ajusta a la realidad a través de una comparación operativa de la Razón de Verdaderos Positivos (VPR) y de la Razón de Falsos Positivos (FPR).

Para esta prueba se usa el área bajo la curva, donde el valor más próximo a 1 indicará que el método tiene mayor exactitud, mientras que los valores más cercanos a 0.5 indican que el método es incorrecto.

Esta curva ayuda a comparar ambos métodos, ya que a través del contraste de curvas se puede definir cuál de los dos es el más predictivo.

En estas curvas se produce la representación de la sensibilidad y especificidad para cada valor umbral, lo cual permite generar un análisis discriminante. La sensibilidad se conoce como la probabilidad de que, dado una zona con movimiento en masa, esta se clasifique como (valor predictivo positivo). La especificidad se entiende como la probabilidad de que, dada una zona sin movimientos en masa, esta sea clasificada como tal (valor predictivo negativo).

Clasificador	Modelo	Mapa de deslizamientos
Verdadero Positivo	Inestable	Inestable
Falso Negativo	Estable	Inestable
Falso Positivo	Inestable	Estable
Verdadero Negativo	Estables	Estables

Tabla 7. Tabla de curva ROC Tomada de García, 2017

9.2 CURVA DE ÉXITO

Es una gráfica que describe la relación en porcentaje entre área acumulada de

movimientos en masa y área susceptible, teniendo en cuenta el rango de susceptibilidad.

10.RESULTADOS

10.1 MÉTODO BIVARIADO (PESO DE LA EVIDENCIA)

Para el desarrollo de este método, se tuvieron en cuenta todas las variables que fueron seleccionadas en un principio y el inventario de movimientos en masa con polígonos. Aquí se presenta el análisis obtenido luego del procesamiento de los datos con la ayuda del software GIS.

10.1.1 Susceptibilidad alta

Esta categoría corresponde a el 40 % del municipio de La Estrella, se localiza principalmente en la parte central en las veredas: El Guayabo, Pueblo Viejo, La Bermejala, La Culebra, San Miguel, La Raya, La Esperanza, San Isidro y Tablacita y en algunos tramos de La Vereda Tierra Amarilla, se identifican como rasgos principales un fuerte control estructural que puede ser producto de la Falla San Jerónimo y sus ramificaciones, asimismo se observan pendientes abruptas a escarpadas, con un relieve relativo de moderado a alto. Esta área se ve afectada principalmente por el mal uso de los suelos que se hallan degradados por la ganadería y la agricultura, además de una mala planificación de obras antrópicas como en el sector del Himalaya y La Florencia, el escaso o casi nulo manejo de los drenajes y aguas de escorrentía que en conjunto con la lluvia generan procesos de remoción en masa en el área de estudio. Como parámetro principal para esta clasificación se tiene en cuenta la alta incidencia y acumulación de fenómenos de remoción en masa activa e inactiva, por lo que tienen una mayor probabilidad de presentarse a futuro.

10.1.2 Susceptibilidad media

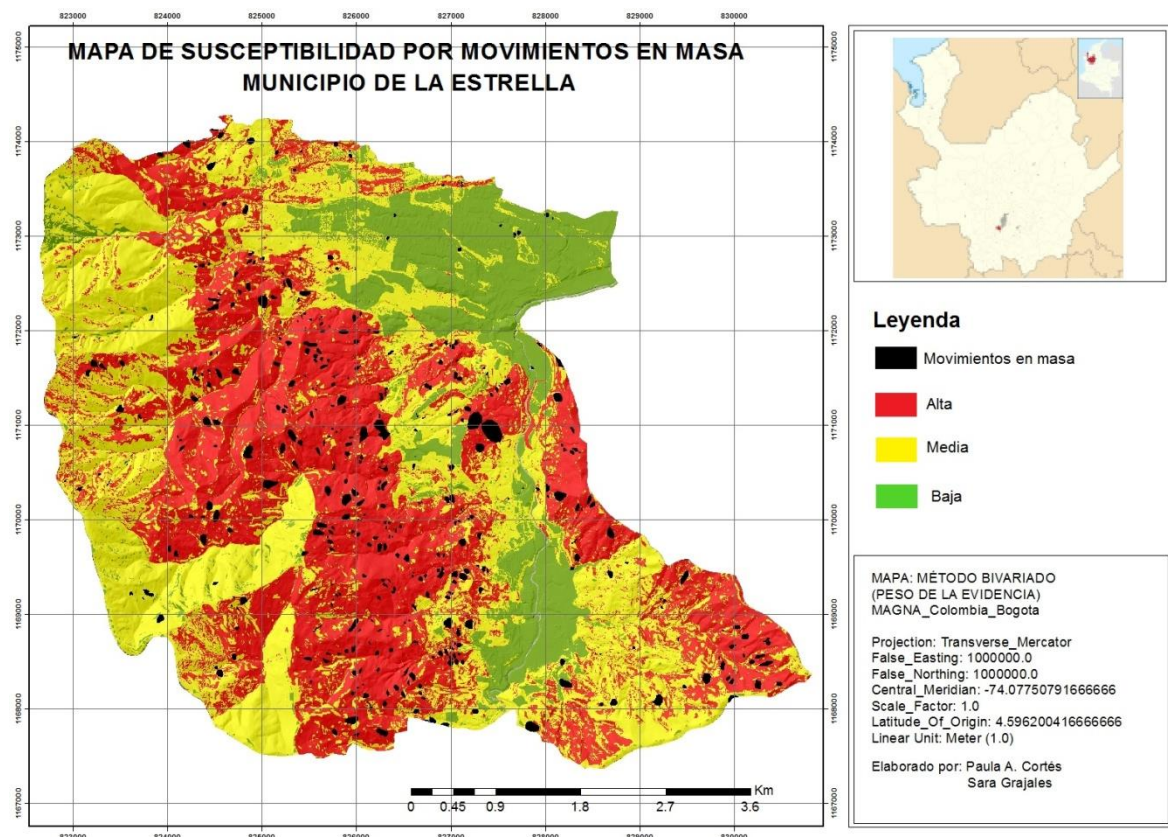
Representa el 40% del municipio de La Estrella, estas áreas se localizan cerca de las zonificadas con susceptibilidad alta, la mayor parte se encuentra en la reserva El Romeral. Aunque en la zona no se visualiza una gran cantidad de procesos de remoción en masa, las características indican la posible inestabilidad que se

puede presentar allí si se genera alguna intervención de carácter negativo, además se observa una susceptibilidad media en el parte central del mapa que corresponde a los sectores El Hoyo, Campo Alegre, El Himalaya y Pueblo Viejo parte baja, estos fueron desarrollados sobre depósitos de vertiente, que son producto de los procesos erosivos y de remoción de la zona con susceptibilidad alta y en donde se pueden presentar movimientos al generar un inadecuado uso del suelo en esta área o en la parte superior. Para esta categoría se tuvo en cuenta que en las zonas se presenta un porcentaje menor de deslizamientos, sin embargo, estos pueden llegar a presentarse debido a las características de la localidad.

10.1.4 Susceptibilidad baja

Esta clasificación representa un área de 20% del municipio de La Estrella, localizado principalmente en la cabecera municipal, Sector Juan XXIII y parte del sector industrial de La Tablaza. Cabe anotar, que en estas áreas la densidad de movimientos en masa es prácticamente inexistente.

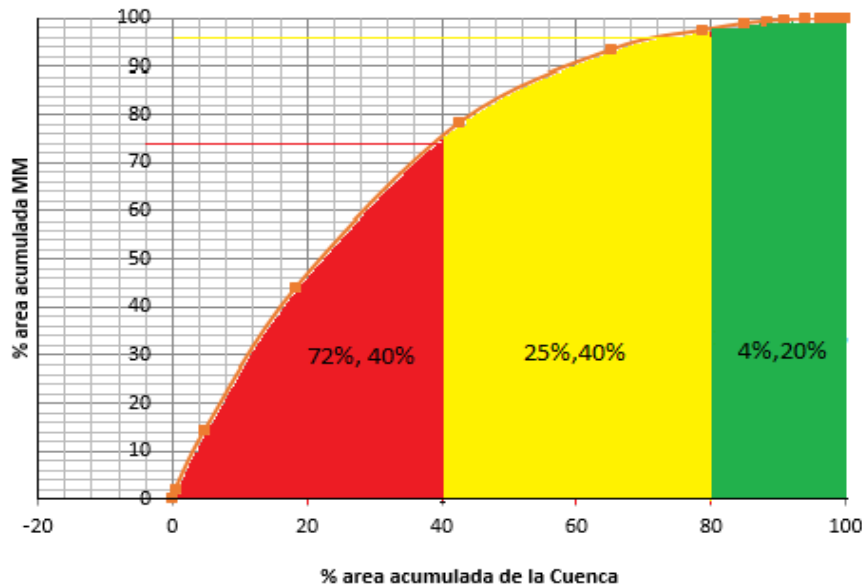
Ilustración 29. Mapa de Susceptibilidad por el método bivariado (Peso de la Evidencia) elaboración propia usando SIG (2018).



10.1.5 Curva de éxito

Para la curva de éxito se obtiene un área bajo la curva total de un 73% lo cual indica que el modelo es válido, además se dividió en los puntos de inflexión para categorizar la susceptibilidad, se observa que en un área de 40% se encuentra una acumulación aproximada del 72% de movimientos en masa lo cual se clasificó como susceptibilidad alta, luego en un 40% del área se encuentra acumulado un 25% de movimientos en masa lo cual se tomó como susceptibilidad media y por último se obtuvo por susceptibilidad baja con un 4% de movimientos en masa en un área total del 20%.

Ilustración 30. Curva de éxito del mapa de susceptibilidad por el método bivariado.



10.2 MÉTODO MULTIVARIADO (REGRESIÓN LOGÍSTICA)

Para esta metodología se tomaron en cuenta todas las variables excepto la curvatura ya que el valor P, se encontraba por encima de 0.05 lo cual indica que la variable es poco significativa para el modelo; para corroborar esto, se analizó el valor estadístico T y se observó que esta variable se encontraba entre -2 y 2, para este modelo se utilizó un R2 con un total de pixeles de 36015 y 12004 de

movimientos en masa.

Con este mapa se obtiene la probabilidad espacial de ocurrencia o no ocurrencia de un evento de remoción en masa, en el caso del Municipio de La Estrella se obtuvo que las variables más significativas corresponden a los mapas de distancias (vías, fallas, drenajes) y pendiente y los menos relevantes son geología y geomorfología. Este mapa se clasificó en susceptibilidad alta, media y baja para realizar la comparación con el modelo bivariado.

10.2.1 Susceptibilidad alta

Constituye el 56 % del Municipio de La Estrella, distribuido por todo el municipio en algunas secciones: en el occidente del territorio en pequeñas zonas de la reserva El Romeral, en la parte baja de las veredas Tierra Amarilla y en la parte alta de las veredas San Miguel y La Raya. Y al oriente del Municipio en la vereda Sagrada Familia, parte central de la vereda San Isidro y parte baja de la vereda La Tablacita, además del cerro Pan de Azúcar. Esto posiblemente se asocie al fuerte control estructural de la zona marcado por el esfuerzo generado por las Falla San Jerónimo.

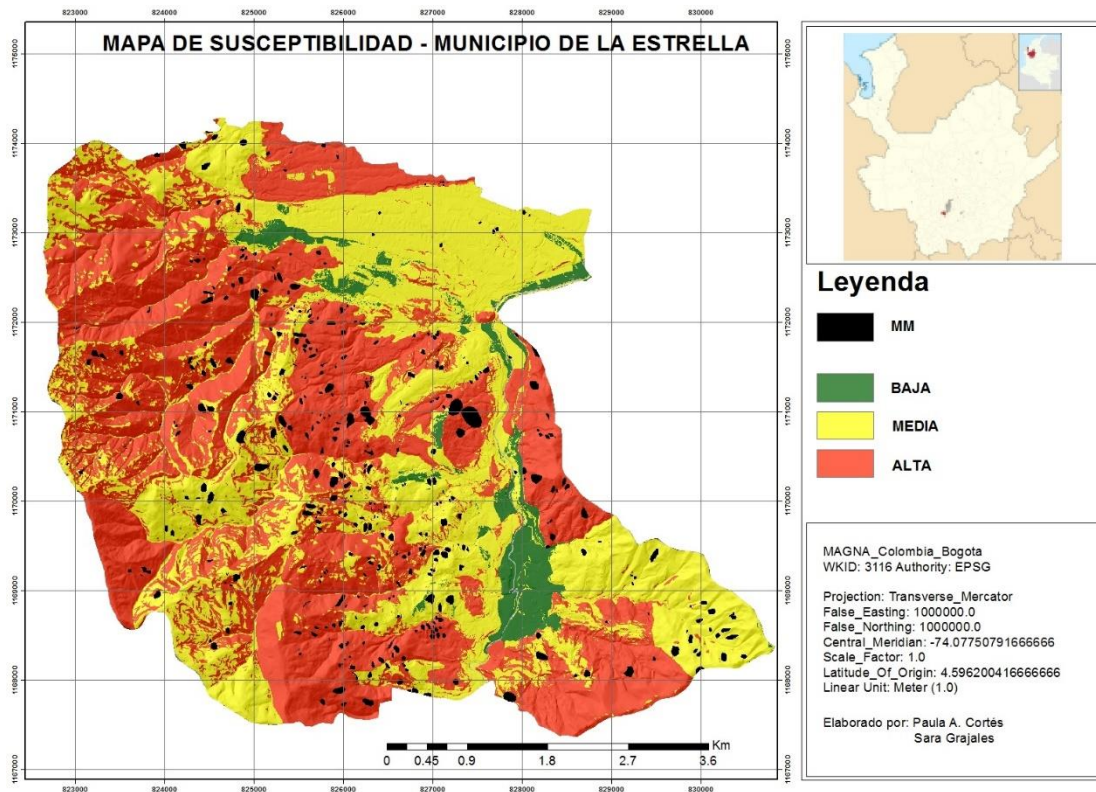
10.2.2 Susceptibilidad media

Ocupa el 25% del Municipio, estas áreas se localizan en todo el municipio, siendo la mayor parte del área de estudio, asociado a la susceptibilidad alta en las veredas San José, Tierra Amarilla, El Guayabo, Pueblo Viejo, Bermejala, La Culebra, San Isidro y La Tablacita; y en sectores Campo Alegre e Himalaya. De igual modo, se visualiza cerca de algunas zonas de susceptibilidad media en el centro poblado Tablaza y en la cabecera municipal.

10.2.3 Susceptibilidad baja

Esta clasificación representa un área de 20% del municipio de La Estrella, localizado principalmente en la cabecera municipal, y en las zonas aledañas al río Aburrá en Juan XXIII y parte del sector industrial de La Tablaza. Se debe agregar que en esta zona el desarrollo de movimientos en masa es muy baja a inexistente.

Ilustración 31. Mapa de susceptibilidad por Regresión Logística, elaboración propia usando SIG (2018).



10.2.4 Curva de éxito

Para el mapa de susceptibilidad se obtiene un área bajo la curva del 61% lo que indica que el modelo tiene falencias superando solo en un 1% lo mínimo para ser aceptable, este modelo indica que un 70% de los movimientos en masa se encuentran en un área acumulada total del 56% aproximadamente, un 25% de los movimientos en un área de 25% para susceptibilidad media y una baja con un 5% de movimientos en un área del 20%.

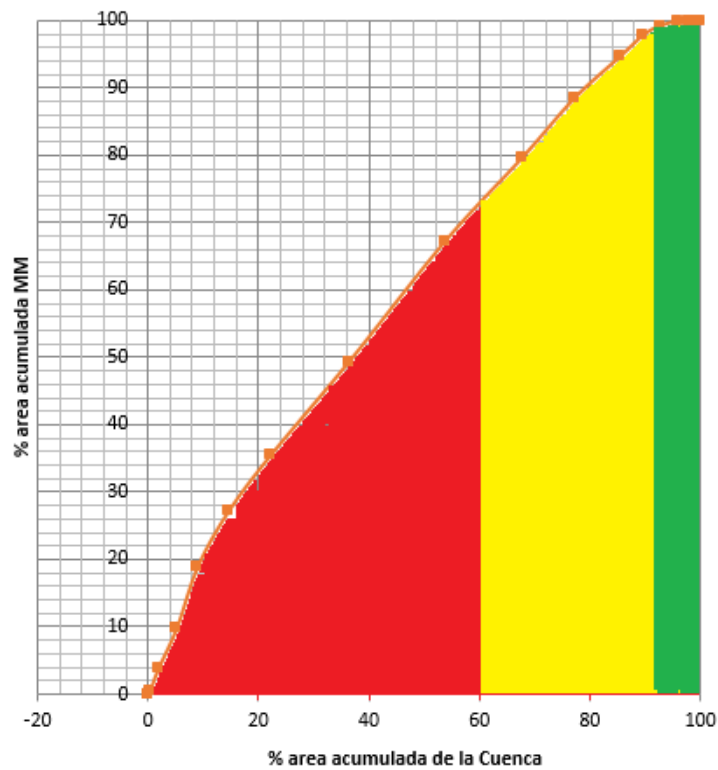


Ilustración 32. Curva de éxito del mapa 1 RL

10.3 CURVA ROC (RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC)

La curva ROC es utilizada en este caso para ayudar a la comparación de métodos, para esta se tiene en cuenta que los valores más cercanos o por debajo de 0.5 indica que el modelo es incorrecto para el caso del método bivariado (Peso de la Evidencia) se obtuvo una ROC de 0.81, mientras que el método multivariado obtuvo una curva de 0.66, lo que nos indica que el método bivariado tiene un mejor acercamiento a la realidad, ya que su curva es acerca a 1.



Ilustración 33. Curva ROC

11. DISCUSIÓN

En este proyecto se realizó una comparación entre dos métodos estadísticos, un bivariado y un multivariado, esto con la finalidad de generar una zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de La Estrella. En el desarrollo del proyecto se identificó que el modelo que presenta los mejores resultados en la zona es el método bivariado por medio del Peso de la Evidencia, ya que los resultados corresponden a la configuración actual del municipio y tienen gran concordancia con el inventario de movimientos en masa. Además, es un modelo fácilmente replicable y presenta una mediana simplicidad al momento de su desarrollo. De igual modo, este método puede indicar cuál de las variables tienen mayor y menor peso al analizar el W+ y el W- respectivamente. Para el caso de estudio las variables que presentan un mayor peso son distancia a fallas y distancia a drenajes y la menos relevante es curvatura.

Por otro lado, se utilizó el método de Regresión Logística como representación de los métodos multivariados, en este caso su validación no fue tan acertada respecto al primer método mencionado, esto puede correlacionarse con las características intrínsecas del área y al tamaño de píxel utilizado en relación con los polígonos del inventario de movimientos en masa, los cuales se podrían cambiar por coronas o centroides para mejorar la precisión del modelo; sin embargo, al ser la Regresión Logística un método probabilístico, se puede reconocer a través de pruebas estadísticas que variables no tienen relevancia en el modelo y estas pueden ser descartadas, igualmente se puede identificar cuál de las variables tiene una mayor incidencia y ser afrontada con prontitud; además, este modelo indica una probabilidad espacial de que ocurra o no la variable dependiente.

En el caso de la Regresión Logística, las variables más significativas son las distancias y la variable que no aporta al modelo es la curvatura, seguido de la geomorfología y la geología, teniendo una similitud con el modelo Peso de la

Evidencia.

Teniendo presente lo anteriormente mencionado y debido a que el uso de los estadísticos t y p , definen cuales de las variables puede eliminarse, una de las sugerencias es utilizar estos análisis (en este caso se desarrolló MATLAB) previo al desarrollo del Peso de la Evidencia, para luego utilizar en este solo las variables que aporten datos al modelo, en consiguiente, el grado de certidumbre podría aumentar.

Cabe anotar que el análisis de la comparación debe hacerse desde los resultados y que dichos datos solo aplican para el municipio de La Estrella, Antioquia. No obstante para efectos de obtener mejores resultados pueden utilizarse ambos modelos. De igual modo, en la Regresión Logística puede utilizarse información referente al grado de fracturamiento asociado a las fallas presentes en la zona, además, utilizar el perfil de suelo en lugar de la geología debido a que son fenómenos superficiales y es necesario entender cómo se encuentra el material visible.

Finalmente, el método Peso de la Evidencia en comparación con la Regresión Logística, es más simple en su desarrollo puesto que el último requiere programación y conocimiento en análisis estadísticos. Por lo mencionado anteriormente, el método que se recomienda es el bivariado y como soporte de este análisis se evidencia que en la curva ROC, para el caso del método bivariado (Peso de la Evidencia) se obtuvo una curva de 0.81, mientras que el método multivariado (Regresión Logística) obtuvo una curva de 0.66, lo que nos indica que la mejor curva es 0.81 ya que es la más cercana a 1 y tiene un mayor acercamiento a la realidad.

12. CONCLUSIONES

En la parte central del Municipio se observa una alta densidad de movimientos en masa, a esto se le suma el control estructural de las fallas San Jerónimo y Tierra Amarilla, que añaden esfuerzos constantes a la zona, además de generar fracturas en la litología permitiendo la infiltración de agua, lo que incrementa la meteorización de las rocas; asimismo, las pendientes muy abruptas dan a esta zona una clasificación de susceptibilidad alta por movimientos en masa.

La reserva El Romeral es definida como una zona con susceptibilidad media, esto a pesar de ser un área con fenómenos de remoción en masa en menor escala y en menor densidad; sin embargo, es un área propensa a la ocurrencia de movimientos debido a sus características, tales como pendientes muy abruptas y escarpadas, materiales meteorizados y cizallados.

El modelo de Regresión Logística además de aportar una probabilidad espacial tiene en cuenta la relevancia o no de una variable, permitiendo identificar cuál de ellas no aporta datos al modelo y ser eliminada; a diferencia del modelo bivariado que solo indica los pesos de las variables respecto a las demás. Es así que la Regresión Logística podría ayudar a reconocer la fuente del evento con mayor facilidad y así aportar una solución específica con premura.

El método bivariado fue elegido como el mejor modelo debido a que la zonificación corresponde con la configuración actual del Municipio, de igual modo, las curvas de validación de este modelo arrojan mejores datos que la Regresión Logística, además, el método bivariado cuenta con procesamiento sencillo, que lo convierte en un modelo práctico y replicable en comparación con el multivariado, aunque estadísticamente este último debería ser más preciso, puesto que es más sensible

y requiere un buen conocimiento estadístico y un inventario de movimientos en masa acorde al modelo.

13.RECOMENDACIONES

En el municipio se identificaron varias zonas con susceptibilidad alta, como es el caso del sector Pueblo Viejo, y de las veredas El Himalaya, Tierra Amarilla, La Esperanza y El Hoyo de Buga, por ello se recomienda realizar estudios a detalle en dichas zonas, en caso de que se desee generar alguna intervención antrópica o cambiar el uso de suelo.

La reserva El Romeral presenta características propias de una zona inestable, además se visualizan fenómenos de remoción en masa a pesar de no presentar intervención antrópica, por ello es preciso conservar este tramo del Distrito de Manejo Integrado (DMI) con la denominación de área protegida, puesto que cambiar su uso aumentaría el desarrollo de movimientos en masa, afectando dicha zona y la parte central del municipio.

Debido a las condiciones intrínsecas que presenta la zona, se aconseja agregar a los modelos de susceptibilidad los detonantes de lluvia y sismo, esto debido a que al tener en cuenta las altas precipitaciones, la litología y características estructurales del municipio, se puede obtener una zonificación temporal.

Para la generación del modelo de Regresión Logística es necesario tener un conocimiento previo de análisis estadísticos, puesto que el modelo es muy sensible y la inclusión de cualquier dato de forma errónea puede alterar en gran medida las operaciones.

Es de gran importancia para ambos modelos tener un buen inventario de movimientos en masa, ya que todas las variables se relacionan con este.

14. BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, C., Medina, E., Sandoval, J., García, J. 2012. Zonificación de amenaza por movimientos en masa aplicando un método bivariado y un proceso heurístico. Caso aplicado a la cuenca del río Cambeima, Ibagué - Tolima - Colombia. IV Simposio Panamericano de Deslizamientos: Vulnerabilidad y Gestión del Riesgo en la región Tropical de Centro y Suramérica: 1 - 17.

Cadavid, M. F., y Hermelin, M. 2005. El evento del 29 y 30 de mayo de 2000 en la Estrella y Sabaneta (Antioquia). En: M. Hermelin (Ed.). *Desastres de origen natural en Colombia, 1979-2004*. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT. 15: 187 – 198.

Cardona, O. 2001. La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo: una crítica y una revisión necesaria para la gestión. Ponencia presentada en el International Work-Conference on Vulnerability and Disaster, Theory and Practice. Wageningen, Holanda. 12-18. Disponible en: <https://bit.ly/2krItDR>.

Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S., Tofani, V. 2013. Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. Revista: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11: 2815 - 2831.

Chen, T., Niu, T., Jia, X., 2016. Comparison of information value and logistic regression models in landslide susceptibility mapping by using GIS. Revista: *Environmental Earth Sciences*. 75: 867 – 882.

Chen, W., Chai, H., Sun, X., Wang, Q., Ding, X., Hong, H. 2016. A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping. Revista: *Geocarto*. 32.: 367-385.

Congreso de la República de Colombia (2012, abril 24). *Ley 1523 de 2012 - Por la cual se adopta la política nacional de gestión de riesgo de desastres*. Disponible en: <http://bit.ly/1FJwpT4>.

Consortio Microzonificación – Área Metropolitana (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. *Informe final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Disponible en: <http://bit.ly/2e7X2L3>.

DNP (Departamento Nacional de Planeación). 2013. Ficha municipal de La Estrella N° 5380.

Erner, A., Sebnem, H., Duzgun, B. 2010. Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway). Revista: Landslides. 7: 55–68.

Fotheringham, A.S., Charlton, M.E., Brunsdon, C. 2001. Spatial variations in school performance: a local analysis using geographically weighted regression. Geogr. Environ. Revista: Model. 5: 43 – 66.

García, E. 2017. Evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa superficiales detonados por lluvia. II Curso Latinoamericano de movimientos en masa.

González, M. 2015. Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 en el municipio de Santa Bárbara, departamento de Antioquia. Proyecto de grado.

Guisao, Y. 2015. Zonificación de amenaza por movimientos en masa para el municipio de Támesis, en el área rural a escala 1:25.000 y en área urbana a escala 1:2.000. Proyecto de grado.

Hong, H., Reza, H., Sadat, Z. 2016. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): A comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models. Elsevier, 259: 105 - 118.

Hussin, H., Zumpano, V., Reichenbach, P., Sterlacchini, S., Micu, M., van Westen, C., Bălteanu, D. (2015). Different landslide sampling strategies in a grid-based bivariate statistical susceptibility model. Revista: Geomorfology. 253: 508 - 523. Disponible en: <https://bit.ly/2k8JUVf>

Municipio de La Estrella, Secretaría de Servicios Administrativos – Archivo General del Municipio de La Estrella (2007, diciembre 30). Acuerdo N°. 42 de 2007. Por “Por el cual se derogan el acuerdo 02 de 2000 y el acuerdo 20 de 2002, se adopta el plan básico de ordenamiento territorial del municipio de La Estrella y se establecen algunas reglamentaciones. Gaceta oficial N°. 4267. Disponible en: <http://bit.ly/2oxZzBx>.

Nandia, A. y Shakoor, A. 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*.110: 11 - 20. Disponible en: <http://bit.ly/2sm755h>.

Nampak, H., Pradhan, B., Manap, M.A. 2014. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Hydrol.* 513: 283 - 300.

Ozdemir, A., & Altural, T. 2013. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64: 180-197.

POMCA. 2005. Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá. Preliminares y resumen ejecutivo. Universidad Nacional – Área Metropolitana – U. P. B. Disponible en: <http://bit.ly/2msk8Kr>.

Pradhan, B., Abokharima, M.H., Jebur, M.N., Tehrany, M.S. (2014). Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. *Revista: Natural Hazards*. 73. 1019 – 1042.

Schicker, R. y Moon, V. (2012). Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale. *Revista: Geomorfology*. 162: 40 - 57. Disponible en: <http://bit.ly/2C9kQE4>.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2001. Guía metodológica para la zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa - Método Univariado - y escenarios de riesgo por avenidas torrenciales. Bogotá - Colombia. 1: 1- 182.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). 2013. Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza relativa por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000. Bogotá – Colombia. 1: 1 – 147.

Shahabi, H., Ahmad, B. 2013. Evaluation and comparison of bivariate and multivariate statistical methods for landslide susceptibility mapping (case study: Zab basin). *Arabian Journal of Geosciences*. 6: 3885–3907. Disponible en: <http://bit.ly/2sm755h>