

**Zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000
aplicando el método estocástico - lógica difusa: caso de estudio, municipio de Vetas,
Santander.**

María Angélica Bautista Sánchez

Nancy Mayerly Luna Cáceres

Trabajo de grado para optar al título de Geóloga

Director:

Joaquín Andrés Valencia Ortiz

Ms. C Geología Ambiental

Co-Director:

María Carmenza Vicinni

Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Dedico de manera especial a mi madre Marilú, pues ella fue el pilar fundamental para la construcción de mi vida profesional, me ha inculcado la responsabilidad y deseo de superación, en ella tengo el espejo en el cual me quiero reflejar pues sus virtudes infinitas y su gran corazón la llevan a ser la mujer a que más admiro.

A Pablo y mis hermanas Leidy y Emily por estar conmigo, por su cariño, su amor y su apoyo incondicional, pues han sido mi ejemplo y lucha para alcanzar mis metas.

Alejito, seguramente en este momento no entiendas mis palabras, pero para cuando seas capaz, quiero que te des cuenta de lo que significas para mí. Eres mi mayor motivación, me impulsas a cada día superarme y a crecer como persona para brindarte siempre mi amor de la mejor manera. Como en todos mis logros, en este estuviste muy presente.

Gracias por su apoyo incondicional. ¡Los Amo!

Nancy Luna

Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo General	19
1.2 Objetivos Específicos.....	20
2. Planteamiento del problema.....	20
3. Justificación	22
4. Localización	24
5. Marco Geológico	26
5.1 Estratigrafía.....	26
5.2 Geología Estructural	29
6. Marco Teórico.....	30
6.1 Movimientos en Masa.....	30
6.1.1 Clasificación de los Movimientos en Masa.	31
6.2 Lógica Difusa.....	33
6.2.1 Conjuntos Difusos y Grados de Pertenencia.....	33
6.2.2 Funciones de Pertenencia.....	33
6.3 Sistema de Inferencia Difusa	34
6.3.1 Superposición Difusa.	35

6.3.2 Tipos de Superposición Difusa	35
6.4 Zonificación de la Susceptibilidad.....	36
6.5 Zonificación de la Amenaza	37
6.5.1 Detonantes.....	37
7. Metodología	39
8. Antecedentes	43
9. Campaña de Campo	48
10. Creación de insumos para el análisis de la lógica difusa	50
10.1 Geología.....	51
10.2 Unidades Geológicas Superficiales (UGS).....	53
10.3 Geomorfología	55
10.3.1 Morfometría.	56
10.3.2 Morfogénesis.....	58
10.3.3 Morfodinámica.....	67
10.3.4 Catálogo de movimientos en masa.	67
10.4 Cobertura de la Tierra	68
10.5 Usos del Suelo.....	70
10.6 Aplicación del Método Estocástico Lógica Difusa.....	71
11. Resultados de la susceptibilidad a movimientos en masa.....	76
11.1 Susceptibilidad Muy Baja	77
11.2 Susceptibilidad Baja.....	78
11.3 Susceptibilidad Moderada.....	79
11.4 Susceptibilidad Alta	80

11.5 Susceptibilidad Muy Alta	81
12. Validación del mapa de susceptibilidad.....	81
13. Análisis de la amenaza por movimientos en masa.....	84
13.1 Factores detonantes	84
13.1.1 Detonante Lluvia.....	85
13.1.2 Detonante Sismo.	87
14. Amenaza por movimientos en masa	90
14.1 Amenaza Baja	92
14.2 Amenaza Media	93
14.3 Amenaza Alta.....	93
14.4 Amenaza Muy Alta	94
15. Conclusiones	94
15. Recomendaciones	97
Referencias Bibliográficas	99
Apéndices.....	110

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Catálogo Nacional de Movimientos en Masa del año 1916 al 2000.	23
Figura 2. Localización geográfica del área de estudio.	25
Figura 3. Mapa geológico del área de estudio.	27
Figura 4. Perfil geológico de la zona de estudio.	30
Figura 5. Caída de roca (a), Cabeceo (b), Deslizamiento Rotacional (c), Deslizamiento Traslacional (d), Deslizamiento de bloques (e), Flujo de Escombros (f), Avalancha de escombros (g), Deslizamientos de tierra (h) y Propagación Lateral (i). Tomada y modificada de Varnes.	32
Figura 6. Representación gráfica de los tipos de funciones de pertenencia.	34
Figura 7. Estructura de un Sistema de Inferencia Difusa.	35
Figura 8. Diagrama de la metodología a utilizar para este proyecto de investigación.	42
Figura 9. Línea de tiempo sobre los estudios de la lógica difusa y sus aplicaciones a la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.	47
Figura 10. Mapa de las estaciones realizadas durante la campaña de campo.	49
Figura 11. a) Afloramiento rocoso de la unidad Granito de pescadero. b) Movimiento de masa de tipo Caída de rocas ubicado a corte de carretera Vía Vetás - California.	50
Figura 12. Deslizamiento traslacional suspendido y de detritos y Deslizamiento traslacional de detritos sobre la vía California – Vetás.	50
Figura 13. Mapa geológico del área de estudio.	52

Figura 14. Mapa geológico categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Inferencia Difusa.....	53
Figura 15. Mapa de UGS del área de estudio (Ver leyenda en Apéndice D).	54
Figura 16. Mapa de UGS categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Lógica Difusa.....	55
Figura 17. Mapas temáticos categorizados como variables morfométricas. Altura(a), Curvatura(b), Pendientes(c), SPI(d), TWI(e).....	58
Figura 18. Mapa geomorfológico del área de estudio.....	59
Figura 19. Mapa geomorfológico categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Lógica Difusa.	60
Figura 20. Ambiente Denudacional en el que se encuentran geoformas de Ladera erosiva abrupta (Dlea), Colina remanente disectada (Dcred), Ladera disectada muy abrupta (Dldma), Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl) y Lomo denudado con filos y erosión laminar (Dldefel).....	61
Figura 21. Ambiente Fluvial, en el que se encuentran geoformas de Plano o llanura de inundación (Fpi) y cauce aluvial activo (Fca), pertenecientes al Río Vetas.	63
Figura 22. Ambientes Glacial y Denudacional, en la que se encuentran geoformas de Sierra glaceada (Gsg), Conos glaciofluviales (Gcgf), Altiplano (Da), Ladera erosiva (Del) y Ladera erosiva abrupta (Dlea).....	65
Figura 23. Ambientes Antrópicos y Denudacionales, en la que se encuentran geoformas Centro poblado (Acp) y Colina remanente (Dcre).....	66
Figura 24. Identificación de movimientos en masa por fotogeología (Google Earth Pro, 2017) ..	67
Figura 25. Mapa de movimientos en masa del área de estudio.	68

Figura 26. Mapa de coberturas de la tierra categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Lógica Difusa.....	70
Figura 27. Mapa de usos del suelo categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Inferencia Difusa.....	71
Figura 29. Reclasificación en 5 intervalos de la prueba trece mediante intervalos geométricos (p13).....	76
Figura 28. Variables utilizadas con los grados de pertenencia de la membrecía Large. GMF (a), Geología (b), UGS (c), Pendientes (d), Usos (e)	75
Figura 30. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de estudio, reclasificado por intervalos geométricos en los rangos: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alta y Muy Alta.	77
Figura 31. Porcentajes del área total del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para cada categoría.....	77
Figura 32. Curva ROC para la validación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa a partir de la lógica difusa (p13).....	83
Figura 33. Porcentaje de movimientos en masa asociados a cada categoría de susceptibilidad. ..	83
Figura 35. Gráfica con el registro de datos para cada estación; 1) Vetás-El Pozo 2) Rincón Los 3) Berlín 4) Vivero Suratá - Aut 5) Cachirí - Aut 6) Picacho. El recuadro rojo indica el rango de 18 años tomado para realizar el mapa de isoyetas.	87
Figura 34. Ubicación espacial de las 6 estaciones pluviométricas del IDEAM, utilizadas en el proyecto de investigación.	86
Figura 36. Mapa detonante lluvia para la zona de estudio.....	88
Figura 37. Mapa del detonante para la zona de estudio.....	89

Figura 38. Mapa de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de estudio, con un periodo de retorno de 475 años.	91
Figura 39. Clasificación del mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa del SGC (2013).	92
Figura 40. Porcentajes del área total del mapa de amenaza a movimientos en masa para cada categoría.	92

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas que delimitan el área de trabajo.	26
Tabla 2. Descripción de las unidades litológicas que afloran en la zona de estudio.	28
Tabla 3. Geoformas de Ambiente Morfogenético Denudacional.	61
Tabla 4. Geoformas de Ambiente Morfogenético Fluvial.	63
Tabla 5. Geoformas de Ambiente Morfogenético Estructural.	64
Tabla 6. Geoformas de Ambiente Morfogenético Glacial.	65
Tabla 7. Geoformas de Ambiente Morfogenético Antrópico.	66
Tabla 8. Rangos de reclasificación en 5 intervalos mediante intervalos geométricos de la prueba trece (p13).	76
Tabla 9. Número de píxeles para cada categoría de susceptibilidad.	82
Tabla 10. Estaciones pluviométricas de la zona de estudio.	85
Tabla 11. Rango de clasificaciones para detonante lluvia.	86
Tabla 12. Fuentes sismogénicas corticales y de subducción.	88
Tabla 13. Rango de clasificaciones para el detonante sismo.	90

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Mapa geológico escala 1:25.000 del área de estudio.....	110
Apéndice B. Mapa de unidades geomorfológicas a escala 1:25.000 del área de estudio	111
Apéndice C. Mapa de unidades geológicas superficiales a escala 1:25.000 del área de estudio.	112
Apéndice D. Leyenda del mapa de unidades geológicas superficiales a escala 1:25.000 del área de estudio.	113
Apéndice E. Mapa de usos de suelo a escala 1:25.000 del área de estudio.	114
Apéndice F. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de estudio, calculado con un deto. lluvia con un periodo de retorno de 25 años y un deto. sismo con un periodo de retorno de 475 años.	115
Apéndice G. Mapa de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de Estudio, con un periodo de retorno de 475 años.	116
Apéndice H. Inventario de movimientos en masa	117
Apéndice I. Tablas de membresías y parámetros utilizados en las pruebas realizadas con las herramientas Fuzzy Membership y Fuzzy Overlay (ArcGis 10.4) para el modelado de la susceptibilidad.....	119

Resumen

TITULO: ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA 1:25.000 APLICANDO EL MÉTODO ESTOCÁSTICO - LÓGICA DIFUSA: CASO DE ESTUDIO, MUNICIPIO DE VETAS, SANTANDER*.

AUTORES: María Angélica Bautista Sánchez, Nancy Mayerly Luna Cáceres.**

PALABRAS CLAVES Susceptibilidad por movimiento en masa, Zonificación de la Amenaza, Municipio de Vetas, Detonantes Sismo y Lluvia, Lógica Difusa.

DESCRIPCIÓN:

El área de investigación se encuentra sobre el flanco occidental de la cordillera oriental al noreste del departamento de Santander, en las inmediaciones del municipio de Vetas, cubriendo un área de trabajo de 98 km². Las condiciones topográficas, geológicas, geomorfológicas, Usos y Coberturas de la tierra del municipio de Vetas, han creado escenarios propicios para la ocurrencia de movimientos en masa, situación que se ha acentuado con los procesos antrópicos como la minería y la agricultura que se han desarrollado en las zonas montañosas.

Para este estudio se toma en cuenta los conjuntos difusos que han sido utilizados en gran cantidad de áreas que abarcan desde las matemáticas básicas hasta la inteligencia computacional aplicada a ingenierías tradicionales y avanzadas. A partir del concepto matemático Lógica Difusa se generó el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:25.000 implementando cinco atributos condicionantes: Geología, Geomorfología, Pendientes, Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y Usos del suelo, obteniendo como resultado una categorización que presenta cinco rangos de susceptibilidad (Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy alta), donde el 78% de los movimientos en masa, se clasifican entre susceptibilidad alta y muy alta. Este modelo fue validado usando la curva ROC (**R**eceiver **O**perating **C**haracteristic) con valores de 0.867 indicando una buena validación que demuestra la fiabilidad del método aplicado. Para la generación del mapa de amenaza a movimientos en masa fueron definidos los detonantes sismo y lluvias, obteniendo como resultado cuatro categorías de amenaza (de Baja a Muy alta), donde las veredas con amenaza alta y muy alta corresponden a Santa Úrsula, Pantanos, Bucare, San Francisco ubicadas en el sector Oeste, y la vereda El Chopo ubicada hacia la zona centro del área de trabajo.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Geología Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz Ms. C Geología Ambiental Co-Director: María Carmenza Vicinni Ingeniera Civil

Abstract

TITLE: SUSCEPTIBILITY ZONING AND THREAT BY MOVEMENTS ON SCALE MASS 1:25.000 APPLYING THE STOCHASTIC PROCESS - DIFFUSE LOGIC: CASE STUDY, MUNICIPALITY OF VETAS, SANTANDER. *

AUTHORS: María Angélica Bautista Sánchez, Nancy Mayerly Luna Cáceres. **

KEYWORDS: Susceptibility by mass movement, Threat Zoning, Municipality of Vetas, Earthquake and Rain Detonating, Diffuse Logic.

DESCRIPTION:

The research area is located on the western flank of the eastern mountain to the northeast of the department of Santander, in the vicinity of the municipality of Vetas, covering a work area of 98 km². The topographical, geological, geomorphological conditions, uses and coverages of the land of the municipality of Vetas, have created favorable scenarios for the occurrence of mass movements, a situation that has been accentuated by anthropic processes such as mining and agriculture that have developed in mountainous areas.

For this study, fuzzy sets that have been used in a large number of areas that range from basic mathematics to computational intelligence applied to traditional and advanced engineering are taken into account. Based on the Fuzzy Logic mathematical concept, the susceptibility map to mass movements was generated at a scale of 1: 25,000, implementing five conditioning attributes: Geology, Geomorphology, Slopes, Surface Geological Unit (**UGS**) and Land use, resulting in a categorization that it has five susceptibility ranges (Very low, Low, Medium, High and Very High), where 78% of mass movements are classified as high and very high susceptibility. This model was validated using the ROC (**R**eceiver **O**perating **C**haracteristic) curve with values of 0.867 indicating a good validation that demonstrates the reliability of the applied method. For the generation of the threat map to mass movements, the earthquake and rainfall triggers were defined, resulting in four threat categories (from Low to Very High), where the paths with high and very high threat correspond to Santa Úrsula, Pantanos, Bucare, San Francisco located in the West sector, and El Chopo village located towards the center of the work area.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas Escuela de Geología Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz Ms. C Geología Ambiental Co-Director: María Carmenza Vicinni Ingeniera Civil

Introducción

Los movimientos en masa (**MM**) son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a la humanidad, causando miles de muertes y daños en las propiedades, por valor de decenas de billones de dólares al año alrededor de todo el mundo (Brabb & Hrod, 1989). Son definidos como un fenómeno en donde materiales como suelos, detritos, rocas y en general depósitos no consolidados son desplazados a una altura inferior influenciados principalmente por efectos de la gravedad (Girty, 2009) y que puede o no incluir el efecto del agua. Este tipo de eventos, son desencadenados por factores asociados a las condiciones del terreno (estructuras geológicas, materiales, pendientes y cobertura vegetal del terreno), procesos naturales (lluvias, sismos, erosión) y procesos antrópicos (modificación del paisaje, cortes en ladera, etc.).

Schuster (1996) expone que en el siglo XX se reportaron aproximadamente 25 eventos de movimientos en masa catalogados como catastróficos y que afectaron a más de 18 países en todo el mundo incluyendo varios países del continente americano, como Estados Unidos, Brasil, Honduras, Guatemala, Nicaragua, El Salvador, Ecuador, Perú y Colombia, donde la actividad sísmica y las fuertes lluvias lideran el accionar de este tipo de fenómeno. Un ejemplo de esto es el deslizamiento ocurrido 1987 en la provincia de Napo, Ecuador que dejó más de 1000 muertos y pérdidas totales de US \$ mil millones a causa de la actividad sísmica de la zona. También las fuertes lluvias causaron múltiples movimientos en masa en Shizuoka, Japón dejando 1094 muertos y alrededor de 19000 casas destruidas. Otro de los causantes de los movimientos en masa más desastrosos del siglo pasado, fueron las erupciones volcánicas. En Java, Indonesia los flujos de lodo del volcán Kalut, causaron más de 5000 muertos y 104 pueblos destruidos.

En Colombia, las consecuencias debido a los movimientos en masa han aumentado obedeciendo a la convergencia de una serie de factores, como la geología, geomorfología, el clima, cobertura del suelo y la acción de tipo antrópica, este último por el uso inadecuado del terreno, además, el desarrollo de las grandes ciudades en el país, se ha concentrado principalmente en la región andina, en donde vive cerca del 70% de la población colombiana, razón por la cual la ocurrencia de un movimiento en masa siempre afectará algún sector productivo del país, causando pérdidas económicas y, en algunos casos, vidas humanas (SGC, 2017).

Actualmente, la evaluación de la amenaza por este tipo de eventos (movimientos en masa, inundaciones, terremotos, etc.) es uno de los temas de mayor interés no solo a nivel científico, sino también social, económico, entre otros (González, 2015), ya que, en las últimas décadas el volumen total de daños que han causado es superior al de los terremotos e inundaciones. Sin embargo, esta situación podría ser en gran medida evitable, si el problema se determina a tiempo y se ejecutan las debidas medidas de prevención y control. La zonificación de la susceptibilidad y amenaza requiere del manejo de una serie de herramientas como métodos de evaluación, entre esos los Modelos Digitales de Elevación (MDE) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), además de, características geológicas y ambientales del área de interés que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible y así poder implementar un diseño óptimo de su solución. Actualmente estas herramientas son ampliamente utilizadas ya que permite la aplicación de diferentes modelos en la generación de la cartografía de susceptibilidad y amenaza. Entre los diferentes modelos de evaluación, se encuentran los métodos estocásticos, heurísticos, estadísticos y determinísticos, de ellos, los modelos estocásticos se caracterizan porque las relaciones entre los componentes del sistema se rigen por las leyes de la naturaleza estadística (Lahoz-Beltrá, 2004) y se dividen en varios sistemas como: Algoritmos Difusos (**AD**), Redes

Neurales Artificiales (**RNA**), Algoritmos Genéticos (**AG**), Programación Geotécnica (**PG**), Colonia de Hormigas (**CH**), Algoritmos Evolucionados (**AE**) y Lógica Difusa (**LD**) (SGC, 2013).

En el desarrollo de este proyecto se implementará una metodología guiada por los Sistemas de Lógica Difusa que, con base en la evaluación de criterio experto y la combinación de parámetros mediante el uso de membrecías y tipos de superposición de atributos, se logrará obtener una representación gráfica en donde se mostrará la clasificación por áreas del grado de susceptibilidad en 5 rangos (muy baja, baja, media, alta y muy alta) seguidamente este mapa será validado por el uso de métodos estadísticos como la curva ROC y el porcentaje de predicción de movimientos en masa. En cuanto a la amenaza (combinación de susceptibilidad + detonantes) se incorporarán los detonantes sismo y lluvia a partir de los datos pluviométricos y sísmicos de la región pertenecientes al municipio de Vetás, Santander que se representara en 4 rangos clasificados (bajo, medio, alto y muy alto) de amenaza.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Zonificar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa para el municipio de Vetás, Santander, a partir del desarrollo de un modelo estocástico (Lógica Difusa) a escala 1:25.000.

1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar una base de datos morfodinámica con el registro e inventario de movimientos en masa de la zona de estudio, a partir de recopilación de datos nacionales.
- Crear el mapa morfogenético, morfométrico y de unidades geológicas superficiales en un sistema información geográfica a partir de un modelo digital de elevación, Google Earth, imágenes satelitales y cartografía base.
- Actualizar el mapa geológico a una escala 1:25.000 por medio de fotointerpretación, haciendo un enfoque en los depósitos cuaternarios.
- Realizar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a partir de las variables geomorfológicas, geológicas, usos del suelo y unidades geológicas superficiales por medio del modelo estocástico - lógica difusa.
- Crear los condicionantes para el área de estudio (detonante sísmico y detonante lluvia).
- Zonificar la amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000.

2. Planteamiento del problema

Colombia enfrenta grandes retos que amenazan seriamente su desarrollo. Las condiciones topográficas del país forman un escenario propicio para la ocurrencia de movimientos en masa (**MM**), situación que se acentúa con los procesos antrópicos que se desarrollan en las zonas montañosas (Banco mundial Colombia, 2012), además los periodos de lluvias desatan constantes

deslaves, desprendimientos y flujos, o se reactivan deslizamientos, afectando muchas poblaciones, al igual que la infraestructura vial y otros proyectos (SGC, 2013).

El desarrollo de las grandes ciudades en el país se ha concentrado principalmente en la región andina, en donde vive cerca del 70% de la población colombiana, razón por la cual la ocurrencia de un movimiento en masa siempre afectará algún sector productivo del país, causando pérdidas económicas y, en algunos casos, de vidas humanas (SGC, 2017).

Por otro lado, el ministerio de vivienda, ciudad y territorio de Colombia (**MINVIVIENDA**), el 19 de septiembre de 2014 expide el decreto número 1807 (MINVIVIENDA, 2014), por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y donde además se dictan otras disposiciones.

El municipio de Vetas presenta alta amenaza por MM, especialmente al norte del casco urbano en las veredas Salado, Centro, Mongora y en las áreas donde se concentran las explotaciones mineras más antiguas de Vetas. Además, se encuentran movimientos activos en zonas puntuales cuyos principales detonantes han sido el corte a media ladera para la adecuación de vías, la disposición inadecuada de estériles de minería en laderas y áreas pendiente pronunciadas y las altas precipitaciones (EOT Alcaldía de Vetas, 2008). De acuerdo con el mapa de amenazas por movimientos en masa a escala 1:100.000 (SGC, 2014), el municipio de Vetas en general, presenta un rango de media a muy alta amenaza por fenómenos de movimientos en masa, donde aproximadamente el 85% del área se encuentra en el rango de media a alta amenaza ubicada en su mayoría en la zona sur, y alrededor del 15% del municipio restante, presenta de alta a muy alta amenaza y se ubica en la zona norte.

3. Justificación

Los movimientos en masa han presentado en mayor medida cada año en todos los países del mundo generando grandes pérdidas humanas y económicas. Sin embargo, el nivel de impacto varía considerablemente de acuerdo con las condiciones geológicas locales y la vulnerabilidad socioeconómica (Alcantara-Ayala, 2002). Datos presentados por Sidle & Ochiai (2006) señalan al continente asiático con el de mayor número de víctimas por MM, donde Nepal sobresale con 186 víctimas mortales por año, seguido por Japón y China, con 170 y 140-150 respectivamente; en Latinoamérica, Brasil ocupa el primer lugar con un promedio de 88 personas fallecidas cada año. En términos económicos Japón es la nación más afectada por movimientos en masa, con un estimado de pérdidas de 4 mil millones de dólares anuales (Cruden *et al.*, 1989; Schuster, 1996; Schuster & Highland, 2001; Sidle & Ochiai, 2006).

Al igual que en Brasil y muchos países en América Latina, Colombia enfrenta grandes retos que amenazan seriamente su desarrollo. Factores como el desplazamiento de población de las zonas rurales a las zonas urbanas, la degradación ambiental y el cambio acelerado del uso del suelo amplifican dichos retos según Banco mundial Colombia (2012). Las condiciones topográficas del país forman un escenario propicio para la ocurrencia de movimientos en masa, situación que se acentúa con los procesos antrópicos que se desarrollan en las zonas montañosas (Banco mundial Colombia, 2012), además, los periodos de lluvias desatan constantes deslaves, desprendimientos y flujos, o se reactivan deslizamientos, afectando muchas poblaciones, al igual que la infraestructura vial y otros proyectos (SGC, 2013). El 90% de las pérdidas generadas por MM

(deslizamientos), son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control (Suárez, 1998).

Según el catálogo nacional de movimientos en masa de Colombia (INGEOMINAS, 2002), Santander es uno de los departamentos que más ha sufrido históricamente afectación por los MM a nivel nacional, registrando más de 400 eventos ocurridos en 57 municipios de su jurisdicción, en donde se han visto afectado aproximadamente 1'474.355 de personas y daños materiales con cifras de gran magnitud (Fig. 1).

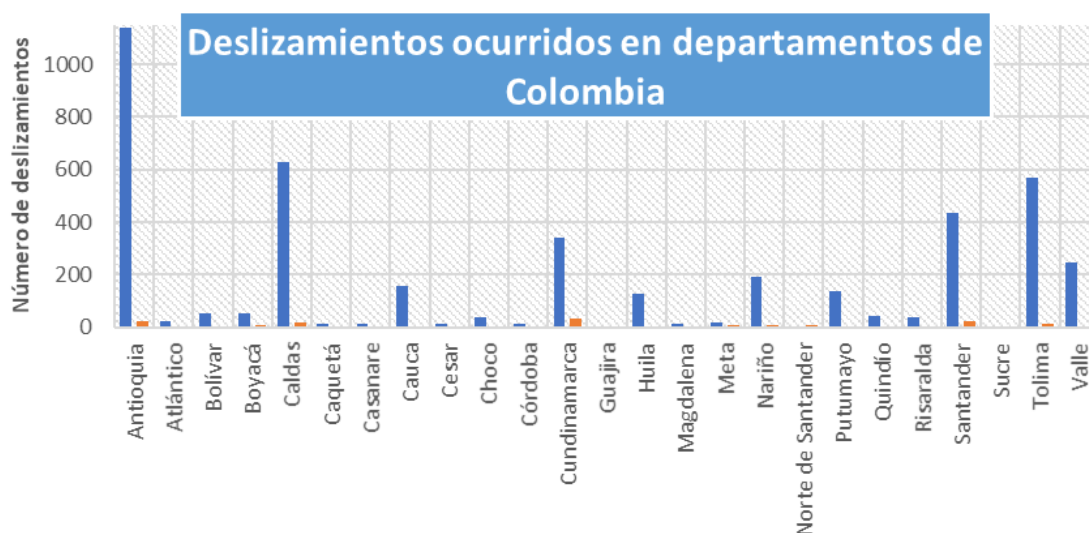


Figura 1. Catálogo Nacional de Movimientos en Masa del año 1916 al 2000.

A partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 , 2012), los municipios del país deben hacer estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas de planificación del desarrollo seguro y gestión ambiental territorial sostenible (SGC, 2013). A pesar de ello, en Vetás existe una problemática latente que amenaza el municipio por movimientos en masa , y sumándose al hecho de que se han desarrollado pocos estudios acerca de los movimientos en masa en el sector, y a la falta de acciones que busquen limitar las zonas

probablemente afectadas por este fenómeno, se hace necesario implementar un modelo a partir de un concepto matemático para sectorizar las áreas susceptibles a esta problemática y en donde los métodos matemáticos estocásticos como el de Lógica Difusa, simulan las condiciones del terreno para crear una base cartográfica de la susceptibilidad por movimientos en masa a una escala 1:25.000, permitiendo un mayor detalle, ya que los estudios realizados hasta el momento en Colombia, se han hecho a escala 1:100.000; y por tanto la selección de una escala 1:25.000 permitirá un mayor nivel de detalle y precisión en la representación cartográfica. La utilidad de estos resultados radica en la práctica de la elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial y de desarrollo socioeconómico del municipio de Vetás, y los municipios aledaños que hacen parte de la zona de estudio, así como, para la prevención y mitigación de efectos causados por los MM.

4. Localización

El área de estudio presenta 98km² (Fig. 2) se encuentra sobre el flanco occidental de la cordillera oriental al noreste del departamento de Santander, en las inmediaciones del municipio de Vetás, en la provincia de Soto. Esta región se caracteriza por presentar un paisaje con tipo de relieve montañoso. En donde la altitud media es de 3.350 metros sobre el nivel del mar. Con una temperatura media que oscila entre 6° y 17° Celsius. Además, presenta un régimen de lluvia monomodal, los meses de poca lluvia van de diciembre a marzo con una precipitación de 35 mm y de abril a noviembre los meses con precipitaciones de hasta 132 mm, el promedio de precipitación anual es de 994mm.

Hidrológicamente pertenece a la cuenca superior del Río Lebrija, subcuenca del Río Suratá y microcuenca del Río Vetás. Sus principales corrientes son las quebradas Laguna Seca, El Salado y El Volcán que vierten aguas al Río Vetás. A la zona de estudio se accede a través de la carretera central que une a Bucaramanga con los municipios de Matanza, Suratá, California y Vetás, o por la carretera Bucaramanga- Berlín – Vetás.

Esta zona corresponde a una parte del sector occidental dentro de la plancha 110 - Pamplona del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) y está delimitada por las coordenadas planas, Datum Magna- Sirgas origen Bogotá que se muestran en la Tabla 1.

El municipio de Vetás cuenta con una extensión total de 9.3 Km² y una extensión rural de 7.9 Km² y limita al oeste con el Municipio de Suratá, al sur con los Municipios de Tona, Charta y California, al norte con el Departamento de Norte de Santander y el Municipio de California, al este con el Departamento de Norte de Santander.

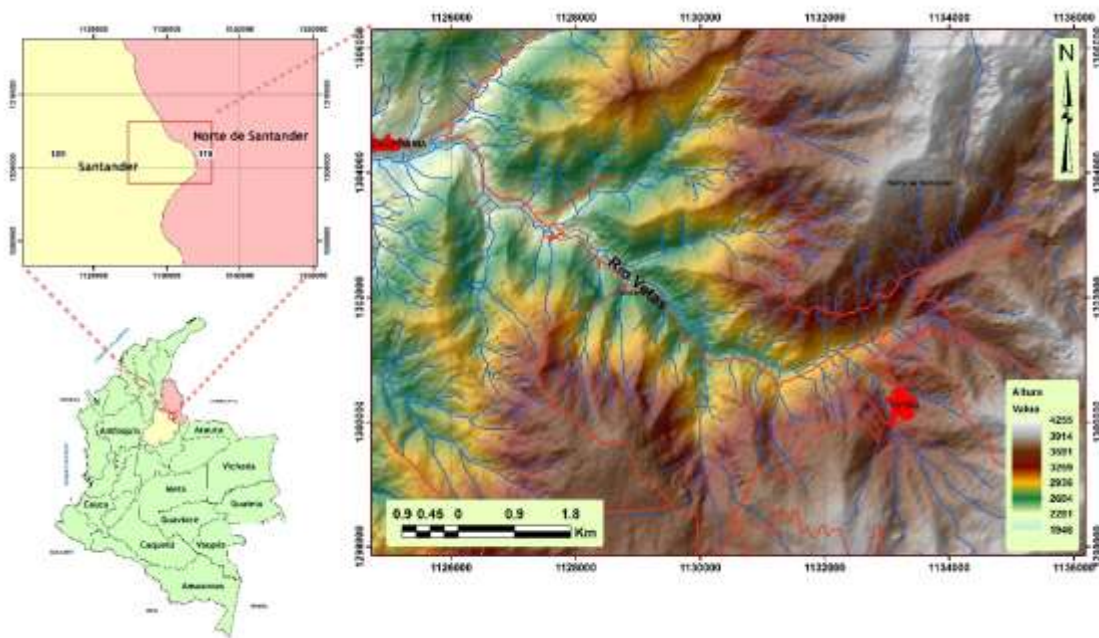


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio.

Tabla 1.

Coordenadas que delimitan el área de trabajo.

COORDENADAS DEL ÁREA DE ESTUDIO					
Punto	X= 1'124.715	Y = 1'306.301	Punto	X = 1'124.715	Y = 1'297856
Punto	X= 1'136.188	Y = 1'306.301	Punto	X = 1'136.188	Y = 1'297856

5. Marco Geológico

En los siguientes apartados se describirá la estratigrafía del área de estudio mediante un mapa geológico y una breve descripción de las unidades litológicas, además de las estructuras regionales que afectan la zona. Pues dentro de los aspectos que se tomaron para evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa en la región, uno es la geología, que juega un papel muy importante en este análisis de susceptibilidad a movimientos en masa, ya que las condiciones litológicas y estructurales pueden ser fuentes de inestabilidad (Ortiz & Martinez, 2018).

5.1 Estratigrafía

Regionalmente el área de estudio se caracteriza por la presencia de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias (Fig. 3). La edad de las unidades presentes en la zona de estudio en su mayoría es del periodo Mesozoico, y específicamente, abarca un lapso desde el Neo proterozoico al Cuaternario. Se describen de manera general las unidades litoestratigráficas en orden cronológico, utilizando la información obtenida principalmente de la memoria explicativa del mapa geológico generalizado de Santander (Royero & Clavijo, 2001), como se muestra en la Tabla 2.

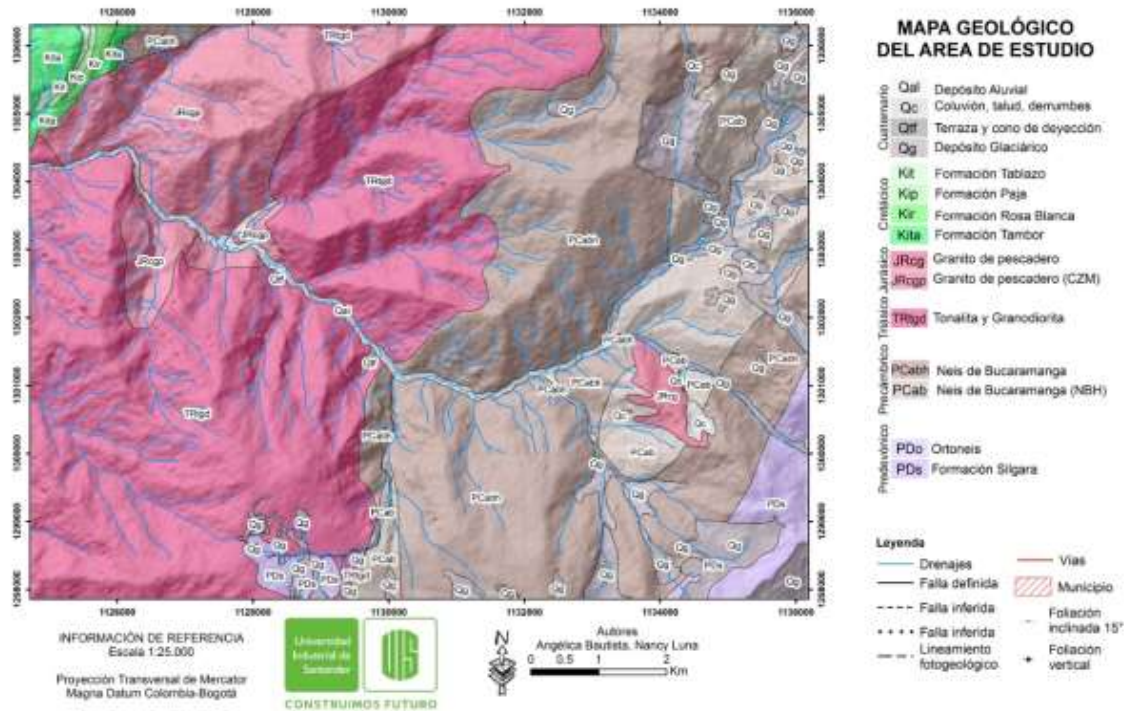


Figura 3. Mapa geológico del área de estudio. Modificado de la plancha 110 - Pamplona (Ingeominas, 1977)

Tabla 2.

Descripción de las unidades litológicas que afloran en la zona de estudio.

Era	Periodo	Época	Unidad litológica	Descripción	Autor
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Qal	Depósitos ampliamente distribuidos, con presencia de terrazas o remanentes de terraza con superficies más arriba de la actual superficie de inundación. Estas tienden a ser más extensas y menos disectadas en los tramos superiores de los valles.	INGEOMINAS, 1973
		Pleistoceno	Qg	Las morrenas están compuestas por bloques, gujarros y gravas muy angulares, de esfericidad media a baja y espesores de hasta 15 metros en su parte frontal, la proporción de bloques y matriz varía de una zona a otra y va desde depósitos clasto soportados a matriz soportados.	Esquema De Ordenamiento Territorial, EOT Vetas, 2002.
	Cretácico	Inferior	Formación Tablazo (Klt)	Consiste calizas gris a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas, en capas medianas a gruesas, con intercalaciones de areniscas grises, grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas, en capas delgadas. Espesor: varía de 150 - 325 m. Ambiente: nerítico poco profundo.	Royero & Clavijo, 2001
			Formación Paja (Klp)	Constituida por lutitas y shales gris oscuros a azulosos, fosilíferos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, con algunas intercalaciones de shales grises, localmente arenosos, calcáreos, fosilíferos, localmente limosos a arenosos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, también pequeñas intercalaciones de calizas grises, localmente arenosas, fosilíferas. Espesor: varía de 125 a 625 m. Ambiente: Epicontinental.	Royero & Clavijo, 2000
			Formación Rosa Blanca (Kir)	Compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso, con politos, ostrácodos y dolomías; hacia la parte superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas. Espesor: varía de 150 a 425 m. Ambiente: En la parte inferior, depósitos evaporíticos con condiciones de hipersalinidad y tranquilidad; el resto de la secuencia se depositó en un medio marino somero en condiciones neríticas.	Royero & Clavijo, 2000
			Formación Tambor (Kita)	Constituida por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo grisáceas y cuarzoareniscas gris amarillentas, con estratificación cruzada, en capas tabulares de espesores variables. Espesor localidad tipo: 218m, Ambiente: depósitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas.	Royero & Clavijo, 2001; Laverde y Clavijo, 1985
			Cuarzomonzonita, aplita y pórfido (JRcpo)	La cuarzomonzonita es de color rosado, rosado naranja a gris violáceo, de grano medio a grueso, inequigranular, compuesta por feldespato potásico, plagioclasas, cuarzo y biotita. También se encuentran fenocristales de feldespato potásico (2cm), plagioclasas, cuarzo y localmente hornblenda.	Ward et al., 1977
			Cuarzomonzonita y Granito (JRcg)	Cuarzomonzonita principalmente, con variaciones locales a granito y granodiorita. La cuarzomonzonita es rosada, gris clara, biotítica, de grano mediano, equigranular a subporfírica, compuesta de cuarzo gris, plagioclasas blanca y feldespato potásico en cantidades más o menos iguales.	Royero & Clavijo, 2001
	Jurásico	Inferior	Tonalita y granodiorita (TRtgd)	Granodiorita de color gris, de grano medio a grueso, subporfírico, compuesta por andesina, cuarzo, microclina y biotita. La tonalita es de color gris verdoso, de grano medio, con variaciones locales a granodiorita; está constituida por andesina, cuarzo, hornblenda y feldespato potásico.	Ward et al., 1973
			Esquistos del Silgara (PDs)	Secuencia de rocas clásticas metamorfoseadas, típicamente delgadas y clínicamente estratificadas, que consta de pizarra, filita, meta-limolita, meta-arenisca impura, meta-waca y meta-waca guijarrosa con menos cantidades de pizarra y filita calcárea (unidad fundamentalmente pelítica y semipelítica)	Ward et al., 1973
Paleozoico	Pre devónico		Neis de Bucaramanga (Pcab)	Rocas metasedimentarias de alto grado de metamorfismo que consisten principalmente de para neis pelítico, semi-pelítico y arenáceo; esquistos y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis hornbléndico y anfibolita; este también incluye migmatitas, una donde el paraneis ésta mezclado con rocas graníticas néisicas y otra donde ambos están cortados por muchas masas pequeñas de granito no foliado de edad mucho más joven.	Ward et al., 1973
			Neis de Bucaramanga (Pcabh)	PCabh: PCab con neis biotítico-hornbléndico y numerosas masas pequeñas de ortogneis	Ward et al., 1973

5.2 Geología Estructural

El área de estudio se encuentra sobre la cordillera oriental, presenta basamento precámbrico, nombrado “Macizo de Santander”, está limitado estructuralmente por tres sistemas de fallas principales a los cuales van asociadas varias fallas locales (Fig. 4), siendo este una zona estructuralmente muy activa con grandes desplazamientos e infiltración de fluidos (magmáticos e hidrotermales) (Mantilla *et al.*, 2011). A continuación se describen las fallas que presentan influencia sobre la zona de estudio:

❖ Fallas de dirección Sudoeste –Noreste

Falla del Río Cucutilla: Esta falla forma un marcado lineamiento que afecta las rocas ígneas y metamórficas de la zona, además es un poco confusa y que luego se ramifica, el que parece ser la rama principal se dirige al sur oeste, para cruzar por el río Vetas y Páramo Rico, donde intersecta la Falla Charta, falla que se puede conectar con una probable falla a lo largo del río La Baja, también hay fallas satélites oblicuas a la falla principal (Ward *et al.*, 1973).

Falla El Volcán: Es una falla de movimiento sinistral de orientación sur sudeste- noroeste este, controla el cauce de las quebradas El Volcán y Casa Vieja (Ward *et al.*, 1973).

❖ Fallas de dirección Sur – Norte

Falla Los Salados: Es una falla dextral normal de alto ángulo, en la que el bloque occidental está levantado respecto al oriental. Esta falla se encuentra en el límite oriental de la cuenca y afecta la quebrada Los Salados, que nace en Laguna Verde (Ward *et al.*, 1973).

Falla de Vetas: Es una falla normal, con una dirección aproximada sur norte, de alto ángulo buza entre 60° y 80° al NW; al norte es desplazada por la falla del volcán, al sur recibe el nombre de falla de Cruz de Peña (Ward *et al.*, 1973).

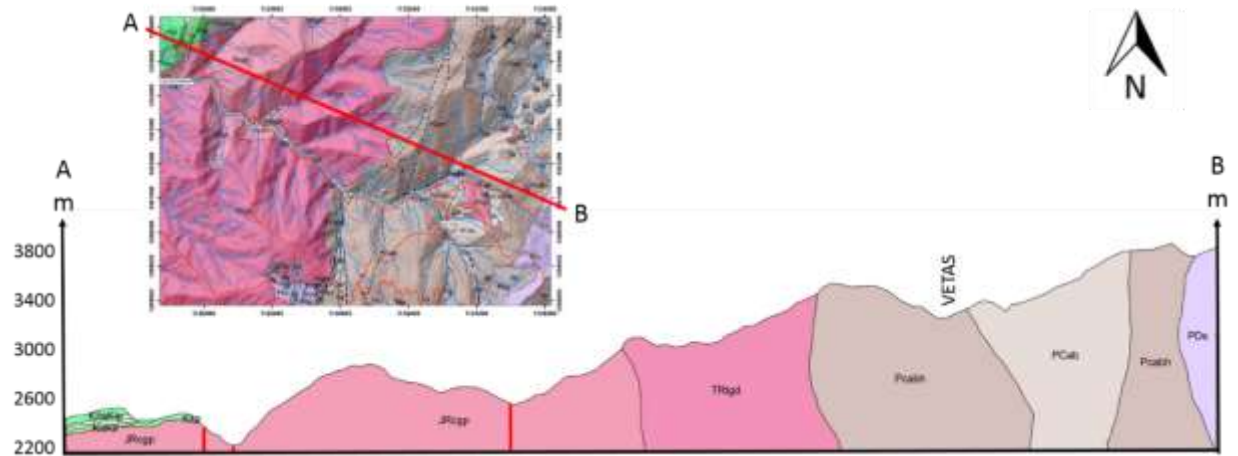


Figura 4. Perfil geológico de la zona de estudio

6. Marco Teórico

Para la presente investigación, se realizó una evaluación y posterior zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa para el municipio de Vetás, donde se desarrollaron insumos cartográficos para ser procesados mediante el uso del método estocástico de Lógica Difusa, con énfasis en la distribución de los movimientos en masa, la geomorfología, la geología y el uso del suelo.

6.1 Movimientos en Masa

Los movimientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra. Su origen obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la superficie terrestre. Aunque varios autores presentan una definición

única sobre los procesos de movimientos en masa, estos conceptos son ligeramente diferentes entre sí.

Crozier (1986), considera que un movimiento en masa es un movimiento externo que tiene por agente de transporte el agua que impregna y dirige el material litológico pendiente abajo. Cruden (1991), entiende como movimiento de ladera, “slope movement”, el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios, de una ladera en sentido descendente. Según el IDEAM (2002), un movimiento en masa puede ser definido como todo desplazamiento hacia abajo (vertical o inclinado en dirección del pie de una ladera) de un volumen de material litológico (roca, formación superficial o suelo) importante, en el cual el principal agente es la gravedad y que puede o no incluir el efecto del agua.

6.1.1 Clasificación de los Movimientos en Masa. En la literatura científica se encuentran muchas clasificaciones de movimientos en masa; la mayoría de ellas se basan en el tipo de materiales, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación del material y el grado de saturación.

Varnes (1978) clasifica los movimientos en masa teniendo en cuenta dos aspectos, según el tipo de material (roca, suelo, tierra, lodo y escombros) y el tipo de movimiento (caídas, cabeceo, deslizamientos, flujos y propagación lateral) (SGC, 2017). Que se describen a continuación:

Caídas: Son desprendimientos abruptos de rocas en pendientes inclinadas o acantilados. La separación ocurre a lo largo de discontinuidades tales como fracturas, grietas y planos de estratificación, y el movimiento ocurre por caída libre, rebote y balanceo (Fig. 5A).

Cabeceo: El cabeceo se caracteriza por la rotación hacia adelante de una unidad o unidades alrededor de un punto de giro, por debajo de la unidad, bajo las acciones de la gravedad y las fuerzas ejercidas por las unidades adyacentes o por los fluidos en las grietas (Fig. 5B).

Deslizamientos: Se refiere sólo a movimientos en masas, donde hay una zona de debilidad que separa el material deslizante de un material subyacente más estable (Fig. 5C, 5D y 5E).

Flujos: Hay cinco categorías básicas de flujos que son flujos de escombros, avalanchas de escombros, flujos de tierra, flujos de barro y flujos de arrastres (Fig. 5F y 5G).

Propagación Lateral: Generalmente ocurren en pendientes muy suaves o terreno plano. El modo dominante de movimiento es la extensión lateral acompañada de fracturas por cizalla o tracción (Fig. 5I).

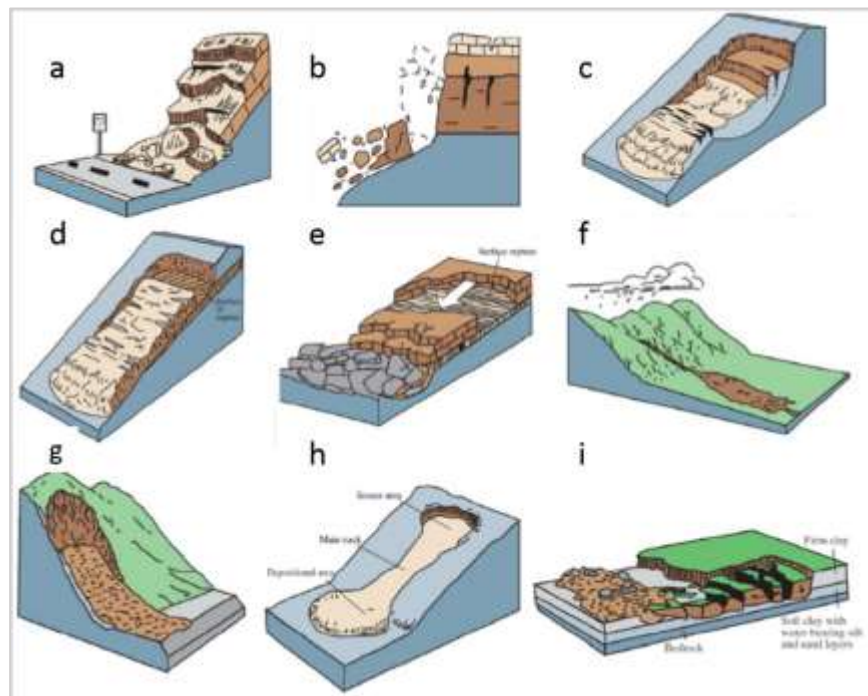


Figura 5. Caída de roca (a), Cabeceo (b), Deslizamiento Rotacional (c), Deslizamiento Traslacional (d), Deslizamiento de bloques (e), Flujo de Escombros (f), Avalancha de escombros (g), Deslizamientos de tierra (h) y Propagación Lateral (i). Modificada de Varnes, 1978.

6.2 Lógica Difusa

La lógica difusa deriva de la lógica tradicional, y es más cercana a la forma del pensamiento humano. La lógica difusa se basa en el hecho de que una afirmación no tiene porqué ser ni cierta ni falsa, sino que se verificará en un cierto grado. Los predicados difusos se aplican a los elementos del conjunto en ese cierto grado (Sánchez & Novalbos, 2014).

Básicamente la Lógica Difusa es una lógica multivaluada que permite representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento. La lógica difusa a diferencia de la lógica booleana clásica presenta una forma de procesar información permitiendo pertenencias parciales a unos conjuntos, que en contraposición a los conjuntos concretos los denominó Conjuntos Difusos (fuzzy sets) (Morcillo, 2011).

6.2.1 Conjuntos Difusos y Grados de Pertenencia. En los conjuntos clásicos se asigna el valor 0 en caso de que el valor no pertenezca al conjunto y 1 si pertenece. Esta función se puede generalizar de forma que los elementos del conjunto pertenezcan a un rango entre 0 y 1. Esta función se llama ‘función de pertenencia’ y el conjunto definido por dicha función ‘conjunto difuso’ (Morcillo, 2011). Siendo, μ_A la función de pertenencia. A el conjunto difuso. $[0,1]$ el intervalo de números reales que incluye los extremos (EQ.1).

$$\mu_A = A \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

6.2.2 Funciones de Pertenencia. Para cada conjunto difuso, existe asociada una función de pertenencia para sus elementos que reclasifican o transforman los datos de entrada en una escala de 0 a 1 basada en la posibilidad de pertenecer a un conjunto especificado (Fig. 6). Las formas de

las funciones de pertenencia más típicas son Linear, Large, MsLarge, Gaussian y Near (ESRI, 2019).

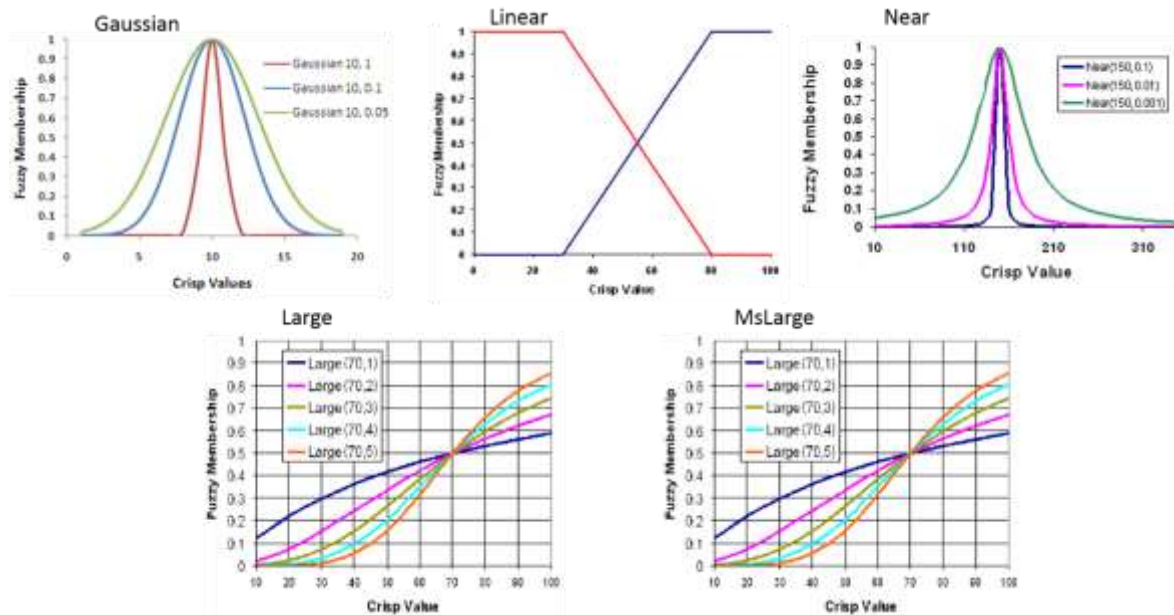


Figura 6. Representación gráfica de los tipos de funciones de pertenencia. Tomado de ESRI (2019)

6.3 Sistema de Inferencia Difusa

Un Sistema de Inferencia Difusa (**SID**) es un método de razonamiento aproximado, que puede definirse como una extensión de la lógica multivaluada que facilita enormemente el modelado de información cualitativa de forma aproximada (González, 2011). Su éxito se debe principalmente a la posibilidad de resolver problemas de una gran complejidad y poco definidos que, mediante métodos tradicionales, son difíciles de solucionar. Según Portilla (2001) un FIS (Fig. 7) se puede definir como un algoritmo que toma información de entrada, la procesa a través del motor de inferencia siguiendo las reglas creadas según la heurística y da resultados numéricos concretos como producto para el análisis en el proceso de toma de decisiones. Los datos de entrada y de

salida, son datos concretos, aunque dentro de la estructura del LD, están representados por medio de una variable lingüística. El conjunto de las variables de entrada, se denomina universo de entrada y al conjunto de las variables lingüísticas de salida, se le conoce como universo de salida.

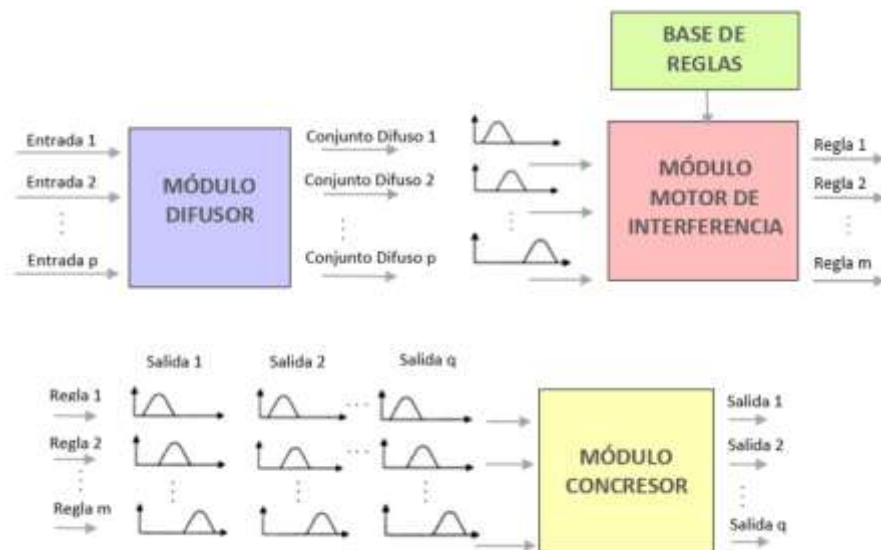


Figura 7. Estructura de un Sistema de Inferencia Difusa. Tomado de Portilla (2001).

6.3.1 Superposición Difusa. Dentro del módulo motor de interferencia se encuentra la herramienta Superposición difusa, que permite analizar la posibilidad de que un fenómeno pertenezca a varios conjuntos en un análisis de superposición multicriterio. La Superposición difusa no solo determina a qué conjuntos puede pertenecer un fenómeno, sino que también analiza las relaciones entre las pertenencias de los diversos conjuntos (ESRI, 2019).

6.3.2 Tipos de Superposición Difusa El Tipo de superposición enumera los métodos disponibles para combinar los datos en función del análisis de la teoría de conjuntos. Cada método permite explorar la pertenencia de cada celda según los diversos criterios de entrada (ESRI, 2019).

Los métodos disponibles son: And difusa, Or difusa, Producto difuso, Suma difusa y Gamma difusa. Cada enfoque proporciona un aspecto diferente de la pertenencia de cada celda a los diversos criterios de entrada.

Gopal & Woodcock (1994) exponen que el uso de fuzzy sets en la evaluación de la exactitud de mapas expande la cantidad de información que puede ser generada en relación con la naturaleza, frecuencia, magnitud y fuente de errores en un mapa temático.

6.4 Zonificación de la Susceptibilidad

Se entiende por susceptibilidad la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre determinado espacio geográfico. No implica el aspecto temporal del evento (Soldano, 2009). En otras palabras, está asociado a las características intrínsecas del terreno analizado, como son los materiales geológicos (suelos y rocas) y su historia de formación (geomorfología), las características geométricas de las laderas analizadas y la cobertura de la tierra. Como se mencionó anteriormente, se aplicará una metodología estocástica, a través de la utilización de un sistema de decisión multivaluado, denominado Lógica Difusa, a partir del cual se calculará la probabilidad a la ocurrencia a movimientos en masa (Muy baja, baja, media, alta y muy alta).

Este sistema está diseñado para casos en los que los datos de entrada son vagos o no muy precisos, sin embargo, arrojará datos concretos, los cuales se cuantificarán con base en juicios de expertos para obtener una escala numérica en rangos de la zonificación (Soldano, 2009).

6.5 Zonificación de la Amenaza

Según Cardona (1993) la amenaza de una zona es la probabilidad de ocurrencia de un evento o resultado no deseable, con una cierta intensidad en un cierto sitio y en un cierto período de tiempo y está constituida por factores de riesgo externos, que pueden ser modificables, pero más a menudo no lo son como: la proximidad de un volcán activo, la proximidad de un río caudaloso, zonas que experimenta movimientos sísmicos frecuentes y de gran intensidad, proximidad a una industria con productos contaminantes, etc. Para el comité de Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD, 2004) la amenaza es un evento, fenómeno o actividad humana que puede causar daño, pérdidas de vidas, daños a la propiedad, interrupción de las actividades sociales y económicas o degradación ambiental. Para Fell *et al.* (2008) la descripción de amenaza por movimientos en masa debería incluir la localización, volumen (área), clasificación y velocidad del movimiento, posibles materiales desprendidos de la masa fallada y la probabilidad de su ocurrencia dentro de un periodo de tiempo dado.

6.5.1 Detonantes. Los principales detonantes de procesos de erosión y movimientos en masa son las precipitaciones, los sismos y factores antrópicos.

Generalmente los MM están asociados a las lluvias, por tal motivo, diferentes autores han abordado el tema desde diferentes puntos de vista, como se describe en Guzetti *et al.*, (2007) quien recopiló que parámetros por mm deben ser tenidos en cuenta para el cálculo de los umbrales utilizados para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa. Por tanto no existe una única metodología aplicada, sin embargo, se utilizan las siguientes hipótesis (Galarza *et al.*, 2014):

- A mayor precipitación promedio anual, mayor contribución a la generación de movimientos en masa
- Los movimientos en masa pueden ser detonados por lluvias máximas diarias cuyo valor de umbral variará de acuerdo con la susceptibilidad y la humedad antecedente del suelo, pero se considera que, a mayor valor de umbral de lluvia, mayor contribución a la generación de movimientos en masa.
- A menor temperatura, menor evaporación y mayor contenido de humedad antecedente en el suelo, por tanto, mayor contribución a la generación de movimientos en masa.

Los taludes se encuentran en estados que van desde muy estables a no estables. Cuando un sismo ocurre induce un movimiento del terreno a menudo suficiente para causar fallas a los taludes que están pocos estables a muy estables antes del sismo. Los daños resultantes pueden ser desde insignificantes a catastróficos dependiendo de la geometría y de las características propias del talud (Galarza *et al.*, 2014).

Existen diversas acciones realizadas por el hombre que puede activar los movimientos en masa. Entre ellas se encuentran las prácticas agrícolas inadecuadas, la deforestación, excavaciones, cortes de laderas, intervención de drenajes y mal manejo de aguas. Estas actividades contribuyen a la afectación por colapsos de materiales rocosos, sedimentación acelerada, degradación progresiva e inundaciones (Albornoz *et al.*, 2007). De esta manera, la presencia antrópica puede convertirse en un detonante de la amenaza presente.

7. Metodología

Con el objetivo de evaluar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en el municipio de Vetás, Santander, se llevarán a cabo VII fase, en las que se realizaron diferentes actividades con el fin de generar los mapas de zonificación a escala 1:25.000, implementando el uso de los SIG y el método estocástico de lógica difusa (Fig. 8).

Durante la fase I se realizará una revisión bibliográfica y recopilación de información disponible en las bases de datos y los sistemas de información públicos sobre los movimientos en masa, además de estudios preliminares geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y geodinámicos del área de estudio, y así definir los insumos y capas temáticas a utilizar en la elaboración de los mapas de susceptibilidad y amenaza mediante un SIG, del mismo modo se realizará la revisión de los principios y fundamentos del método estocástico de lógica difusa (Ver Sección 9. 8. Antecedentes).

Para la fase II se iniciará el procesamiento de datos por medio de una herramienta SIG, con el fin de elaborar mapas preliminares y temáticos, además del refinamiento de la cartografía a escala 1:25.000. Se usarán insumos bases como la Geología de la plancha 110 - Pamplona (Ingeominas, 1977), imágenes satelitales y el Modelo Digital de Elevación (MDE) realizado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) entre los años 2006 y 2011. Este presenta una resolución espacial de 12.5 m y el conjunto de datos tiene una variación de altura entre (1011 – 3397 m) y un ángulo de pendiente entre (0° - 78.3°) (ASF, 2019).

La fase III consistirá en la verificación y complementación de los mapas generados en la fase II a escala 1:25.000 por medio de un control de campo en el área de estudio, donde se comprobarán y se corregirán los resultados obtenidos en los mapas generados (Ver Sección 10. 9. Campaña de Campo).

La fase IV corresponde a la generación de los insumos propuestos en las fases anteriores para la elaboración del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa utilizando una herramienta SIG, que posteriormente serán procesados con el fin de ser categorizados por medio de un criterio experto y así todos los insumos queden con el mismo “universo del discurso” para que se puedan introducir como variables de entrada en la siguiente fase (Ver Sección 11. 10. Creación de insumos para el análisis de la lógica difusa).

Para la fase V se tomarán los insumos ya con sus respectivos grados de pertenencia se ingresarán al módulo difusor para finalmente generar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en 5 categorías (muy baja, baja, media, alta y muy alta). El programa para utilizar es un toolbox (caja de herramientas) denominado Fuzzy Overlay (Ver Sección 12).

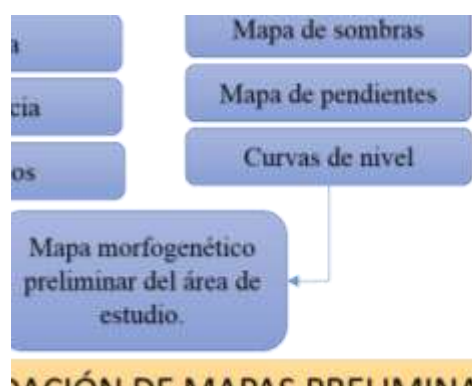


Figura 29. Reclasificación en 5 intervalos de la prueba trece mediante intervalos geométricos (p13).

11. Resultados de la susceptibilidad a movimientos en masa.).

En el desarrollo de esta fase se hará la evaluación, verificación y complementación del mapa generado por la función Fuzzy Overlay, evaluado en cada membresía y tipo de superposición. El Resultado obtenido se contrasta con el inventario de movimientos en masa y se valoró con la prueba ROC) (Ver Sección 13. 12. Validación del mapa de susceptibilidad).

En la fase VII se determinarán cada uno de los factores a analizar (Detonante lluvia y Detonante sismo) y posteriormente se calculará su incidencia en el área para finalmente convertirlos en mapas de parámetros que se clasificaran en 5 categorías, seguidamente, se realizará la suma de los mapas de parámetros seleccionados (Detonante sismo y Detonante lluvia) con el mapa de susceptibilidad respectivamente, utilizando el sistema de combinación de mapas para producir las correlaciones espaciales entre los mapas de parámetros y el mapa de susceptibilidad (Ver Sección 0. 13. Análisis de la amenaza por movimientos en masa).

Finalmente, en la fase VIII se realizará la suma de los mapas combinados (amenaza por factor climático y amenaza por factor sismo) que se generaron en la fase anterior, la suma implicará nuevamente el mapa de susceptibilidad (susceptibilidad + amenaza por factor climático + amenaza por factor sismo) para obtener la amenaza total, que posteriormente se reclasificará 4 categorías: Baja, Media, Alta y Muy alta (Ver Sección 15. 14. Amenaza por movimientos en masa)

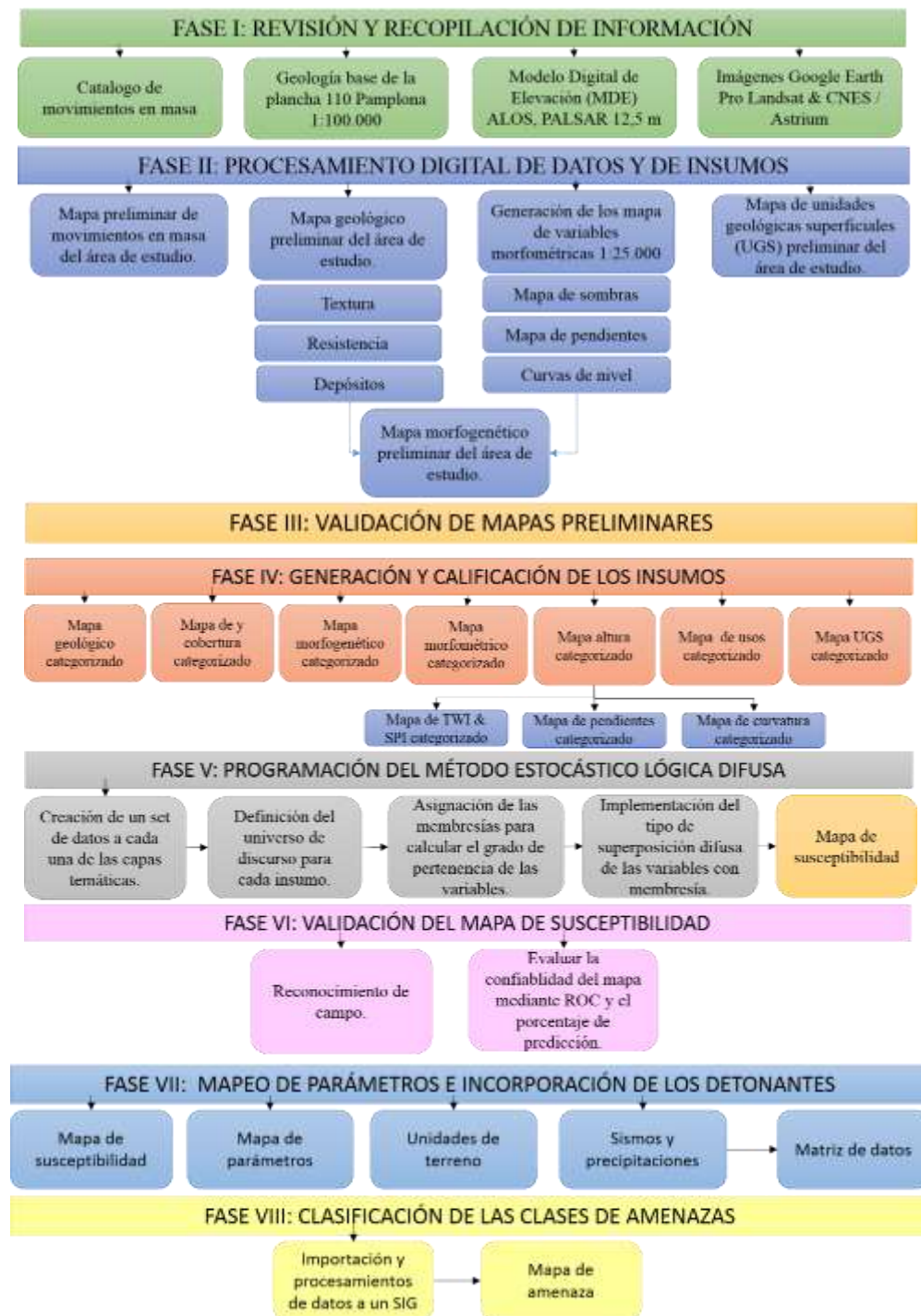


Figura 8. Diagrama de la metodología a utilizar para este proyecto de investigación.

8. Antecedentes

Los conjuntos difusos fueron introducidos en 1965 por Lotfi Zadeh con el fin de conciliar el modelado matemático y el conocimiento humano en las ciencias de la ingeniería. Desde entonces, una gran cantidad de literatura ha florecido en torno al concepto de conjuntos difusos en una increíble variedad de áreas, desde matemática y lógica hasta metodologías de ingeniería tradicionales y avanzadas (desde ingeniería civil hasta inteligencia computacional) (Zimmermann, 2012). La teoría de conjuntos difusos fue concebida en 1965 como una teoría formal que podría considerarse como una generalización de la teoría de conjuntos clásica o de la lógica dual clásica (Zimmermann, 2012).

Lofty Zadeh (1965) propuso una herramienta para valorar conceptos cualitativos del ser humano y argumentaba que en la vida cotidiana nos vemos en la necesidad de utilizar “clases” imprecisamente definidas que “juegan un rol importante en el pensamiento humano, particularmente en los campos de reconocimiento de patrones, comunicación de la información y la abstracción”.

En 1992, Juang realizó un esquema de evaluación cualitativa de bajo costo, con el fin de mapear el potencial de falla de pendiente en una isla montañosa al sur de Taiwán (Kaohsiung) por medio de conjuntos difusos. Para este objetivo consideró cuatro categorías de factores que afectan la estabilidad de las pendientes naturales, como la geología, topografía, meteorología y usos del suelo, donde los datos o la información lingüística obtenidos se representaron y procesaron utilizando conjuntos difusos. En este estudio, el análisis o cálculo involucrado en conjuntos difusos

se realizó utilizando la técnica de simulación Monte Carlo. Como resultado del estudio obtuvo un mapa capaz de predecir correctamente el potencial de falla de la pendiente del área estudiada.

En 1995 Elton propuso la aplicación de la teoría de conjuntos difusos con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a la licuefacción que incluyera factores generalmente evaluados solo por un experto. El enfoque se probó mapeando la susceptibilidad de licuefacción de Charleston, Carolina del Sur. Para ello ingresó el perfil del suelo mediante descripciones lingüísticas que luego se procesaron utilizando la teoría de conjuntos difusos. Los conjuntos difusos resultantes se interpretaron definiendo el índice de susceptibilidad a la licuefacción difusa (FLSI), un número que se puede trazar y contornear para producir un mapa de susceptibilidad a la licuefacción. Los resultados obtenidos fueron bastante favorables al compararlos con otros resultados publicados generados a partir de análisis convencionales.

El estudio realizado por Binaghi *et al.*, (1998) en los Apeninos de Umbria-Marche en los departamentos de Marche y Umbria de Italia, presenta una comparación entre dos metodologías para la evaluación de la inestabilidad de taludes y la producción de mapas de inestabilidad. El primero es el método del factor de certeza, y el segundo se basa en la lógica difusa integrada con la teoría de Dempster-Shafer. Los resultados demostraron experimentalmente que ambos métodos tienen un gran potencial para tratar la zonificación de la inestabilidad de la pendiente.

Para Colombia, Modesto Portilla (2001) presentó un estudio en Chiquiza, Boyacá en los sectores del escarpe principal del deslizamiento "EI Caminante" donde aplicó los sistemas de lógica difusa (SLD), en el análisis y evaluación de los factores: Litología, meteorización, humedad del terreno y condición cinemática. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios al ser coherentes con la condición actual del deslizamiento "EI Caminante", además concluyó que los factores

determinantes del grado de susceptibilidad a movimientos en masa en dicho sector son representados por la litología y la situación estructural de las discontinuidades.

Ercanoglu & Gokceoglu (2002) emplearon el enfoque de lógica difusa para producir un mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en un área propensa a movimientos en masa en el noroeste de Turquía. Para este propósito, el estudio incluyó cinco etapas principales, que son la preparación de un inventario de deslizamientos de tierra del área de estudio, la aplicación de análisis factorial, la extracción de reglas difusas IF-THEN, el uso de un sistema de información geográfica y el control de la fiabilidad del mapa de susceptibilidad a deslizamientos resultante. El ángulo de la pendiente, el aspecto de la pendiente, el uso de la tierra, la profundidad de la intemperie, las condiciones del agua y la elevación topográfica se consideraron factores de condicionamiento de movimientos en masa para el área de estudio. Como resultado obtuvieron un buen rendimiento del enfoque difuso para el procesamiento, donde los movimientos en masa identificados en el área se ubican en las zonas de alta y muy alta susceptibilidad.

El estudio realizado por Tangestani (2004) en la provincia noroccidental de Fars en Irán, propone la operación de agregación gamma del enfoque difuso para producir un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para la zona de captación de Kakan. Para el área de estudio, se consideraron como factores causales de movimientos en masa, la litología, el ángulo de la pendiente, el aspecto de la pendiente, la cobertura del suelo, la profundidad de la meteorización, la proximidad a las carreteras, la elevación topográfica y la profundidad del suelo. Se examinaron tres valores para gamma modificando las funciones difusas de pertenencia y se evaluaron los mapas de salida utilizando los movimientos en masa conocidos. Como mejor resultado se obtuvo que el 93.9% de los movimientos en masa identificados se ubicaron en la zona de alta susceptibilidad y el 6.1% en la zona de muy alta susceptibilidad.

Ibsen Chivatá (2008) realizó para Colombia un estudio de estimación de un modelo de susceptibilidad por deslizamientos inducidos por lluvia para la ciudad de Manizales. Empleó las herramientas de la teoría de los conjuntos difusos, la teoría de la posibilidad y la teoría de la evidencia. Los datos finales del modelo se expresaron mediante un mapa definido en categorías lingüísticas o etiquetas inciertas como: baja, media, alta, muy alta susceptibilidad. También desarrolló igualmente un espectro difuso con el cual se clasifican los niveles de susceptibilidad a partir de la percepción y opinión de expertos. Como resultado obtuvo un modelo que muestra que en la zona de estudio se presentan niveles de susceptibilidad que comprenden categorías de bajos a altos, siendo más frecuentes las susceptibilidades medias. Además, Ibsen Chivatá introdujo el concepto de parámetro difuso, útil en la modelación de fenómenos con incertidumbre, complejos y no lineales.

Hacia el Sureste del departamento de Santander, Colombia, se realizó un estudio de susceptibilidad a movimientos en masa por Rueda & Tavera (2016), que comprende la Plancha 136-I-B en la jurisdicción de los municipios de Málaga y Molagavita. Emplearon la teoría de conjuntos difusos apoyada en la construcción de reglas a partir de la heurística, conocido como Sistema de Inferencia Difusa, y considerando nueve parámetros condicionantes de susceptibilidad a movimientos en masa, acorde a la Geología, Geomorfología y características del suelo, en el área de estudio. Para el procesamiento utilizaron el sistema de inferencia de tipo Mamdani en el cual fueron ingresadas las variables (entrada y salida). Como resultado obtuvieron un modelo exitoso de la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa diferenciando la zona en sectores homogéneos de acuerdo con el grado potencial o real de ocurrencia de movimientos en masa.

En la Fig. 9 se detalla la línea de tiempo correspondiente a los antecedentes, que incluye algunos de los primeros estudios y aplicaciones de lógica difusa y su avance en el análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa.



Figura 9. Línea de tiempo sobre los estudios de la lógica difusa y sus aplicaciones a la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

9. Campaña de Campo

El reconocimiento de campo consistió en una campaña de 7 días en la zona de estudio, en donde se realizaron 52 estaciones de control (Fig. 10). Principalmente este campo tuvo como uno de sus objetivos la identificación, localización e interpretación de los movimientos en masa no registrados en las bases de datos ni en las imágenes satelitales, la caracterización de los MM se realizó mediante el formato del SGC (2013), la localización y elevación de cada movimiento en masa se recolectó con un GPS (Garmin E-trax vista HCx), y también se estudiaron los factores ambientales relacionados con la presencia de estos movimientos.

Además, se corroboraron las Unidades Geológicas Superficiales junto con la delimitación de los depósitos cuaternarios, de igual manera se confirmaron y se reevaluaron las unidades morfogénicas definidas anteriormente en los mapas temáticos elaborados a escala 1:25.000 con el fin de mejorar y refinar los insumos para su debido procesamiento.

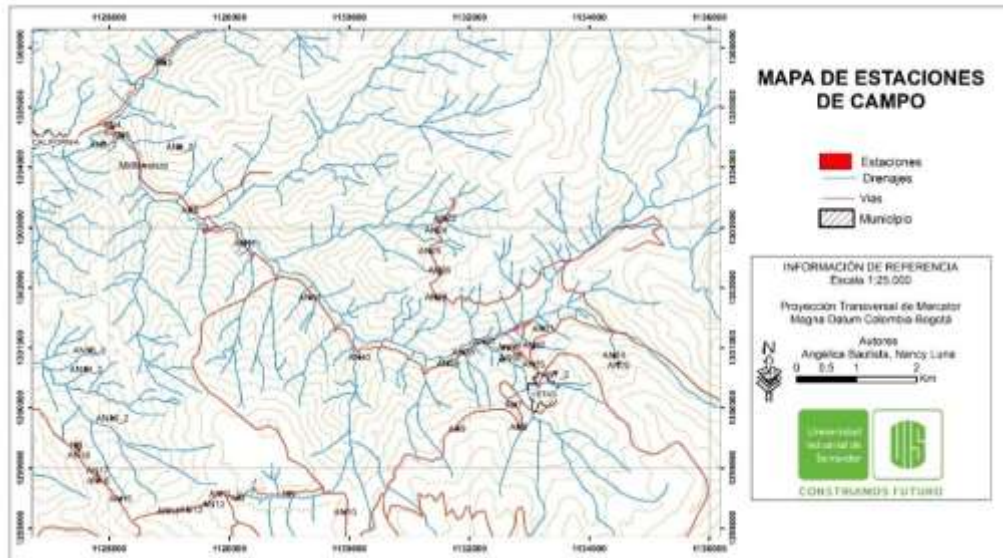


Figura 10. Mapa de las estaciones realizadas durante la campaña de campo.

Durante el recorrido se registraron movimientos en masa que en su mayoría se identificaron como deslizamientos traslacionales que posteriormente se registraron en el mapa base con los movimientos que anteriormente ya estaban registrados.

En la Fig. 11a se muestra un afloramiento rocoso de la Unidad Granito de Pescadero perteneciente al área de estudio, mientras en la Fig. 11b y Fig. 12 se evidencian movimientos en masa tipo caída de rocas y deslizamientos traslacionales respectivamente.



Figura 11. a) Afloramiento rocoso de la unidad Granito de pescadero. b) Movimiento de masa de tipo Caída de rocas ubicado a corte de carretera en la Vía Vetás - California.



Figura 12. Deslizamiento traslacional suspendido y de detritos y Deslizamiento traslacional de detritos sobre la vía California – Vetás.

10. Creación de insumos para el análisis de la lógica difusa

Para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa se deben tener en cuenta los atributos y sus variables. Para esto se debe contar con el MDE y mapas cartográficos base como

la geología regional, cobertura vegetal y los usos del suelo para poder generar los atributos necesarios, además de la creación de variables como las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), morfometría, morfogénesis y morfodinámica, que contengan información para el análisis de la susceptibilidad. Los mapas resultantes del proceso de análisis e interpretación se elaboraron a escala 1:25.000, mediante un Sistema de Información Geográfica para su integración dentro del modelo de susceptibilidad por movimientos en masa.

10.1 Geología

Es uno de los atributos más importantes en el estudio de movimientos en masa y estabilidad de taludes dado que cada unidad litológica tiene diferentes valores de susceptibilidad debido a que los materiales más consolidados son menos propensos a sufrir movimientos en masa y viceversa (Wang *et al.*, 2016). Para el proceso de elaboración de este insumo, se utilizó como base la geología de plancha 110 - Pamplona a escala 1:100.000 del INGEOMINAS, las cuales en general contienen información litológica a nivel estructural y de unidades litológicas, que permiten la caracterización litoestratigráfica de las unidades cartografiadas a la escala del estudio (SGC, 2013). Posteriormente, esta información se actualizó a escala 1:25.000 por medio de análisis de imágenes satelitales y fotointerpretación. En la verificación de campo para obtener el mapa final de geología a escala 1:25.000, se mejoraron las condiciones cartográficas de los depósitos Cuaternarios (Aluvial, Coluvial y glacial) (Fig. 13).

En la metodología del SGC (2013), se clasifican las distintas litologías de acuerdo con su resistencia, textura y depósitos, los cuales sugieren el grado de afectación de los materiales rocosos al estar asociados a sus propiedades y características intrínsecas.

La zona de estudio está compuesta principalmente por rocas neoproterozoicas como el Neis de Bucaramanga que cubren de centro a Este y rocas Triásicas-Jurásicas como la Tonalita y granodiorita y el Granito de pescadero que afloran de centro a Oeste, y en muy baja proporción se encuentran rocas sedimentarias, depósitos glaciares, aluviales y coluviales. En la Fig. 14 se muestra mediante un mapa, la influencia de dichas litologías en la susceptibilidad a movimientos en masa.

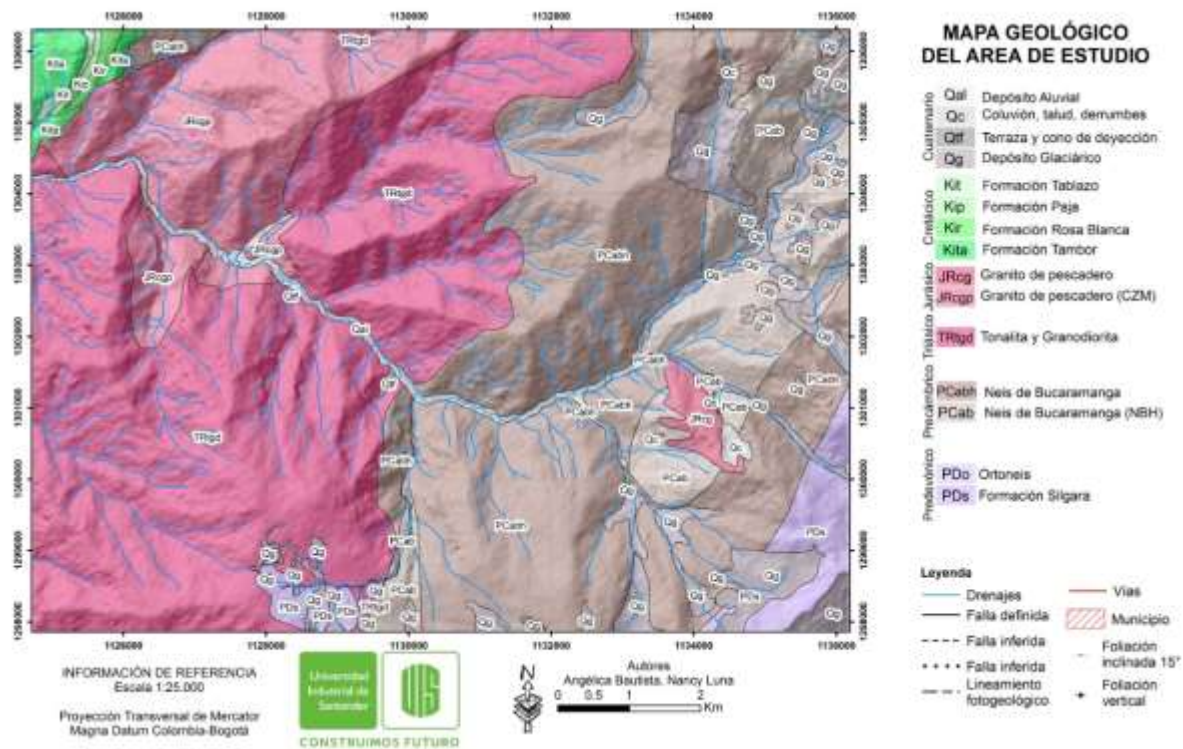


Figura 13. Mapa geológico del área de estudio. Modificado de INGEOMINAS (1977)

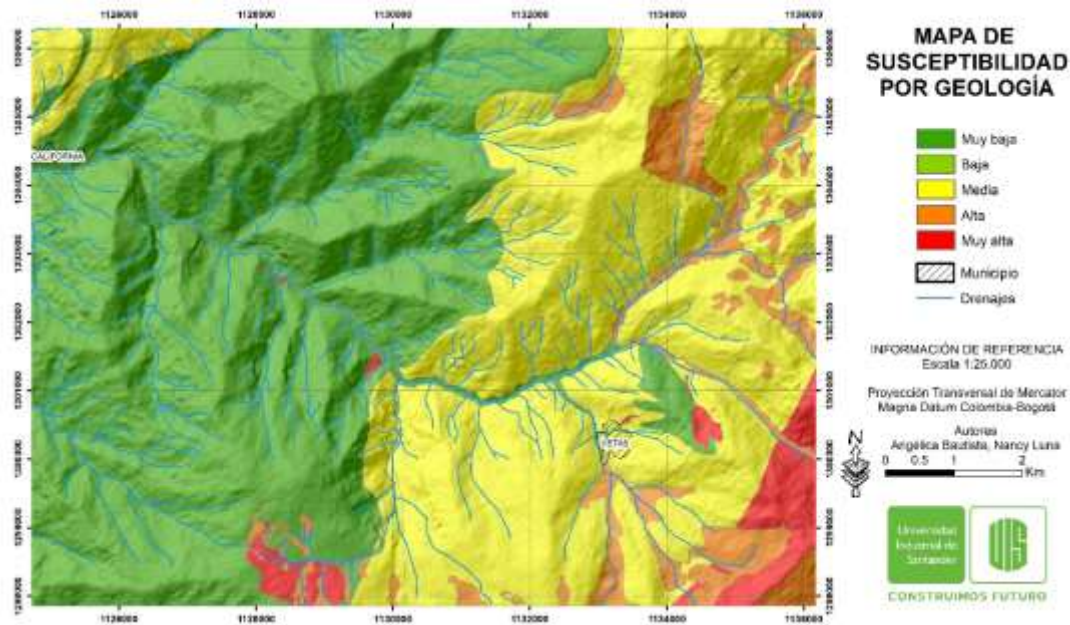


Figura 14. Mapa geológico categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Inferencia Difusa.

10.2 Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Las unidades geológicas de superficie (Fig.15) son uno de los factores condicionantes más importantes en la inestabilidad de las laderas, corresponden a un conjunto (homogéneo) de materiales geológicos que afloran en la superficie, que provienen del mismo origen y conservan en general las mismas características físicas y de comportamiento geomecánico (SGC, 2015). Para la elaboración de estos mapas se clasifican los materiales superficiales en suelos y rocas. En el área de trabajo se definieron suelo coluvial, suelo antrópico, suelo coluvial activo, suelo residual, suelo transportado y roca.

Se identificaron 220 tipos diferentes de UGS (Apéndice C) en el área de trabajo, donde la UGS con más presencia es “Suelo residual de la Tonalita y Granodiorita con baja erosión” siendo esta

la UGS que cuenta con la mayor presencia de movimientos en masa. En la Fig. 16 se muestra el mapa categorizado de susceptibilidad creado a partir de las UGS.

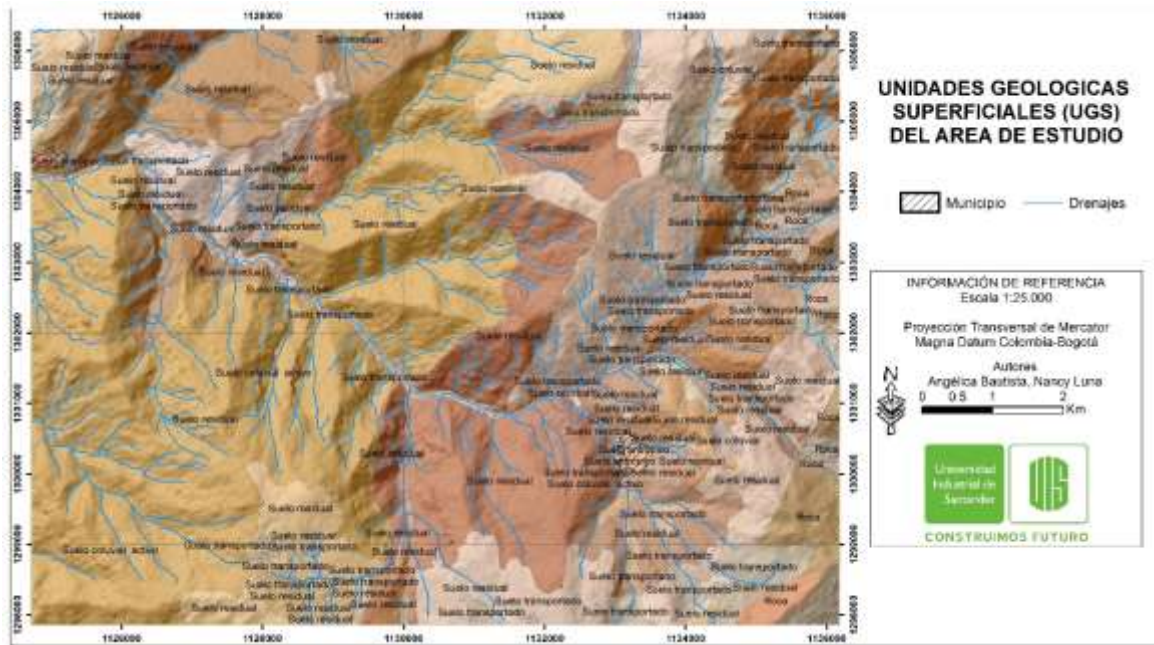


Figura 15. Mapa de UGS del área de estudio (Ver leyenda en Apéndice D).

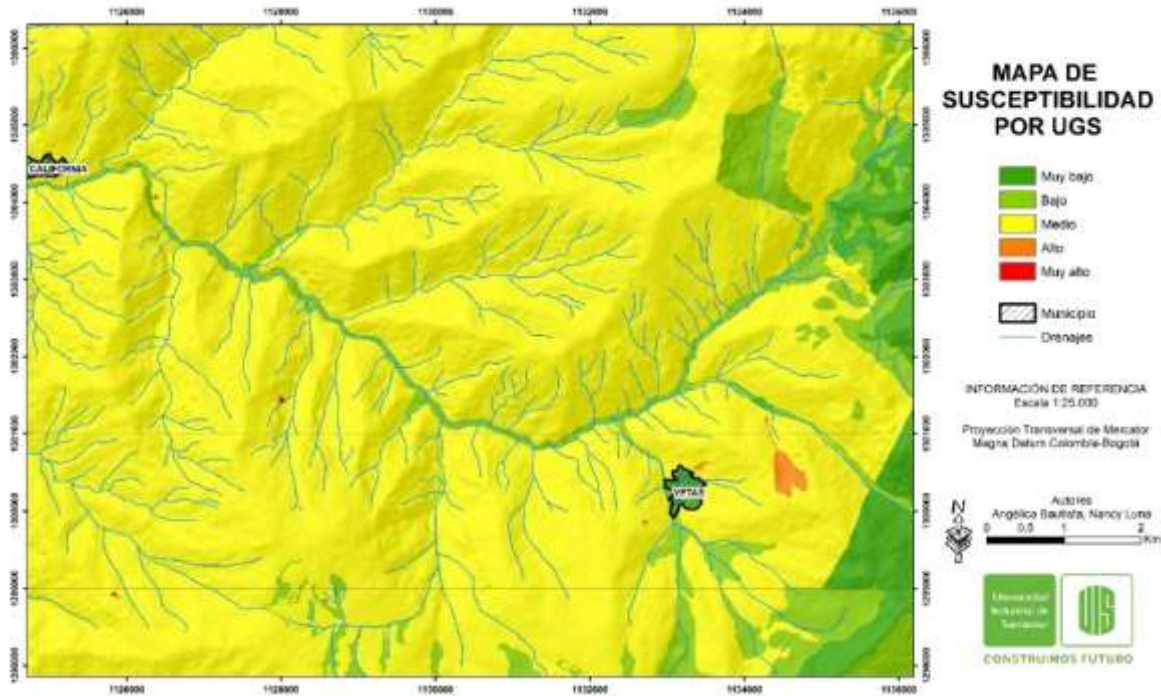


Figura 16. Mapa de UGS categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Lógica Difusa.

10.3 Geomorfología

La geomorfología se define como el estudio de la superficie terrestre, incluyendo la descripción de las formas, su origen, estructura, historia de desarrollo, dinámica actual, diagnóstico a futuro y su relación con la actividad humana (Sala *et al.*, 1989).

Para este atributo se requiere generar planchas geomorfológicas a escala 1:25.000, mediante la metodología del SGC (2013), por consiguiente, la aplicación de la geomorfología a los estudios de los movimientos en masa incluye las variables como la Morfometría, Morfogénesis y Morfodinámica (SGC, 2013).

10.3.1 Morfometría. Determina aspectos cuantitativos en términos de altura, curvatura, SPI, TWI, pendientes, y densidad de fracturamiento (Fig.17). Para la generación de las variables morfométricas se empleó el MDE con el cual se realizó distintos procesamientos mediante un SIG.

Altura o elevación: Este factor tiene gran relación con los procesos como la erosión, acumulación y las formas y deformaciones de las pendientes (Youssef *et al.*, 2015), pues es un condicionante en los movimientos en masa. En la zona de estudio se presenta un rango de elevación entre 1947 y 4255 m.s.n.m, y los sectores con mayor incidencia a movimientos en masa se encuentran entre las alturas de 2492 y 3706 m.s.n.m. (Fig. 17a)

Curvatura: La curvatura es una medida invariante de una superficie, que indica qué tanto esta curvada. En la curvatura se refleja la forma de la pendiente, estas puede ser cóncavas, convexas o rectas y son definidas como la tasa de cambio en el gradiente o aspecto de las pendientes, medido en la dirección de la máxima inclinación (Narváez & Bedoya, 2007), (Valencia, 2017), al igual que la pendiente, esta variable se elaboró (Fig. 17b) mediante el procesamiento del MDE, y se calcula con el radio de curvatura de la celda.

Pendientes: Según el SGC (2013) se define como pendiente el ángulo existente entre la superficie del terreno y su horizontal que puede estar representada tanto en grados como en porcentaje y se obtiene mediante el procesamiento del MDE en un SIG. La importancia de esta variable se da a la estrecha relación con los movimientos en masa, pues son el resultado de la interacción entre el ángulo de la pendiente y las propiedades del material (Youssef *et al.*, 2015), siendo más susceptible a los movimientos las áreas con terrenos que presentan mayor pendiente. En esta variable reclasificada en 7 rangos; se observa que los ángulos de pendientes predominantes en el área de estudio se encuentran en el rango de 30° a 45° y que la mayor concentración de áreas asociadas a movimientos en masa se encuentra en el mismo rango (Fig. 17c).

SPI: El Stream Power Index es un parámetro secundario, que se calcula a partir de otros parámetros, usado para medir el poder de erosión de las corrientes y está relacionado con los procesos de movimiento en masa (Danielson, 2013). Se usa para describir la erosión potencial del flujo en un punto dado de la superficie topográfica. Para el cálculo de esta variable (Fig. 17d) se utilizó EQ. 2:

$$SPI = Ln ((\alpha + 0.001) * (\frac{\beta}{100}) + 0.001) \quad (2)$$

TWI: El índice topográfico de humedad (Fig. 17e) está relacionado con la humedad edáfica y refleja la tendencia del suelo a la generación de escorrentías, debido a que los perfiles con mayor humedad son más proclives a saturarse, por lo que la precipitación caída sobre ellos puede convertirse mucho más fácilmente en escorrentía. Así, cuanto más elevado es el valor de este índice, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica, la cual es extraída de un MDE, (Lobo *et al.*, 2012) y está definido por el área local drenada para un punto de cálculo (af) y la pendiente direccional de la celda de interés (β), mediante la EQ. 3.

$$ln \left(\frac{af}{\tan \beta} \right) \quad (3)$$

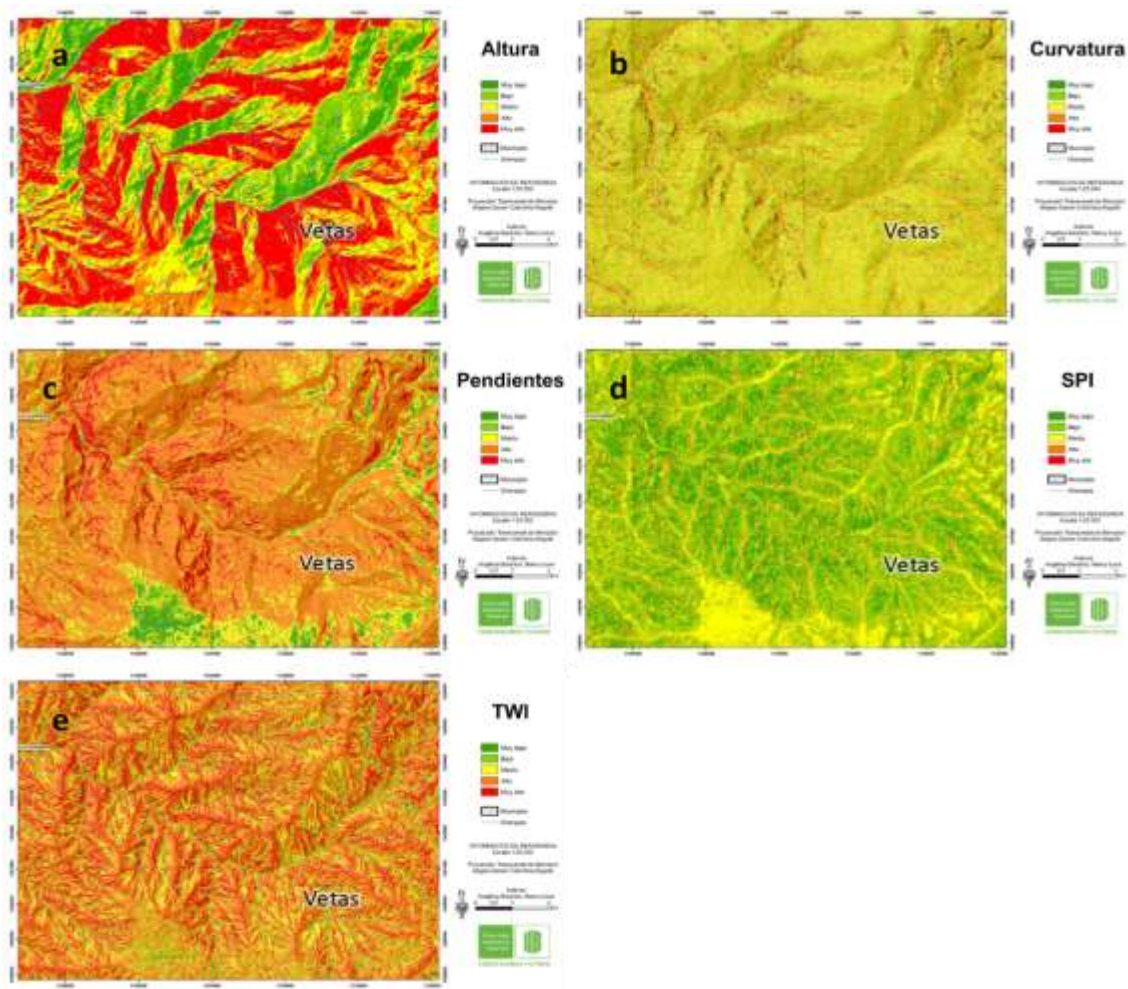


Figura 17. Mapas temáticos categorizados como variables morfométricas. Altura(a), Curvatura(b), Pendientes(c), SPI(d), TWI(e).

10.3.2 Morfogénesis. La morfogénesis corresponde al origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje. El origen del paisaje depende de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos (agua, viento, hielo), que actúan sobre la superficie terrestre en diferentes proporciones e intensidades, y durante intervalos de tiempos geológicos, modelando el terreno (SGC, 2013).

Para la zona de estudio se presentaron 5 ambientes morfogenéticos (Fig.18): Ambiente Denudacional, Ambiente Glacial, Ambiente Estructural, Ambiente Fluvial y Ambiente Antrópico y dentro de cada uno de estos ambientes se identificaron sus respectivas unidades morfológicas que en su totalidad sumaron 50 unidades (Apéndice B), basadas en la clasificación publicada en el “Glosario de Unidades Geomorfológicas” del SGC (2013). En la Fig.19 se muestra mediante un mapa, la influencia de la geomorfología en la susceptibilidad a movimientos en masa.

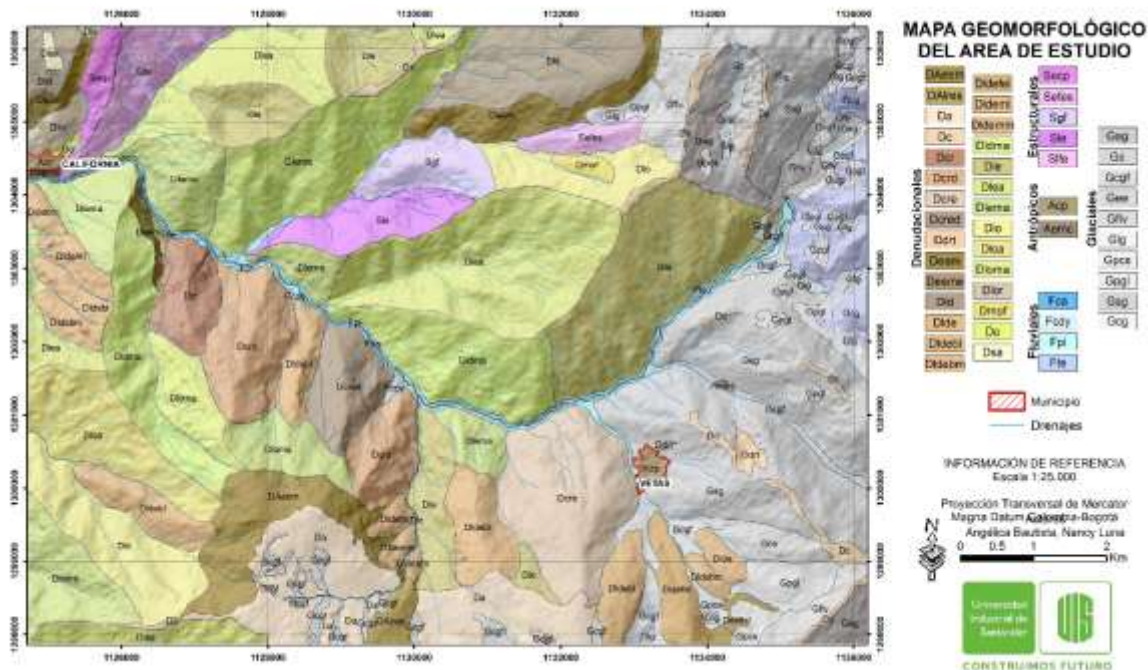


Figura 18. Mapa geomorfológico del área de estudio.

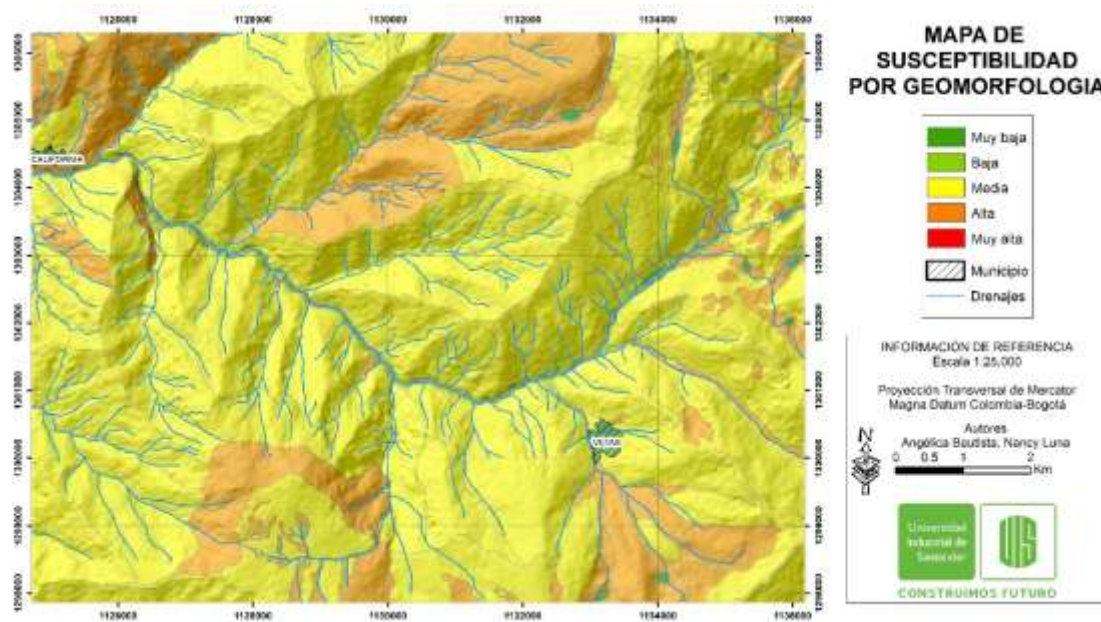


Figura 19. Mapa geomorfológico categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Lógica Difusa.

Ambiente Denudacional: Se da bajo presencia de procesos exógenos erosivos hídricos y gravitatorios o una combinación de los dos. Bajos condiciones climáticas secas se generan erosión laminar, surcos y cárcavas, mientras que en condiciones húmedas se favorece la meteorización y los movimientos gravitatorios con sus movimientos en masa (Benavides *et al.*, 2007). Los dos procesos tanto el erosivo hídricos y el de movimientos en masa, interactúan para producir un sinnúmero de combinaciones y constituyen los dos subambientes dominantes del Ambiente Denudacional. En la Fig. 20 se muestran imágenes tomadas en la campaña de campo.



Figura 20. Ambiente Denudacional en el que se encuentran geoformas de Ladera erosiva abrupta (**Dlea**), Colina remanente disectada (**Dcred**), Ladera disectada muy abrupta (**Dldma**), Lomo denudado bajo de longitud larga (**Dldebl**) y Lomo denudado con filos y erosión laminar (**Dldefel**).

En la zona se identificaron 29 unidades de ambiente denudacional que se muestran en la Tabla 3. En la Fig. 20 se muestran algunos ejemplos de geoformas de tipo denudacional en el municipio de Vetas.

Tabla 3.

Geoformas de Ambiente Morfogenético Denudacional.

Código	Nombre	Área km ²	% área
DAres	Lomo residual de altiplano	0.406	0.43
Dlea	Ladera erosiva abrupta	9.034	9.52
Da	Altiplano	4.094	4.31
Dcred	Colina remanente disectada	1.364	1.44
Dcrd	Colina residual disectada	3.191	3.36
Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud larga	3.809	4.01
Dcr	Colina residual	1.133	1.19
Dlema	Ladera erosiva muy abrupta	6.105	6.43
Dloma	Ladera ondulada muy abrupta	1.031	1.09
Dldebm	Lomo denudado bajo de longitud media	0.915	0.96
Dldemm	Lomo denudado moderado de longitud media	0.163	0.17
Dldeml	Lomo denudado moderado de longitud larga	0.645	0.68

Código	Nombre	Área km ²	% área
Dle	Ladera erosiva	7.825	8.25
Deem	Escarpe de erosión mayor	2.079	2.19
Dlor	Loma residual	0.386	0.41
Dld	Loma denudada	3.020	3.18
Dcre	Colina remanente	3.522	3.71
Dlde	Lomo denudado	0.293	0.31
DAeem	Escarpe de erosión mayor de altiplano	2.171	2.29
Dldma	Ladera disectada muy abrupta	8.399	8.85
Dloa	Ladera ondulada abrupta	2.276	2.40
Dldefel	Lomo denudado con filos y erosión laminar	0.779	0.82
Dlo	Ladera ondulada	3.576	3.77
Dmof	Montículos con filos disectados	0.216	0.23
Dc	Cima	1.127	1.19
Do	Ondulaciones denudacionales	0.063	0.07
Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	0.063	0.07
Deeme	Escarpe de erosión menor	0.039	0.04
Ddrt	Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	0.186	0.20
Total		69.710	71.56

Ambiente Fluvial: Este ambiente está dominado por la acción de las corrientes de agua y el transporte de sedimentos sobre la superficie terrestre. Los ríos se encargan de transportar su carga líquida y sólida a lo largo del sistema fluvial generando procesos erosivos y de acumulación en función de su pendiente, caudal y carga de sedimentos (Benavides *et al.*, 2007).



Figura 21. Ambiente Fluvial, en el que se encuentran geoformas de Plano o llanura de inundación (**Fpi**) y cauce aluvial activo (**Fca**), pertenecientes al Río Vetás.

En la zona se identificaron 4 unidades de ambiente denudacional que se muestran en la Tabla 4. En la Fig. 21 se muestran algunos ejemplos de geoformas de tipo fluvial en el municipio de Vetás.

Tabla 4.

Geoformas de Ambiente Morfogenético Fluvial.

Código	Nombre	Área km ²	% área
Fcdy	Cono de deyección	0.046	0.05
Fca	Cauce aluvial activo	0.317	0.33
Fpi	Plano o llanura de inundación	0.257	0.27
Fte	Terraza de erosión	0.028	0.03
Total		0.648	0.67

Ambiente Estructural: Corresponde a las zonas dominadas por los bloques tectónicos de rocas sedimentarias plegadas y los macizos ígneos – metamórficos sin geoformas marcadas de otros ambientes. En este contexto, tanto la litología como la estructura de deformación de las rocas inciden para favorecer una disección distintiva de los bloques levantados y plegados (Benavides

et al., 2007). En la zona se identificaron 5 unidades de Ambiente Estructural que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Geoformas de Ambiente Morfogenético Estructural.

Código	Nombre	Área km ²	% área
Secp	Escarpe Contrapendiente	0.553	0.57
Sefes	Espolón festoneado	0.563	0.58
Slfe	Escarpe de línea de falla	1.452	1.5
Sgf	Gancho de flexión	1.207	1.24
Sle	Ladera estructural	1.443	1.49
Total		5.219	5.38

Ambiente Glacial: El Cuaternario ha sido el período dominado por numerosos ciclos glaciales, periodos fríos que ha afectado la cordillera alta de los Andes con los procesos altamente erosivos y de acumulación asociados con la gelifracción y abrasión durante el avance de las lenguas glaciares (Benavides *et al.*, 2007). En la zona se identificaron 10 unidades de Ambiente Glacial que se muestran en la Tabla 6. En la Fig. 22 se muestran algunos ejemplos de geoformas de tipo glacial y denudacional en el municipio de Vetás.



Figura 22. Ambientes Glacial y Denudacional, en la que se encuentran geoformas de Sierra glaceada (**Gsg**), Conos glaciofluviales (**Gcgf**), Altiplano (**Da**), Ladera erosiva (**Del**) y Ladera erosiva abrupta (**Dlea**).

Tabla 6.

Geoformas de Ambiente Morfogenético Glacial.

Código	Nombre	Área Km ²	% área
Gcg	Colina glaceada	1.712	1.77
Gpgl	Plano glaciolacustrino	2.276	2.35
Glg	Laguna Glacial	0.254	0.26
Gee	Espolón estructural glaciado	0.601	0.62
Gag	Artesa glacial	1.585	1.64
Gflv	Flancos de valle Glaciar	1.653	1.71
Gcgf	Conos glaciofluviales	2.107	2.18
Gpcs	Planos y conos de sobrelavado glaciar	0.451	0.47
Gc	Circo glaciar y de nivación	0.565	0.58
Gsg	Sierra glaceada	10.514	10.86
Total		21.718	22.43

Ambiente Antrópico: Este ambiente se caracteriza por presentar geoformas generadas por la alteración significativa de la superficie terrestre por la acción del hombre. Dentro de estos procesos se destacan los rellenos artificiales, rellenos sanitarios y las excavaciones, generalmente asociados

con la minería a cielo abierto, los embalses artificiales y las zonas urbanas también representan una modificación notable de la superficie terrestre (Benavides *et al.*, 2007).

En la zona se identificaron 2 unidades de ambiente antrópico que se muestran en la Tabla 7. En la Fig. 23 se muestran algunos ejemplos de geoformas de tipo antrópico y denudacional en el municipio de Vetás.



Figura 23. Ambientes Antrópicos y Denudacionales, en la que se encuentran geoformas Centro poblado (**Acp**) y Colina remanente (**Dcre**).

Tabla 7.

Geoformas de Ambiente Morfogenético Antrópico.

Código	Nombre	Área km ²	% área
Acp	Centro Poblado	0.192	0.20
Aemc	Explotación minera	0.018	0.02
Total		0.211	0.22

10.3.3 Morfodinámica. La Morfodinámica estudia los procesos superficiales que afectan a una geoforma y que han ocurrido tanto en el pasado, como los que se encuentran activos en el presente o aquellos que se puedan activar en el futuro (INGEOMINAS, 2004).

Para la elaboración de la susceptibilidad a movimientos en masa se requiere de un conjunto de mapas e insumos anteriormente definidos e información cartográfica básica del área de estudio (SGC, 2013), teniendo en cuenta que este proyecto de investigación se realizó mediante el método estocástico de lógica difusa se hizo esencial la creación de una base de datos para movimientos en masa.

10.3.4 Catálogo de movimientos en masa. La base de datos para movimientos de masa se construyó por diferentes tipos de fuentes que suministraron información base de la zona, entre ellas, el Sistema de Información de Movimientos en Masa (**SIMMA**), el Sistema de Inventario de Desastres (**DesInventar**) y la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (**CDMB**) de las cuales se obtuvieron la ubicación de los movimientos en masa registrados a lo largo del tiempo en el área de estudio. Así mismo, esta base de datos se amplió con la ayuda de imágenes LANDSAT & CNES/Astrium, tomadas con Google Earth Pro (Fig. 24) y además de la campaña de campo.



Figura 24. Identificación de movimientos en masa por fotogeología (Google Earth Pro, 2017)

En total el inventario cuenta con cuarenta y tres (43) movimientos en masa (Apéndice M), de los cuales dos (2) se obtuvieron del SIMMA, uno (1) de DesInventar, nueve (9) de la CDMB y treinta y dos (32) identificados durante el desarrollo de la campaña de campo (Fig. 25).

En su mayoría se reconocieron movimientos de tipo deslizamiento traslacional que se concentran principalmente en los cortes de carretera. También se identificaron reptaciones de áreas considerables.

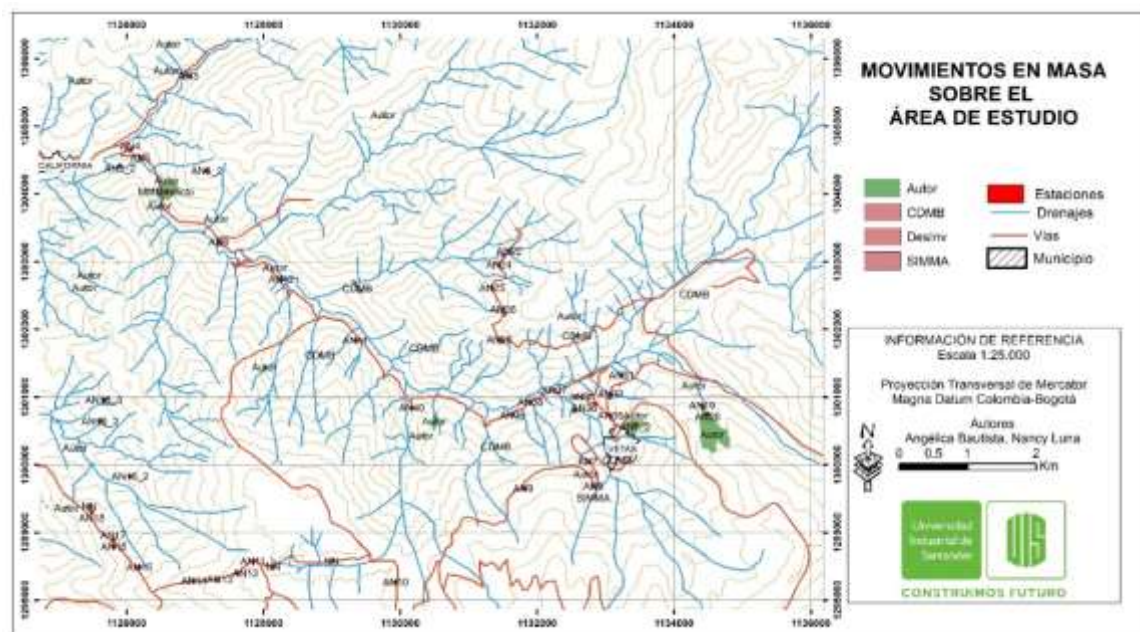


Figura 25. Mapa de movimientos en masa del área de estudio.

10.4 Cobertura de la Tierra

La cobertura de la tierra se traduce como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima (IDEAM, 1997), es decir, describe la vegetación,

los elementos antrópicos existentes y otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua (IDEAM, 2012), en ambientes naturales producto de la evolución ecológica (bosques, sabanas, lagunas, entre otros) o a partir de ambientes artificiales creados o mantenidos por el ser humano (cultivos, represas, ciudades, entre otros) (IGAC, 2005).

Para el análisis de la cobertura de la tierra, se empleó la cartografía de coberturas suministrada por la CDMB, la cual fue complementada mediante imágenes satelitales de Google Earth Pro y la metodología Corine Land Cover (Coordination of information on the environmental), la cual se introdujo en Colombia en el año 2004, mediante el trabajo interinstitucional de entidades como el IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA (IDEAM *et al.*, 2008). Se identificaron 19 tipos de coberturas de la tierra, donde la categoría predominante es el herbazal denso bajo de tierra firme no arbolado el cual se incluye dentro de las categorías con mayor relación a los movimientos en masa junto con herbazales densos altos de tierra firme no arbolados, pastos arbolados y pastos limpios. Esto sugiere que la erosión, la escorrentía y las altas pendientes del lugar, afectan de manera más directa a las zonas con menor abundancia de vegetación creando ambientes propicios a movimientos en masa. En la Fig. 26 se muestra el mapa de susceptibilidad generado a partir de la cobertura de la tierra.

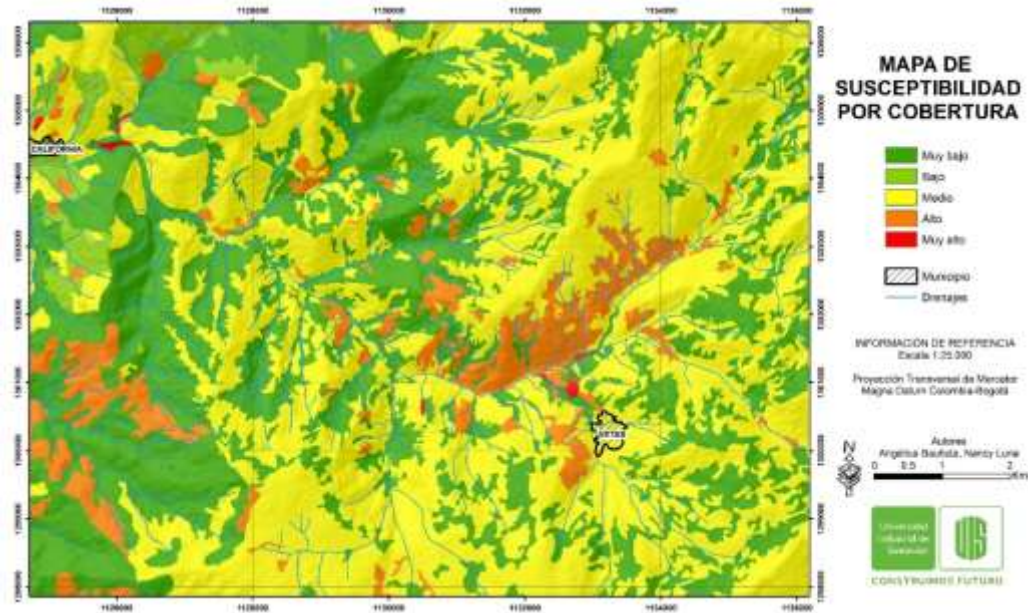


Figura 26. Mapa de coberturas de la tierra categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Lógica Difusa

10.5 Usos del Suelo

El uso del suelo está caracterizado por la prestación o la utilidad de un tipo de cobertura en pro de del desarrollo de actividades del ser humano (Janssen *et al.*, 2000), tales como el uso residencial industrial, reservas naturales, etc. En otros términos, son tratamientos y actividades que el hombre promueve en una cobertura de la tierra para modificarla o sacarle provecho económico (Lamprea, 2017). Para el análisis del uso del suelo, se empleó la cartografía de usos de la tierra suministrada por la CDMB, la cual fue complementada mediante imágenes satelitales de Google Earth Pro y la clasificación de SGC (2017), con el fin de cubrir en su totalidad el área de trabajo. Se identificaron 10 tipos diferentes de usos del suelo (Apéndice E), donde la categoría con mayor predominancia en la zona de trabajo son los herbazales dedicados a la protección forestal, y las categorías con mayor relación a los movimientos en masa son los sistemas combinados de agricultura y forestería,

cultivos transitorios semipermanentes y cultivos transitorios semintensivos, lo cual sugiere que la intervención antrópica conlleva a la degradación de las laderas. En la Fig. 27 se muestra el mapa de susceptibilidad generado a partir de los usos del suelo.

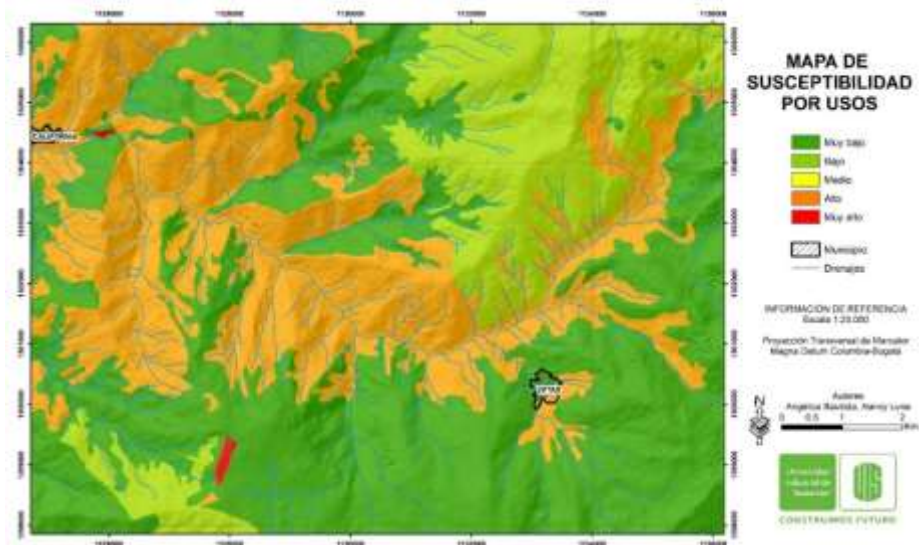


Figura 27. Mapa de usos del suelo categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Sistema de Inferencia Difusa

10.6 Aplicación del Método Estocástico Lógica Difusa

Existen tres maneras de abordar la generación de susceptibilidad por métodos libres de distribución: las Redes Neuronales, los métodos basados en Lógica Difusa y los enfoques neuro-difusos (Rueda & Tavera, 2016).

Los métodos difusos pueden procesar múltiples conjuntos de datos de manera cuantitativa de acuerdo al diseño del sistema de inferencia (Chi *et al.*, 2002), y se apoyan en las relaciones difusas entre los factores causales y la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa (Kanungo *et al.*,

2009). A su vez, ha habido variaciones en el empleo de la Lógica Difusa para hallar la susceptibilidad a movimientos en masa, y en las geociencias en general (Rueda & Tavera, 2016).

Entre esas variaciones se encuentran las funciones de pertenencia o membresías existentes (Linear, Large, MSLarge, Gaussian y Near) y los tipos de superposición (And difusa, Or difusa, Producto difuso, Suma difusa y Gamma difusa).

Las funciones de pertenencia o membresía reclasifican o transforman los datos de entrada en una escala de 0 a 1 basada en la posibilidad de pertenecer a un conjunto especificado, es decir fuzifica las variables de entrada. Cada una de ella lo hace de manera diferente (Fig. 6).

La membresía Linear aplica una función lineal entre los valores mínimos y máximos especificados por el usuario. A todo lo que esté por debajo del mínimo se asignará un 0 (no pertenece) y a todo lo que esté por encima del máximo, un 1 (pertenece) (Fig. 6) (ESRI, 2019).

La membresía Large se utiliza cuando los valores de entrada más altos tienen más posibilidad de pertenecer al conjunto. A todo lo que se encuentre cercano del mínimo se asignará 0 (no pertenece) y todo lo que este cercano al máximo, un 1 (pertenece) (Fig. 6) (ESRI, 2019).

La membresía MsLarge es similar a la membresía Large, excepto que la definición está basada en una desviación media y una desviación estándar especificadas. Por lo general, la diferencia entre las dos funciones radica en que la función MsLarge puede ser más pertinente si los valores muy altos tienen mayor posibilidad de pertenecer al conjunto (Fig. 6) (ESRI, 2019).

La membresía Gaussiana transforma los valores originales en una distribución normal. El punto medio de la distribución normal determina la definición ideal para el conjunto, a la que se asigna un 1; la pertenencia del resto de los valores de entrada disminuye a medida que se alejan del punto medio, tanto en la dirección positiva como en la negativa. La pertenencia de los valores de entrada disminuye desde el punto medio hasta que alcanzan un punto donde los valores se alejan

demasiado de la definición ideal y definitivamente dejan de pertenecer al conjunto y, por lo tanto, se les asignan valores cero (Fig. 6) (ESRI, 2019).

La membresía Near está definida por un punto medio que determina el centro del conjunto, identifica la pertenencia definitiva y al que, por consiguiente, se asigna un 1. A medida que los valores se alejan del punto medio, tanto en la dirección positiva como en la negativa, la pertenencia disminuye hasta alcanzar el valor 0, el cual define la no pertenencia (Fig. 6) (ESRI, 2019).

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad, los insumos se procesaron bajo todos los tipos de membresía (Apéndice I), sin embargo, las membresías Large y MsLarge fueron las que mejor se ajustaron al modelo. Ya con los insumos fuzificados o con sus respectivos grados de pertenencia se les aplicaron los distintos tipos de superposición.

La Superposición difusa permite analizar la posibilidad de que un fenómeno pertenezca a varios conjuntos en un análisis de superposición multicriterio. La Superposición difusa no solo determina a qué conjuntos puede pertenecer un fenómeno, sino que también analiza las relaciones entre las pertenencias de los diversos conjuntos y cada tipo de superposición difusa procesa los datos fuzificados de manera diferente.

And difusa devolverá el valor mínimo de los conjuntos a los que pertenece la ubicación de la celda. Esta técnica es útil cuando desea identificar el mínimo denominador común para la pertenencia de todos los criterios de entrada (ESRI, 2019).

Or difusa básicamente procesa de forma contraria al And difusa, pues este devolverá el valor máximo de los conjuntos a los que pertenece la ubicación de la celda. Esta técnica es útil cuando desea identificar los valores de pertenencia máximos para cualquiera de los criterios de entrada (ESRI, 2019).

Producto difuso multiplicará, para cada celda, cada uno de los valores difusos por todos los criterios de entrada. El producto resultante será menor que cualquiera de las entradas y, cuando la entrada pertenece a varios conjuntos, el valor puede ser muy bajo (ESRI, 2019).

Suma difusa sumará los valores difusos de cada conjunto al que pertenece la ubicación de la celda. La suma resultante es una función de combinación lineal creciente que está basada en el número de criterios introducidos en el análisis (no es una suma algebraica) (ESRI, 2019).

Gamma difusa es un producto algebraico del Producto difuso y la Suma difusa, ambos elevados a la potencia de gamma. Si el valor gamma especificado es 1, la salida es la misma que la de Suma difusa; si el valor gamma es 0, la salida es la misma que la de Producto difuso. Los valores intermedios permiten combinar la evidencia entre estos dos extremos y son probablemente diferentes de Or difusa y And difusa. Gamma difusa es un arreglo entre el efecto creciente de Suma difusa y el efecto decreciente de Producto difuso (ESRI, 2019).

Gamma difusa establece las relaciones entre los diversos criterios de entrada y no devuelve simplemente el valor de un solo conjunto de pertenencia como lo hacen Or difusa y And difusa. Puede utilizar Gamma difusa cuando desee obtener valores mayores que los de Producto difuso pero menores que los de Suma difusa (ESRI, 2019).

Los modelos generados a partir de los diferentes tipos de superposición fueron discriminados de acuerdo con las condiciones validadas por pruebas como el ROC y el porcentaje de predicción de movimientos en masa (ESRI, 2019).

El mapa elegido para el modelo de susceptibilidad se obtuvo de la prueba trece (p13), en donde específicamente se utilizó la membresía “Large” con el tipo de superposición “Gamma” siendo estos dos los que mejor se ajustaron (Fig. 28), dicha prueba se reclasifico en 5 rangos utilizando intervalos geométricos (ya que crea saltos de clase basados en intervalos de clase que tienen una

serie geométrica de datos continuos) Produciendo así un resultado visualmente atractivo y cartográficamente completo (Fig. 29), para así finalmente clasificar la susceptibilidad en muy baja, baja, media, alta y muy alta.



Figura 28. Variables utilizadas con los grados de pertenencia de la membrecía Large. GMF (a), Geología (b), UGS (c), Pendientes (d), Usos (e)

Tabla 8.

Rangos de reclasificación en 5 intervalos mediante intervalos geométricos de la prueba trece (p13).

Rango	Categorías
0.080 - 0.348	1
0.348 - 0.536	2
0.536 - 0.666	3
0.666 - 0.757	4
0.757 - 0.888	5

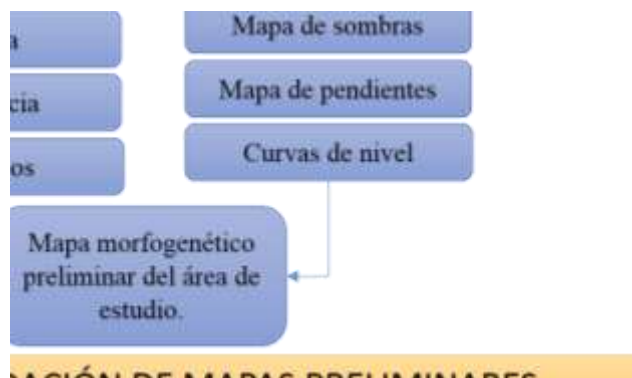


Figura 29. Reclasificación en 5 intervalos de la prueba trece mediante intervalos geométricos (p13).

11. Resultados de la susceptibilidad a movimientos en masa.

El mapa final de susceptibilidad a movimientos en masa (Fig. 30) fue calculado aplicando el Sistema de Inferencia Difusa donde se incluyeron 5 variables y atributos que fueron condiciones en respuesta a los eventos de inestabilidad descritos en el área de estudio (Geología, Geomorfología, Pendientes, Usos del suelo y Unidades Geológicas Superficiales), y clasificados

en 5 rangos: Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta. Las categorías con mayor y menor influencia en el área respectivamente son: susceptibilidad media (34%) y susceptibilidad muy baja (0,2%). La distribución porcentual por categoría se muestra en la Fig. 31.

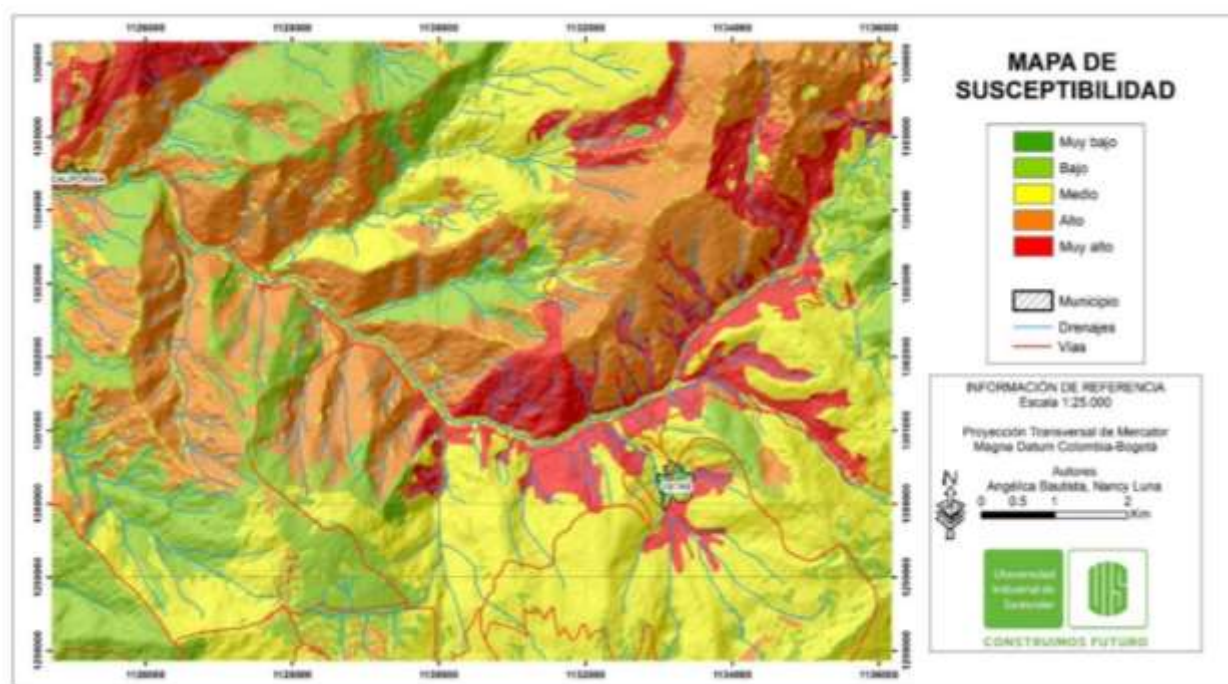


Figura 30. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de estudio, reclasificado por intervalos geométricos en los rangos: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto.

11.1 Susceptibilidad Muy Baja

Esta categoría de susceptibilidad abarca el 0,26% del área estudio siendo la categoría menos extensa. Se localiza sobre las inmediaciones del Río Vetás y sobre los cascos urbanos de los municipios de Vetás y California (Fig. 31), con altitudes superiores a los 2005 y 3350 m.s.n.m. y pendientes que oscilan entre los 0° y 15°. Morfológicamente, corresponde a los Centros Poblados los cuales están definidos por viviendas contiguas, vecinas o adosadas entre sí. En cuanto a la

litología, la zona Oeste de la región está asociada a la Tonalita y granodiorita, y a hacia el Este, al Neis de Bucaramanga. Respecto a los usos del suelo, esta categoría es reconocida como Uso Residencial.

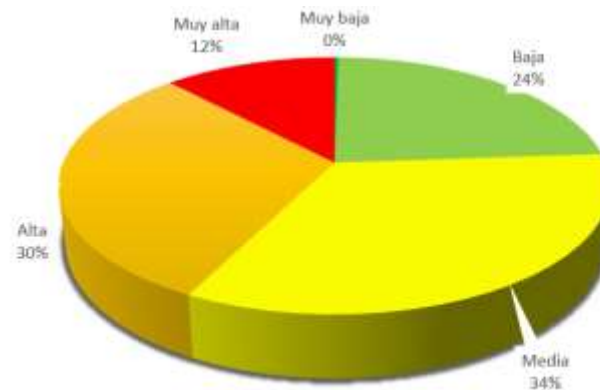


Figura 31. Porcentajes del área total del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para cada categoría.

11.2 Susceptibilidad Baja

Esta categoría representa el 23,62% del área estudio y se localiza de manera dispersa, principalmente hacia el Oeste con altitudes mayores a 2500 m.s.n.m y en menor proporción hacia el Este a altitudes mayores a 3600 m.s.n.m (Fig. 31). Morfológicamente muestra un predominio por las geoformas de tipo denudacional como las laderas erosivas (**Del**, **Dlea**, **Dlema**), laderas onduladas (**Dlo**, **Dloa**) con pendientes entre 15° y 30°, además de cimas (**Dc**) y altiplanos (**Da**). También se asocia al ambiente glacial sobre geoformas de tipo colina glaceada (**Gcg**).

Litológicamente, la susceptibilidad baja se encuentra asociada a rocas correspondientes al Neis de Bucaramanga y al Granito de pescadero y la Tonalita y granodiorita, las cuales presentan suelos

residuales de baja erosión. En cuanto a los usos del suelo, esta categoría corresponde a herbazales, bosques y áreas seminaturales que protegen las laderas contra intensos procesos erosivos.

11.3 Susceptibilidad Moderada

Esta categoría representa la mayor área con un 33,57%, y se localiza de manera dispersa sobre el área de estudio (Fig. 31), mostrando una fuerte tendencia hacia el sur-este de la región, con elevaciones superiores a los 3000 y 3707 m.s.n.m y pendientes entre 10° y 25°. Morfológicamente muestra un predominio hacia el Este por geoformas de tipo denudacional y glacial como laderas erosivas (**Del**, **Dlema**), colina remanente (**Dcre**), lomos denudados (**Dldeml**, **Dldebm**, **Dldebl**), loma denudada (**Dld**), escarpe de erosión mayor de altiplano (**DAeem**), sierra Glaciada (**Gsg**), espolones estructurales glaciados (**Gee**), plano glaciolacustrino (**Gpgl**), artesa Glacial (**Gag**), flancos de valle Glacial (**Gflv**), y hacia la zona Norte, algunas geoformas de tipo estructural como ladera estructural (**Sle**) y gancho de flexión (**Sgf**).

Litológicamente, abarca gran parte del Neis de Bucaramanga y la Formación Silgará los cuales presentan suelos residuales con alta erosión y rocas con moderada erosión, respectivamente. En menor proporción se encuentra la Tonalita y granodiorita y el Granito de pescadero, con suelos residuales de baja erosión. Además, cubre los suelos transportados del depósito glaciárico de alta erosión en la zona Sur-Este. En cuanto a los usos del suelo, esta categoría corresponde a herbazales, arbustales y algunos cultivos transitorios semipermanentes.

11.4 Susceptibilidad Alta

Esta categoría abarca el 30,52% (Fig. 31), mostrando una fuerte tendencia de centro a norte del área de investigación, con elevaciones entre los 2700 y 4108 m.s.n.m., y pendientes mayores a 25° y 45° relacionadas principalmente con el valle del Río Vetás.

Morfológicamente muestra un predominio hacia la parte Oeste por las geoformas de ambiente denudacional como laderas erosivas muy abruptas (**Dlema**), laderas onduladas muy abruptas (**Dloma**), laderas disectadas muy abruptas, colinas residuales disectada (**Dcrd**), montículos con filos disectados (**Dmof**), cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (**Ddrt**) y hacia la zona Este por las geoformas de ambiente glacial como lagunas glaciales (**Glg**), Circo glaciales (**Gc**), sierras glaciadas (**Gsg**) y los flancos de valle glacial (**Gflv**). También se asocia al ambiente estructural sobre la geoforma escarpe de línea de falla (**Slfe**).

Litológicamente, esta categoría está asociada al Granito de pescadero, la Tonalita y granodiorita y al Neis de Bucaramanga los cuales presentan suelos residuales de baja y alta erosión, además depósitos glaciáricos y de coluvión. Respecto a los usos del suelo, la susceptibilidad alta está asociada a sistemas combinados de agricultura y forestaría junto con cultivos transitorios semipermanentes y pastoreo. Estos usos del suelo y la gran cantidad de movimientos en masa, muestra una estrecha relación entre la modificación del suelo por actividad antrópica y la estabilidad de las laderas.

11.5 Susceptibilidad Muy Alta

Esta categoría abarca el 12.03 % del área estudio y se localiza una parte en la zona Noroeste de con altitud de 2500 m.s.n.m y otra parte hacia la zona central de la parte Este con altitudes de 3600 m.s.n.m (Fig. 31). Morfológicamente muestra un predominio hacia la parte oeste por las geoformas de ambiente denudacional como laderas disectadas muy abruptas (**Dldma**), escarpes de erosión mayor (**Deem**), lomas residuales (**Dlor**) y hacia la zona central de la parte Este por las geoformas de ambiente glacial como sierras glaciadas (**Gsg**), artesa glacial (**Gag**), Conos glaciofluviales (**Gcgf**), y los flancos de valle glacial (**Gflv**). También se asocia al ambiente estructural sobre las geoformas como escarpes de línea de falla (**Slfe**), espolón festoneado (**Sefes**), y escarpes de contrapendiente (**Secp**).

Litológicamente, hacia el Noroeste de la zona de trabajo está asociada a las formaciones Tambor, Rosa Blanca, Paja y Tablazo y a hacia la zona central de la parte Este, a rocas correspondientes al Neis de Bucaramanga, además de depósitos glaciáricos, terrazas y conos de deyección. Los usos del suelo más relacionados a la categoría de susceptibilidad alta son los sistemas combinados de agricultura y forestaría junto con cultivos transitorios semipermanentes.

12. Validación del mapa de susceptibilidad

Los resultados del análisis de susceptibilidad fueron validados a partir del uso de la curva ROC, el porcentaje de predicción y, por último, visualmente a partir del conocimiento experto. Para este

fin, se realizaron 115 pruebas (Apéndice I) (cada prueba con al menos 5 atributos o variables creadas), de las cuales solo 9 pasaron la prueba ROC. Sobre estas 9 pruebas solo 4 pasaron la prueba del porcentaje de predicción, y 3 por el criterio experto.

El primer método de validación se realizó mediante la curva ROC (**R**eceiver **O**perating **C**haracteristic), que es un gráfico de "sensibilidad" versus "especificidad", que se calcula para varios umbrales (Vakhshoori & Zare, 2016). Para cada prueba se obtuvo una curva ROC y se analizó el resultado escogiendo la prueba con un AUC (área de bajo de la curva) más alto y cercano a 1. En la Tabla 9 se muestra los datos utilizados para el cálculo del AUC y gráfico ROC arrojado. Los resultados de la ROC (Fig. 32) indican una validación buena con un AUC = 0.867, ya que los valores inferiores a 0,7 no representan una correcta asociación a las superficies como movimientos en masa.

Tabla 9.

Número de pixeles para cada categoría de susceptibilidad.

Clase	Píxeles con eventos en cada clase	Píxeles en cada clase
1	108	82846
2	221	156222
3	260	134995
4	639	127462
5	9470	118360

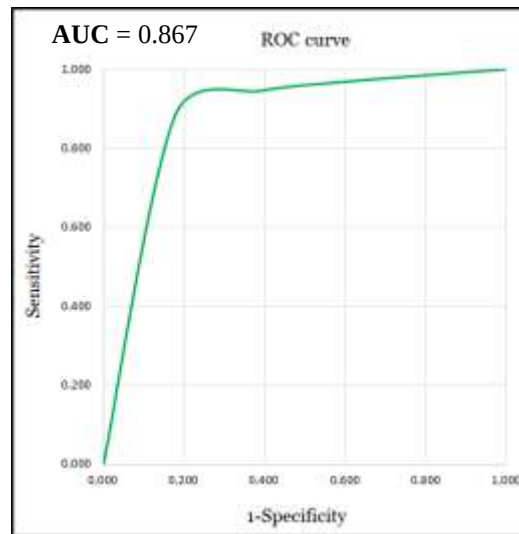


Figura 32. Curva ROC para la validación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa a partir de la lógica difusa (p13).

Posteriormente se evaluó la calidad del modelo de susceptibilidad mediante el porcentaje de predicción, que indica la relación entre el área con movimientos en masa y las áreas correspondientes a cada categoría de susceptibilidad. Para el modelo elegido, las categorías alta y muy alta representan una predicción del 78 % de los movimientos en masa del área de estudio (Fig. 33). Por último, se comparó visualmente el modelo de susceptibilidad obtenido, con las ubicaciones de los movimientos en masa inventariados.

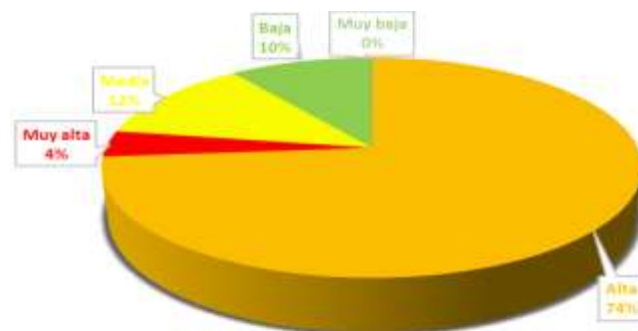


Figura 33. Porcentaje de movimientos en masa asociados a cada categoría de susceptibilidad.

13. Análisis de la amenaza por movimientos en masa

Para el análisis de la amenaza es necesario contar con insumos en términos de cartografía base. Tales insumos forman parte de los factores desencadenantes de movimientos en masa. En este estudio se consideran como factores condicionantes de la amenaza, las lluvias y sismos ya que los factores antrópicos se incluyen de forma implícita en la cobertura y usos del suelo (SGC, 2016).

En este capítulo se describen los aspectos metodológicos propuestos para elaborar la zonificación de amenaza por movimientos en masa.

13.1 Factores detonantes

Los movimientos en masa son procesos geomorfológicos propiciados por la ocurrencia de eventos geológicos, meteorológicos y antrópicos que conducen a una disminución de la resistencia de los materiales térreos.

Para la ocurrencia de un movimiento en masa se da por la disminución de la resistencia de los materiales térreos que componen los taludes, de tal forma que, si dicha resistencia es superada por el umbral mínimo, dan lugar a la desestabilización del terreno. Para el desarrollo de este estudio, estos eventos se les denominan Detonantes, de los cuales se tienen en cuenta los correspondientes a los factores climáticos y sísmicos (SGC & UNAL, 2015).

13.1.1 Detonante Lluvia Para la cuantificación de la contribución del factor climático en cuanto a la disminución de la resistencia de los materiales térreos, se emplearon los datos de precipitación suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Para este estudio se utilizaron 6 estaciones pluviométricas (Tabla 10) en donde se tomaban los datos de precipitación máxima mensual por día (ya que representan el escenario más crítico), distribuidas espacialmente de forma uniforme dentro y fuera del área de estudio con altitudes similares para obtener mejores resultados (Fig. 34). Para completar los datos faltantes de precipitaciones, se utilizó el método de relleno de datos conocido como Razón Q, el cual se aplica a pares de estaciones cercanas, en donde una tiene los datos completos y la otra no, para el mismo periodo de tiempo.

Tabla 10.

Estaciones pluviométricas de la zona de estudio.

Municipio	Nombre estación pluviométrica	Precipitación máx. (mm) en 25 años
Vetas	VETAS-EL POZO	67,6269
Silos	RINCON LOS	87,5973
Tona (Berlín)	BERLÍN	44,0096
Suratá	VIVERO SURATÁ - AUT	91,5755
Suratá	CACHIRÍ - AUT	81,9135
Tona	PICACHO EL	90.8872

Cada una de las estaciones utilizadas se analizó desde el año 2000 hasta el año 2018, (Fig. 35) calculándose para cada una de estas un periodo de retorno de 25 años, aplicando la metodología y fórmulas de valores extremos de Gumbel (2014). A partir de estos, mediante un procesamiento

SIG se generó el mapa de distribución de precipitaciones (isoyectas) (Fig. 36) realizado en base a las seis estaciones pluviométricas con la ayuda de la herramienta Kriging esferoidal. Posteriormente se realizó una reclasificación del mapa, en 5 categorías (Tabla 11) por el método Natural Breaks.

Tabla 11.

Rango de clasificaciones para detonante lluvia.

Rango (mm)	Categorías
67.634 - 69.976	1
69.976 - 71.605	2
71.605 - 73.352	3
73.352 - 75.179	4

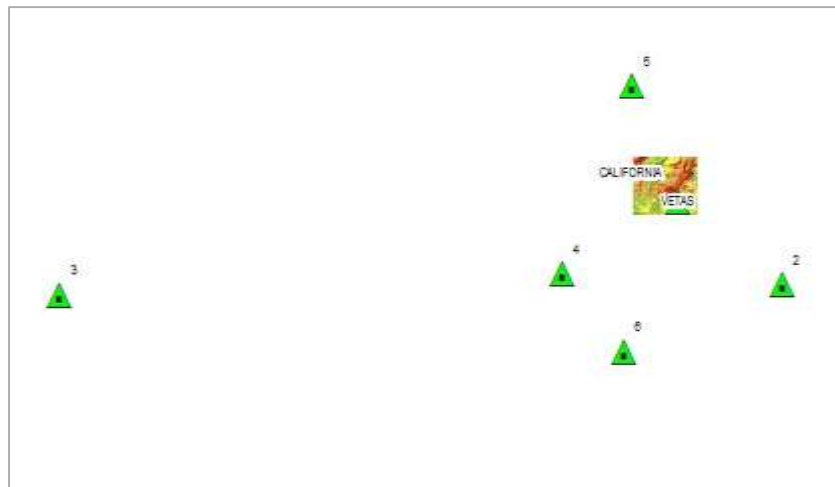


Figura 34. Ubicación espacial de las 6 estaciones pluviométricas del IDEAM, utilizadas en el proyecto de investigación.

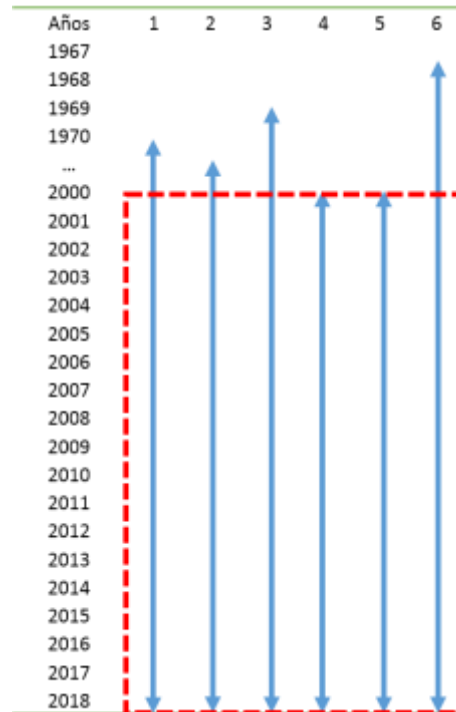


Figura 35. Gráfica con el registro de datos para cada estación; 1) Vetás-El Pozo 2) Rincón Los 3) Berlín 4) Vivero Suratá - Aut 5) Cachirí - Aut 6) Picacho. El recuadro rojo indica el rango de 18 años tomado para realizar el mapa de isoyetas.

13.1.2 Detonante Sismo. Para la elaboración del mapa detonante sismo se usó la metodología de la Asociación Colombiana de ingeniería sísmica (AIS) (2010). Que inicia con el análisis del modelo tectónico del departamento de Santander (SGC, 2018), que se construyó con los datos de 3 tipos de fuentes sismogénicas: Las corticales, aquellas con profundidades menores a 50km; las de Subducción y Zona Benioff definidas con profundidades mayores a 50km (AIS, 2010). Las fuentes corticales que son atribuidas a las fallas regionales importantes de la zona de estudio y las fuentes de zona de subducción, atribuidas al nido sísmico de Bucaramanga (Tabla 12).

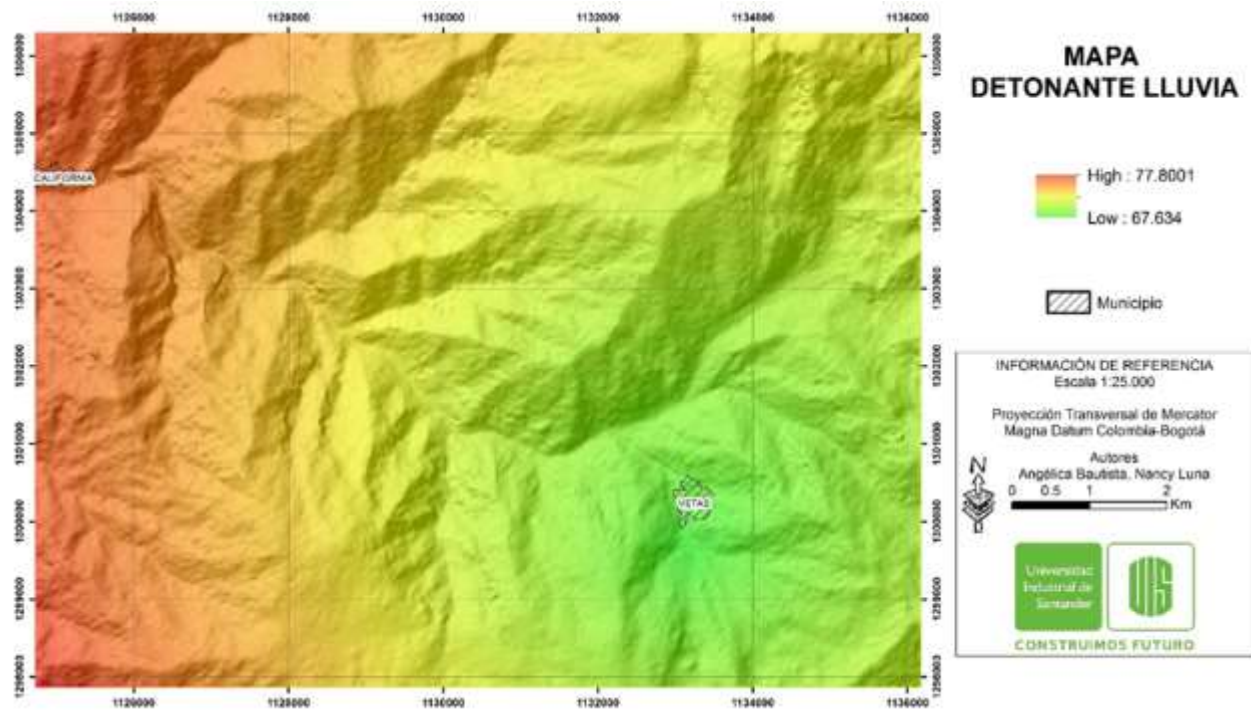


Figura 36. Mapa detonante lluvia para la zona de estudio.

Tabla 12.

Fuentes sismogénicas corticales y de subducción.

Fuente	Tipo de desplazamiento	Longitud (km)	Profundidad (Km)	λ	β	CV	Mo	σ
Falla de Arrugas	Inverso	64	4	0.31	4	0.58	3	0.17
Falla de Bucaramanga	Sinistral inversa	220	3	0.68	1.97	0.29	3	0.41
Falla de Cimitarra	Normal	45	NR	0.25	2.86	0.58	3	0.17
Falla de La Salina	Inverso	171	6	1.48	1.92	0.17	3	0.6
Falla de Servitá	Inverso dextral	55	17	0.67	2.67	0.58	3	0.22
Falla de Suárez	Inverso sinistral	145	8	0.8	2.14	0.3	3	0.4
Falla Jetudo	Inverso sinistral	51	NR	1.48	1.92	0.17	3	0.6
Falla de Cócora	Inversa	71	NR	1.48	1.92	0.17	3	0.6
Nido Bucaramanga	Subducción	NR	120 - 190	47.652	2.68	0.03	4	0.39
Zona de Benioff Profundo	Subducción	NR	120 - 190	1.83	3.59	0.16	4	0.32

Seguidamente, se tomó el registro histórico de sismos del catálogo sísmico del SGC (2018), que comprendían aproximadamente 129.000 datos correspondientes hasta el mes de Julio de 2019, posteriormente se realizó un filtro, descartando los datos con magnitudes menores a 4.0 Mw (magnitud mínima que afecta las estructuras civiles) y las réplicas sísmicas.

A continuación, se eligió y se aplicó los modelos de atenuación para cada una de las fuentes, las cuales se tomaron de Campbell & Bozorgnia (2014) y Chavez & Alva (2006). Ya con las sismicidades y patrones de atenuación calculadas, se procedió a determinar la amenaza sísmica y la probabilidad de excedencia según Ordaz (2000) procesando los datos en el programa Crisis versión 2015 utilizando un periodo de retorno de 475 años, lo cual arrojó como resultado velocidades que varían entre 159.165 y 145.461 cm/s². Finalmente, con la amenaza sísmica calculada, se obtuvo el mapa detonante sismo (Fig. 37). Posteriormente se realizó una reclasificación del mapa, en 5 categorías (Tabla 13), utilizando el método Natural Breaks.

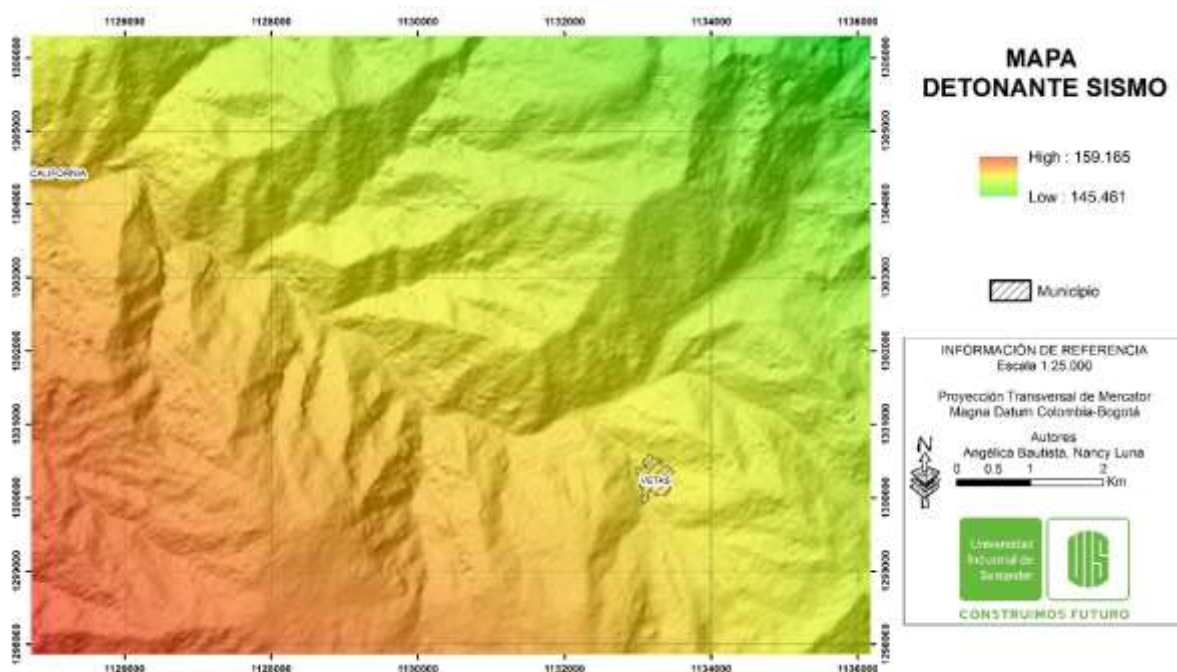


Figura 37. Mapa del detonante para la zona de estudio.

Tabla 13.

Rango de clasificaciones para el detonante sismo.

Rango (cm/s ²)	Categorías
145.461 - 149.261	1
149.262 - 151.456	2
151.457 - 153.490	3
153.491 - 155.739	4
155.740 - 159.165	5

14. Amenaza por movimientos en masa

Para la elaboración del mapa de amenazas a movimientos en masa (Apéndice G) (Fig. 38) se utilizó la metodología del SGC (2013), que inicia por realizar las sumas de la susceptibilidad + detonante sismo y susceptibilidad + detonante lluvia. Posteriormente se combinan los dos mapas obtenidos con la susceptibilidad, en este caso por medio del toolbox “combine” del SIG ArcGIS 10.4. El mapa generado se clasificó en 4 categorías: Baja, Media, Alta y Muy Alta, de acuerdo a la Fig. 39 publicada por el SGC (2013).

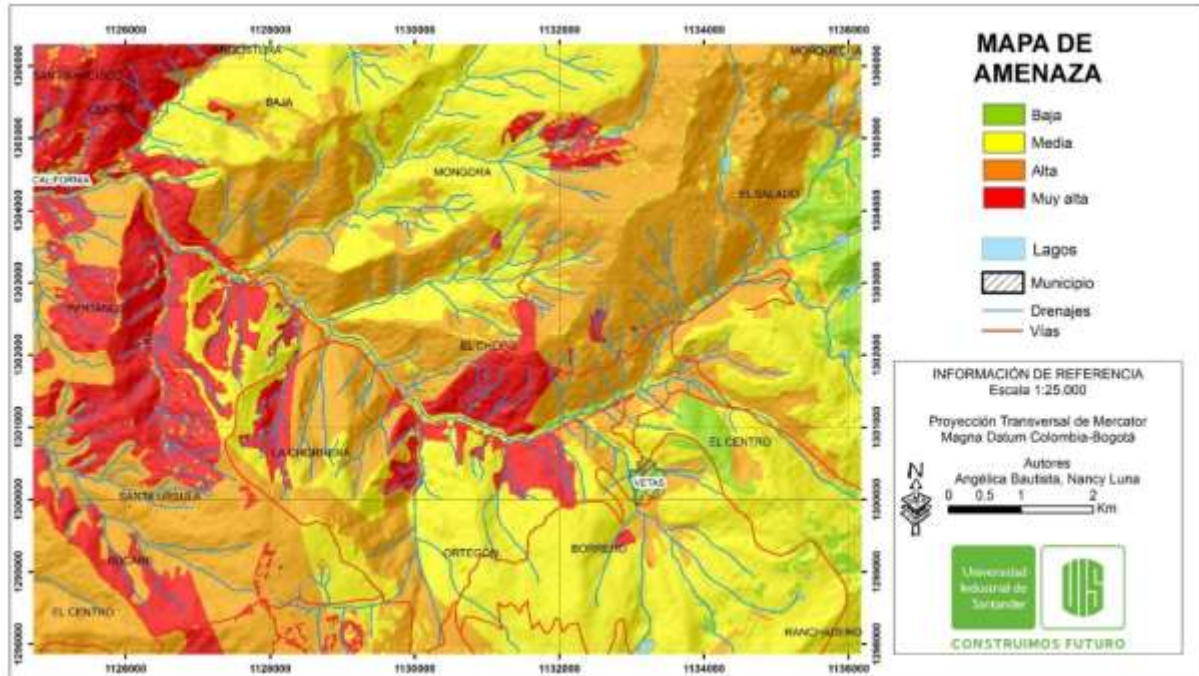


Figura 38. Mapa de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de estudio, con un periodo de retorno de 475 años.

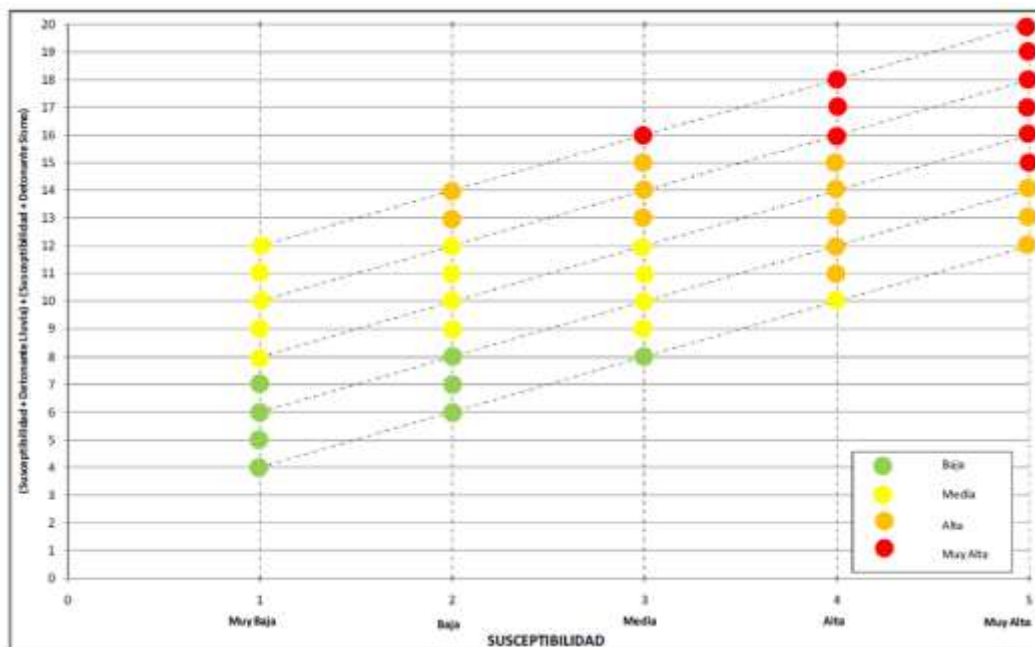


Figura 39. Clasificación del mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa del SGC (2013).

En la Fig. 40 se muestra la distribución porcentual de las cuatro categorías anteriormente definidas. La categoría con mayor distribución corresponde a la amenaza media con un 42% del área total del mapa y la de menor área, corresponde a la amenaza baja con 3% del área total.

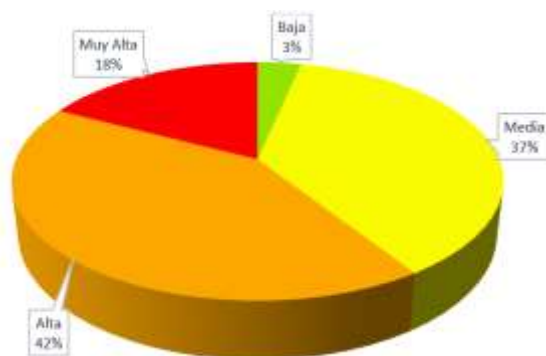


Figura 40. Porcentajes del área total del mapa de amenaza a movimientos en masa para cada categoría.

14.1 Amenaza Baja

Esta categoría representa alrededor del 3% de la zona de estudio (Fig. 40) del área total y se localiza en la zona Este sobre las veredas El Salado y El Centro con elevaciones superiores a los 3600 m.s.n.m. Las precipitaciones máximas mensuales por día en un periodo de retorno de 25 años son de 68,83 mm/día. Las aceleraciones horizontales a nivel de roca estimadas están entre 148,212 a 153,229 PGA o cm/s^2 [Aceleración **M**áxima del **S**uelo (**PGA** por sus siglas en inglés)]. Esta zona no se encuentra afectada por fallas visibles lo que conduce a la estabilidad estructural de las formaciones rocosas de la zona como el Neis de Bucaramanga, la Formación Silgará y el Granito de Pescadero.

14.2 Amenaza Media

Esta categoría representa alrededor del 37% de la zona de estudio (Fig. 40) y se localiza en toda la región abarcando las Veredas Angosturas, Mongora, Ortegon, Borrero, Ranchadero y parte de las veredas La Baja y El Centro. Se encuentra a elevaciones que varían entre 2700 y 4019 m.s.n.m. Las precipitaciones máximas mensuales por día en un periodo de retorno de 25 años son de 68,99 a 75,310 mm/día. Las aceleraciones horizontales a nivel de roca estimadas están entre 150,442 a 155,747 PGA o cm/s^2 . Esta zona está afectada por fallas geológicas que atraviesan las unidades litológicas como la Tonalita y granodiorita y el Neis de Bucaramanga que presentan suelos residuales, además de suelos transportados de depósitos glaciáricos.

14.3 Amenaza Alta

Esta categoría representa alrededor del 42 % de la zona de estudio (Fig. 40) y se localiza dispersa en el área de trabajo, abarcando las veredas El Centro, Santa Ursula, El Salado, La Chorrera y parte de las veredas Pantanos, Morquecha y Bucare. Se encuentra entre alturas de 3021 a 3403 m.s.n.m. Las precipitaciones máximas mensuales por día en un periodo de retorno de 25 años son de 71,220 a 76,891 mm/día. Las aceleraciones horizontales a nivel de roca estimadas están entre 145,861 a 158,368 PGA o cm/s^2 . Esta zona está altamente afectada por la acción de las fallas geológicas que atraviesan los suelos residuales del Neis de Bucaramanga, la Tonalita y granodiorita, y el Granito de pescadero y algunos suelos transportados de depósitos glaciáricos y coluviones. Las veredas categorizadas como amenaza alta son El Saldaso y parte de las veredas de El Chopo, Pamtanos, La Chorrera, Mongora, Santa Ursula, Bucare, El Centro y Mongora.

14.4 Amenaza Muy Alta

Esta categoría representa alrededor del 18 % de la zona de estudio (Fig. 40) y se localiza dispersa en el área de trabajo, abarcando las veredas El Chopo, San Francisco y parte de las veredas Mongora, Borrero, Pantano y Bucare. Se encuentra entre alturas de 2380 a 3060 m.s.n.m. Las precipitaciones máximas mensuales por día en un periodo de retorno de 25 años son de 71,220 a 76,891 mm/día. Las aceleraciones horizontales a nivel de roca estimadas están entre 145,861 a 158,368 PGA o cm/s^2 . Esta condición afecta todos casi todos los tipos de rocas incluyendo las formaciones sedimentarias como la Fm Tambor, Fm. Rosa Blanca, Fm. Paja y Fm. Tablazo, además de la Tonalita y Granodiorita. Las veredas categorizadas como amenaza alta son San Franciso, Centro y parte de las veredas de El Chopo, Pantanos, La Chorrera, Mongora, Santa Ursula, Bucare, El Centro y Mongora, donde la frecuencia de movimeintos en masa es alta.

15. Conclusiones

Se generó el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 del municipio de Vetás, Santander, aplicando el método Estocástico- Lógica Difusa, que fue clasificado en 5 categorías de susceptibilidad: Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy alta. Siendo la susceptibilidad Media la que predomina en la zona de estudio (33.57%), la cual comprende geoformas de tipo denudacional y glacial como laderas erosivas abruptas y muy abruptas y abarca gran parte de los suelos residuales del Neis de Bucaramanga y la Formación Silgará y depósitos glaciáricos. La

susceptibilidad alta es la segunda categoría con más presencia en la zona (30.52%) donde prevalece las geoformas de ambiente denudacional como laderas, lomas de pendientes abruptas y muy abruptas, que en su mayoría pertenecen a suelo residual del Granito de Pescadero, el Neis de Bucaramanga y la tonalita y granodiorita, además de estar influenciado por depósitos glaciáricos y de coluvión, talud y derrumbes.

La elaboración del mapa de susceptibilidad partió de la cartografía de 10 variables independientes, donde se identificaron como aquellas con influencia directa a la ocurrencia de movimientos en masa. Estas variables corresponden a: Geología (Resistencia, Textura, Depósitos y Densidad de fracturamiento), Geomorfología (Morfogénesis y Morfometría), UGS, Usos, Cobertura, TWI, SPI, Pendientes, Curvatura y Altura. A partir de estas variables seleccionadas, se identificaron cuales tienen mayor influencia a estos procesos, las cuales corresponden a Geología, Geomorfología, Pendientes, UGS y Usos, las cuales están relacionadas directamente con la ocurrencia de los movimientos en masa, mientras que, en esta investigación, las variables SPI, TWI, Curvatura y Cobertura no representan una influencia relevante frente a estos eventos.

Con la campaña de campo se logró un mayor detalle de los depósitos presentes en la zona y sus contactos, con lo cual se verificó y se refinó la cartografía geológica anteriormente obtenida de la plancha 110 - Pamplona del INGEOMINAS. Además, se redefinieron unidades geomorfológicas para mejorar la fotointerpretación del mapa de geomorfología previamente elaborado. También se realizó la recolección de información de movimientos en masa presentes en el área de estudio, para así complementar el registro del catálogo de movimientos en masa que se tenía previamente de diferentes fuentes y por fotointerpretación, obteniendo un total de 43 MM clasificados como deslizamientos rotacionales, flujos de detritos, flujos de suelo y caída de rocas, los cuales se utilizaron como validador del mapa final de susceptibilidad.

Se obtuvo el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa aplicando el método estocástico de lógica difusa utilizando un sistema de inferencia difusa con la membresía “Large” y el tipo de superposición “gamma” en función de 5 variables, realizando diferentes pruebas. Se eligieron las mejores pruebas en base a los resultados de la prueba ROC y finalmente se escogió el mapa final con el porcentaje de predicción. La curva ROC del mapa final obtuvo un AUC de 0.867 y un porcentaje de predicción de 77.5%. Lo cual indicó que el modelo relaciona de una manera adecuada los movimientos en masa, con las zonas de susceptibilidad más altas y además se demostró la fiabilidad del método de lógica difusa para la zonificación de la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa. Con estos resultados y el proceso metodológico para obtener la susceptibilidad a los MM se describe una alternativa viable a usar este método en otras regiones del país.

El detonante lluvia fue diseñado en base a los datos de precipitación máxima mensual por día proporcionados mediante 6 estaciones pluviométricas del IDEAM, evaluadas para un período de retorno de 25 años arrojando valores entre 66,634 y 77,800 mm/día. A pesar de que en la zona Oeste se presentan los mayores valores de precipitación y hacia el casco urbano de Vetás los menores valores de precipitación, los movimientos en masa se encuentran dispersos por toda el área de estudio (principalmente en las veredas). Lo que indica la inestabilidad del terreno a sufrir movimientos en masa.

El modelo sísmico realizado, se basó en los datos históricos de sismos de magnitud > 4.0 Ml del catálogo del SGC para el departamento de Santander, entre enero de 1993 a julio de 2018, para un periodo de retorno de 475 años obteniendo valores de aceleración máximas horizontales que oscilan entre 145,461 y 159,165 $[cm/s^2]$. El mapa de detonante sismo muestra mayores valores de aceleración máxima local hacia la zona Suroeste, y menores valores hacia el noreste de la zona de

trabajo. Sin embargo, la mayoría de los movimientos en masa coinciden con los valores medios y altos de aceleración máximas horizontales del modelo diseñado.

Se modeló el mapa de amenaza por movimientos en masa a partir de la susceptibilidad y los detonantes sísmicos y lluvias, obteniendo cuatro categorías: Baja, Media, Alta y Muy Alta. La categoría con mayor predominio en la zona de estudio es la amenaza Alta con un 42% del área, afectando principalmente las veredas El Salado, El Chopo, Mongora, La Chorrera, Santa Úrsula, El Centro y Pantanos. La categoría de amenaza media se sitúa principalmente en las veredas al Este y centro de la zona como la vereda Baja, Mongora, Ortega, Borrero y El Centro. La categoría de amenaza Muy Alta, se ubica al Oeste y centro del mapa afectando gran parte de las veredas San Francisco, Centro, Pantanos, Santa Úrsula, La Chorrera y Bucare y menor proporción, las veredas El Chopo, Mongora, Ortega y Borrero. El casco urbano del municipio de Vetás se encuentra categorizado como amenaza baja y el casco urbano del municipio de California como amenaza media.

15. Recomendaciones

Implementar una cartografía geológica más detallada en cuanto a depósitos de rocas que permita mejorar la calidad del insumo a procesar en un futuro proyecto de susceptibilidad a movimientos en masa.

Teniendo en cuenta las cinco variables utilizadas en este proyecto, aplicar la metodología propuesta implementando otro tipo de métodos predictivos como los determinísticos con fines de comparar y evaluar el rendimiento de cada uno.

Ya que el método matemático Lógica Difusa depende de la calidad y cantidad de datos utilizados como variables o atributos, se recomienda que las entidades estatales lleven a cabo actividades que enriquezcan y mejoren las bases de datos relacionadas a estos proyectos de investigación como estaciones pluviométricas y caracterización de estructuras geológicas regionales.

Con el fin de completar la información del riesgo por movimientos en masa en el municipio de Vetás, se recomienda realizar un estudio de vulnerabilidad y exposición en base a la zonificación de susceptibilidad y amenaza aquí propuesta.

Tomando en cuenta los resultados de los modelos de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa aquí generados, que señalan una condición potencial a general movimientos en masa, se requiere caracterizar y evaluar las superficies desde un punto de vista geotécnico para determinar los grados de inestabilidad del terreno.

Referencias Bibliográficas

- Albornoz, K. M., Muñetón, E. G., & Galbán, E. M. (2007). Influencia de la intervención antrópica en la ocurrencia de procesos de ladera. Microcuenca de la quebrada Ramos, Flanco Norandino venezolano. *Terra Nueva Etapa*, 23(34), 35-68.
- Alcaldía Municipal de Vetás, Santander. (2008), Esquema de Ordenamiento Territorial municipio de Vetás. Dimensión ambiental, Capítulo 4. Recuperado el 2 de Agosto de 2019, de <http://www.vetas-santander.gov.co/tema/documentos-alcaldia-688622>.
- Alcantara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47, (pp. 107-124). Recuperado el 18 de Agosto de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X02000831>.
- Asociación Colombiana de ingeniería sísmica [AIS]. (2010). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009. Bogotá D.C.: AIS.
- ASF. Dataset: ASF DAAC 2015, ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_high_res. Includes Material © JAXA/METI 2007. doi:10.5067 / Z97HFCNKR6VA. (Acceso: 20 de 03 de 2019).
- Baldwin, J. F. (1979). Fuzzy logic and its application to fuzzy reasoning. *Advances in fuzzy set theory and applications*, 83-115.
- Banco mundial Colombia. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Bogotá. Recuperado el 2 de agosto de 2019, <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>
- Benavides, H., Mayorga, R., & Hurtado, G. (2007). Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales-IDEAM. Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el Rclimindex, Nota técnica del Ideammeteo/007-2007. Bogotá: Ideam. Recuperado

- el 2 de Agosto de 2019, de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/020661/NotaRclimindexfinal.pdf>
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F., & Rampini, A. (1998). Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster–Shafer approaches. *Natural hazards*, 17(1), 77-97. Recuperado el 2 de Agosto de 2019, de <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008001724538>
- Brabb E.E. , Hrrrod B.L. (1989). Landslides: Extent and economic significance: Proc., 28th International Geological Congress: Symposium on landslides, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, (pp.385). Recuperado el 9 de Agosto de 2019, de <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:clkT8kloBQJ:www.erosion.com.co/presentaciones/category/14-libro-deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-enzonastropicales-jaime-suarez.html%Fdownload%3D137:184-1-caracterizaci3n+delosmovimientos+1+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5% Damped Linear Acceleration Response Spectra. (EERI, Ed.) *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087–1115. Recuperado el 9 de Agosto de 2019, <https://earthquakespectra.org/doi/abs/10.1193/062913EQS175M>
- Cardona, A.O., (1993), Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. En A. Maskrey (ed.), *Los desastres no son naturales*, (pp. 51). Recuperado el 1 de Agosto de 2019, de <http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/LosDesastresNoSonNaturales-1.0.0.pdf>
- Chávez Obregón, J. A., & Alva Hurtado, J. E. (2006). Leyes de atenuación para aceleraciones espectrales en el Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado el 10 de octubre de 2019, de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/4224>
- Chivatá, I. (2008). Estimación de la susceptibilidad ante deslizamientos: aplicación de conjuntos difusos y las teorías de la posibilidad y de la evidencia. *Ingeniería e Investigación*, 28(1), 26-40. Recuperado el 30 de Junio de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64328105.pdf>
- Chi, K. H., Park, N. W., & Chung, C. J. (2002). Fuzzy logic integration for landslide hazard mapping using spatial data from Boeun, Korea. *International archives of photogrammetry*

- remote sensing and spatial information sciences, 34(4), 54-59 Recuperado el 3 de Junio de 2019, de <https://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part4/pdfpapers/283.pdf>
- Crozier, M. J. (1986). Landslides: causes, consequences & environment. Taylor & Francis, England, (pp245). Recuperado el 5 de Junio de 2019, de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-7939.1989.tb01143.x>
- Cruden, D.M.S., Thomson, B.D., Bomhold, J-Y., Locat, J., Evans, J.A., Heginbottom, K., Moran, D.J., Piper, R., Powell, R., Prior, D., Qugley, R.M. (1989). Landslides: extent and economic significance in Canada, en Landslides: extent and economic significance, editado por Brabb E.E. y Harrod B.L., Proc. 28th Intl. Geol. Congr. Symp. On Landslides, Wash. D.C. (pp 1-23). Recuperado el 30 de Julio de 2019, de http://img.kb.dk/tidsskriftdk/pdf/gto/gto_0090-PDF/gto_0090_72061.pdf
- Danielson, T. (2013). Utilizing a high-resolution Digital Elevation Model (DEM) to develop a Stream Power Index (SPI) for the Gilmore creek watershed in Winona County, Minnesota. Papers in resource analysis, 15, 11. Recuperado el 3 de Enero de 2019, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.434.4391&rep=rep1&type=pdf>
- Del Cerro Sánchez, T., & Novalbos, P. (2014). Lógica Difusa. Universidad Carlos III de Madrid, 8. Recuperado el 30 de Septiembre de 2019, de <http://www.it.uc3m.es/~jvillena/irc/practicas/13-14/06.pdf>
- Elton, D. J., Juang, C. H., & Sukumaran, B. (1995). Liquefaction susceptibility evaluation using fuzzy sets. Soils and foundations, 35(2), 49-60. Recuperado el 15 de Junio de 2019, de https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1972/35/2/35_2_49/_article/-char/ja/
- Eras Galarza, M. L. (2014). Determinación de zonas susceptibles a movimientos en masa en el Ecuador, a escala 1: 1'000.000, utilizando el Método de Ponderación de Parámetros (Bachelor's thesis, Quito, 2014.). Recuperado el 7 de Marzo de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/308873710_Guia_metodologica_para_la_zonificacion_de_susceptibilidad_y_amenaza_relativa_por_movimientos_en_masa_escala_1100000
- Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2002). Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. Environmental geology, 41(6), 720-730. Recuperado el 20 de Junio de 2019, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00254-001-0454-2>

ESRI. Environmental Systems Research Institute. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/main/about-arcgis-for-desktop-extensions.htm>. (Acceso: 1 de 1 de 2019).

Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD) (2004). Términos principales relativos a la reducción del riesgo de desastres. Recuperado el 21 de Junio de 2019, de <http://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>

Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. Engineering Geology, (pp. 95). Recuperado el 13 de Abril de 2019, de <https://www.semanticscholar.org/paper/Guidelines-for-landslide-susceptibility%2C-hazard-and-Fell-Corominas/130b91b43adab0f389370bbe22d76192bbcc7be1>

Girty, G. H. (2009). Chapter 8, Landslides. Understanding Processes Behind Natural Disasters. San Diego State University: Department of Geological Sciences (pp. 1-17). Recuperado el 30 de Junio de 2019, de <http://www.sci.sdsu.edu/visualgeology/naturaldisasters/Chapters/Chapter8Landslides.pdf>

González M, C., (2011), Lógica difusa, una introducción práctica (pp. 7). Recuperado el 30 de Junio de 2019, de http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf.

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. (pp 1). Recuperado el 23 de Junio de 2019, de https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/8245/Milena_GonzalezGomez_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Gopal S, Woodcock C (1994). Theory and Methods for accuracy assessment of thematic maps using fuzzy sets. Photogram. Eng. Rem. Sensing 60, (pp 181-188). Recuperado el 21 de Mayo de 2019, de <https://pdfs.semanticscholar.org/3be1/2140baeaa36516c57ff7c31073511acdfac2.pdf>.

Google. (2017). [Mapa de Vetas, Colombia en Google Earth Pro]. Recuperado el 3 de Octubre, 2019 de <https://www.google.com/intl/es/earth/>

Gumbel E. J. (2004). Statistics of Extremes. Courier Dover Publications. ISBN: 978- 0486436043.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and atmospheric physics*, 98(3-4), 239-267. Recuperado el 30 de Junio de 2019, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-007-0262-7>

IDEAM (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. In Simposio Latinoamericano de Control de Erosión (pp. 1-8). Recuperado el 23 de Julio de 2019, de http://www.docentes.unal.edu.co/gvargasc/docs/PUBLICACIONES_RIESGOS/Modelo-pronosticoFRM.pdf

IDEAM. (2012). Ecosistemas. Recuperado el 24 de Julio de 2019, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>.

IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA. (2008). Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geografico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena.

IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (1997). Geosistemas de Alta Montaña Colombiana. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 403p. Recuperado el 12 de Febrero de 2019, de http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=7914&shelfbrowse_itemnumber=8320

INGEOMINAS. (2002). Catálogo Nacional de movimientos en masa. Subdirección de Amenaza Geoambientales. Bogotá, Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2005). Interpretación Visual de Imágenes de Sensores Remotos y su Aplicación en levantamientos de Cobertura y Uso de la Tierra. Bogotá.

- Jansesn, L y Di Gregorio, A. (1998) A New Concept for a Land Cover Classification System. FAO Land and Water Development Division. 55-65p. Recuperado el 3 de Junio de 2019, de https://www.researchgate.net/profile/Louisa_Jansen/publication/257312915_A_new_concept_for_a_land-cover_classification_system/links/54ccf2a80cf29ca810f7331e/A-new-concept-for-a-land-cover-classification-system.pdf
- Juang, C. H., Lee, D. H., & Sheu, C. (1992). Mapping slope failure potential using fuzzy sets. *Journal of geotechnical engineering*, 118(3), 475-494. Recuperado el 14 de Junio de 2019, de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281992%29118%3A3%28475%29>
- Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., & Gupta, R. P. (2012). Landslide Susceptibility Zonation (LSZ) Mapping—A Review. Recuperado el 2 de Junio de 2019, de: https://www.researchgate.net/publication/257676704_Landslide_Susceptibility_Zonation_LSZ_Mapping_-_A_Review
- Lahoz-Beltrá, R. (2004). Bioinformatica: simulación, vida artificial e inteligencia artificial. Diaz de santos. (pp.95). Recuperado el 4 de Junio de 2019, de https://www.editdiazdesantos.com/libros/lahoz-beltra-rafael-bioinformatica_simulacion-vida-artificial-e-inteligencia-artificial L03006450101.html?articulo=03006450101
- Lamprea, F. A. A. (2017). Zonificación de las coberturas de la tierra mediante la aplicación de herramientas SIG para la revisión y ajuste del pot en el marco del crecimiento urbano y la conurbación norte: caso municipio de Zipaquirá (doctoral dissertation, universidad distrital francisco josé de caldas). (Pp 60) Recuperado el 3 de Agosto de 2019, de https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/files_ciaf/Lamprea-Avellanea-Ferdy.pdf
- Leal Narváez, E. A., & Branch Bedoya, J. W. (2007). Estimación de curvaturas y direcciones principales en nube de puntos no organizados. *Dyna*, 74(153). Recuperado el 16 de Mayo de 2019, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/13473/2/990-25903-1-PB.htm>
- Lobo, J. R., & Kamp, U. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Revista geográfica venezolana*, 53(1), 109-126. Recuperado el 16 de Mayo de 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730388007.pdf>

- Mantilla, L. C., Mendoza, H., Bissig, T., & Craig, H. (2011). Nuevas evidencias sobre el magmatismo Miocénico en el distrito minero de Vetás-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 33(1). Recuperado el 6 de Mayo de 2019, de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/2471>
- Ministerio de vivienda, c. y. (19 de septiembre de 2014). Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones territoriales. Decreto número 1807. Bogotá, Colombia.
- Morcillo, C. G. (2011). *Lógica Difusa. Una introducción Práctica*. Universidad de Castilla-La Mancha. Recuperado el 6 de Mayo de 2019, de http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf
- Ortiz, J. A. V., & Martínez-Graña, A. M. (2018). A neural network model applied to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 1106-1128.
- Pérez, R. M. (2010). Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio. *Revista de investigación de Sistemas e Informática*, 7(1), 91-104. Recuperado el 16 de Julio de 2019, de http://200.62.146.19/Bibvirtual/Publicaciones/risi/2010_n1/v7n1/a09v7n1.pdf
- Portilla-Gamboa, M. E. (2001). Aplicación de los Sistemas de Lógica Difusa en la Evaluación de la Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa. *Geología Colombiana*, 26, 189-205. Recuperado el 15 de Agosto de 2019, de <http://bdigital.unal.edu.co/32194/1/31566-114811-1-PB.pdf>
- Royero, J. M., & Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado departamento de Santander, escala 1:300.000. Bogotá: multimedios l.t.d.a.
- Rueda, A.F & Tavera, C.A (2016). Zonificación de la susceptibilidad relativa por movimientos en masa empleando el método matemático de lógica difusa en un área de 150 km² pertenecientes a la plancha 136-i-b escala 1:25.000.

- Sala, M. (1984). Geomorfología actual. Guía conceptual, temática y bibliográfica. Revista de geografía, 18(1), 209-248. Recuperado el 17 de Mayo de 2019, de <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/viewFile/45984/56810>
- Schuster R. L. (1996). Socioeconomic significance of landslides. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds.) Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC, USA. Schuster, R.L., Highland, M.L. 2001. Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the Western Hemisphere. Open file report 01-0276. USGS, (pp 129-177). Recuperado el 16 de Junio de 2019, de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-002.pdf>.
- Schuster, R.L., Highland, M.L. (2001). Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the Western Hemisphere. Open file report 01-0276. USGS Recuperado el 16 de Septiembre de 2019, de <https://pdfs.semanticscholar.org/1e9e/8626fc2d83a87c3c8aa94f8d205544f819d7.pdf>
- Schuster, R.L., (1996), The 25 most catastrophic landslides of the 20th century, Landslides, Proc. Of the 8th International Conf. & Field Trip on Landslides, Granada, España. Recuperado el 29 de Septiembre de 2019, de <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN020656060/The-25-most-catastrophic-landslides-of-the-20th/>
- Servicio Geológico Colombiano [SGC] & Universidad Industrial de Santander convenio 009. (2014). Mapa de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa plancha 110 - Pamplona. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC] & Universidad Nacional De Colombia convenio 028. (2015). Memoria explicativa de zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100.000 plancha 279 – Dagua. (Anexo E Detonante sismo y lluvia) Bogotá, Colombia: Servicio Geológico de Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Servicio Geológico Colombiano-SGC.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2013). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa escala 1:100.000 (Vol. 2). Bogotá, Colombia: Servicio Geológico de Colombia.

Servicio Geológico Colombiano [SGC] (2017). Publicaciones especiales geológicas. Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. (L. E. Vásquez Salamanca, Ed.) Bogotá, Colombia: Servicio Geológico de Colombia.

Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2018). Servicio geológico colombiano. Obtenido de Consulta catalogo sísmico: Recuperado el 15 de Agosto de 2019, de [ps://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/catalogo-sismico.aspx](https://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/catalogo-sismico.aspx)

Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico de Colombia.

Sidle R.C., Ochiai H. (2006). Landslides: processes, prediction, and land use. Water Resources Monograph 18. American Geophysical Union, Washington D.C. Recuperado el 23 de Julio de 2019, de https://www.researchgate.net/profile/Gabriel_Eidelman/publication/262967472_Brewing_Justice_Fair_Trade_Sustainability_and_Survival_-_by_Daniel_Jaffee/links/5afcff8a0f7e9b98e03e9ddf/Brewing-Justice-Fair-Trade-Sustainability-and-Survival-by-Daniel-Jaffee.pdf

Soldano, A. (2009). Inundaciones: ¿Qué es susceptibilidad? Conceptos sobre riesgo. Síntesis temática realizada para el Foro Virtual de la RIMD creado para la Capacitación en Teledetección Aplicada a la Reducción del Riesgo por Inundaciones, 16. Recuperado el 19 de Agosto de 2019, de <http://www.rimd.org/advf/documentos/4921a360071e58.79575639.pdf>

Suárez D, J., (1998), Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander (pp. 1). Recuperado el 16 de septiembre de 2019, de <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/14-libro-deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales-jaime-suarez.html?download=137:184-1-caracterizaciodelosmovimientos-1>

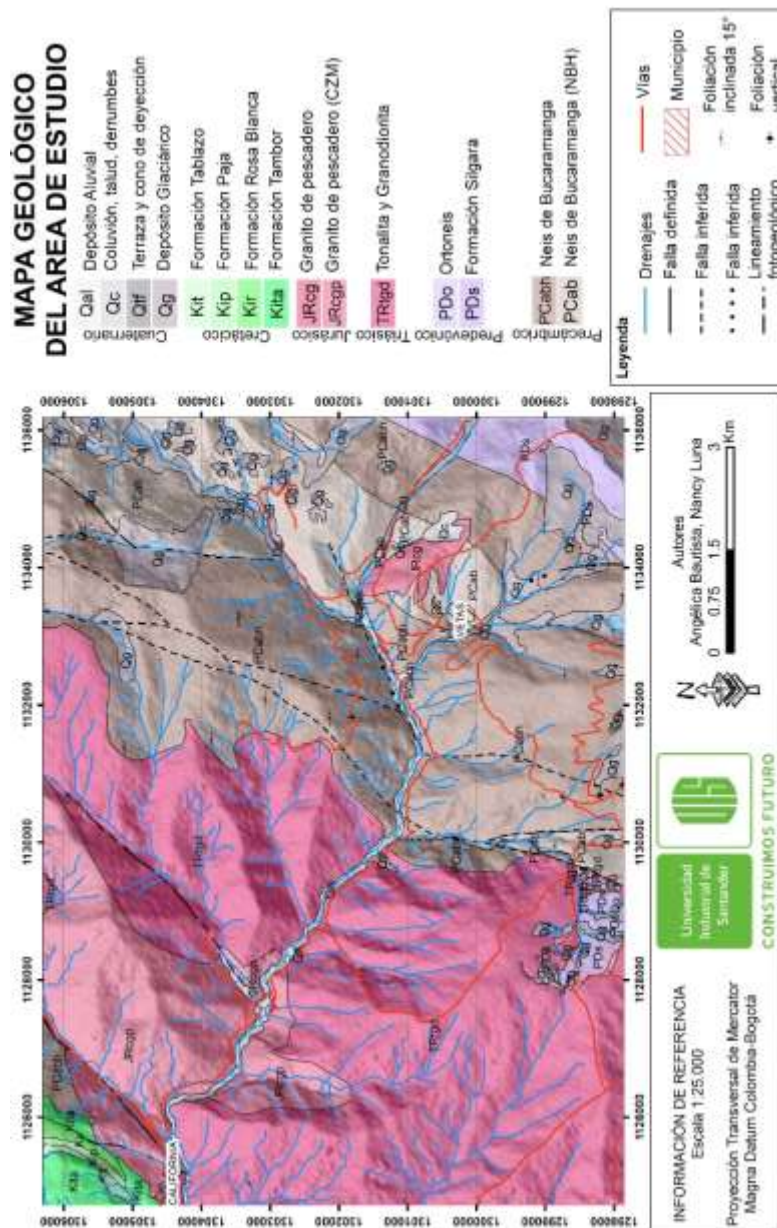
Tangestani, M. H. (2004). Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma approach in a GIS, Kakan catchment area, southwest Iran. Australian Journal of Earth Sciences, 51(3), 439-450. Recuperado el 26 de Septiembre de 2019, de https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1111/j.1400-0952.2004.01068.x?casa_token=Tp6MbIozwzoAAAAA:h5nnbLucy2ygvTfRXSQCgaAjd1eWIZYFOZtXvNUq_rl3OfZGL-R5EXoSRdhWlBL2UMxIe2_3PY8R9A

- Vakhshoori, V., & Zare, M. (2016). Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(5), 1731-1752. Recuperado el 25 de Septiembre de 2019, de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2016.1144655>
- Valencia, J. A., (2017). Aplicación de redes neuronales y SIG en el análisis de riesgos de inundación y movimientos de ladera en el municipio de Capitanejo (Santander- Colombia), Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Wang, Q., Li, W., Wu, Y., Pei, Y., Xing, M., & Yang, D. (2016). A comparative study on the landslide susceptibility mapping using evidential belief function and weights of evidence models. (SPRINGER, Ed.) *Journal of earth system science*, 645–662. Recuperado el 16 de Mayo de 2019, de <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/jess/125/03/0645-0662>
- Ward, W., Goldsmith, R., Cruz, J., Restrepo, H., & Gómez, E. (1973). Memoria explicativa de mapa geológico de Colombia, cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander y Norte de Santander. Ingeominas. *Boletín Geológico*, Bogotá. Recuperado el 6 de Octubre de 2019, de <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/383>
- Yanar, T. & Akyürek, Z. (2006). The enhancement of the cell-based GIS analysis with fuzzy processing capabilities', *Information Science* 176, (pp 1067-1085). Recuperado el 20 de Junio de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/222407705_The_enhancement_of_the_cell-based_GIS_analyses_with_fuzzy_processing_capabilities.
- Youssef, A., Pradhan, B., Nemah, M., & El-Harbi, H. (2015). Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. *Environ Earth Science*. Recuperado el 16 de Julio de 2019, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-014-3661-3>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353. Recuperado el 14 de Abril de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S00199586590241X>
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III. *Information sciences*, 9(1), 43-80. Recuperado el 16 de Abril de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020025575900171>.

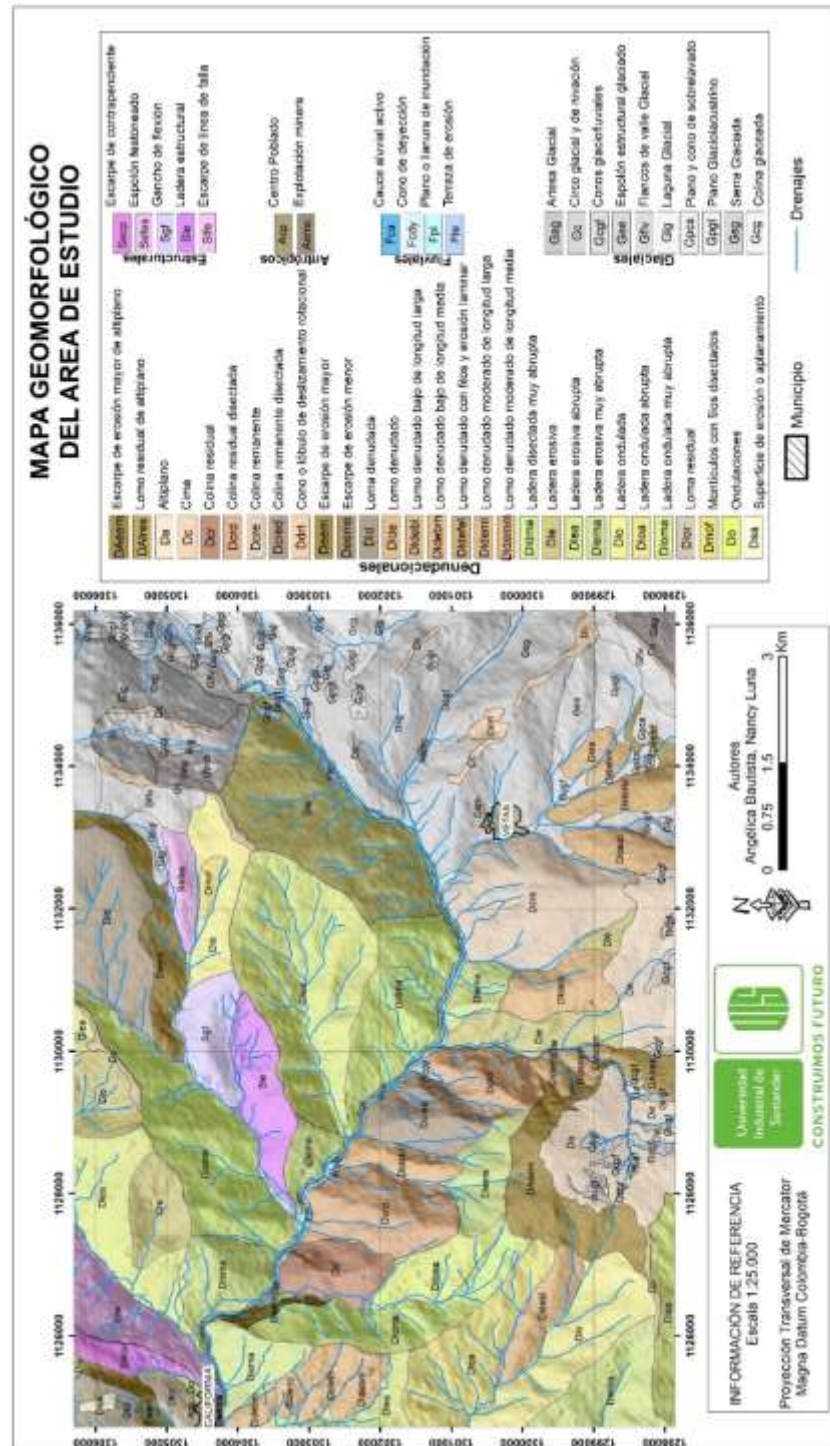
Zimmermann, H. J. (Ed.). (2012). Practical applications of fuzzy technologies (Vol. 6). Springer Science & Business Media. Recuperado el 16 de Abril de 2019, de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=qp3bBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=Practical+applications+of+fuzzy+technologies+\(Vol.+6\).+Springer+Science+%26+Business+Media.+&ots=0E7pV5N1Y3&sig=PQZfXHXW4S8KN4oprWZozmjafso#v=onepage&q=Practical%20applications%20of%20fuzzy%20technologies%20\(Vol.%206\).%20Springer%20Science%20%26%20Business%20Media.&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=qp3bBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR15&dq=Practical+applications+of+fuzzy+technologies+(Vol.+6).+Springer+Science+%26+Business+Media.+&ots=0E7pV5N1Y3&sig=PQZfXHXW4S8KN4oprWZozmjafso#v=onepage&q=Practical%20applications%20of%20fuzzy%20technologies%20(Vol.%206).%20Springer%20Science%20%26%20Business%20Media.&f=false)

Apéndices

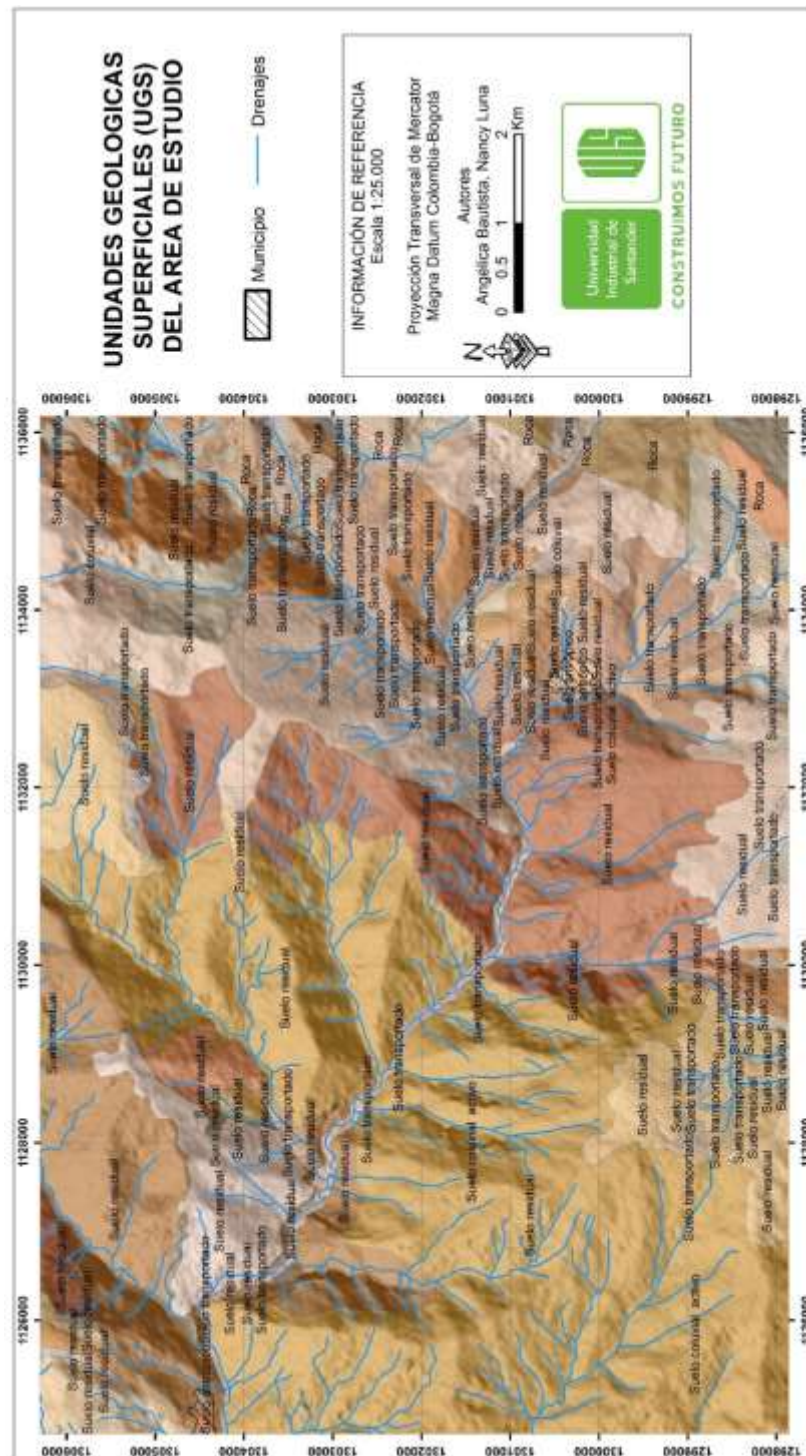
Apéndice A. Mapa geológico escala 1:25.000 del área de estudio



Apéndice B. Mapa de unidades geomorfológicas a escala 1:25.000 del área de estudio



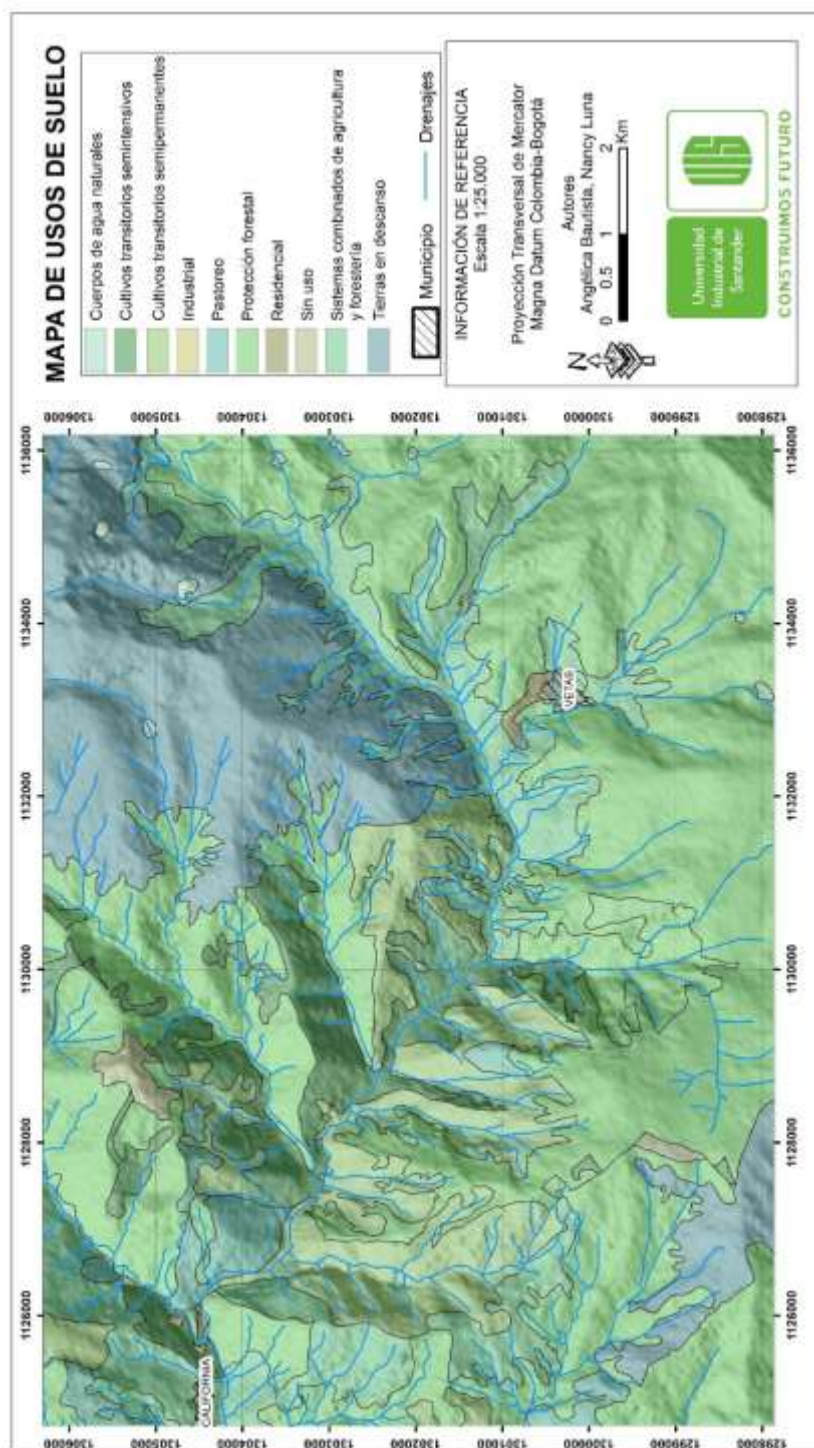
Apéndice B. Mapa de unidades geológicas superficiales a escala 1:25.000 del área de estudio.



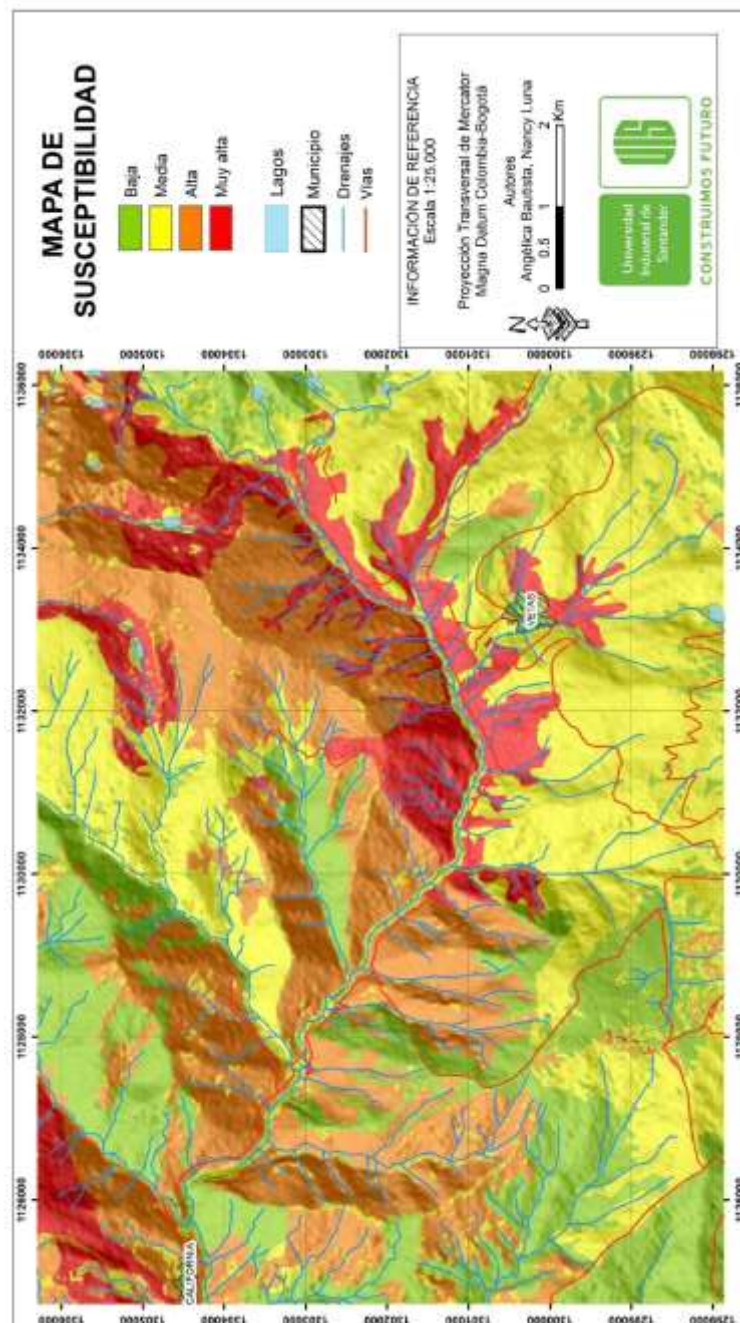
Apéndice C. Leyenda del mapa de unidades geológicas superficiales a escala 1:25.000 del
 área de estudio.

UGS		
	Roca de la Formación Silgara con alta erosión y con bajo fracturamiento.	Suelo residual de la Formación Silgara con moderada erosión.
	Roca de la Formación Silgara con alta erosión.	Suelo residual de la Formación Tambor con baja erosión.
	Roca de la Formación Silgara con moderada erosión y con bajo fracturamiento.	Suelo residual de la Tonalita y Granodiorita con alta erosión.
	Roca de la Formación Silgara con moderada erosión.	Suelo residual de la Tonalita y Granodiorita con baja erosión.
	Roca del Neis de Bucaramanga (NBH) con alta erosión.	Suelo residual de la Tonalita y Granodiorita con moderada erosión.
	Roca del Neis de Bucaramanga con alta erosión y con bajo fracturamiento.	Suelo residual del Granito de pescadero (CZM) con alta erosión.
	Roca del Neis de Bucaramanga con alta erosión y con moderado fracturamiento.	Suelo residual del Granito de pescadero (CZM) con moderada erosión.
	Roca del Neis de Bucaramanga con alta erosión y con moderado fracturamiento.	Suelo residual del Granito de pescadero con baja erosión.
	Roca del Neis de Bucaramanga con moderada erosión y con bajo fracturamiento.	Suelo residual del Granito de pescadero con moderada erosión.
	Roca del Neis de Bucaramanga con moderada erosión y con moderado fracturamiento.	Suelo residual del Neis de Bucaramanga (NBH) con alta erosión.
	Roca del Ortoneis con alta erosión.	Suelo residual del Neis de Bucaramanga (NBH) con baja erosión.
	Suelo antrópico de la Formación Tambor con baja erosión.	Suelo residual del Neis de Bucaramanga (NBH) con moderada erosión.
	Suelo antrópico de la Tonalita y Granodiorita con baja erosión.	Suelo residual del Neis de Bucaramanga con alta erosión.
	Suelo antrópico del Granito de pescadero con baja erosión.	Suelo residual del Neis de Bucaramanga con baja erosión.
	Suelo antrópico del Neis de Bucaramanga (NBH) con baja erosión.	Suelo residual del Neis de Bucaramanga con moderada erosión.
	Suelo antrópico del Neis de Bucaramanga (NBH) con moderada erosión.	Suelo transportado de la Terraza y cono de deyección con baja erosión.
	Suelo antrópico del Neis de Bucaramanga con alta erosión.	Suelo transportado del Depósito Aluvial con alta erosión.
	Suelo antrópico del Neis de Bucaramanga con moderada erosión.	Suelo transportado del Depósito Aluvial con baja erosión.
	Suelo coluvial activo	Suelo transportado del Depósito Aluvial con moderada erosión.
	Suelo coluvial del Coluvión, talud, derrumbes con alta erosión.	Suelo transportado del Depósito Glaciárico con alta erosión.
	Suelo coluvial del Coluvión, talud, derrumbes con moderada erosión.	Suelo transportado del Depósito Glaciárico con baja erosión.
	Suelo residual de la Formación Paja con baja erosión.	Suelo transportado del Depósito Glaciárico con moderada erosión.
	Suelo residual de la Formación Rosa Blanca con baja erosión.	
	Suelo residual de la Formación Silgara con alta erosión.	

Apéndice D. Mapa de usos de suelo a escala 1:25.000 del área de estudio.



Apéndice E. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de estudio, calculado con un deto. lluvia con un periodo de retorno de 25 años y un deto. sismo con un periodo de retorno de 475 años.



Apéndice G. Inventario de movimientos en masa

Punto	Tipo de movimiento	Fuente	X	y
0	Deslizamiento traslacional	Autor	1126615.58	1306215.18
1	Deslizamiento traslacional	Autor	1132797.9	1299909.46
2	Deslizamiento traslacional	Autor	1132711.12	1299855.94
3	Deslizamiento traslacional y flujos de suelo	Autor	1134558.45	1300475.09
4	Deslizamiento traslacional y caída de rocas	Autor	1128008.68	1301439.6
5	Deslizamiento	CDMB	1133352.95	1300177.6
6	Deslizamiento	CDMB	1134298.49	1302514.17
7	Deslizamiento	CDMB	1129356.8	1301842.43
8	Deslizamiento	CDMB	1131398.62	1300262
9	Deslizamiento	CDMB	1132581.08	1301902.45
10	Deslizamiento	CDMB	1133172.41	1300097.69
11	Deslizamiento	CDMB	1130353.38	1301716.63
12	Deslizamiento	CDMB	1128831.8	1301617.51
13	Deslizamiento	DesInv	1133204.54	1301197.34
14	Deslizamiento	SIMMA	1130179.54	1300842.45
15	Deslizamiento	SIMMA	1132820.02	1299519.79
16	Deslizamiento traslacional	Autor	1124766.58	1299466.62
17	Deslizamiento traslacional	Autor	1124841.01	1299379.54
18	Deslizamiento traslacional	Autor	1125132.14	1299360.58
19	Deslizamiento traslacional	Autor	1125614.08	1300659.06
20	Deslizamiento traslacional	Autor	1125682.9	1300949.68
21	Deslizamiento traslacional	Autor	1127313.38	1303627.01
22	Deslizamiento traslacional	Autor	1126625.83	1304045.21
23	Deslizamiento traslacional	Autor	1126732.07	1305820.18
24	Deslizamiento traslacional	Autor	1127332	1303267.93
25	Deslizamiento traslacional	Autor	1128243.07	1302747.09
26	Deslizamiento traslacional	Autor	1129754.34	1305164.83
27	Deslizamiento	CDMB	1129373.06	1302624.16

Punto	Tipo de movimiento	Fuente	X	y
28	Deslizamiento traslacional	Autor	1133448.85	1300577.76
29	Deslizamiento traslacional Suspendido, y caída de rocas	Autor	1126428.09	1304057.96
30	deslizamiento traslacional	Autor	1126433.03	1303896.07
31	deslizamiento traslacional	Autor	1126486.2	1303819.77
32	Deslizamiento traslacional	Campo	1127248.02	1303101.8
33	deslizamiento traslacional	Autor	1133277.04	1300589.43
34	deslizamiento traslacional	Autor	1134333.11	1301034.57
35	Deslizamiento traslacional de detritos	Campo	1126052.86	1304654.6
36	Flujo de detritos	Campo	1131640.25	1300782.94
37	Deslizamiento traslacional	Campo	1133214.17	1301344.45
38	Deslizamiento traslacional de suelo	Campo	1132980.39	1300935.75
39	Deslizamiento traslacional	Campo	1133072.7	1300780.17
40	Flujo de detritos	Campo	1132556.74	1301825.9
41	Caída de rocas	Campo	1132849.66	1300905.97
42	Deslizamiento traslacional de suelo	Campo	1131993.39	1300147.53
43	Flujo de detritos	Campo	1130063.77	1298227.19
44	Flujo de detritos	Campo	1125520.53	1299221.51

Apéndice H. Tablas de membresías y parámetros utilizados en las pruebas realizadas con las herramientas Fuzzy Membership y Fuzzy Overlay (ArcGis 10.4) para el modelado de la susceptibilidad.

Membresía	MSLarge			
Hedge	somewhat			
Prueba	Variables	Overlay tipe		Comentarios
p1	geología, GMF, pendientes,UGS,usos	GAMMA	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe da valores muy alto.
p2	geología, GMF, pendientes,UGS,usos	AND	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe da valores muy bajo.
p3	geología, GMF, pendientes,UGS,usos	OR	ACEPTABLE	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe es amplio, y coincide con el validador, sin embargo solo algunas pruebas pasaron la prueba ROC.
p4	geología, GMF, pendientes,UGS,usos			
p5	geología, GMF, pendientes,UGS,usos			
p6	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI,TWI,UGS,usos			
p7	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI,TWI,usos			
p8	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes,UGS,usos			
p9	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI,TWI,UGS,usos			
p10	geología, GMF, pendientes,UGS,usos,curvatura	PRODUCT	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe no es muy amplio, en su mayoría la susceptibilidad es de media a alta.
p11	geología, GMF, pendientes,UGS,usos,curvatura, SPI			
p12	geología, GMF, pendientes,UGS,usos,curvatura	SUMM	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe da valores muy alto.
p13	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI,TWI,UGS,usos			

Membresía	linear			
Hedge	Somewhat			
Prueba	Variables	Overlay tipe		Comentarios
pp5	GMF, geo, SPI, UGS, usos	SUMM	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe se reduce a valores muy altos.
pp6	GMF, geo, SPI, UGS, usos, TWI			
pp7	GMF, geo, SPI, UGS, usos, TWI, curvatura			
pp8	GMF, geo, SPI, UGS, usos, TWI, curvatura, altura			
pp13	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes	GAMMA	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe se reduce a valores muy bajos.
pp14	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes, SPI			
pp15	altura, cobertura,geología, GMF, pendientes, SPI, TWI			
pp16	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes, SPI, UGS			
pp17	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes, SPI, UGS, usos			
pp18	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes, SPI, UGS, usos, curvatura, TWI	OR	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe se reduce a valores muy altos.
pp11	altura, cobertura,geología, GMF, pendientes			
pp24	altura, cobertura,geología, GMF, pendientes, SPI			
pp25	altura, cobertura,geología, GMF, pendientes, SPI, TWI			
pp29	altura, cobertura, curvatura, geología, GMF	AND	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe se reduce a valores muy bajos.
pp30	altura, cobertura, curvatura, geología, GMF, pendientes			
pp34	altura, cobertura, curvatura, geología, GMF	PRODUCTO	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay tipe se reduce a valores muy bajos.
pp35	altura, cobertura, curvatura, geología, GMF, pendientes			
pp36	altura, cobertura, curvatura, geología, GMF, pendientes,SPI			
pp37	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes,SPI			
pp38	altura, cobertura, curvatura, geología, GMF, pendientes,SPI, TWI			

Membresia	Gaussiana			
Hedge	Somewhat			
Prueba	Variables	Overlay type		Comentarios
p1	GMF y pendientes	SUMM	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type se reduce a valores muy altos.
p2	GMF, pendientes, SPI			
p3	GMF, pendientes, SPI, TWI			
p4	pendIENTES, TWI, SPI			
p5	SPI, TWI, UGS			
P6	curvatura, geologia, altura y cobertura	GAMMA	DESCARTADO	Los movimientos en masa de mayor importancia en la zona de estudio, no son reconocidos en el modelo de susceptibilidad arrojado por el overlay type.
p10	gmf, pendiente, SPI, TWI, UGS			
p11	gmf, pendiente, SPI, TWI, UGS, usos			
p12	gmf, pendiente, SPI, TWI, UGS, usos, geologia			
p13	gmf, pendiente, SPI, TWI, UGS, usos, geologia, cobertura			
p14	gmf, pendiente, SPI, TWI, UGS, usos, geologia, cobertura, curvatura	OR	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type se reduce a valores muy altos.
p15	gmf, pendiente, SPI, TWI, UGS, usos, geologia, cobertura, curvatura, altura			
ppo15	gmf, pendiente, UGS, usos, geologia, cobertura, curvatura, altura			
p20	altura, cobertura, geologia, GMF, pendiente			
p21	altura, cobertura, geologia, GMF, pendiente, SPI			
p22	altura, cobertura, geologia, GMF, pendinete, SPI, TWI, UGS	AND	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type se reduce a valores muy altos.
p26	altura, cobertura, curvatura, geologia, gmf			
p27	gmf, pendiente, SPI, TWI, UGS, usos, geologia, cobertura, curvatura, altura			
p33	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF			
p34	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendiente			
p35	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendiente, spi	PRODUCTO	DESCARTADO	Los movimientos en masa de mayor importancia en la zona de estudio, no son reconocidos en el modelo de susceptibilidad arrojado por el overlay type.
p36	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pend, SPI, TWI			
p37	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pend, SPI, TWI, UGS			
p38	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pend, SPI, TWI, UGS, usos			
P39	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pend, UGS, usos			
Membresia	Large			
Hedge	somewhat			
Prueba	Variables	Overlay type		Comentarios
p1	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos	AND	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type da valores muy alto.
p2	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos	OR	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type da valores muy bajo.
p3	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos	PRODUCTO	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type no es muy amplio, en su mayoria la susceptibilidad es de media a alta.
p4	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos	SUMM	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type da valores muy alto.
p5	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos	GAMMA	ACEPTABLE	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type es amplio, Y coincide con el validador, sin embargo no todas las pruebas pasaron la prueba ROC.
p6	cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p7	cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, WI, UGS, usos			
p8	cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, UGS, usos			
p9	altura, cobertura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, TWI, UGS			
p10	altura, curvatura, geologia, GMF, pendientes, TWI, UGS, usos	PRODUCTO	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type no es muy amplio, en su mayoria la susceptibilidad es de media a alta.
p11	curvatura, geologia, GMF, pendientes, TWI, UGS, usos			
p12	curvatura, geologia, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p13	geologia, GMF, pendientes, UGS, usos			
p14	geologia, GMF, pendientes, UGS, usos, TWI			
p15	geologia, GMF, pendientes, UGS, usos, curvatura			
p16	geologia, GMF, pendientes, UGS, usos, curvatura			
p17	geologia, GMF, pendientes, UGS, usos, curvatura, SPI			
p18	geologia, GMF, pendientes, UGS, usos, curvatura, SPI			
p19	geologia, GMF, pendientes, UGS, usos, curvatura			

Membresía	Near			
Hedge	somewhat			
Prueba	Variables	Overlay type		Comentarios
p6	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI	AND	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type da valores muy alto.
p7	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI			
p8	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS			
p9	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p10	altura, cobertura,curvatura, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p16	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI	OR	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type da valores muy bajo.
p17	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI			
p19	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS			
p18	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p20	altura, cobertura,curvatura, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p25	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos	PRODUCTO	ACEPTABLE	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type es amplio, sin embargo no pasa la prueba ROC.
p26	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI			
p27	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI			
p28	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS			
p30	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p29	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes, UGS, usos	SUMM	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type da valores muy alto.
p31	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p32	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, TWI, UGS, usos			
p33	sin spi			
p39	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI			
p40	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI	GAMMA	ACEPTABLE	El rango de susceptibilidad arrojado por el overlay type es amplio, sin embargo no pasa la prueba ROC.
p41	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS			
p42	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p43	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, UGS, usos			
p44	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, UGS, usos			
p50	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI	OR	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado da valores muy bajo.
p51	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI			
p52	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS			
p53	altura, cobertura,curvatura, geología, GMF, pendientes, SPI, TWI, UGS, usos			
p54	altura, cobertura, geología, GMF, pendientes, UGS, usos			
p56	geología, GMF, pendientes, UGS, usos	AND	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado da valores muy alto.
p57	geología, GMF, usos			
p58	geología, GMF, pendientes, UGS, usos			
p59	geología, GMF, usos			
p60	GMF, pendientes, UGS, usos			
p61	geología, pendientes, UGS, usos	AND	DESCARTADO	El rango de susceptibilidad arrojado da valores muy alto.
p62	geología, pendientes, GMF, altura, usos			
p65	geología, GMF, pendientes, UGS, usos			