ANÁLISIS DE LA AMENAZA A MOVIMIENTOS EN MASA

Análisis de la Amenaza a Movimientos en Masa a partir de la Integración del Método Estadístico Multivariado de Regresión Logística y la Optimización basada en el Algoritmo de Colonia de Hormigas para un área de 12.5 Km^2 del Sector Norte de Bucaramanga - Santander

Wilson Augusto Sandoval Vásquez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director
Joaquín Andrés Valencia Ortiz
M.Sc. Geología Ambiental

Codirector
Wilfredo del Toro Rodríguez
M.Sc. Geotecnia

Tutor
Óscar Fabián Sánchez Ortiz
Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2019

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 1

1 Planteamiento Del Problema 3

2 Justificación 5

3 Objetivos 6

3.1 Objetivo General 6

3.2 Objetivos Específicos 6

4 Localización 7

5 Marco Geológico 7

5.1 Estratigrafía 7

5.2 Geología Estructural 10

5.3 Evolución Geológica Del Área De Bucaramanga 12

6 Marco Teórico 14

6.1 Susceptibilidad A Movimientos En Masa 14

6.1.1 Movimientos En Masa 14

6.1.2 Regresión Logística Binaria Múltiple 18

6.1.3 Algoritmo De Colonia De Hormigas 19

6.2 Amenaza A Movimientos En Masa 22

6.2.1 Detonante Sismo 22

6.2.2 Detonante Lluvia 23

6.2.3 Cálculo De La Amenaza 23

7 Metodología 24

7.1 Recopilación Y Revisión Bibliográfica. 25

7.1.1 Regresión Logística 25

7.1.2 Optimización Por Colonia De Hormigas 26

7.2 Procesamiento Digital De Información. 28

7.2.1 Factores Condicionantes Para Construcción Del Modelo De Susceptibilidad 28

7.3 Correlación Y Aplicación Método De Regresión Logística Y El Algoritmo De Optimización Por Colonia De Hormigas. 40

7.3.1 Aplicación Del Modelo De Regresión Logística (Rl) 41

7.3.2 Integración Del Algoritmo De Optimización Por Colonia De Hormigas 46

7.4 Validación De Resultados. 48

7.5 Generación Mapa De Amenaza 49

7.5.1 Detonante Sísmico: 50

7.5.2 Detonante Climático 52

7.6 Trabajo De Campo. 54

8 Resultados 58

8.1 Susceptibilidad 58

8.1.1 Resultados De Las Pruebas De Validación 59

8.1.2 Análisis De La Susceptibilidad A Movimientos En Masa 61

8.2 Amenaza 63

8.2.1 Detonante Sismo 63

8.2.2 Detonante Lluvia 64

8.2.3 Mapa De Amenaza A Movimientos En Masa 66

8.2.4 Amenaza Baja 67

8.2.5 Amenaza Media 67

8.2.6 Amenaza Alta 68

8.2.7 Amenaza Muy Alta 68

8.2.8 Amenaza En Zonas De Expansión Urbana 69

9 Conclusiones 71

10 Recomendaciones 73

Referncias Bibliográficas 74

APÉNDICE A. Mapa Geológico a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga. 83

APÉNDICE B. Mapa Geomorfológico a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga. 84

APÉNDICE C. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga. 85

APÉNDICE D. Mapa de Amenaza a Movimientos en Masa a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga. 86

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio..... 7
Figura 2. Marco estructural regional de la zona de estudio 10
Figura 3. Interpretación fotogeológica preliminar del área metropolitana de Bucaramanga . 11
Figura 4. Evolución geológica del área de Bucaramanga..... 12
Figura 5. Clasificación de movimientos en masa 15
Figura 6. Ilustración del comportamiento de las hormigas..... 20
Figura 8. Esquema metodológico aplicado al trabajo de investigación..... 24
Figura 9. Línea de tiempo con la evolución de las aplicaciones de la RL..... 26
Figura 10. Línea de tiempo con la evolución de las aplicaciones del algoritmo OCH..... 28
Figura 11. Mapa geológico a escala 1:10.000 del área de estudio..... 29
Figura 12. Mapa de unidades morfogenéticas a escala 1:10.000 del área de estudio..... 30
Figura 13. Distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos del área de estudio..... 31
Figura 14. Mapas de atributos morfométricos 35
Figura 15. Inventario de movimientos en masa para la región de estudio..... 37
Figura 16. Mapa de Usos del Suelo para la zona de estudio 38
Figura 17. Mapa de Coberturas de la Tierra para la zona de estudio 39
Figura 18. Mapa de Unidades Geológicas superficiales del área de estudio..... 40
Figura 19. Conjunto de datos de variables y su configuración..... 41
Figura 20. Correlación de los parámetros de la OCH y la RL..... 46
Figura 21. Matrices de procesamiento de la OCH..... 47
Figura 22. Aceleración máxima horizontal a nivel de roca-PGA para Colombia 50
Figura 23. Mapa de Amenaza Sísmica para el departamento de Santander 51
Figura 24. Contexto regional del régimen de precipitación media anual 52
Figura 25. Distribución espacial y registro histórico de estaciones meteorológicas 53
Figura 26. Panorámica desde el sector posterior de la planta de Bavaria..... 54
Figura 27. Deslizamiento rotacional..... 54
Figura 28. Deslizamiento progresivo..... 55
Figura 29. Estructura de contención sobre laderas inestables 55

Figura 30. Afloramiento de agua subterránea en el área de estudio 56
Figura 31. Panorámica del sector norte de Bucaramanga desde el Sur 56
Figura 32. Panorámica de del sector norte de Bucaramanga desde el Noreste 56
Figura 33. Panorámica hacia el suroeste del área de estudio 57
Figura 34. Afloramiento de depósito no consolidado sobre la vía Bucaramanga–Rionegro . 57
Figura 35. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa del sector norte 58
Figura 36. Distribución espacial de la susceptibilidad a movimientos en masa. 59
Figura 37. Gráfica de la Curva ROC para el mapa final de susceptibilidad 60
Figura 38. Porcentaje de predicción de Choi 60
Figura 39. Detonante sísmico 63
Figura 40. Curva de aceleración máxima del terreno para Bucaramanga 64
Figura 41. Detonante climático 65
Figura 42. Mapa de amenaza a movimientos en masa del sector 66
Figura 43. Distribución espacial de la amenaza por movimientos en masa. 67
Figura 44. Amenaza por movimientos en masa para la zona de expansión urbana 69

Lista de Tablas

Pág.
Tabla 1. Síntesis de las unidades estratigráficas aflorantes en el área de estudio. 8
Tabla 2. Clasificación de Varnes (1978) 16
Tabla 3. Geoformas del ambiente denudacional y su distribución en el área de estudio 31
Tabla 4. Geoformas del ambiente antrópico y su distribución en el área de estudio 32
Tabla 5. Geoformas del ambiente fluvial y su distribución en el área de estudio. 33
Tabla 6. Geoformas del ambiente estructural y su distribución en el área de estudio 33
Tabla 7. Pruebas elegidas del procesamiento de la RL 45
Tabla 8. Resultados de la RL para el mapa de susceptibilidad final 59

Lista de Apéndices

Pág.

APÉNDICE A. Mapa Geológico a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga. 83

APÉNDICE B. Mapa Geomorfológico a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga. 84

APÉNDICE C. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga. 85

APÉNDICE D. Mapa de Amenaza a Movimientos en Masa a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga. 86

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA AMENAZA A MOVIMIENTOS EN MASA A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DEL MÉTODO ESTADÍSTICO MULTIVARIADO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA Y LA OPTIMIZACIÓN BASADA EN EL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS PARA UN ÁREA DE 12.5 KM^2 DEL SECTOR NORTE DE BUCARAMANGA – SANTANDER[1]*

AUTOR: WILSON AUGUSTO SANDOVAL VÁSQUEZ[2]**

PALABRAS CLAVE: MOVIMIENTOS EN MASA, REGRESIÓN LOGÍSTICA, OPTIMIZACIÓN POR COLONIA DE HORMIGAS, AMENAZA.

DESCRIPCIÓN:

Los movimientos en masa se consideran como los procesos geológicos más destructivos, además generan impacto negativo mayor que cualquier otro tipo de desastre natural, siendo de los más peligrosos y llegando a producir grandes pérdidas económicas e incluso muertes.

En el municipio de Bucaramanga se han registrado múltiples emergencias relacionadas con estos eventos. Para reducir su impacto, es necesario contar con información técnica que puede obtenerse mediante distintas metodologías, aptas para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza. Uno de estos métodos es la **R**egresión **L**ogística (**RL**), que se ha posesionado como una de las técnicas estadísticas más versátiles para el análisis de gran cantidad de datos. Y el método de **O**ptimización por **C**olonia de **H**ormigas, (**OCH**), técnica de inteligencia artificial inspirada en el comportamiento de alimentación de las hormigas, para la solución de problemas de optimización, ha sido implementado eficientemente en diversas áreas del conocimiento, asimismo evidencia un gran potencial dentro del campo análisis de la ocurrencia de movimientos en masa.

La implementación de estos métodos produjo que la interacción de OCH y RL proveyeran la solución óptima al problema planteado, es decir, se obtuvo como resultado un modelo de susceptibilidad a movimientos es masa, que refleja las condiciones reales de la zona. Tras la integración de los detonantes sismo y lluvia, fue posible obtener la distribución espacial de la amenaza a movimientos en masa para la zona, identificando que el 29% del área presenta una alta probabilidad de ocurrencia de estos eventos, en donde el casco urbano en este sector es el principal afectado. También se determinó que la zona definida como suelos de expansión no se encuentra totalmente estable, desde el punto de vista de la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, pues el 34% de ella se encuentra clasificada dentro del rango de amenaza alta.

[1*] Trabajo de grado

[2] **Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Geólogo M. Sc.

ABSTRACT

TITLE: MASS MOVEMENT HAZARD ANALYSIS FROM THE INTEGRATION OF THE MULTIVARIATE STATISTICAL METHOD OF LOGISTIC REGRESSION AND THE OPTIMIZATION BASED ON THE ALGORITHM OF ANT COLONY FOR AN AREA OF 12.5 KM^2 IN THE NORTHERN SECTOR OF BUCARAMANGA – SANTANDER[1]*

AUTHOR: WILSON AUGUSTO SANDOVAL VÁSQUEZ[2]**

KEYWORDS: MASS MOVEMENT, LOGISTIC REGRESSION, ANT COLONY OPTIMIZATION, HAZARD.

DESCRIPTION:

Mass movements are considered as one of the most destructive geological processes, they also generate a negative impact greater than any other type of natural disaster, being one of the most dangerous and leading to great economic losses and even deaths.

In Bucaramanga there have been multiple emergencies related to mass movement events. To reduce its impact, it is necessary to have technical information that can be obtained through different methodologies, suitable for the evaluation of susceptibility and threat to mass movements. One of these methods is the **L**ogistic **R**egression (**LR**), which has become one of the most versatile statistical techniques for analyzing a large amount of data. And the method of **A**nt **C**olony **O**ptimization, (**ACO**), artificial intelligence technique inspired by the feeding behavior of the ants, for the solution of optimization problems, has been implemented efficiently in diverse areas of knowledge, also evidences a great potential within the field analysis of the occurrence of mass movements.

The implementation of these two methods produced that the interaction of the OCH on the methodological scheme of the RL provided the optimal solution to the problem posed, that is, a result of a model susceptibility, which reflects the real conditions of the area. After the integration of the seismic and rain triggers to the susceptibility model, it was possible to obtain the spatial distribution of the threat to mass movements for the area, identifying in this way that 29% of the area presents a high probability of occurrence of these events, where the urban area in this sector is the main affected. It was also determined that the area defined as expansion soils is not completely stable, from the point of view of the probability of occurrence of mass movements, since 34% of it is classified within the high threat range.

[1*] Bachelor thesis

[2**]Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Geólogo M. Sc.

Introducción

Colombia se encuentra localizada geográficamente en la esquina noroccidental de Suramérica, presentando gran complejidad geológica como resultado de la interacción de tres placas tectónicas principales: Suramericana, Nazca y Caribe (Cediel *et al.*, 2003). La interacción de estas tres placas hace que el territorio colombiano esté caracterizado por la presencia de cadenas montañosas jóvenes, separadas por valles interandinos, cuya dinámica favorece la ocurrencia de diversos fenómenos naturales, tales como sismos, erupciones volcánicas y movimientos en masa. Estos últimos comúnmente conocidos como deslizamientos, a pesar de constituir únicamente un tipo de movimiento en masa, son potenciados por lluvias intensas, pendientes fuertes, materiales fracturados y meteorizados y en muchas ocasiones por el uso inadecuado del territorio. En la primera década de este siglo hubo mayor impacto negativo por movimientos en masa en Colombia que en los treinta años anteriores (Banco Mundial, 2012). Esto debido al aumento de la exposición de la población vulnerable, a la intervención humana sobre el territorio y al consecuente deterioro ambiental. Estos se presentan principalmente en la región andina, en donde se encuentran las principales ciudades y se asienta más del 70% de la población colombiana (**S**ervicio **G**eológico **C**olombiano [**SGC**], 2015).

El departamento de Santander se ha mantenido como uno de los principales focos de estos procesos. Específicamente hacia el norte de Bucaramanga, la capital del departamento, se han venido presentando procesos de desestabilización de laderas que han afectado de manera importante aspectos sociales y económicos de la región, llegando incluso a comprometer la integridad física de sus habitantes (INGEOMINAS, 2001). Este sector es de gran importancia ya que ha venido convirtiéndose en parte de las zonas de expansión urbana del municipio, con áreas aptas para el desarrollo de proyectos de infraestructura de diversos tipos, principalmente comercial y residencial. No obstante, el terreno presenta cierto grado de complejidad, el cual debe tenerse en cuenta para contrarrestar y evitar posibles desastres.

Los movimientos en masa se definen como todos aquellos movimientos que se presentan ladera debajo de una masa de roca, detritos o tierras por efectos de la gravedad u otros factores detonantes o contribuyentes (SGC, 2013). Estos procesos pueden afectar el desarrollo normal de las actividades de las regiones, generando grandes pérdidas en la infraestructura y en los

sectores económico, social y ambiental. Adicionalmente, se entiende por amenaza el evento físico potencialmente perjudicial, fenómeno o actividad humana que puede causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental (SGC, 2015). La génesis de los movimientos en masa obedece a la combinación de gran diversidad de procesos tanto de origen geológico como hidrometeorológico, químico y mecánico, entre otros, es por ello que el estudio, el análisis y la evaluación de la amenaza por estos procesos involucra la integración de varias disciplinas de las ciencias de la Tierra y del medio ambiente.

Para reducir el impacto generado por los movimientos en masa, es necesario contar con información técnica de estos, la cual se puede generar a diferentes escalas. Esta información puede obtenerse mediante distintas metodologías, aptas para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa, que son complementarias para una fase posterior en donde se combinan con la vulnerabilidad y la exposición dando lugar a la evaluación final del riesgo por movimientos en masa y cualquier fenómeno natural, de forma generalizada (UNDRO, 1979). Sin embargo, dentro de los alcances de este proyecto de investigación se plantea la evaluación y análisis de la amenaza a movimientos en masa, siendo esto un gran avance y punto de partida para los diversos estudios que puedan generarse después, tanto en la zona de estudio como en otros lugares del territorio.

La selección del método de evaluación más adecuado depende de varios factores como: disponibilidad, calidad y exactitud de los datos, la resolución espacial, los resultados requeridos, la escala de trabajo, etc. Los métodos relativos y los procedimientos han sido clasificados en términos heurísticos, estadísticos, determinísticos y estocásticos (Soeters & Van Westen, 1996). Las técnicas de análisis estadístico permiten la creación de una cartografía de la susceptibilidad con base en valores de probabilidad. Uno de estos métodos es la **R**egresión **L**ogística (**RL**), perteneciente a la rama de análisis multivariados, la cual se ha posesionado como una de las técnicas más versátiles para el análisis de gran cantidad de datos. De forma similar, los métodos estocásticos están basados en variables tomadas como datos al azar, que se relacionan entre ellas con funciones probabilísticas (SGC, 2013). Este tipo de metodologías usan herramientas novedosas para su desarrollo. Específicamente el método de **O**ptimización por **C**olonia de **H**ormigas, (**OCH**) que se introdujo como una nueva técnica de

inteligencia artificial inspirada en el comportamiento de alimentación de las hormigas reales, para la solución de los problemas de optimización combinatoria (Dorigo & Blum, 2005). OCH ha sido implementado eficientemente en diversas áreas del conocimiento a lo largo de su historia, asimismo evidencia un gran potencial dentro del campo análisis de los movimientos en masa y la evaluación de su respectiva amenaza en combinación con otros métodos, debido a su fuerte robustez, adaptabilidad y mecanismos de retroalimentación positiva, que ocasionan que este algoritmo pueda descubrir rápidamente las soluciones óptimas (Lai *et al.*, 2016). Debido a las potenciales ventajas que ofrecen la RL y la OCH, la implementación de estos dos métodos para el presente trabajo de investigación, en donde la interacción de la OCH sobre el esquema metodológico de la regresión logística provee la solución óptima al problema planteado, es decir, se obtiene como resultado una cartografía de la susceptibilidad a movimientos es masa, que refleja de manera más fiel las condiciones reales de la zona. Una vez se elabora el mapa de susceptibilidad para la zona y con la integración de los detonantes sismo y lluvia, calculados mediante funciones estadísticas asociadas a los datos del registro histórico para cada uno de ellos, se obtiene una cartografía de la amenaza a movimientos en masa para la región de estudio, a través de una matriz de jerarquía (SGC, 2013). Finalmente, se realiza un análisis de la distribución espacial de estos eventos, haciendo énfasis en la zona delimitada como suelo de expansión urbana del municipio (Alcaldía de Bucaramanga, 2013).

1 Planteamiento del Problema

A nivel mundial, se vienen presentando diversos factores que han aumentado el impacto de desastres naturales recurrentes, tales como las inundaciones y los movimientos en masa. Estos últimos se consideran como uno de los procesos geológicos más destructivos. Aunque los movimientos en masa pueden enmarcarse en los mecanismos denudativos que modelan la superficie terrestre, generan un impacto negativo mayor que cualquier otro tipo de desastre natural, siendo uno de los más peligrosos y llegando a producir grandes pérdidas económicas e incluso muertes (Guzzetti *et al.*, 1999). Colombia debido a que se encuentra ubicada geográficamente en una zona tropical y a sus características geológicas, climatológicas y topográficas, reúne elementos cruciales para la ocurrencia de movimientos en masa, los cuales generan un incremento considerable en su frecuencia e incluso los potencian. En adición,

pueden considerarse los cambios en la resistencia de los suelos producto de factores antrópicos, dentro de los que resaltan la sobrecarga y la excavación del pie de una ladera. En este país, los movimientos en masa se presentan principalmente en la región Andina y hacia el nororiente de esta, sobre el departamento de Santander, se han presentado procesos de desestabilización de laderas de gran incidencia, y la ciudad de Bucaramanga no ha sido la excepción. Ésta se enmarca en un bloque de gran complejidad e influencia tectónica (Velandia & Bermúdez, 2018), lo cual ejerce un fuerte control en estos fenómenos.

A lo largo de la historia del municipio se han registrado múltiples emergencias relacionadas con eventos de movimientos en masa. De acuerdo con la información existente en el **S**istema de **I**nformación de **M**ovimientos en **Ma**sa (**SIMMA**) del SGC, se tiene registro de 162 movimientos en masa. Específicamente, en el sector norte, durante los 80's se registraron importantes eventos de inestabilidad. Posteriormente, en los 90's los problemas relacionados con movimientos en masa en el sector norte aumentaron considerablemente, dejando más de 5 barrios gravemente afectados y cientos de familias afectadas (INGEOMINAS, 2001). Actualmente, allí siguen imperando estos procesos.

La ciudad ha tenido un gran crecimiento económico en los últimos años (Alcaldía de Bucaramanga, 2015), conllevando al incremento acelerado de población y la reducción de áreas idóneas para la construcción. En consecuencia, comúnmente se presentan asentamientos humanos en zonas no aptas para urbanización, en especial dentro del sector norte. Esta ocupación desordenada tiene influencia directa en la ocurrencia de los movimientos en masa (Suárez, 1998).

Ante la problemática generada por este fenómeno natural en el área de estudio y ya que ésta hace parte de las zonas de expansión urbana de la capital Santandereana, se considera pertinente la realización de un estudio más detallado sobre el sector norte de Bucaramanga que muestre las condiciones actuales de susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa a escala 1:10.000, con el fin de generar insumos indispensables para el diseño e implementación futura de un plan de prevención y/o mitigación de este tipo de eventos.

2 Justificación

El desarrollo de esta investigación contribuirá a la creación y evaluación de un modelo con un mayor grado de confianza, en lo que respecta a la amenaza a movimientos en masa, implementando una metodología de inteligencia artificial que ha obtenido resultados eficientes en diferentes áreas del saber (Shekhawat *et al.*, 2009). Aportando de esta manera el conocimiento geocientífico a temas de aplicación dentro del ámbito social y económico de la región. Teniendo en cuenta además que, de acuerdo con la Ley 1523 de 2012 y en cumplimiento del Decreto 1807 de 2014, en todos los municipios del país se deben realizar estudios de riesgos de desastres naturales como un proceso social para la reducción y manejo de desastres a partir de la planificación, con el propósito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida y el desarrollo sostenible del país. Estructurando de esta manera un modelo territorial que articule los sistemas organizacionales del municipio con el uso, el aprovechamiento y el potencial del suelo. El cual establezca mecanismos que permitan al municipio determinar las zonas no urbanizables y promover el ordenamiento de su territorio, el uso equitativo y racional del suelo, la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes (Alcaldía de Bucaramanga, 2013).

A pesar de que en el casco urbano del municipio de Bucaramanga el suelo apto para expansión urbana es escaso, la zona norte es una buena opción en cuanto al espacio territorial. Sin embargo, en algunos sectores, las características geológicas, geotécnicas y morfológicas no garantizan la estabilidad de proyectos de desarrollo urbano. Esto quiere decir que, si no se cuenta con la información suficiente sobre el terreno previamente, cualquier obra de infraestructura que se localice allí, tendrá una gran probabilidad de ser afectada por estos procesos. Poniendo en grave peligro la integridad física de sus habitantes y degradando su calidad de vida.

En este orden de ideas, se evidencia una falencia de estudios a mayor detalle al respecto. Para reducir y prevenir los impactos negativos generados por los movimientos en masa se requiere información técnico-científica de los mismos, teniendo en cuenta además que su zonificación debe ser una prioridad ante un escenario tan propenso a este tipo de procesos, es por ello que este estudio se encamina principalmente a determinar y evaluar la distribución

espacial de la amenaza a movimientos en masa a escala 1:10.000 de un área del sector norte de Bucaramanga, la cual conforma parte importante de las áreas de expansión urbana del municipio, logrando de esta manera suministrar una herramienta base al sistema de planificación futura del mismo, e incorporarla específicamente al ordenamiento del territorio, priorizando inversiones y proyectos a ejecutar, además de reducir la afectación por ese tipo eventos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar la condición de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:10.000 con base en la integración del algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas al método de Regresión Logística y evaluar, mediante la adición de factores detonantes (lluvia y sismo), la amenaza a movimientos en masa dentro de un área de 12.5 Km^2 en el sector norte y zonas de expansión urbana de Bucaramanga.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de las unidades geológicas a escala 1:10.000 en el área del proyecto.
- Crear y analizar los componentes morfogenéticos, morfométricos y morfodinámicos para el área de estudio.
- Elaborar un inventario actualizado de los movimientos en masa presentes en la zona a partir de la recopilación bibliográfica, fotointerpretación y el control de campo.
- Implementar la técnica de Optimización por Colonia de Hormigas y el análisis de la Regresión Logística para generar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa.
- Crear los factores detonantes para la región de estudio (Detonante lluvia y Detonante sismo).
- Generar el mapa de Amenaza a movimientos en masa a partir de los factores detonantes en el área de estudio.
- Analizar la Amenaza a movimientos en masa en las zonas de expansión urbana del municipio.

4 Localización

La zona de estudio comprende un área de 12.5 Km^2 del sector norte del municipio de Bucaramanga, Santander, hacia el nororiente del territorio colombiano (Figura 1). Perteneciente a la zona Andina, sobre la Cordillera Oriental, presenta un relieve accidentado con alturas relativas en el rango de 595 a 1133 m.s.n.m. y laderas con pendientes entre los 0 y 62°.Localmente se enmarca en un bloque de gran complejidad e influencia tectónica (INGEOMINAS, 2001).

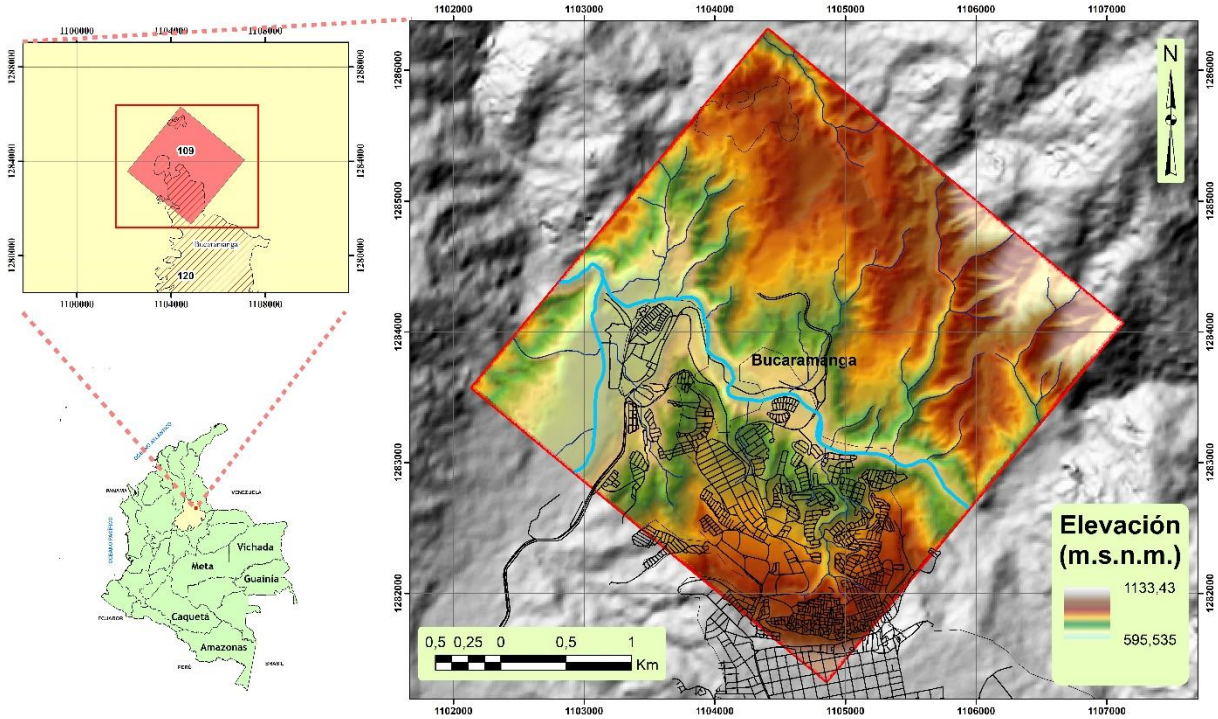


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

5 Marco Geológico

5.1 Estratigrafía

La zona de estudio comprende una amplia gama de rocas de diferentes edades y composiciones que van desde el Precámbrico hasta el Cuaternario, siendo estás últimas las más representativas (Tabla 1). Las unidades ígneo-metamórficas del Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita forman parte del basamento cristalino, además de las Formaciones Floresta, Diamante, Tiburón, Bocas y Girón (Royero & Clavijo, 2001; Diederix *et al.*, 2009) que infrayacen a la reciente Formación Bucaramanga de edad cuaternaria, la cual se subdivide en cuatro miembros, dispuestos

de base a techo en los miembros Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos, respectivamente. Asimismo, se presentan depósitos no consolidados mucho más recientes, en los que se destacan el Segmento Órganos Removido, Flujos de escombros, Depósitos Coluviales, Aluviales, Fluviales, de Terrazas, de laderas e incluso Rellenos de origen antrópico (Clavijo & Vargas, 2017).

Tabla 1. Síntesis de las unidades estratigráficas aflorantes en el área de estudio. Modificada de Clavijo & Vargas (2017).

Era	Periodo	Unidad	Descripción
Cenozoico	Cuaternario	Rellenos Antrópicos (**Qra**)	Intercalaciones de escombros y materiales de construcción mecanizados, basuras y desechos orgánicos con niveles arenosos y arcillosos compactos.
		Depósito Coluvial (**Qc**)	Depósitos de materiales de diversos tamaños englobados en una matriz arenosa de litología heterogénea, formas angulares a subangulares distribuidas en forma caótica, sin selección ni estratificación aparente, con regular a pobre consolidación, a lo largo de laderas producto de la acción de eventos hidrogravitatorios.
		Depósito Fluvial por Decantación (**Qfd**)	Depósitos de gravas y arenas en una matriz areno-lodosa producto de la decantación de materiales a lo largo de los cauces de ríos. Las gravas presentan clastos desde tamaño guijos hasta bloques de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.
		Deslizamiento (**Qdl**)	Zona de deslizamiento principal donde se observa reptación, grietas, hundimiento del terreno.
		Depósito de Ladera (**Ql**)	Depósitos de color amarillo claro a rojizo, con cantos y bloques de conglomerados y areniscas cuarzofeldespáticas subangulares en matriz areno-arcillosa.
		Depósito Aluvial Reciente (**Qal2**)	Bloques y cantos redondeados a subredondeados de lodolitas, conglomerados, calizas, esquistos y granito en matriz arenosa.
		Depósito Aluvial Antiguo (**Qal1**)	Cantos de areniscas silíceas, conglomerados, cuarcitas y lodolitas, granito, granodiorita y gabro, neis y esquistos en matriz areno-lodosa.
		Depósitos de Terraza aluvial (**Qt**)	Depósitos de cantos redondeados a subredondeados de areniscas cuarzosas y resistentes, guijos ígneos y metamórficos, areniscas violáceas y fragmentos de cuarzo lechoso, en matriz areno-arcillosa.
		Flujos de Escombros (**Qfe**)	Flujos de escombros constituidos en su mayoría por fragmentos tamaño grava y bloques de la Formación Girón, además de la predominancia de bloques de rocas ígneas y metamórficas. Espesor mayor a 3 metros.

Era	Periodo	Unidad	Descripción	
		Segmento Órganos Removido (**Qbor**)	Depósito compuesto de gravas guijosas con matriz limo-arenosa parcialmente lavadas. Producto de la erosión del Miembro Órganos.	
		Formación Bucaramanga	Miembro Limos Rojos (**Qblr**)	Arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos amarillentos y naranjas. Existen esporádicos bloques angulares grandes de areniscas relacionadas principalmente con este miembro.
			Miembro Gravoso (**Qbg**)	Depósito fluviotorrencial con niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Cantos esporádicos de bloques angulares grandes de arenisca, asociados superficialmente a este miembro.
			Miembro Órganos (**Qbo**)	Depósito fluvio torrencial compuesto por una serie monótona de fragmentos gruesos polimícticos, de aspecto conglomerático, en alternancia con capas y lentes limo-arenosos, con variaciones laterales en composición y textura.
Mesozoico	Jurásico	Formación Girón (**Jg**)	Areniscas de grano medio-grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaiones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta, grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm.	
		Formación Bocas (**TRb**)	Alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas, gris verdosas y gris oscuras, limolitas gris verdosas, con nódulos calcáreos, conglomerados gris verdosos y arcillolitas gris oscuras, fosilíferas, limolitas gris verdosas a rojo grisáceas, levemente calcáreas. Hacia la parte superior se encuentran capas delgadas de rocas volcánicas.	
		Cuarzomonzonita (**JTRcg**)	Cuarzomonzonita de grano grueso, biotítica, inequigranular, rosada, naranja y gris, con textura hipidiomórfica y granito rosado pálido.	
	Triásico	Formación Tiburón (**TRPt**)	Conglomerados calcáreos, líticos granosoportados con fragmentos de guijos y guijarros de calizas predominantemente, subredondeados a subangulares y en menor proporción fragmentos de areniscas, cherts y rocas volcánicas, dentro de una matriz arenoso-calcárea, de color gris y de grano fino.	
Paleozoico	Pérmico			
	Carbonífero	Formación Diamante (**PCd**)	Arenisca gris púrpura de grano fino, medio y localmente de grano grueso a conglomerático; una parte media con lodolita gris oscura e intercalaciones de caliza del mismo color, y hacia la parte superior se conforma de caliza gris oscura, ligeramente arcillosa con delgadas intercalaciones de arcillolitas y areniscas grises a rojo grisáceas.	
	Devónico	Formación Floresta (**Df**)	Rocas de grano fino, arcillolitas negras y areniscas multicolores, con intercalaciones de arcillolitas ocres, violetas, gris amarillentas y amarillo rojizas, con niveles fosilíferos y areniscas gris oscuras.	
Neo - proterozoico		Neis de Bucaramanga (**pEb**)	Paraneises cuarzofeldespáticos, hornbléndicos, micáceos y granatíferos y cantidades subordinadas de anfibolitas, migmatitas, cuarcitas, mármoles y esporádicamente granulitas.	

5.2 Geología Estructural

De forma general, el departamento de Santander se encuentra localizado en una región tectónica compleja y dinámica, que representa a una zona de influencia entre los límites de placas tectónicas del Caribe y la Suramericana, conocida como bloque Andes del Norte o bloque Norandino (Kellogg, 1984; Case *et al.*, 1984; Kellogg *et al.*, 1985; Royero & Clavijo, 2001).

El área de estudio se encuentra enmarcada estructuralmente en la zona de influencia de dos sistemas de fallas de gran envergadura, el Sistema de Fallas de Bucaramanga – Santa Marta al Este y el Sistema de Fallas de Suárez – Río de Oro al Oeste, los cuales convergen hacia el norte del municipio de Bucaramanga (Figura 2).

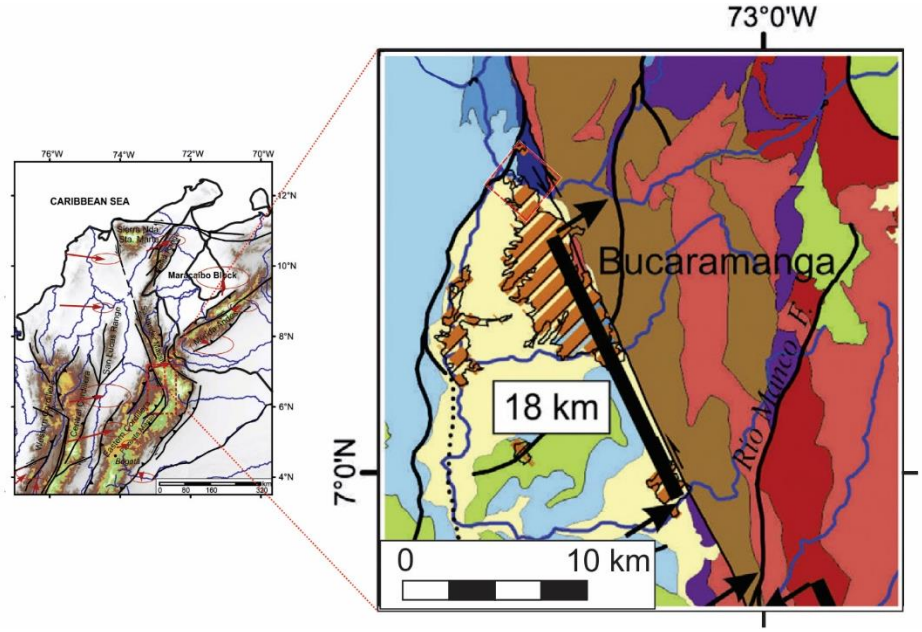


Figura 2. Marco estructural regional de la zona de estudio. Modificado de Velandia & Bermúdez, (2018).

La Falla de Bucaramanga es una estructura de deslizamiento regional en el centro de la Cordillera Oriental y se considera el límite occidental del Bloque de Maracaibo y el Macizo de Santander (Velandia & Bermúdez, 2018). Su desplazamiento lateral izquierdo está asociado con tectónica de escape en los modelos que muestran el desplazamiento del Bloque Maracaibo al NW debido a la relación entre las placas Sudamericana y Caribe, incluido el Bloque Chocó-Panamá (Galvis *et al.*, 2014). La mayoría de sus estructuras tienen una dirección preferencial N-NW y una cinemática de rumbo sinestral y con un desplazamiento menor a 45 km el cual es amortiguado hacia el sur por fallas inversas de bajo ángulo (cabalgamiento) como las fallas de Boyacá y Soapagá (Toro, 1990). Existen dos hipótesis en cuanto a la edad para la Falla de Bucaramanga,

una la considera del Paleógeno (Young *et al.*, 1956; Tschanz *et al.*, 1974; Montes *et al.*, 2009) y la otra del Neogéno (Campbell, 1968; Duque-Caro, 1980; Boinet *et al.*, 1989;Paris *et al.*, 2000).

Adicionalmente, la actividad neotectónica de la Falla de Bucaramanga como una estructura de rumbo sinestral ha sido bien documentada (París & Romero, 1994; INGEOMINAS, 1997; Paris *et al.*, 2000; Diederix *et al.*, 2009; Veloza *et al.*, 2012; Jiménez *et al.*, 2015), dentro del área de estudio se identifican varios segmentos de ella (B1, B2, B3 y B4), Estas estructuras de dirección general N-NW han sido identificadas en los registros sísmicos y resultan necesarias para poder explicar los desplazamientos relativos del contacto entre los segmentos Órganos Inferior y Superior, Se presentan allí incluso, una serie de fallas paralelas transversales (TN2, TN2', TN2-3 y TN3) que atraviesan la zona; estas estructuras de dirección general W-NE identificadas en análisis fotogeológicos (Figura 3) presentan un movimiento de rumbo con un importante desplazamiento vertical del bloque sur de hasta 50 metros en el contacto de los segmentos Órganos Inferior y Superior (Niño & Vargas, 1992; Clavijo & Vargas, 2017). En los afloramientos de tectónica reciente el corredor de deformaciones asociadas a estas fallas es del orden de 30 metros y afectan a los segmentos del Miembro Órganos.

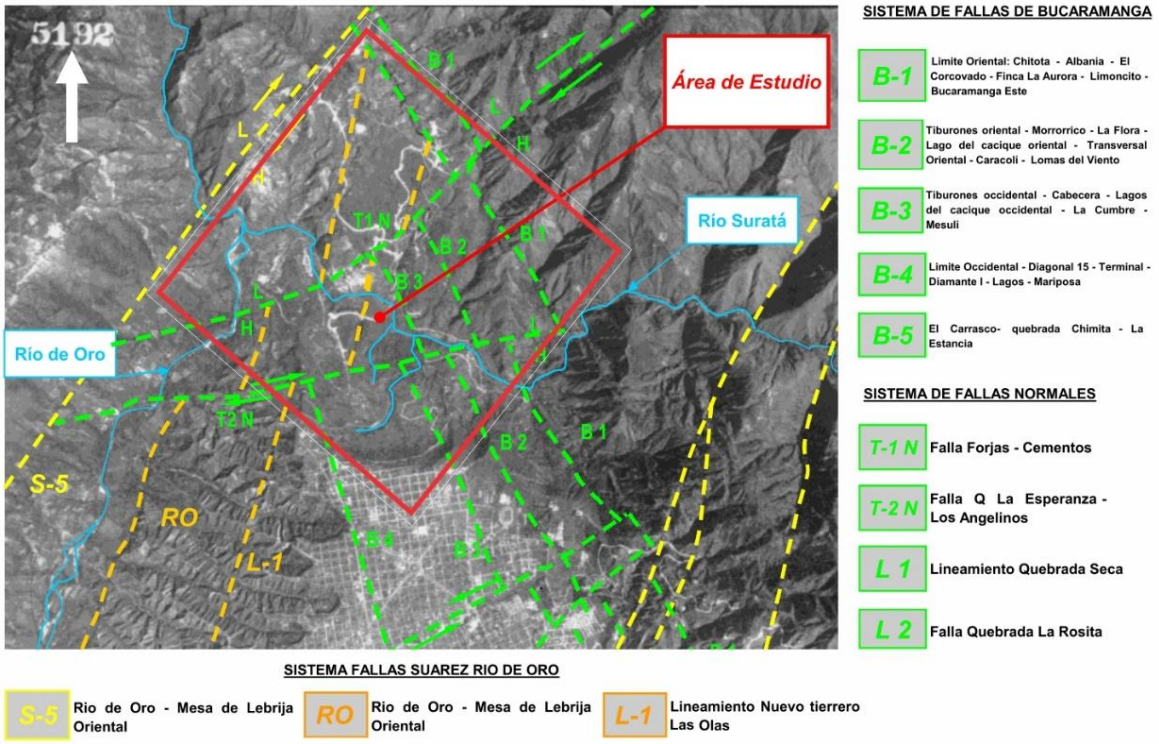


Figura 3. Interpretación fotogeológica preliminar sobre el área metropolitana de Bucaramanga con detalle de la zona de estudio. Modificada de Clavijo & Vargas (2017).

Por otro lado, el Sistema de Fallas del Suárez – Río de Oro se extiende por una longitud de aproximadamente 120 km hasta confluir con la Falla de Bucaramanga 5 km al norte de la capital santandereana, su trazo tiene una dirección N25°E, con inclinación al occidente y sigue el curso de los ríos Suárez y de Oro. Es una falla inversa de alto ángulo con un importante componente de rumbo (Royero & Clavijo, 2001). En el área de estudio, este sistema de fallas afecta en baja proporción las rocas aflorantes.

5.3 Evolución Geológica del Área de Bucaramanga

En su etapa más reciente, la evolución geológica de esta zona comprende seis fases (Clavijo & Vargas, 2017).en donde predominan lapsos de deformación, con una marcada incidencia del sistema de Fallas de Bucaramanga, y depositación de material de diversas fuentes asociado a eventos fluvio-torrenciales (Figura 4).

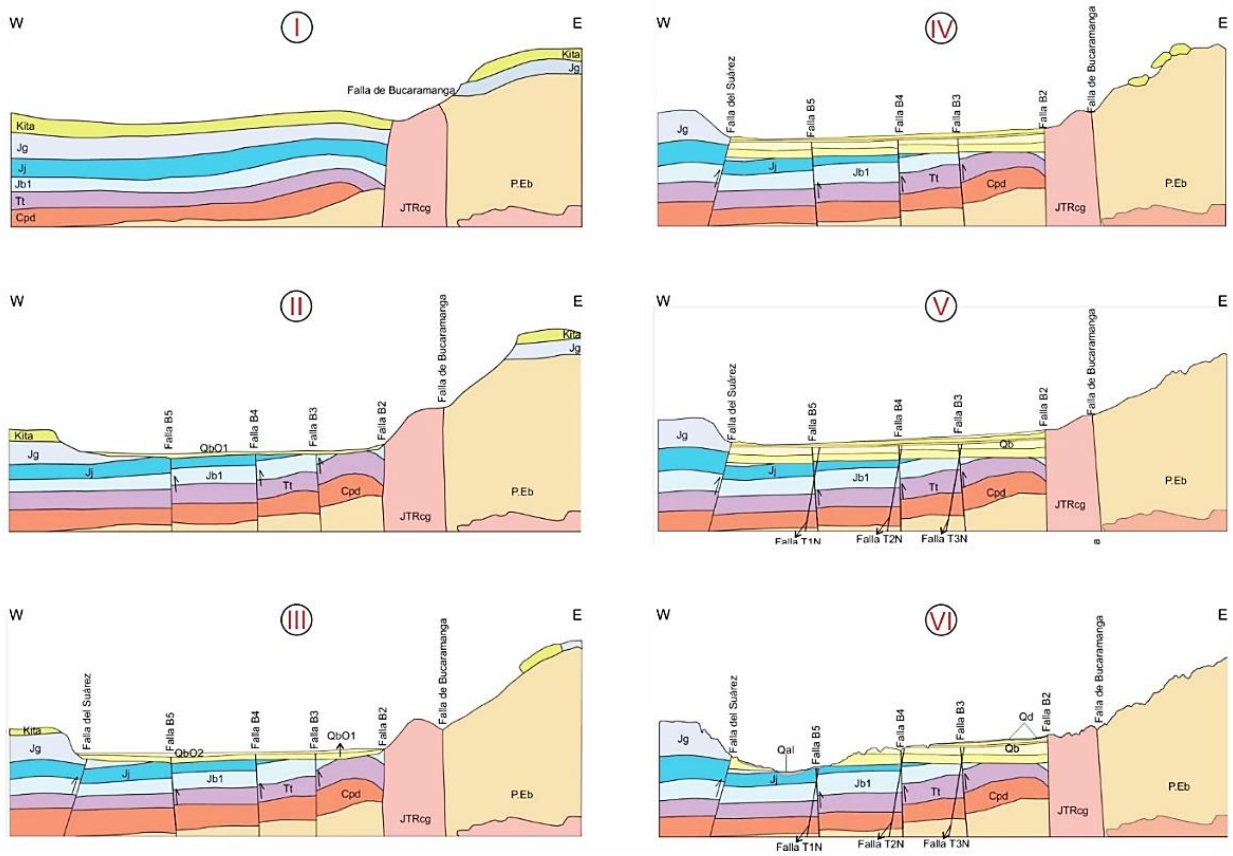


Figura 4. Evolución geológica del área de Bucaramanga. I) Primera fase: Mioceno-Plioceno; II) Segunda fase: Pleistoceno; III) Tercera fase: Holoceno temprano; IV) Cuarta fase: Holoceno reciente; V) Quinta fase: Cuaternario reciente; VI) Estado actual. Tomada de Clavijo & Vargas, (2017).

La primera fase, Mioceno-Plioceno, ocurrida durante los inicios de la Orogenia Andina se caracteriza por el comienzo de la formación de la depresión tectónica de Bucaramanga limitada al oriente por el Sistema de Fallas de Bucaramanga - Santa Marta y al occidente por el Sistema de Fallas del Suárez- Río de Oro, los cuales se unen hacia el norte en el sector de Los Colorados. El límite sur corresponde a la falla de Los Santos. El origen de esta depresión está asociado a los últimos levantamientos de la cordillera oriental, donde la Fm. Girón y sus infrayacentes fueron comprimidas por el levantamiento del Macizo de Santander al oriente, contra las paleo Mesas de Los Santos, Ruitoque y Lebrija (Figura 4 (I)).

La segunda fase, durante el Pleistoceno, está representada por la depositación del miembro basal de la Formación Bucaramanga producto de eventos fluvio-torrenciales asociados a los abanicos aluviales que conformaban los paleoríos: Suratá al norte, Frío al centro y de Oro al sur, además continúa actividad de los sistemas de fallas que produjeron un desplazamiento del ápice de los abanicos y desviaron la dirección de los ríos mencionados, propiciando adicionalmente flujos de escombros y lodos que recubrieron los depósitos aluviales (Figura 4(II)).

La tercera fase, durante el Holoceno temprano evidencia una continua depositación de la Fm. Bucaramanga con actividad importante de los sistemas de fallas y un probable cambio en la red de drenaje y/o condiciones climáticas que afectaron la fuente de los detritos. En el costado centro oriental de la depresión se presentaron probablemente los mayores desplazamientos relativos en la vertical, debidos a la formación de una cuña limitada al sur por la falla transversal que sigue el curso de la Quebrada Suratoque y otra al norte que alinea la Quebrada La Iglesia; produciendo en consecuencia flujos de detritos que formaron conos de poca extensión en el piedemonte (Figura 4 (III)).

La cuarta fase, durante el Holoceno reciente, se caracteriza por la continua depositación de la Formación Bucaramanga, miembros Finos y Gravoso, además de un cambio en las condiciones hidroclimáticas y en la actividad sísmica. Los sedimentos de la superficie del Macizo de Santander y del sector oriental de Bucaramanga fueron objeto de una disección profunda causada por la erosión retrogresiva de la Quebrada La Iglesia y sus afluentes al norte, dejando al descubierto varios cerros, además del ahondamiento de los valles de los Ríos Suratá y Frío. Todas estas corrientes presentan un marcado control estructural a lo largo de su curso (Figura 4 (IV)).

La quinta fase, durante el Cuaternario reciente, evidencia la culminación de la depositación de la Fm. Bucaramanga con su miembro superior, Limos Rojos, asociado a la actividad preponderante del sistema de fallas transversales asociadas al Sistema de Fallas del Suárez, con desplazamientos de decenas de metros de las trazas de la Falla de Bucaramanga y un cambio en la dirección de los ríos principales con basculamiento hacia el norte de la depresión. Se inicia también la erosión de la llamada terraza de Bucaramanga con un gran deslizamiento en el norte y en el escarpe occidental en donde las nacientes de las quebradas fueron disectando los depósitos hasta alcanzar los niveles de rocas y depósitos más antiguos (Figura 4 (V)).

La sexta fase, en donde la erosión continúa y la dinámica de las corrientes además de la actividad antrópica fueron dando al área su estado actual, generándose además los depósitos aluviales antiguos y recientes, terrazas aluviales, coluviales, dentro de los que destaca el Segmento Órganos Removido, además de rellenos (Figura 4 (VI)). Se evidencia también actividad de los sistemas de fallas transversales.

6 Marco Teórico

6.1 Susceptibilidad a Movimientos en Masa

La susceptibilidad a movimientos en masa es una medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden ocurrir en un área. Su determinación se basa solamente en el análisis de factores intrínsecos o condicionantes, tales como geología, geomorfología, usos del suelo, coberturas de la tierra, entre otros. Los mapas de susceptibilidad contienen información sobre los distintos eventos que pueden ocurrir, es decir, sobre la posibilidad de ocurrencia espacial en términos de identificación de las áreas de iniciación más probables (SGC, 2017). Existen diferentes métodos para la elaboración de estos mapas que, de forma general, se dividen en procedimientos heurísticos, estadísticos, determinísticos y estocásticos (Soeters & Van Westen, 1996).

6.1.1 Movimientos en masa.

Un movimiento en masa es definido como el movimiento de una masa o volumen de rocas, detritos o tierra (suelo) pendiente abajo por efectos de la gravedad y puede además ser activo, inactivo o reactivado (Fell *et al.*, 2008). Este término es equivalente a definiciones como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas

(SGC, 2013). La ocurrencia de ellos desarrolla varios rasgos geomorfológicos y morfométricos característicos (Figura 5). Los elementos morfológicos pueden asociarse a la masa desplazada o al terreno intacto circundante. Entre estos se destacan: la corona, el escarpe principal, la superficie de ruptura, el cuerpo, los flancos, el frente y el pie, entre otros (Vargas-Cuervo, 2000).

De manera general, la mayoría de los movimientos en masa implican una gran cantidad de procesos y factores asociados tales como cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural, entre otros, lo que se traduce en ilimitadas posibilidades de clasificación. No obstante, una de las más utilizadas tiene en cuenta dos elementos: el tipo de movimiento y el tipo de material (Varnes, 1978).

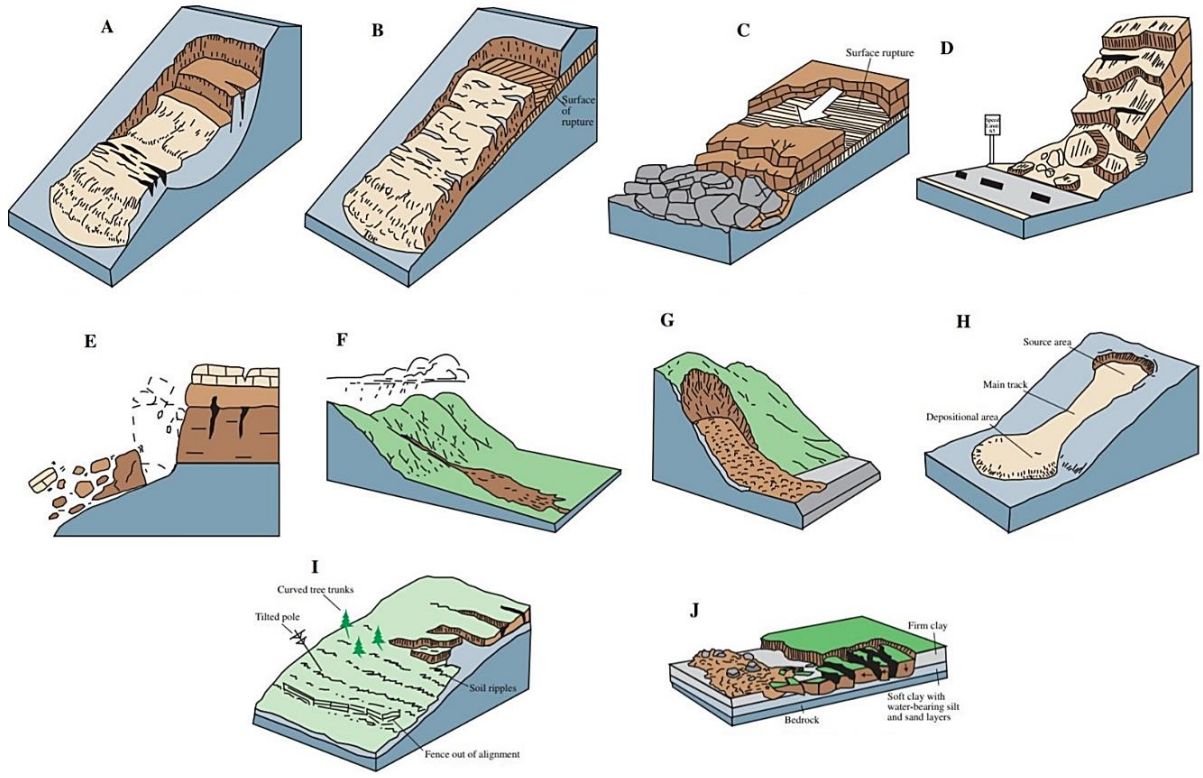


Figura 5. Clasificación de movimientos en masa. **A**) Deslizamiento rotacional; **B**) Deslizamiento traslacional; **C**) Deslizamiento de bloques; **D**) Caída de rocas; **E**) Volcamiento; **F**) Flujo de detritos; **G**) Avalancha de detritos; **H**) Flujo de tierra; **I**) Reptación; **J**) Extensión lateral. Modificada de Pfurtscheller, Lochner, & Thieken, (2011).

En cuanto al tipo de movimiento considera 5 casos básicos: caída, volcamiento, deslizamiento, flujo y propagación lateral (***Tabla 2***). En cuanto al material considera dos tipos: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierras, según predominen materiales más gruesos, o más finos que el tamaño arena, respectivamente (INGEOMINAS, 2002).

Tabla 2. Clasificación de Varnes (1978). Modificada de INGEOMINAS, (2002).

<table>
<tr><th colspan="3" rowspan="3">TIPO DE MOVIMIENTO</th><th colspan="3">TIPO DE MATERIAL</th></tr>
<tr><th rowspan="2">ROCAS</th><th colspan="2">SUELOS INGENIERILES</th></tr>
<tr><th>GRUESOS</th><th>FINOS</th></tr>
<tr><td colspan="3">Caídas</td><td>Caída de Rocas</td><td>Caída de Detritos</td><td>Caída de Tierra</td></tr>
<tr><td colspan="3">Volcamientos</td><td>Volcamiento de Rocas</td><td>Volcamiento de Detritos</td><td>Volcamiento de Tierra</td></tr>
<tr><td colspan="2">Deslizamiento</td><td>Roca Homogénea</td><td>Hundimiento de Rocas</td><td>Hundimiento de Detritos</td><td>Hundimiento de Tierra</td></tr>
<tr><td>Rotacional</td><td>Traslacional</td><td>Heterogeneidad Litológica</td><td>Deslizamiento de Bloques de Rocas</td><td>Deslizamiento de Bloques. Deslizamiento de Detritos</td><td>Deslizamiento de Bloques de Tierra. Deslizamiento de Tierra</td></tr>
<tr><td colspan="3">Propagación Lateral</td><td>De Rocas</td><td>De Detritos</td><td>De Tierras</td></tr>
<tr><td colspan="3">Flujos</td><td rowspan="2">Flijos de Rocas (Deep Creep)</td><td>Flujos de Detritos</td><td>Flujos de Tierras</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">Movimientos Complejos</td><td colspan="2">Reptación</td></tr>
<tr><td colspan="3">Combinación de dos o más tipos de Movimientos</td></tr>
</table>

6.1.1.1 Caída

Se trata del desprendimiento de materiales que se desplazan la mayor parte de su trayectoria por el aire. Se consideran 3 casos: Caída Libre, si la inclinación de taludes o laderas desde donde se desprende la masa excede los 75°. Si este ángulo es menor, el material desprendido desciende en brincos y en el caso de taludes con inclinaciones menores a 45°, los materiales desalojados descienden predominantemente rodando.

6.1.1.2 Volcamiento

Se refiere al desplazamiento lateral de masas desde la cara de un talud natural o artificial, las cuales rotan alrededor de un punto o un eje, situado en el centro de gravedad de la masa desplazada. El movimiento puede deberse a la presión ejercida por el material situado encima de la masa afectada, o a la presión del agua o del hielo en las grietas. Ocurrido el volcamiento la masa puede caer o deslizar dependiendo de su forma, de la geometría de la superficie de separación y de la orientación y extensión de las discontinuidades cinemáticamente activas.

6.1.1.3 Deslizamiento

Desplazamiento descendente, con una componente horizontal apreciable, a lo largo de una o varias superficies de falla o zonas de corte, que pueden coincidir con superficies preexistentes (planos estructurales o superficies antiguas de falla), o generarse durante el movimiento. Existen varios tipos de deslizamiento:

- Deslizamiento rotacional: la superficie de rotura es curvada y cóncava.
- Deslizamiento traslacional: la superficie de falla es planar.
- Deslizamiento de cuñas: constituye un caso especial de deslizamiento traslacional, en el cual la masa que se desplaza se apoya sobre la intersección de dos discontinuidades estructurales.
- Deslizamiento combinado: se presenta algo de translación y algo de rotación. La superficie de rotura presenta un escarpe principal muy pendiente, que puede suavizarse en profundidad y remata con una sección casi plana; la pata puede llegar a inclinarse en sentido contrario del movimiento y en la zona de corona pueden presentarse bloques desplazados en un mecanismo de Graben.

6.1.1.4 Flujo

El término flujo en general se refiere a movimientos espacialmente continuos, en los cuales se presentan múltiples y efímeras superficies de corte, estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. Se clasifican como desplazamientos en masa los flujos no canalizados relacionados con el desplazamiento viscoso de suelos o detritos derivados de masas que previamente se han involucrado en un deslizamiento. También movimientos viscosos de masas relativamente secas. En realidad, se presenta una transición del estado de deslizamiento al de flujo con incremento en la humedad y desagregación de las partículas o partículas sueltas y secas que se desplazan hacia un terreno con más pendiente, lo suficiente para que éstas comiencen a rotar individualmente. En ambos casos el movimiento se vuelve viscoso.

6.1.1.5 Otros

- Reptación: movimientos de laderas que ocurren a una tasa imperceptible, es decir un movimiento una tasa de desplazamiento mínima. Puede ser estacional o continua.
- Subsidencia: Desplazamientos descendentes predominantemente verticales del terreno, asociados a remoción o consolidación del material subyacente, por causas naturales o artificiales.

6.1.2 Regresión logística binaria múltiple

La regresión logística es un método de tipo estadístico multivariado que hace predicciones cuantitativas para áreas libres de movimientos en masa donde existen condiciones similares a donde estos sí se han presentado (SGC, 2013). Este método ha sido ampliamente aplicado con éxito al mapeo de la susceptibilidad a movimientos en masa de manera general (Dai & Lee, 2002; Süzen, 2002; Ohlmacher & Davis, 2003; Süzen & Doyuran, 2004; Akgün, 2007). El enfoque principal de la regresión logística es comparar la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa con la frecuencia real de los mismos. De esta forma, la regresión logística permite formar una relación de regresión multivariante entre una variable dependiente y varias variables independientes (Atkinson & Massari, 1998; Hosmer & Lomeshow, 2000). Debido a que este método es útil para predecir la presencia o ausencia de una característica o resultado en función de los valores de un conjunto de variables predictoras (Lee, 2005), su aplicabilidad en el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa es formidable, pues su propósito en el marco de esta temática es encontrar el mejor ajuste del modelo para describir la relación entre la presencia o ausencia de movimientos en masa, (denominada variable dependiente) y un conjunto de parámetros independientes, tales como ángulo de la pendiente, litología, distancia a drenajes, entre otras (Ayalew & Yamagishi, 2005).

En la regresión logística, la variable dependiente se codifica como "1" y "0" para indicar la presencia y la ausencia de un movimiento en masa, respectivamente. Los coeficientes determinados mediante el análisis por regresión logística se pueden usar para estimar las razones (o pesos) para cada una de las variables independientes. El modelo logístico que representa el modelo de regresión de máxima verosimilitud se puede expresar en su forma más simple según la (**1**).

$$P = \frac{1}{1 + e^{Z}} \qquad \textbf{(1)}$$

donde P es la probabilidad de ocurrencia de un evento estimada en la situación actual.

Como el valor Z varía desde $-\infty$ a $+\infty$, la probabilidad varía de 0 a 1 en una curva en forma de S. Siendo Z definida según la (**2**).

$$Z = B_o + B_1X_1 + B_2X_2 + \cdots + B_nX_n \qquad \textbf{(2)}$$

donde Bo es el intercepto del modelo, n es el número de variables independientes. Los B_i $(i = 0, 1, 2, \ldots, n)$ son los coeficientes de razón (o pesos) del modelo de regresión logística y los X_i $(i = 0, 1, 2, \ldots, n)$ son las variables independientes.

Basado en las ecuaciones (**1**) y (**2**), la ecuación de la regresión logística (Akgün, 2007), puede escribirse de la siguiente forma extendida (**3**):

$$Logit(P) = \frac{1}{1 + e^{(B_o + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \cdots + B_n X_n)}} \quad \textbf{(3)}$$

6.1.3 Algoritmo de Colonia de Hormigas

De manera general, en ciencias de la computación y en investigación operativa, el algoritmo de la colonia de hormigas, algoritmo hormiga u optimización por colonia de hormigas (OCH) es una técnica probabilística para solucionar problemas de optimización que pueden reducirse a buscar los mejores caminos o rutas en grafos. Y tiene como ventaja que puede ser usada en diversas aplicaciones dinámicas, ya que se adapta a cambios. Este algoritmo es un miembro de la familia de métodos de inteligencia artificial (Shekhawat *et al.*, 2009) y se inspira en el comportamiento de alimentación de algunas especies de hormigas (Figura 6). Estas hormigas depositan feromonas en el suelo para marcar un camino favorable (el camino más corto existente entre la fuente de comida y su nido o colonia) que deberían seguir otros miembros de la colonia. OCH explota un mecanismo similar para resolver problemas de optimización (Dorigo *et al.*, 2006).

Este sistema es basado en la retroalimentación positiva (el depósito de feromonas atrae otras hormigas y estas fortalecerán dicha retroalimentación) y la retroalimentación negativa (disipación de la ruta por evaporación) (Dorigo & Blum, 2005). Teóricamente, si la cantidad de feromonas fue la misma en todas las rutas durante todo el tiempo, ninguna ruta fue elegida. Sin embargo, debido a la retroalimentación, una ligera variación en una arista amplificará y entonces se permitirá elegir una ruta. El algoritmo se moverá de un estado inestable en el que ninguna arista es más fuerte que otra, a un estado estable donde una ruta está compuesta por las aristas más fuertes.

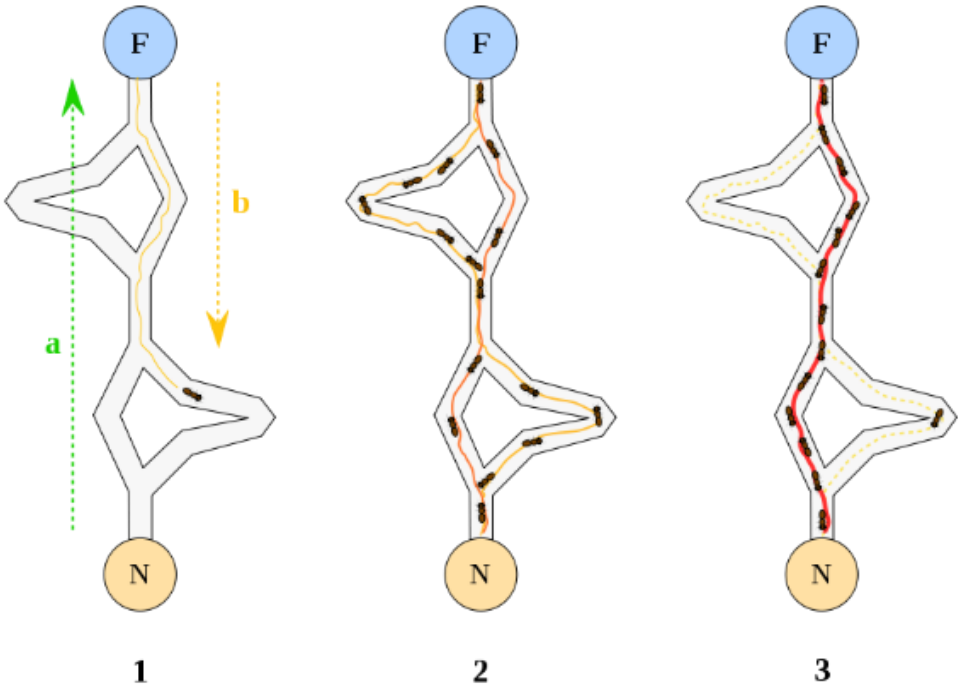


Figura 6. Ilustración del comportamiento de las hormigas. Tomada de Shekhawat et al., (2009). **1**. La primera hormiga encuentra la fuente de alimentos (F) a través de cualquier camino (a), entonces retorna a la colonia (N), dejando tras sí un rastro de feromonas; **2**. Las hormigas indiscriminadamente siguen cuatro caminos posibles, pero el fortalecimiento de la pista hace más atractivo la ruta más corta; **3**. Las hormigas toman la ruta más corta y largas porciones de otras rutas empiezan a perder su rastro de feromonas.

La filosofía básica del algoritmo implica el movimiento de una colonia de hormigas a través de los diferentes estados del problema influenciado por dos políticas de decisión a nivel local, rutas y atracción (Gutjahr, 2003). De esta manera, cada hormiga incrementalmente construye una solución del problema. Cuando una hormiga completa una solución, o durante la fase de construcción, las hormigas evalúan la solución y modifican el valor de la ruta sobre las componentes utilizadas en la solución. Esta información de feromonas dirigirá la búsqueda de futuras hormigas. Además, el algoritmo incluye la evaporación del rastro que reduce todos los valores de los rastros evitando la posibilidad de caer en óptimos locales.

En cada iteración del algoritmo, cada hormiga se mueve de un estado i a un estado j, correspondiendo a una solución intermedia más completa. Por tanto, cada hormiga k computa un conjunto de expansiones factibles de su estado actual en cada iteración y se mueve a una de estas de manera probabilística. Para una hormiga k, la probabilidad de moverse de un estado i a un estado j depende de la combinación de dos valores, del atractivo $\eta_{i,j}$ del movimiento, computado

por una razón de pesos que indica a priori la conveniencia de dicho movimiento y el nivel de rastro $\tau_{i,j}$ del movimiento, indicando que tan competente ha sido en el pasado este particular movimiento (Dorigo *et al.*, 2006).

El nivel de rastro representa a posteriori una indicación de la conveniencia de ese movimiento. Los rastros son actualizados por lo general cuando todas las hormigas han completado su solución, aumentando o disminuyendo los niveles de los rastros de los movimientos correspondientes que fueron partes de "buenas" o "malas" soluciones respectivamente.

En general, la k_{th} hormiga se mueve del estado *i* al estado *j* con la probabilidad enunciada en la (**4**).

$$P^{k}{}_{\text{i},j} = \frac{\left(\tau_{i,j}{}^{\alpha}\right)\left(\eta_{i,j}{}^{\beta}\right)}{\sum\left(\tau_{i,j}{}^{\alpha}\right)\left(\eta_{i,j}{}^{\beta}\right)} \qquad \textbf{(4)}$$

Donde:

$\tau_{i,j}$ es la cantidad de feromonas depositadas en la transición del estado *i* a *j*

α es un parámetro para controlar la influencia de $\tau_{i,j}$ ($\alpha \geq 0$)

$\eta_{i,j}$ es la conveniencia del estado de transición *i*,*j*

β es un parámetro para controlar la influencia de $\eta_{i,j}$ ($\beta \geq 1$)

Cuando todas las hormigas han completado una solución, los rastros o la cantidad de feromona es actualizada de acuerdo con la (**5**):

$$\tau_{i,j} = (1 - \rho)\,\tau_{i,j} + \sum_{k} \Delta\tau_{i,j}{}^{k} \qquad \textbf{(5)}$$

Donde:

$\tau_{i,j}$ es la cantidad de feromonas depositadas para un estado de transición *i*,*j*

ρ es la rata o el coeficiente de evaporación de feromonas

$\Delta\tau_{i,j}{}^{k}$ es la cantidad de feromonas depositadas por la kth hormiga, típicamente dada por:

$$\Delta\tau_{i,j}{}^{k} = \begin{cases} Q/L_k \; si\ la\ hormiga\ k\ viaja\ sobre\ el\ borte\ i,j \\ 0\ si\ es\ de\ otra\ manera \end{cases}$$

donde L_k es el costo de la ruta de la hormiga kth (en la mayoría de los casos es la longitud) y Q es una constante.

6.2 Amenaza a Movimientos en Masa

La amenaza a movimientos en masa representa la probabilidad de ocurrencia de un evento físico o condición peligrosa de origen natural o inducido por la acción humana en un periodo de tiempo y área determinados (Varnes, 1984), capaz de causar daños en bienes materiales, infraestructura, recursos ambientales e incluso la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud. Ya que los movimientos en masa son el resultado de la interacción de factores intrínsecos del terreno que lo predisponen a una situación de inestabilidad (susceptibilidad), la integración con factores extrínsecos al terreno (detonantes) generan la amenaza a movimientos en masa (SGC, 2013). De esta manera se realiza el cálculo y la consiguiente elaboración del mapa de amenaza a movimientos en masa.

6.2.1 Detonante sismo

El movimiento del terreno durante la ocurrencia de un sismo ha sido un detonante importante de movimientos en masa en diferentes ambientes geológicos. Como, por ejemplo, caídas de roca, deslizamientos de suelos y deslizamientos en roca en laderas escarpadas, involucrando capas superficiales de suelo y roca descompuesta, han sido los tipos de movimientos en masa más comunes detonados por sismos históricos (SGC, 2015b). Para el análisis de sismos que detonan deslizamientos generalmente se usan datos de aceleración máxima del terreno (PGA, por su sigla en inglés) que luego son considerados en modelaciones dinámicas o pseudoestáticas (SGC, 2017). Los modelos elaborados para evaluar el detonante sísmico hacen uso del registro histórico de todos los eventos presentados en el territorio y su asociación distintas fuentes sismogénicas, ya sea con fallas activas superficiales o fuentes más profundas. Mediante funciones de atenuación se define, con base en parámetros probabilísticos, los valores de aceleración para un área determinada teniendo en cuenta un periodo de recurrencia establecido.

6.2.2 Detonante Lluvia

El clima de una región condiciona los procesos que se generan en la superficie de la misma. Específicamente las laderas se ven afectadas ante una lluvia y estas incluso tienen la capacidad de detonar un movimiento en masa. Altas intensidades de lluvia frecuentemente detonan movimientos superficiales y flujos de detritos debido a que la disipación de las presiones de poros positivas es muy rápida, especialmente en materiales permeables (IDEAM, 2014). Lluvias de baja a moderada intensidad, que se presentan por días o semanas, pueden detonar flujos de detritos y deslizamientos profundos, siendo entonces importante la lluvia antecedente al reducir la succión del suelo e incrementar las presiones de poros positivas, especialmente en suelos de baja permeabilidad (Corominas *et al.*, 2013).

En virtud de que los movimientos en masa también ocurren debido a un incremento en la presión de poros del suelo generado por el ascenso del nivel freático, y que estos procesos están asociados a largos periodos de lluvia, se hace la relación de la variación del nivel freático con la variabilidad de la lluvia acumulada para largos periodos. Dicha estimación se ha de realizar en atención a que existe una relación directa entre el volumen acumulado de agua caída en un periodo de lluvia y el ascenso del nivel freático, ya que por lo general en nuestro medio no se cuenta con registros de nivel freático levantados sistemáticamente. Es por ello que se sugiere la evaluación de este parámetro a partir de la variabilidad temporal de las precipitaciones (SGC, 2015).

6.2.3 Cálculo de la Amenaza

El mapa de amenaza a movimientos en masa final es calculado a partir de una función de modelación ((**6**) que tiene en cuenta la susceptibilidad del terreno previamente obtenida, y cada uno de los detonantes, sísmico y de lluvias (SGC, 2013), considerando las categorías en las que se encuentran clasificadas (Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta)

$$A_T = (S + D_s) + (S + D_l) \qquad \textbf{(6)}$$

Donde,
A_T es la Amenaza total
S es la Susceptibilidad del terreno
D_s es el Detonante sismo
D_l es el Detonante lluvia

Los valores obtenidos de amenaza por cada uno de los detonantes son relacionados en una matriz de jerarquía que clasifica el mapa de amenaza total en cuatro categorías: Baja, Media, Alta y Muy Alta.

7 Metodología

Para la realización del presente trabajo de investigación se propuso la utilización del método estadístico multivariado de Regresión Logística (RL) además de la Optimización por Colonia de Hormigas (OCH), que en conjunto ofrecen la solución óptima con un enfoque objetivo teniendo presente la combinación de factores desde el punto de vista geológico, geomorfológico y geotécnico, entre otros. El flujo de trabajo en el proyecto de investigación se dividió en 7 fases (Figura 7).

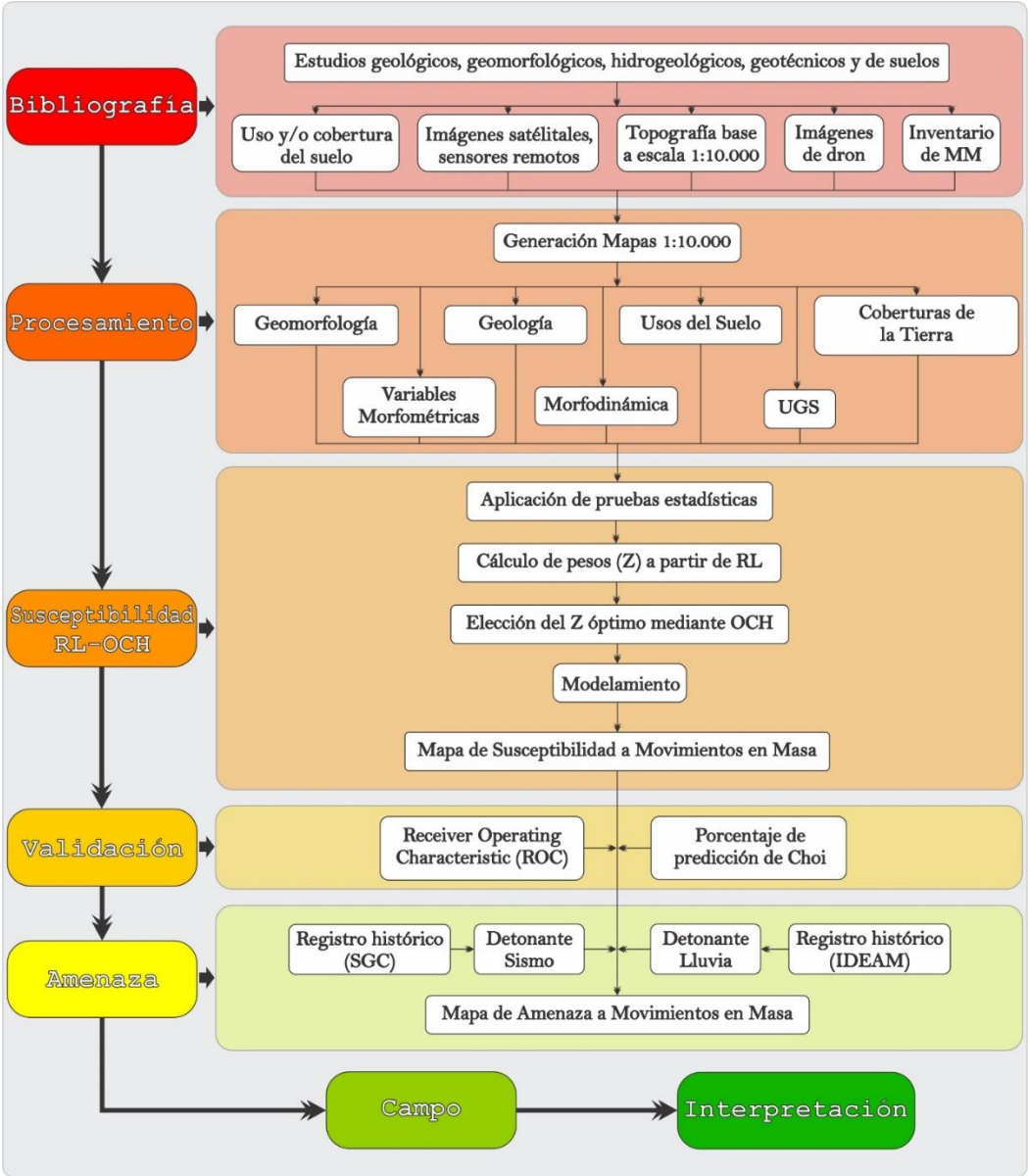


Figura 7. Esquema metodológico aplicado al trabajo de investigación.

7.1 Recopilación y revisión bibliográfica.

Esta fase correspondió a la recopilación y revisión bibliográfica, en donde se consultó estudios previos correspondientes a geología, geomorfología, hidrogeología, geotecnia y de uso y/o cobertura del suelo actual, entre otros; además se obtuvieron imágenes satelitales y de sensores remotos, la topografía base a escala 1:10.000 y el inventario de movimientos en masa en la zona. Adicionalmente, en esta etapa se hizo una revisión minuciosa de los fundamentos teóricos de los análisis estadísticos multivariados de regresión logística y el algoritmo de optimización por colonia de hormigas y sus aplicaciones en la susceptibilidad a movimientos en masa en distintos estudios realizador alrededor del mundo, estos sirvieron como punto de partida para la realización de la presente investigación.

7.1.1 Regresión Logística

La **R**egresión **L**ogística (**RL**) se ha posicionado como una de las técnicas preferidas para la generación de cartografías enfocadas a movimientos en masa (Akgun & Erkan, 2016), debido a la ventaja de poder ingresar al modelo variables cuantitativas (continuas o discretas), cualitativas o una combinación de ambas (Bernknopf *et al.*, 1988). Sus orígenes se remontan a la creación del método estadístico multivariado en su forma general (Cornfield *et al.*, 1961), posteriormente su diversificación logró alcanzar el ámbito geológico en cuanto a la evaluación de amenazas naturales, específicamente en la aplicación de métodos estadísticos multivariados a la elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos (Carrara, 1983), consecutivamente uno de ellos, la regresión logística tomó gran fuerza en el ámbito científico realizándose diversos estudios con resultados muy certeros y relevantes a lo largo distintas áreas del mundo (Carrara *et al.*, 1991; Dikau *et al.*, 1996; Atkinson & Massari, 1998; Gorsevsky *et al.*, 2000; Lee & Min, 2001; Ohlmacher & Davis, 2003; Duman *et al.*, 2006; Hernández, 2008; Das *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013; Youssef *et al.*, 2014; Conoscenti *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016; Erener *et al.*, 2017; Lombardo & Mai, 2018). La evolución de esta metodología, en su forma generalizada, se observa en la Figura 8.

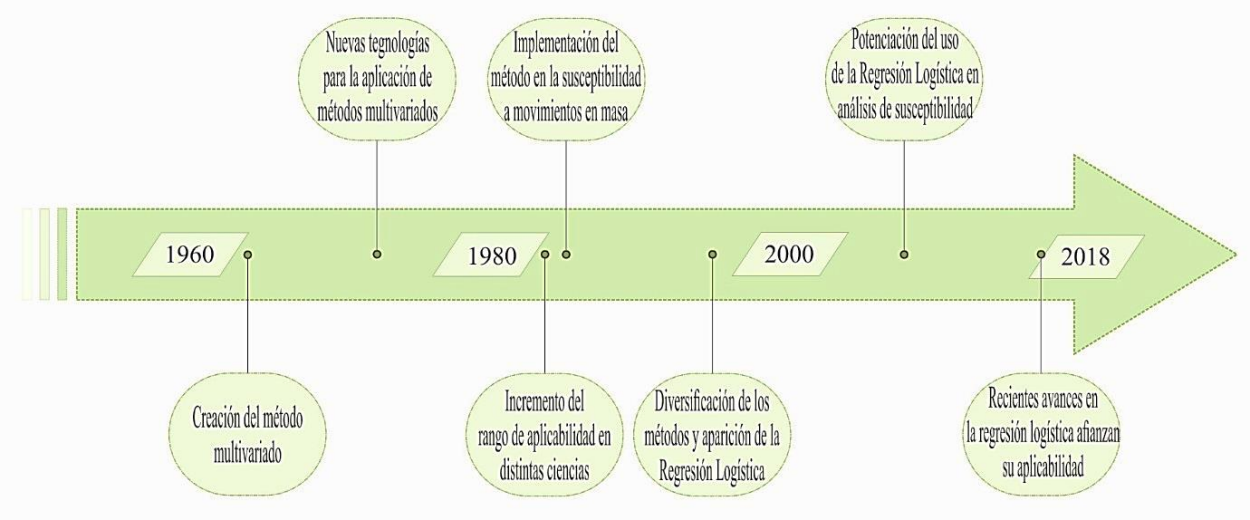


Figura 8. Línea de tiempo con la evolución de las aplicaciones de la Regresión Logística enfocadas al análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa.

7.1.2 Optimización por Colonia de Hormigas

El algoritmo de **O**ptimización por **C**olonia de **H**ormigas (**OCH**) es una técnica relativamente nueva y muy versátil de optimización que se introdujo a principios de la década de 1990 (Dorigo, 1992). Su base conceptual se fundamenta en el comportamiento de búsqueda de alimento de las hormigas, el cual de manera análoga se explota dentro del algoritmo para la búsqueda de soluciones óptimas aproximadas a problemas discretos y continuos de optimización (Blum, 2005). La idea original se ha diversificado para resolver una amplia clase de problemas numéricos, y como resultado, han surgido gran cantidad de problemas nuevos, basándose en diversos aspectos del comportamiento de las hormigas. Desde que se propuso el primer algoritmo de optimización de colonias de hormigas, OCH atrajo la atención de más investigadores y ahora hay disponible una cantidad relativamente grande de aplicaciones exitosas. Además, se está disponible un corpus sustancial de resultados teóricos que proporciona directrices útiles para investigadores y profesionales en otras aplicaciones de OCH (Dorigo *et al.*, 2006). A lo largo de su desarrollo, OCH ha ido evolucionando y adaptándose a nuevas ideas e incluso se ha incorporado con otras metodologías de manera exitosa. Algunas de las transformaciones del algoritmo original son: *Ant System* (Dorigo *et al.*, 1991), (Dorigo *et al.*, 1996), *Elitist Ant System* (Dorigo, 1992), *Ant-Q* (Gambardella & Dorigo, 1995), *Ant Colony System* (Dorigo & Gambardella, 1997), *MAX-MIN Ant System* (Stützle & Hoos, 2000), *Rank-based Ant System* (Bullnheimer *et al.*, 1999), *ANTS* (Maniezzo, 1999), *BWAS* (Cordón *et al.*, 2000), *Hyper-cube Ant System* (Blum & Dorigo, 2004).

Aunque los estudios de aplicación de OCH concernientes a la evaluación de la amenaza por movimientos en masa no son abundantes. Recientemente se ha visto un incremento en el interés científico sobre esta temática. En disciplinas relacionadas, tal como es el caso de la geotecnia, es mucho más frecuente el uso de este algoritmo, desarrollando, por ejemplo, OCH para resolver un problema de minimización del factor de seguridad en el análisis de estabilidad de taludes (Kahatadeniya *et al.*, 2009) y concluyendo en que OCH es un método excelente para este tipo de análisis.

No obstante, otros trabajos de Xulong (2016) han presentado un método analítico para la predicción de un desastre natural, específicamente de deslizamiento de tierra, basándose en la integración redes neuronales y el algoritmo de colonia de hormigas, en la red neuronal OCH-BP. El método en específico extrae factores de evaluación como la pendiente para la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, y luego aborda el modelo de predicción de deslizamientos de tierra a través de la red neuronal OCH-BP. Algunos autores como Yang *et al.*, (2016) diseñan un algoritmo de optimización de parámetros basado en OCH, y aplican un clasificador a la evaluación de riesgo de deslizamiento. Se muestra a partir de los resultados que el algoritmo de optimización de parámetros del clasificador OCH es superior a otros tipos de algoritmos, y el clasificador es muy aplicable en la evaluación de riesgos por deslizamiento.

También se ha aplicado OCH en temáticas afines a la evaluación de la amenaza y el riesgo a diferentes desastres naturales. Es así como ciertos investigadores resuelven la complicada relación no lineal entre índices y niveles de riesgo, la cual es una dificultad importante en la zonificación del riesgo de inundación (Lai *et al.*, 2016). Para resolver este problema, se promueve el algoritmo de colonia de hormigas basado en la extracción de reglas (Ant-Miner) para mapear el riesgo de inundación de una zona de estudio. Mostrando que Ant-Miner exhibe una mayor precisión y reglas más simples que pueden usarse para generar un mapa de zonificación de riesgo de inundación de forma rápida y fácil. Allí las áreas con alto nivel de riesgo obtenidas coinciden con las áreas de inundaciones históricas, sugiriendo la eficacia del método propuesto.

Estos estudios muestran el potencial de proporcionar un enfoque novedoso y exitoso para la zonificación de la amenaza frente a eventos geológicos que afectan directamente el entorno dentro de una corta escala temporal (como movimientos en masa e inundaciones) y de la versatilidad del algoritmo de colonia de hormigas.

La evolución de esta metodología, en su forma generalizada, se observa en la Figura 9.

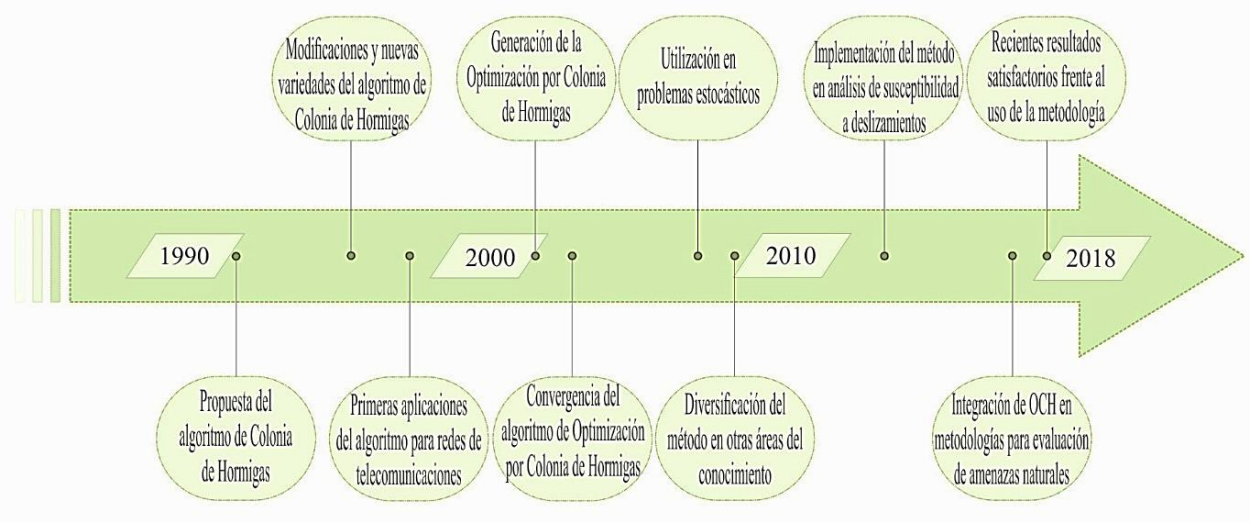


Figura 9. Línea de tiempo con la evolución de las aplicaciones del algoritmo de Optimización por Colonia de Hormigas enfocadas al análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa.

7.2 Procesamiento digital de información.

Esta fase se basó en el procesamiento digital de toda la información base mediante la utilización de distintos **S**istemas de **I**nformación **G**eográfica (GIS), generando de esta manera mapas temáticos intermedios con cada factor condicionante a escala 1:10.000 tales como: la geología, la geomorfología y la distribución de movimientos en masa, las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), los Usos del Suelo y las Coberturas de la Tierra; además de la creación de variables morfométricas, tales como: altura, densidad de fracturamiento, distancia a ríos, orientación, pendiente, y SPI. Todos los parámetros mencionados anteriormente fueron utilizados como insumos para el cálculo y análisis de la RL-OCH.

7.2.1 Factores condicionantes para construcción del modelo de susceptibilidad

Los factores condicionantes son una colección de datos espaciales que tienen un efecto en la ocurrencia de movimientos en masa y son utilizados tanto en la explicación de los procesos existentes, como en los que puedan ocurrir en el área (SGC, 2017). De esta forma se toman en consideración todos los parámetros mencionados como mapas temáticos que fueron evaluados para el área de estudio.

Geología: Los mapas con información geológica constituyen un insumo básico para cualquier análisis de amenaza a movimientos en masa. Para este atributo se tomaron en cuenta los estudios de INGEOMINAS, 2008 el cual muestra una cartografía geológica de las unidades aflorantes en

la zona de estudio a una escala 1:25.000; posteriormente se realizó una actualización de estas unidades con la integración de la fotointerpretación sobre imágenes satelitales y UAV de depósitos y unidades recientes hasta de un área de 1600 m^2, que representa la unidad mínima cartografiable para una escala 1:10.000 (Salitchev, 1979). Adicionalmente, para este aspecto, el presente estudio (Figura 10) tomó como referencia las unidades estratigráficas y sus respectivos límites definidos para la zona de estudio en el más reciente estudio realizado por Clavijo & Vargas (2017), en el que se elabora una cartografía geológica a una escala muy detallada. Finalmente se realizó verificación de unidades mediante visitas de campo.

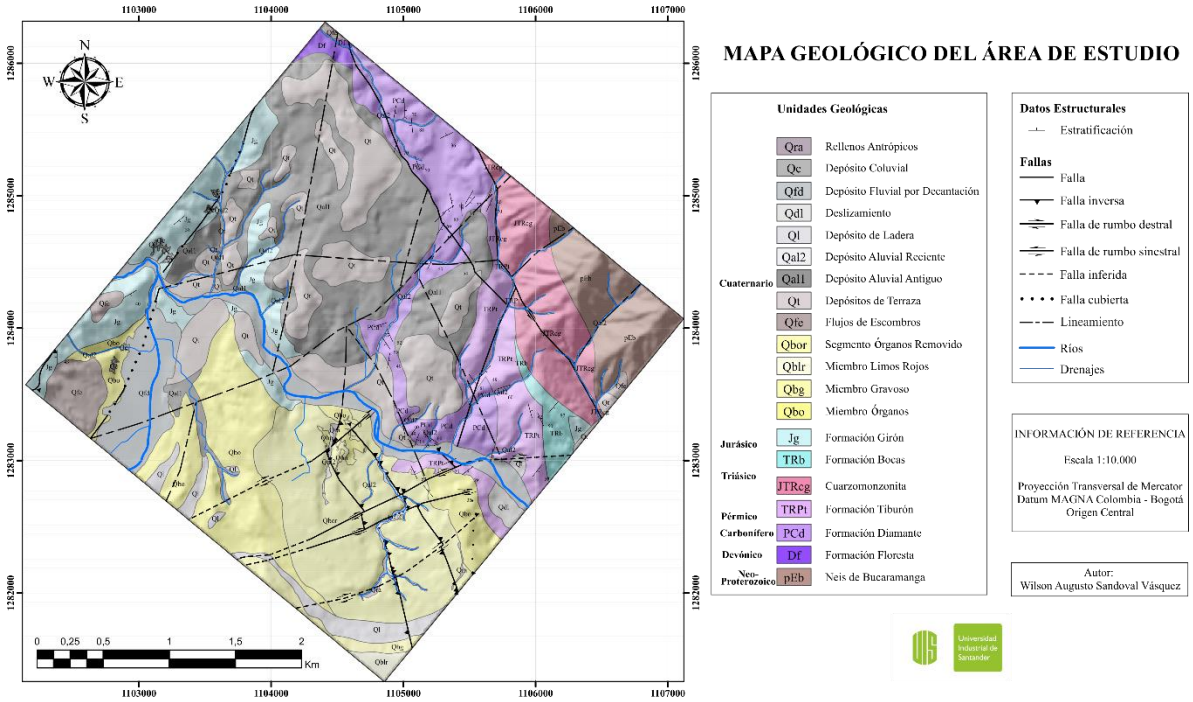


Figura 10. Mapa geológico a escala 1:10.000 del área de estudio. Modificada de INGEOMINAS (2008) y Clavijo & Vargas (2017). (APÉNDICE A)

Geomorfología: En el análisis de susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa, la geomorfología constituye el factor más importante para el análisis de la evolución del territorio y su relación con la ocurrencia de procesos con características definidas (Van Westen *et al.*, 2003). Para su aplicación en los diferentes estudios de amenaza por movimientos en masa, el factor geomorfológico se divide en tres atributos: morfogénesis, morfometría y morfodinámica (SGC, 2013). En el presente estudio, el mapa de unidades morfogenéticas (Figura 11) fue realizado en base a la metodología propuesta por Carvajal (2012).

Morfogénesis: Corresponde al conjunto de todos los procesos, exógenos, endógenos agradacionales y degradacionales en los diferentes ambientes de formación, que eventualmente conllevan a la formación de las geoformas de un territorio, es decir las causas y los procesos que dieron la forma al paisaje actual (Valencia-Ortiz & Martínez-Graña, 2018). Estos procesos actúan sobre la superficie terrestre en distintas proporciones e intensidades a lo largo diferentes intervalos de tiempo geológico. La información de aspecto morfogenético se representó mediante la definición de unidades morfogenéticas que, según la jerarquización de ellas para la escala de trabajo, corresponden al nivel de Componentes (Carvajal, 2012).

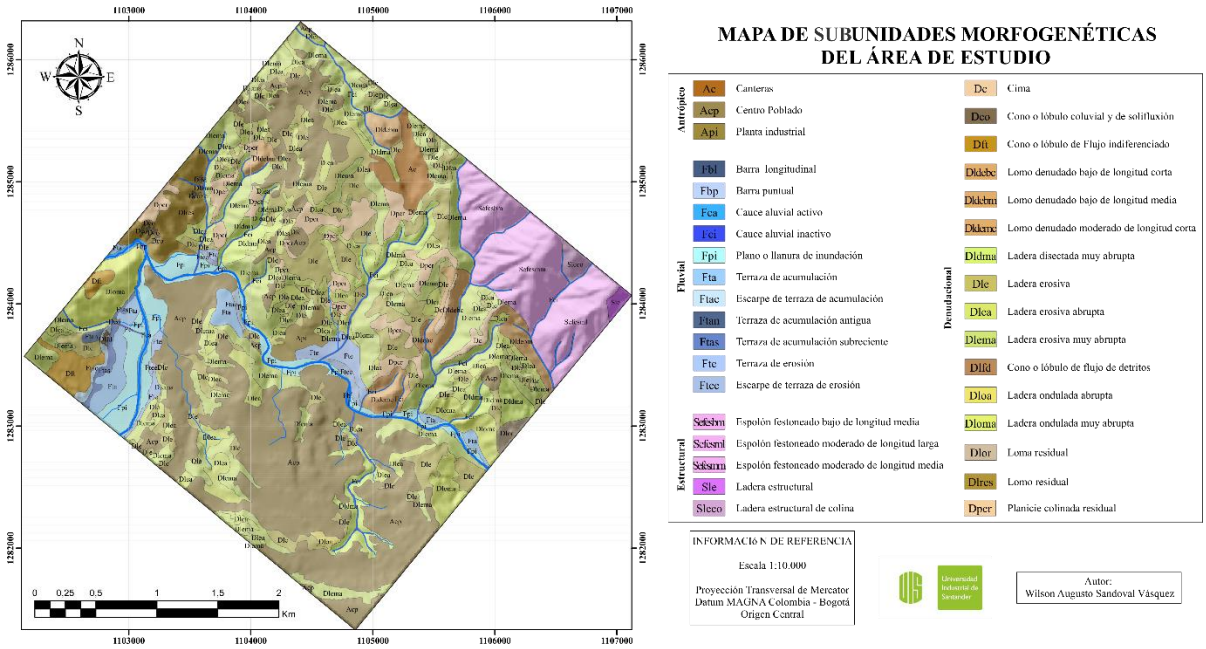


Figura 11. Mapa de unidades morfogenéticas a escala 1:10.000 del área de estudio. Realizado bajo la metodología propuesta por Carvajal (2012). (APÉNDICE B).

A continuación, se realiza la descripción de los distintos ambientes morfogenéticos asociados al área de estudio además de la distribución de dichos ambientes dentro del cuadrángulo perteneciente a la zona de la presente investigación (Figura 12).

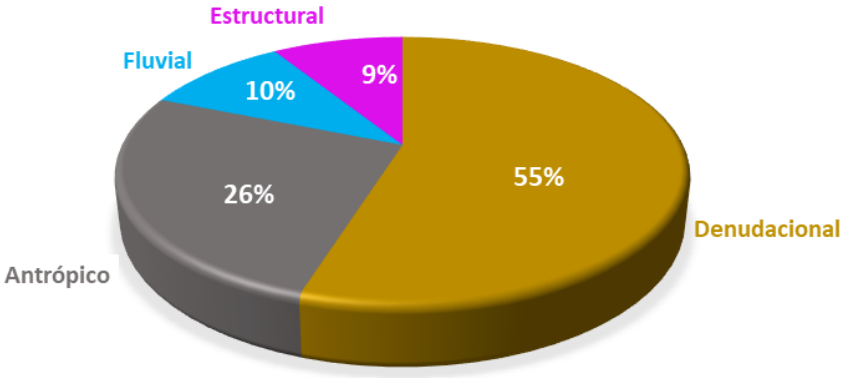


Figura 12. Distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos presentes en el área de estudio.

Ambiente Denudacional: Abarca las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas morfoestructurales preexistentes y además crean nuevas geoformas por acumulación de sedimentos. Este ambiente en la zona de estudio abarca el 54,88% (Tabla 3), siendo el más predominante.

Tabla 3. Geoformas asociadas al ambiente denudacional y su distribución en el área de estudio.

Ambiente	Acrónimo	Unidad	Área [km2]	Porcentaje
Denudacional	Dft	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado	0,143	1,14%
	Dlema	Ladera erosiva muy abrupta	2,081	16,65%
	Dlea	Ladera erosiva abrupta	0,991	7,93%
	Dloa	Ladera ondulada abrupta	0,018	0,15%
	Dloma	Ladera ondulada muy abrupta	0,444	3,55%
	Dldebm	Lomo denudado bajo de longitud media	0,192	1,53%
	Dldma	Ladera disectada muy abrupta	0,533	4,26%
	Dc	Cima	0,055	0,44%
	Dpcr	Planicie colinada residual	0,474	3,79%
	Dlor	Loma residual	0,297	2,37%
	Dldebc	Lomo denudado bajo de longitud corta	0,123	0,98%
	Dldemc	Lomo denudado moderado de longitud corta	0,096	0,77%
	Dco	Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	0,012	0,10%
	Dlfd	Cono o lóbulo de flujo de detritos	0,005	0,04%
	Dle	Ladera erosiva	1,397	11,18%

Dentro de este ambiente se encuentran las siguientes geoformas: Cono o lóbulo de Flujo indiferenciado (**Dft**), Ladera erosiva muy abrupta (**Dlema**), Ladera ondulada abrupta (**Dloa**), Ladera erosiva abrupta (**Dlea**), Ladera ondulada muy abrupta (**Dloma**), Lomo residual (**Dlres**), Lomo denudado bajo de longitud media (**Dldebm**), Ladera disectada muy abrupta (**Dldma**), Cima (**Dc**), Planicie colinada residual (**Dpcr**), Loma residual (**Dlor**), Lomo denudado bajo de longitud corta (**Dldebc**), Lomo denudado moderado de longitud corta (**Dldemc**), Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión (**Dco**), Cono o lóbulo de flujo de detritos (**Dlfd**), Ladera erosiva (**Dle**). Estas unidades se encuentran asociadas principalmente a procesos de erosión de los depósitos y las rocas, de menor resistencia, aflorantes en el área de estudio.

Ambiente Antrópico: Incluye las geoformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros y adecuación de nuevas vías, que modifica la morfología natural del terreno.

Este ambiente en la zona de estudio abarca el 26,26% (Tabla 4), y dentro de él se encuentran las siguientes geoformas: Centro Poblado (**Acp**), Planta industrial (**Api**), Canteras (**Ac**). Estas unidades se encuentran asociadas principalmente al casco urbano del municipio y a las zonas suburbanas en constante crecimiento dentro de las zonas de expansión urbana.

Tabla 4. Geoformas asociadas al ambiente antrópico y su distribución en el área de estudio.

Ambiente	Acrónimo	Unidad	Área [km2]	Porcentaje
Antrópico	Acp	Centro Poblado	3,010	24,08%
	Api	Planta industrial	0,098	0,78%
	Ac	Canteras	0,175	1,40%

Ambiente Fluvial: Incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre. Este ambiente en la zona de estudio abarca el 9,93% (Tabla 5), y dentro de él se encuentran las siguientes geoformas: Plano o llanura de inundación (**Fpi**), Terraza de erosión (**Fte**), Escarpe de terraza de erosión (**Ftee**), Escarpe de terraza de acumulación (**Ftae**), Terraza de acumulación subreciente (**Ftas**), Terraza de

acumulación antigua (**Ftan**), Barra puntual (**Fbp**), Barra longitudinal (**Fbl**), Terraza de acumulación (**Fta**), Cauce aluvial inactivo (**Fci**), Cauce aluvial activo (**Fca**). Estas unidades se encuentran asociadas principalmente a la acción de dos importantes ríos en la zona, el Río de Oro y el Río Suratá que confluyen hacia el NW.

Tabla 5. Geoformas asociadas al ambiente fluvial y su distribución en el área de estudio.

Ambiente	Acrónimo	Unidad	Área [km2]	Porcentaje
Fluvial	Fpi	Plano o llanura de inundación	0,443	3,54%
	Fte	Terraza de erosión	0,139	1,11%
	Ftee	Escarpe de terraza de erosión	0,039	0,31%
	Ftae	Escarpe de terraza de acumulación	0,043	0,34%
	Ftas	Terraza de acumulación subreciente	0,044	0,35%
	Ftan	Terraza de acumulación antigua	0,014	0,11%
	Fbp	Barra puntual	0,003	0,03%
	Fbl	Barra longitudinal	0,003	0,02%
	Fta	Terraza de acumulación	0,215	1,72%
	Fci	Cauce aluvial inactivo	0,176	1,41%
	Fca	Cauce aluvial activo	0,123	0,99%

Ambiente Estructural: Incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades. Este ambiente en la zona de estudio abarca el 8,93% (Tabla 6), siendo el menos predominante y dentro de él se encuentran las siguientes geoformas: Espolón festoneado moderado de longitud media (**Sefesmm**), Ladera estructural de colina (**Sleco**), Espolón festoneado bajo de longitud media (**Sefesbm**), Ladera estructural (**Sle**), Espolón festoneado moderado de longitud larga (**Sefesml**). Estas unidades se encuentran asociadas principalmente al trazo de la Falla de Bucaramanga y sus estructuras asociadas.

Tabla 6. Geoformas asociadas al ambiente estructural y su distribución en el área de estudio.

Ambiente	Acrónimo	Unidad	Área [km2]	Porcentaje
Estructural	Sefesmm	Espolón festoneado moderado de longitud media	0,447	3,58%
	Sleco	Ladera estructural de colina	0,049	0,39%
	Sefesbm	Espolón festoneado bajo de longitud media	0,242	1,94%
	Sle	Ladera estructural	0,028	0,22%
	Sefesml	Espolón festoneado moderado de longitud larga	0,350	2,80%

Morfometría: Se dedica al análisis cuantitativo de la superficie del terreno en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente, es decir, consiste esencialmente en la caracterización y el análisis digital de superficies topográficas continuas (Zinck, 2012).

Los atributos morfométricos (Figura 13) se calcularon a partir de un **M**odelo **D**igital del **T**erreno (MDT) con resolución espacial de 10 m, elaborado en base a la topografía realizada por el IGAC.

La **altura** o altitud generalmente se encuentra relacionada con diferentes procesos geológicos y geomorfológicos, tales como la erosión, infiltración a lo largo de diaclasas, acumulaciones de lodo y detritos y deformaciones de la pendiente (Ahmed *et al.*, 2015). Para el área se presentan alturas entre los 596 m.s.n.m. y los 1133 m.s.n.m., sin embargo, la mayor parte de los movimientos en masa ocurren entre los700 y 850 m.s.n.m.

La **pendiente** o grado de inclinación de la ladera se define como el ángulo existente entre una determinada superficie del terreno y un plano horizontal. Siendo este atributo el mejor indicador para realizar subdivisiones del relieve (Verstappen & van Zuidam, 1992), debido a que es una de las principales causas de los movimientos en masa. Para el área de estudio se tiene un rago de pendientes que abarca desde los 0° hasta los 61,5°, sin embargo, la mayor proporción de movimientos en masa se presentan en pendientes que varían entre 35° y 40°.

La **orientación** o aspecto de las laderas se define como la dirección de la pendiente máxima de la superficie del terreno, de igual forma permite conocer la orientación de los planos de los taludes del relieve con respecto a los puntos cardinales, se relaciona con factores como la lluvia, la cantidad de exposición al sol y la estructura morfológica de la zona que en conjunto afectan la estabilidad de la pendiente (Lombardo & Mai, 2018). En el área de estudio la mayor cantidad de eventos relacionados con movimientos en masa se encuentra en las orientaciones Este – Noreste.

El **SPI** por sus siglas en inglés (Stream Power Index) es una función del grado de inclinación de las laderas y de la acumulación del flujo, mide el poder de erosión de las distintas corrientes y se considera como un factor que contribuye a la estabilidad dentro del área de estudio (Regmi *et al.*, 2014), adicionalmente muestra los variados índices de erosión que ejercen los caudales de los ríos principales y todos sus afluentes en los depósitos y rocas adyacentes siendo, de esta forma, de mayor valor en dichas zonas. En el área de estudio se muestran los valores más altos de SPI hacia las zonas próximas a los cauces activos e intermitentes, respectivamente.

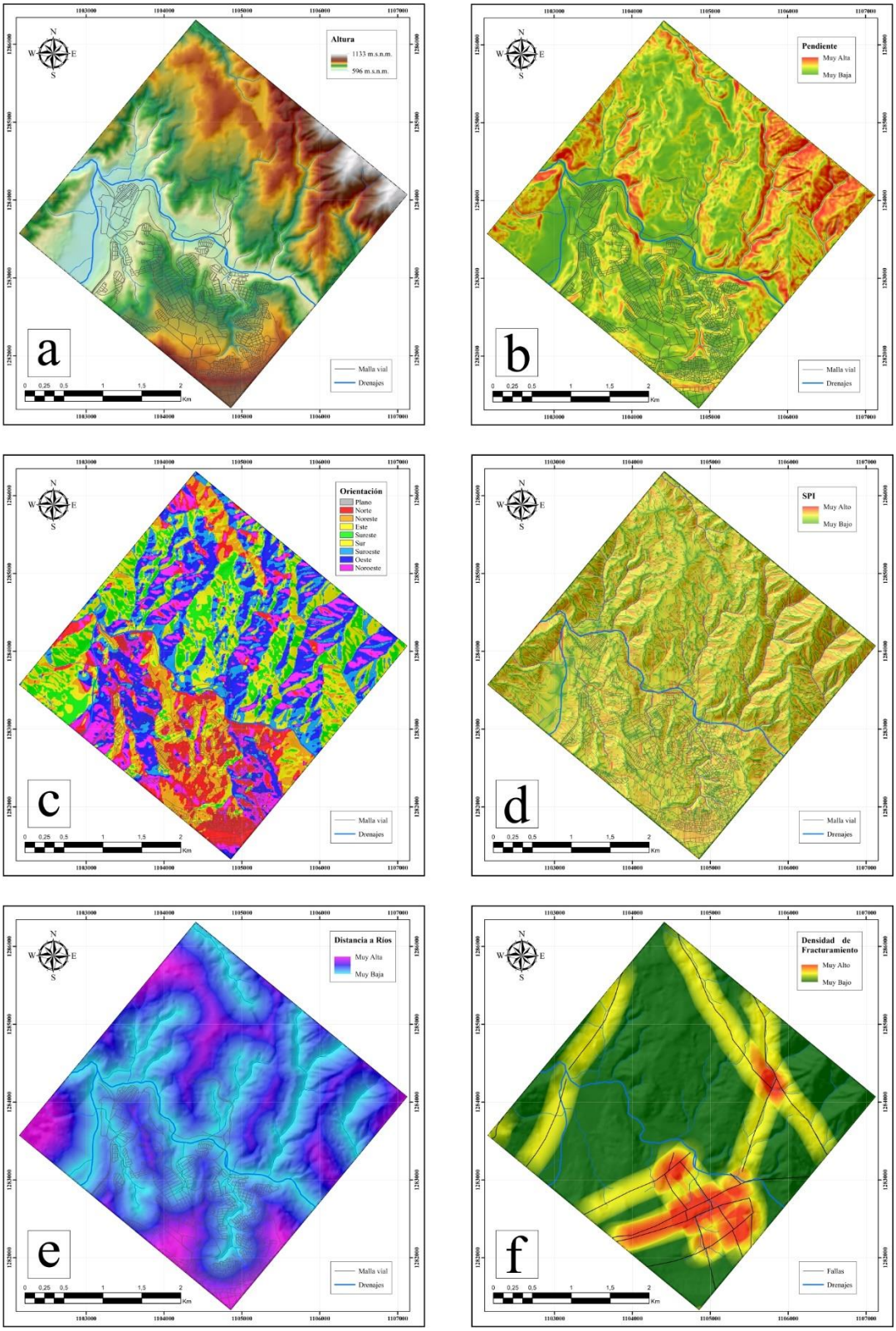


Figura 13. Mapas de atributos morfométricos tomados en cuenta para la realización del modelo de susceptibilidad. **a**) Altura, **b**) Pendiente, **c**) Orientación; **d**) SPI, **e**) Distancia a Ríos, **f**) Densidad de Fracturamiento.

La **distancia a ríos** es considerada como uno de los factores de mayor significancia en la ocurrencia de movimientos en masa (Nandi & Shakoor, 2010), esto debido a que la estabilidad de las laderas se ve afectada de una forma negativa por los cambios que produce su cercanía a fuentes hídricas, pues al saturarse ciertos materiales aumenta su presión de poros afectando directamente su resistencia a esfuerzos cortantes. Es posible apreciar, en el área de estudio, que las regiones con una cercanía entre 50 m y 300 m a ríos o drenajes en general presentan una mayor relación con los eventos de inestabilidad.

La **densidad de fracturamiento** agrupa las zonas anexas a las estructuras geológicas que se relacionen con deformaciones tectónicas activas, allí se tienen en cuenta lineamientos, pliegues y fallas dentro de la zona de estudio. Este factor se asocia directamente con la ocurrencia de movimientos en masa, siendo los materiales fracturados aquellos que tienen una mayor susceptibilidad a ser movilizados por fuerzas hidro-gravitatorias (Can *et al.*, 2005). Se encuentra que gran parte de las zonas con presencia de movimientos en masa están dentro de regiones con altas a medianas densidades de fracturamiento.

Morfodinámica: Estudia los procesos superficiales que afectan las geoformas 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). Es decir, hace referencia a la dinámica exógena relacionada con la actividad de agentes como el viento, agua, hielo y la acción de la gravedad terrestre. Adicionalmente, permite identificar y definir la evolución de los movimientos en masa además de su distribución espacial en el área de estudio (SGC, 2017).

Para la generación del mapa de eventos morfodinámicos se realizó un inventario que consta de 152 movimientos en masa (Figura 14), de los cuales 94 fueron obtenidos de la compilación de información disponible en las plataformas SIMMA y DESINVENTAR, de bases de datos de Gestión del Riesgo y CDMB, además de estudios realizados en la zona por Geotecnología S.A.S. y el Grupo de Investigación Geomática – UIS. Adicionalmente 58 movimientos en masa fueron identificados mediante fotointerpretación y tras el reconocimiento en campo.

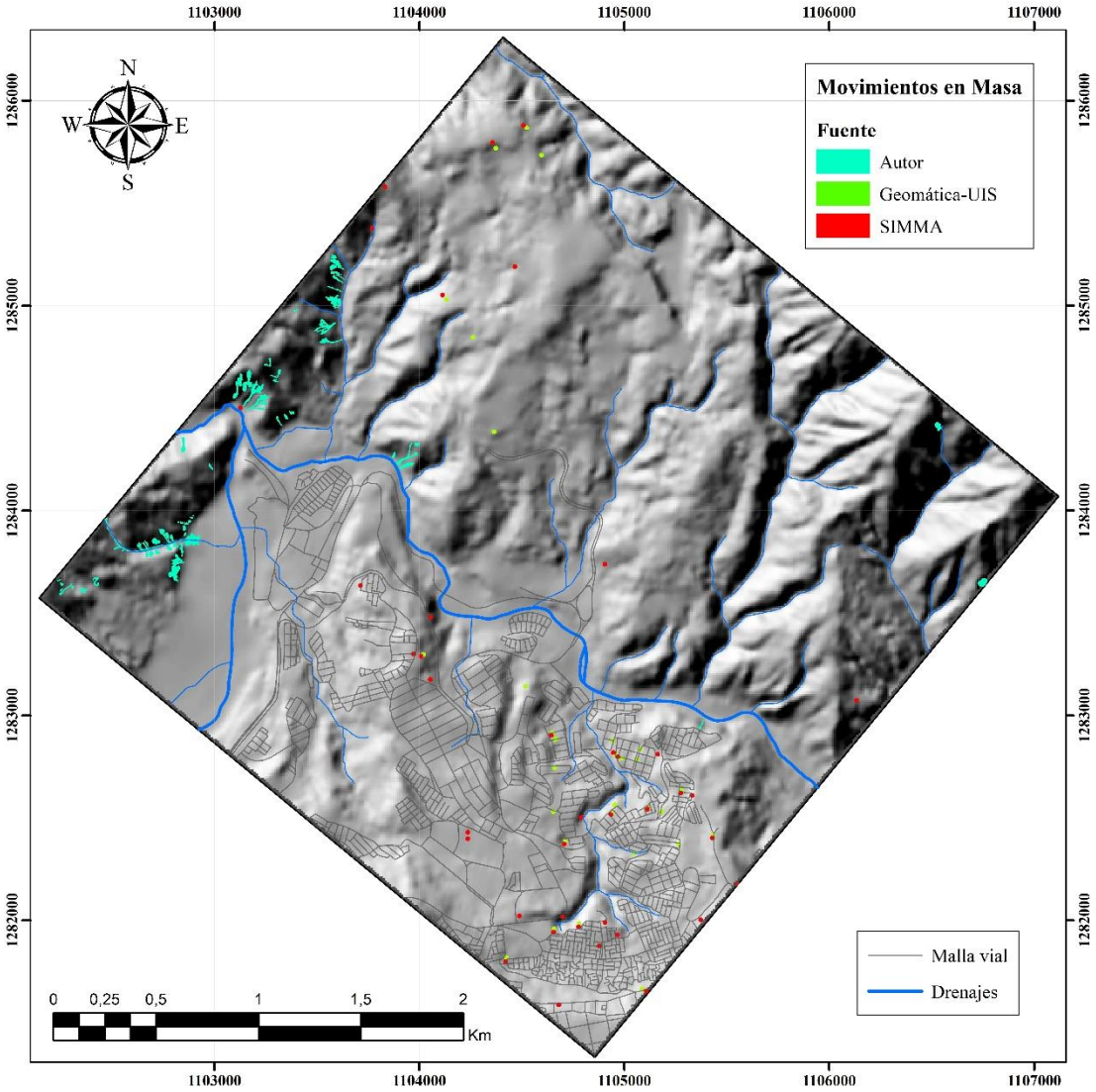


Figura 14. Inventario de movimientos en masa para la región de estudio, diferenciados por su fuente.

Usos del suelo: Los cambios en el uso del suelo tienen una gran influencia sobre la estabilidad de las laderas, por ello en las regiones con mayor dinámica poblacional, el impacto de los seres humanos en el medio ambiente contribuye significativamente a la iniciación y la reactivación de movimientos en masa (Reichenbach *et al.*, 2014). Este factor fue evaluado mediante la metodología vigente (IGAC & UPRA, 2015) que divide el territorio en zonas homogéneas según el uso actual que se le esté dando al suelo (Figura 15). De esta forma se obtuvieron 12 clases de usos, dentro de los que destacan el Residencial, el Cultivo Permanente Intensivo y los Sistemas Combinados de Agricultura, Ganadería y Forestería, por su representatividad en el área de estudio.

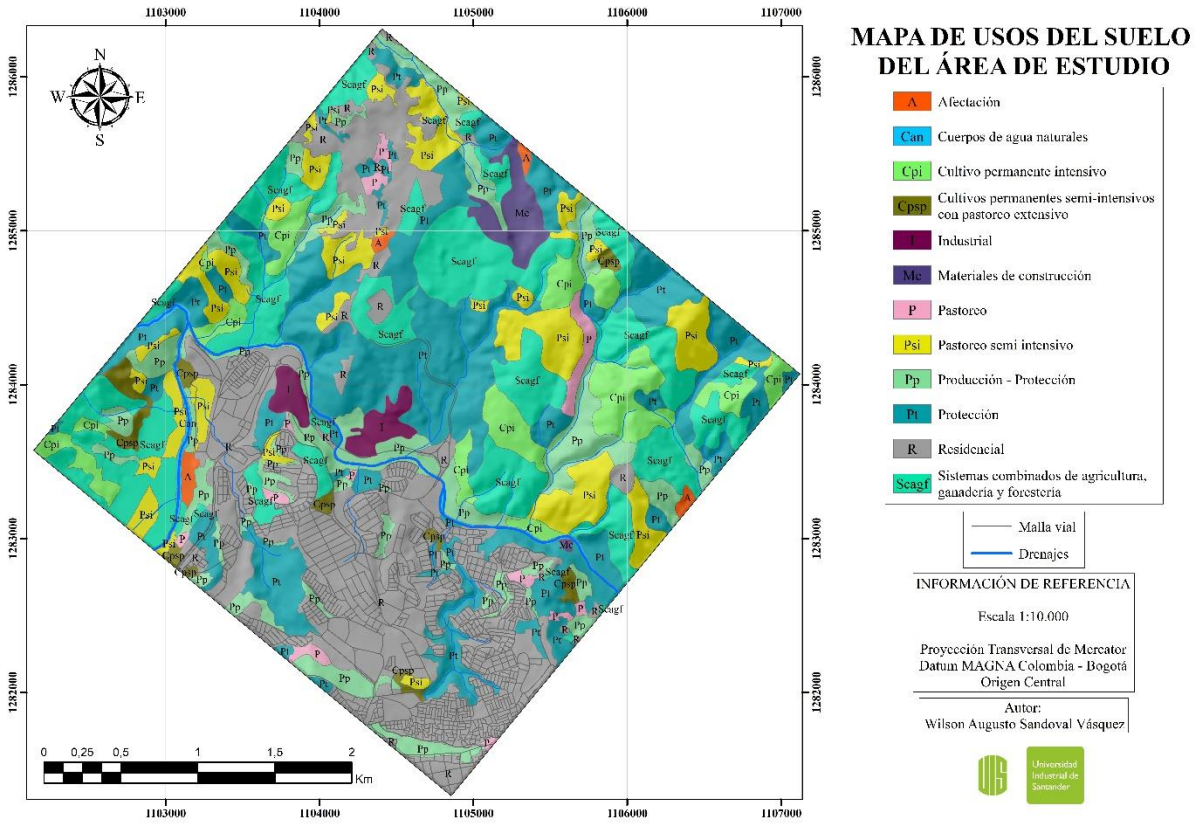


Figura 15. Mapa de Usos del Suelo para la zona de estudio. Realizado mediante la metodología indicada por IGAC & UPRA (2015).

Coberturas de la tierra: Los efectos de la vegetación en la estabilidad de las laderas son variados y van desde el punto de vista mecánico hasta el hidrológico, incrementando las fuerzas resistentes, por medio del soporte del suelo por enraizamiento y control de la erosión, además de la interceptación de la lluvia por la cobertura vegetal, la capacidad de infiltración, cambios en el contenido de agua en el suelo por evapotranspiración y efectos en la conductividad hidráulica (Suárez, 1998). Estos efectos, ligados a la cobertura vegetal, se relacionan directamente con la ocurrencia de movimientos en masa. Por ello, dentro del área de estudio se realizó la identificación de las coberturas de la tierra siguiendo la Metodología Corine Land Cover para Colombia (IDEAM, 2010), asignando las respectivas unidades de coberturas según correspondió (Figura 16).

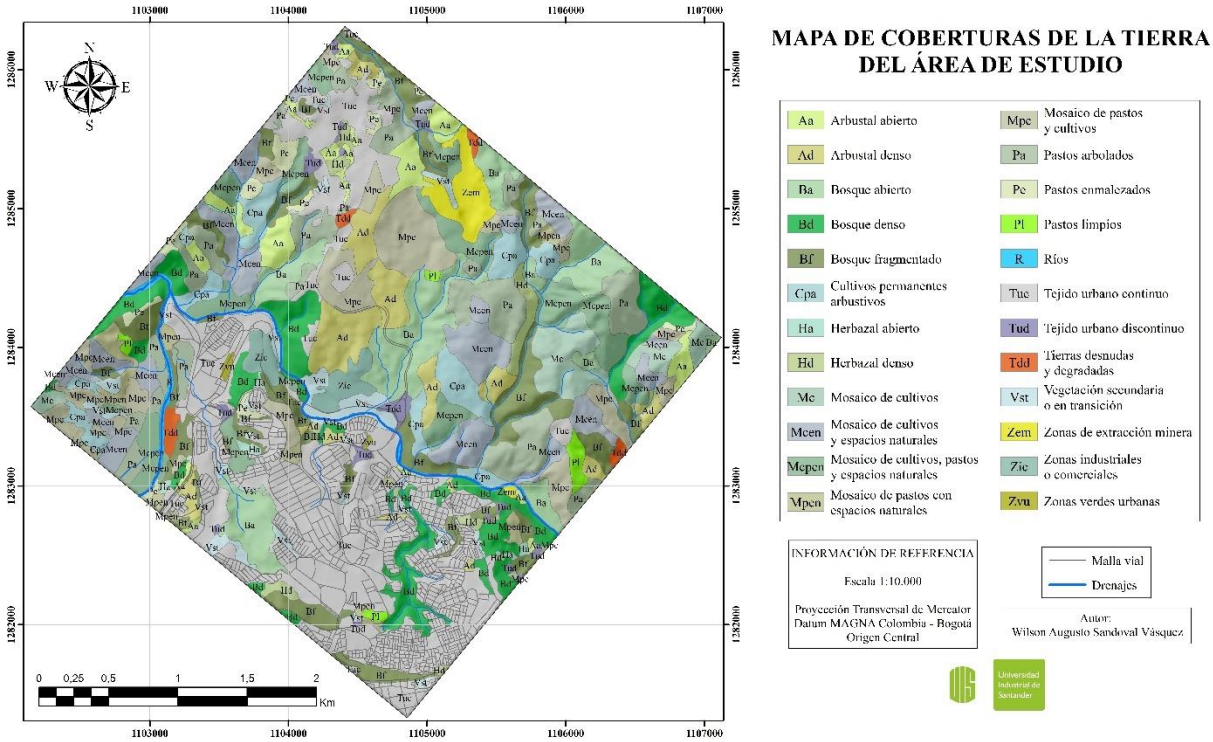


Figura 16. Mapa de Coberturas de la Tierra para la zona de estudio. Realizado bajo los lineamientos de la metodología Corin Land Cover para Colombia, propuesta por IDEAM (2010).

UGS: 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, hasta algunas decenas de metros por debajo de la superficie del terreno (Hermelín, 1985). Cada UGS se considera como el resultado de una serie de procesos tanto exógenos como endógenos que modelan la superficie terrestre y le confieren al terreno una serie de propiedades que la hacen más o menos susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa. Representan uno de los factores condicionantes más importantes en la inestabilidad de las laderas (SGC, 2017). Para el área de estudio, dentro del marco de esta investigación, se clasificaron los materiales superficiales en 111 unidades según su origen, composición, grado de meteorización y de fracturamiento (Figura 17).

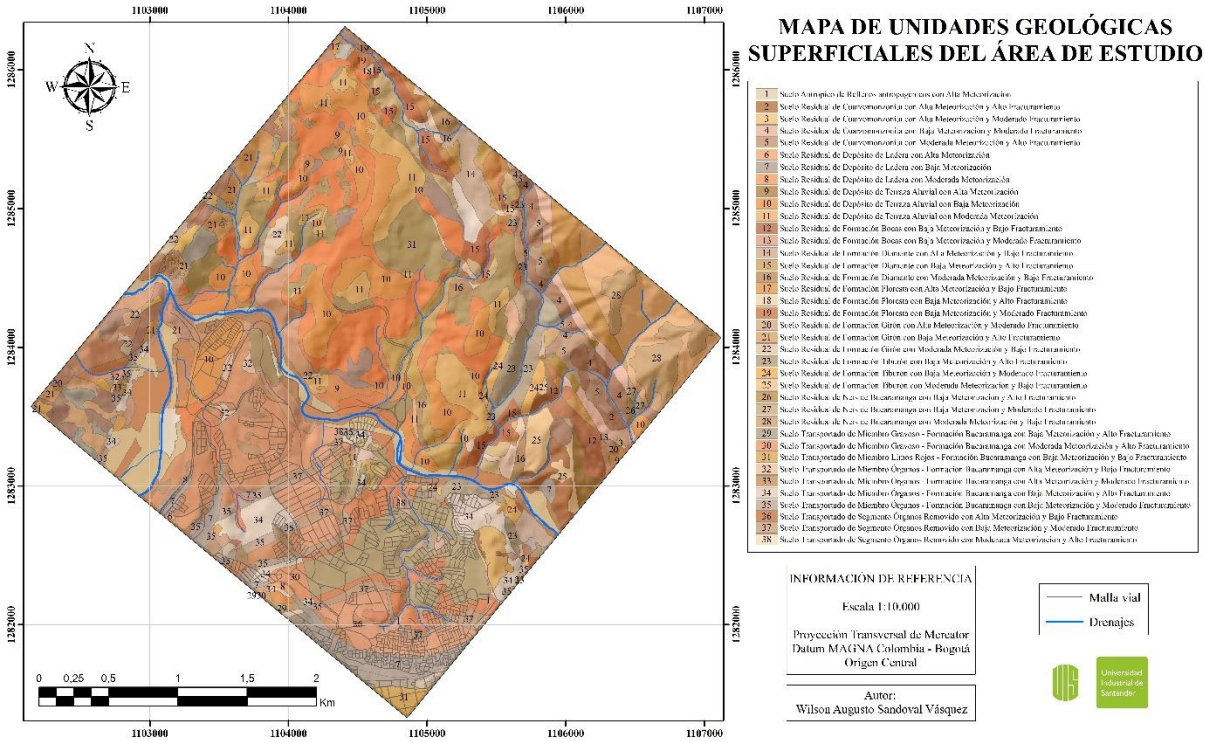


Figura 17. Mapa de Unidades Geológicas superficiales del área de estudio. Realizado bajo la metodología propuesta por Hermelín (1985).

7.3 Correlación y aplicación método de Regresión Logística y el algoritmo de Optimización por Colonia de Hormigas.

Durante esta fase se realizó la correlación y aplicación del método estadístico multivariado de Regresión Logística y su implementación dentro del algoritmo de Optimización por Colonia de Hormigas (RL-OCH). A manera de síntesis, se puede indicar que la RL mediante el procesamiento de datos de entrada, donde se encuentran todos los factores condicionantes y variables morfométricas, genera para cada uno de ellos un conjunto de pesos (Z) que luego son usados para calcular la probabilidad total, sin embargo, a lo largo de su aplicación, este método permite la elección de distintas combinaciones de los parámetros de entrada, generando a su vez, varias opciones de conjuntos de datos totalmente válidas desde el punto de vista estadístico. Es allí donde se hace necesaria la integración de la OCH que mediante su algoritmo elije la mejor opción de ellas. Finalmente, la susceptibilidad es calculada a partir del conjunto de pesos (Z) elegido.

7.3.1 Aplicación del modelo de Regresión Logística (RL)

La RL es un análisis en el que se trata de probar un modelo de predicción de probabilidad de ocurrencia de una variable categórica dicotómica. Existen dos tipos dentro de este grupo, la RL binomial y la RL multinomial, que hacen referencia a cuando la variable dependiente evaluada tiene sólo dos categorías y más de dos, respectivamente. Se hará énfasis en la primera de ellas, debido a que esta se usa en situaciones cuando la variable dependiente es una variable categórica de sólo dos categorías (dicotómica) (Ayalew & Yamagishi, 2005). Tal es el caso de la ocurrencia de movimientos en masa. Por otro lado, con respecto a las variables independientes puede ser una o pueden ser varias de ellas dicotómicas o cuantitativas. Esta metodología se usa además en los casos en que se enfoquen en la causalidad predictiva, es decir, tratar de generar predicciones a partir de modelos matemáticos (Jovell, 1995). Lo anterior aplica muy bien a la susceptibilidad a movimientos en masa En la regresión logística, la variable dependiente no es cuantitativa. Es decir, la RL busca encontrar asociaciones en función de una probabilidad de ocurrencia que se dé una categoría cuando existen otras categorías de otras variables independientes.

Para la realización de esta fase del presente trabajo se optó por la integración en el programa IBM SPSS Statistics V25 de los datos de todas las variables relacionadas (Figura 18). Esta herramienta, ofrece técnicas de recolección y tratamientos de datos y analítica predictiva para la solución de múltiples problemas (Aranaz, 2002) basándose en la relación de diferentes clases de variables (ordinales, nominales y escalares).

	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta	Valores	Perdidos	Columnas	Alineación	Medida	Rol
1	Geología	Numérico	7	4		Ninguno	Ninguno	10	Izquierda	Nominal	Entrada
2	Geomorfología	Numérico	7	4		Ninguno	Ninguno	12	Izquierda	Nominal	Entrada
3	Usos	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	13	Izquierda	Nominal	Entrada
4	Coberturas	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	9	Izquierda	Nominal	Entrada
5	UGS	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	8	Izquierda	Nominal	Entrada
6	Altura	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	11	Izquierda	Escala	Entrada
7	Pendiente	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	8	Izquierda	Escala	Entrada
8	SPI	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	8	Izquierda	Escala	Entrada
9	Orientación	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	9	Izquierda	Escala	Entrada
10	Den_Frac	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	9	Izquierda	Escala	Entrada
11	Dist_Ríos	Numérico	25	16		Ninguno	Ninguno	8	Izquierda	Escala	Entrada
12	Mov_Masa	Numérico	7	0		Ninguno	Ninguno	8	Izquierda	Nominal	Entrada

Figura 18. Conjunto de datos de las distintas variables y su configuración en el programa IBM SPSS Statistics V25. Se resalta la elección del tipo de variable en la casilla denominada “Medida”.

Inicialmente, y antes de realizar algún tipo de análisis de los resultados de la RL es necesario evaluar y garantizar ciertos postulados o supuestos intrínsecos del método en cuestión. Esto se

hace aún más imprescindible cuando se tiene más de una variable independiente, como es el caso de este trabajo.

Supuestos de la Regresión Logística

Linealidad: Aunque la linealidad en este método no se cumple, ya que en él se toman en cuenta las variables categóricas, esta sí se garantiza mediante la realización del procedimiento estadístico, esto cuando en lugar de hacer una regresión múltiple se hace una regresión logística.

No multicolinealidad: Expresa el grado de interrelación entre los predictores y lo que la técnica de RL asume es que ésta es de baja magnitud. No es posible corroborar este supuesto en el proceso de la RL, sin embargo, mediante procedimientos previos de regresión lineal múltiple se consigue la confirmación del mismo. Este supuesto puede ser verificado mediante el análisis del valor estadístico arrojado allí, conocido como Factor de Varianza Inflada (VIF). El valor de VIF que indica que no existe en absoluto multicolienealidad es 1, y unos buenos resultados se pueden obtener hasta un valor de 10, sin embargo, mayores a este límite podrían generar problemas dentro de la RL. Para el presente estudio, los valores de VIF de las diferentes configuraciones del conjunto de datos de entrada se mantuvieron en el rango de 2 a 4, verificando para todos los casos este supuesto (Fajardo & Mejía, 2017).

Independencia de errores: Tampoco es posible corroborar este supuesto en el proceso de la RL, sin embargo, nuevamente mediante procedimientos previos de regresión lineal múltiple se consigue la confirmación de este. Este supuesto es evaluado a partir del coeficiente estadístico de Durbin-Watson. Idealmente, este valor debe encontrarse en el rango de valores de 1 a 3, no obstante valores distintos no deben descartarse de inmediato sino deben ser analizados con cuidado sus respectivos resultados. Para el presente estudio, los valores de dicho coeficiente se mantuvieron entre 1.205 y 2.062 para las diferentes configuraciones del conjunto de datos de entrada, verificando para todos los casos este supuesto.

Adicionalmente, aunque los siguientes no son supuestos en el sentido estricto, sí son aspectos que se tuvieron en cuenta a la hora de aplicar la RL, con el fin de obtener un análisis de datos coherente y garantizar los resultados (Ahmed *et al.*, 2015; Akgun & Erkan, 2016).

Información incompleta de predictores: Si se trata con variables cualitativas, en donde se trabajan con las matrices que forman las categorías de los datos, se debe tener en cuenta que hay

que garantizar que cada posición dentro de cada matriz contenga información, de lo contrario se verían afectados los resultados, e incluso esto podría inhabilitar el análisis de RL.

Separación completa de variables: Esto hace referencia a la asociación entre las variables a utilizar y es complementario al supuesto de independencia de errores. Y denota que se estén midiendo datos distintos, no mediciones de la misma variable en diferentes momentos.

Sobredispersión: Es una condición que surge desde los principios de los análisis numéricos que se le realiza a un conjunto de datos. Enuncia que, si existen distancias muy grandes entre las categorías de las variables en cuestión, podrían generarse errores y algunos problemas con los resultados obtenidos.

El análisis de RL dentro de los distintos softwares estadísticos no tiene la posibilidad u opción de informar o mostrar que se cumplen o no esos supuestos dentro de él, pero se hace uso de las herramientas que da SPSS para poder obtener los resultados que se necesitan en cuanto a los supuestos. Tal es el caso de los ya mencionados coeficientes estadísticos de VIF y de Durbin-Watson a partir de una regresión lineal que corroboran los dos últimos supuestos, respectivamente (Fajardo & Mejía, 2017).

No obstante, cuando se tienen variables cualitativas, el supuesto de linealidad, de entrada ya no se cumple, (cuando se tienen variables cualitativas y estas se plotean en un diagrama de puntos, a diferencia de cuando son variables cuantitativas, no se encontrarán distribuidos a lo largo de un línea de tendencia sino que existirán dos grupos o nubes de datos, asociados con las categorías de la variable dependiente) es por ello que es necesario hacer una transformación logarítmica posterior para cumplir este supuesto (Logit), el cual podría definirse como la unidad de trabajo con la que se realizan las regresiones logísticas (Castro, 2014). Esto se realiza mediante la integración de los valores de los pesos (Z) calculados en la RL dentro de la (2), calculando en consecuencia la probabilidad total.

Luego de hacer la verificación de los supuestos, se realizó la elección de parámetros que iban a ser parte del modelo estadístico multivariado de Regresión Logística, este conjunto de datos engloba las denominadas variables independientes fue escogido de los insumos anteriormente mencionados (factores condicionantes y variables morfométricas). Adicionalmente, para cada uno de ellos se eligió una categoría de variable o medida, de la siguiente manera:

Variables Nominales: Geología, Geomorfología, Usos del Suelo, Coberturas de la Tierra, UGS.

Variables Escalares: Altura, Pendiente, SPI, Orientación, Densidad de Fracturamiento, Distancia a Ríos.

En donde, las variables nominales son categóricas y no se presenta ninguna relación de orden o jerarquía dentro de ellas, es decir, tienen categorías mutuamente excluyentes. Y las variables escalares representan las que contienen conjuntos de datos cuantitativos, ya sean discretas o continuas.

Dentro del procesamiento de los datos, se hace necesaria la codificación de las clases de cada variable. Para la variable dependiente, que es dicotómica o binaria, se codifica con valores de 1 en donde se presente ocurrencia de movimientos en masa y con 0 en donde no se presente. Para las variables independientes se realiza una normalización, con el fin de facilitar el análisis e interpretación final (Ayalew & Yamagishi, 2005). Esta normalización se realizó siguiendo la (**7**).

$$X = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{7}$$

En donde, X es el valor normalizado calculado para el dato x_i, x_{min} y x_{max} representan el menor y mayor valor dentro del conjunto de datos, respectivamente.

Dentro del análisis de la RL se realizaron 100 pruebas, introduciendo diferentes configuraciones del conjunto de datos con el fin de encontrar el modelo con mejor ajuste y que represente las condiciones reales del área de estudio. Con base en los distintos coeficientes mencionados anteriormente se definieron cuáles de las variables tenían una mayor significancia, es decir, cuáles les estaban aportando al modelo de una manera positiva. De allí fueron seleccionadas las 13 pruebas con mayor relevancia, según el valor de R^2 de Nagelkerke (Tabla 7. Pruebas elegidas del procesamiento de RL con base en el valor de R2 de Nagelkerke y el porcentaje de predicción con el modelo para cada una de ellas.).

Tabla 7. Pruebas elegidas del procesamiento de RL con base en el valor de R2 de Nagelkerke y el porcentaje de predicción con el modelo para cada una de ellas.

# Prueba	Normalizada	Medida	Variables utilizadas	Predicción con modelo	R2 de Nagelkerke
69	sí	Escalares (6,7,8,9,10,11) Nominales (1,2,3,4,5,12)	todas	90,380762	0,7132735
70	sí	Escalares (6,7,8,10,11) Nominales (1,2,3,4,5,12)	sin orientación	90,340681	0,7035509
71	sí	Escalares (7,8,9,10,11) Nominales (1,2,3,4,5,12)	sin altura	90,380762	0,7132648
72	sí	Escalares (6,8,9,10,11) Nominales (1,2,3,4,5,12)	sin pendiente	90,180361	0,7019710
73	sí	Escalares (6,7,9,10,11) Nominales (1,2,3,4,5,12)	sin spi	90,220441	0,7113474
74	sí	Escalares (6,7,8,9,10) Nominales (1,2,3,4,5,12)	sin dist_ríos	90,380762	0,7131850
75	sí	Escalares (6,7,8,9,11) Nominales (1,2,3,4,5,12)	sin den_frac	90,501002	0,7104026
76	sí	Escalares (6,7,8,9,10,11) Nominales (2,3,4,5,12)	sin geología	89,699399	0,6919175
77	sí	Escalares (6,7,8,9,10,11) Nominales (1,3,4,5,12)	sin geomorfología	90,260521	0,6934647
78	sí	Escalares (6,7,8,9,10,11) Nominales (1,2,4,5,12)	sin usos	90,380762	0,7132735
79	sí	Escalares (6,7,8,9,10,11) Nominales (1,2,3,5,12)	sin coberturas	90,260521	0,7030959
80	sí	Escalares (6,7,8,9,10,11) Nominales (1,2,3,4,12)	sin ugs	87,695391	0,6088618
81	sí	Nominales (1,2,3,4,5,12)	sólo geología, geomorfología, usos, coberturas y ugs	90,060120	0,6900775

Como se puede observar en las pruebas elegidas, a pesar de ser las mejores según los parámetros mencionados, no es posible seleccionar sólo una de ellas de manera totalmente objetiva, pues estadísticamente todas serían válidas. Para esta elección se hace la integración de la OCH en la siguiente fase.

7.3.2 Integración del algoritmo de Optimización por Colonia de Hormigas

La Optimización mediante Colonia de Hormigas (OCH) tiene su fuente de inspiración en el comportamiento de colonias de hormigas reales, en esta analogía OCH se basa en la comunicación indirecta de una colonia de agentes llamados hormigas artificiales por medio de una huella de feromona. Este rastro sirve como información numérica distribuida que las hormigas usan como distribución probabilística de soluciones del problema a resolver y la adaptan mediante la ejecución del algoritmo para reflejar su experiencia de búsqueda (Ortiz, 2013).

Para la iniciación del algoritmo deben tenerse en cuenta los parámetros que conforman las ecuaciones generalizadas del algoritmo (**4**), tales como el número de hormigas y consecuentemente iteraciones para lograr la convergencia de una solución óptima, el rastro inicial de feromona asociado a la transición en cada iteración, los pesos o frecuentemente llamado parámetro heurístico. Adicionalmente, es necesaria la definición de la actualización de la feromona (**5**) en la que, por medio de la acumulación de feromona en soluciones recurrentes y la evaporación de feromona en soluciones de poca confluencia, se hace una retroalimentación con el finde explorar todo el espacio muestral definiendo la ruta óptima. Estos parámetros definirán la proporción en la que se afectará la regla de transición probabilística que conforma el algoritmo OCH.

La interpretación e implementación de la OCH al análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, se realizó mediante la correlación de los parámetros intrínsecos del método en cuestión con los resultados de los pesos (Z) y los R^2 de Nagelkerke de la RL en la anterior etapa (Figura 19).

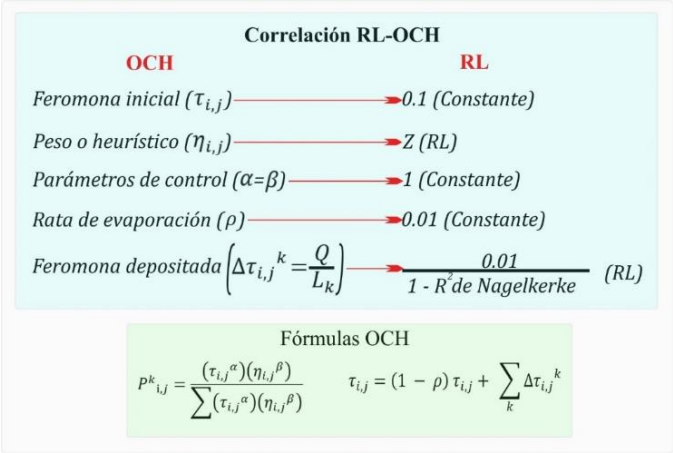


Figura 19. Correlación de los parámetros de la OCH con los resultados obtenidos mediante la RL anteriormente.

Posterior a la correlación de los parámetros, se procedió a construir las bases del algoritmo de OCH para la configuración de los 13 conjuntos de datos aportados por el modelo de la RL (Figura 20).

$$P_{ij} = \frac{\tau \times Z_i}{\sum_{i=1}^{n}(\tau \times Z_i)}$$

$$\tau_{ij} = (1-\rho)\tau + \Delta\tau$$

$$\Delta\tau = \frac{0{,}01}{1-R^2}$$

$\rho =$ 0,01

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
delta t -->	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
R^2 Nagelkere	0,71	0,7	0,71	0,7	0,71	0,71	0,71	0,69	0,69	0,71	0,7	0,61	0,69
#	Z69	Z70	Z71	Z72	Z73	Z74	Z75	Z76	Z77	Z78	Z79	Z80	Z81
774	10,4	10,7	10,4	10,1	10,3	10,5	11,7	18,8	-9,65	8,77	8,19	17,2	11
775	9,93	10,2	9,97	10,2	9,94	9,98	11,2	18,4	-10,2	8,29	7,69	16,7	11
1273	11	11,2	11	10,2	10,8	11	12,3	19,4	-8,99	9,36	8,8	17,7	11
1274	11,1	11,3	11,1	10,2	10,9	11,1	12,4	19,5	-8,94	9,42	8,86	17,7	11

H1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Feromona	P_Z69	P_Z70	P_Z71	P_Z72	P_Z73	P_Z74	P_Z75	P_Z76	P_Z77	P_Z78	P_Z79	P_Z80	P_Z81
0,1	0,08223	0,084	0,083	0,08	0,081	0,083	0,093	0,15	-0,076	0,069	0,065	0,136	0,087
0,1	0,08214	0,084	0,082	0,084	0,082	0,083	0,093	0,15	-0,084	0,069	0,064	0,138	0,091
0,1	0,08249	0,084	0,083	0,076	0,081	0,083	0,092	0,15	-0,067	0,07	0,066	0,133	0,082
0,1	0,08249	0,084	0,083	0,076	0,081	0,083	0,092	0,15	-0,067	0,07	0,066	0,132	0,082

H2

12														
Z_aleatorio														
9	Feromona	Feromona	más actualización de feromona											
R^2 aleatorio	disipada	acumulada	P_Z69	P_Z70	P_Z71	P_Z72	P_Z73	P_Z74	P_Z75	P_Z76	P_Z77	P_Z78	P_Z79	P_Z80	P_Z81
0,608861838	0,099	0,12456641	0,0794	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,14	-0,07	0,07	0,06	0,13	0,08
0,608861838	0,099	0,12456641	0,0793	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,15	-0,08	0,07	0,06	0,13	0,09
0,608861838	0,099	0,12456641	0,0798	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,14	-0,07	0,07	0,06	0,13	0,08
0,608861838	0,099	0,12456641	0,0798	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,14	-0,06	0,07	0,06	0,13	0,08

H100

10															
Z_aleatorio															
7	Feromona	Feromona	más actualización de feromona												
R^2 aleatorio	disipada	acumulada	P_Z69	P_Z70	P_Z71	P_Z72	P_Z73	P_Z74	P_Z75	P_Z76	P_Z77	P_Z78	P_Z79	P_Z80	P_Z81
0,71327354	0,0913517	0,7851994	0,329	0,337	0,33	0,32	0,326	0,33	0,371	0,594	-0,3	0,277	0,258	0,543	0,347
0,71327354	0,0913517	0,7851994	0,329	0,337	0,33	0,337	0,329	0,331	0,372	0,609	-0,34	0,275	0,255	0,554	0,364
0,71327354	0,0913517	0,7851994	0,328	0,335	0,329	0,304	0,324	0,33	0,368	0,579	-0,27	0,279	0,263	0,527	0,328
0,71327354	0,0913517	0,7851994	0,328	0,334	0,329	0,302	0,324	0,329	0,367	0,578	-0,27	0,28	0,263	0,526	0,326

Figura 20. Extracto de las matrices de procesamiento de la OCH para el cálculo y elección de la solución óptima para el modelo de susceptibilidad.

Inicialmente se dispusieron los datos de Z en columnas, que representaron cada uno de los posibles caminos a elegir, para posteriormente ser relacionados mediante las fórmulas de la OCH, cada una de ellas se asoció dentro la correlación anterior (Figura 19), y consecuentemente se

procedió a realizar la primera iteración con la hormiga 1, esta tuvo en cuenta los valores de feromona iniciales constantes y una evaporación de igual forma constante. Para la segunda iteración con la hormiga 2, se tomaron en cuenta los valores de probabilidad anteriormente calculados y adicionalmente se realizó una elección aleatoria para seleccionar el próximo camino (desde la iteración 1 a la 2); al finalizar este paso se actualizaron los datos de feromona, tanto como por acumulación como por disipación, la cual será tenida en cuenta para la siguiente iteración en lugar del valor inicial constante de feromona. De esta forma se realiza una retroalimentación de acuerdo con los caminos (Z) elegidos. Se realizó este mismo procedimiento en los siguientes pasos, y a medida que esto se hacía, los valores de probabilidad fueron convergiendo a una Z en particular en la hormiga 100 (Figura 20), evidenciándose esto en la no variación significativa de los valores de probabilidad acumulada, siendo esta la solución óptima. La prueba elegida fue la número 73.

Posteriormente, y como procesamiento adicional, se optó por realizar cálculos de la OCH con los caminos (Z) restantes, es decir suprimiendo la solución óptima ya encontrada. Esto se realizó 5 veces en total, con el fin de evaluarlas también mediante los métodos de validación mostrados en el capítulo respectivo.

Una vez, elegidos los conjuntos de datos relacionados con los pesos (Z) de las clases de cada variable, se procedió a elaborar el mapa de susceptibilidad para cada caso con la integración de ellos en la (**3**).

7.4 Validación de resultados.

Esta fase correspondió a la validación y calibración de los resultados obtenidos. La validación del modelo generado por la RL-OCH fue evaluado mediante tres pruebas distintas que muestran la concordancia de este con la realidad del terreno.

La primera de ellas es una prueba intrínseca del análisis multivariado de regresión logística que se basa en la determinación del coeficiente **R^2 de Nagelkerke**, que fluctúa de 0 a 1 dependiendo del caso y da cuenta del porcentaje de varianza que se está explicando de la variable dependiente, es decir, el valor de este coeficiente muestra considerablemente cómo el modelo de probabilidad se ajusta al conjunto de datos de las variables independientes (Menard, 1995). Se considera un ajuste perfecto cuando este valor es de 1 y una relación nula cuando muestra un valor de 0,

asimismo se estipula que a partir de un valor de 0,2 existe una evidencia relativa de bondad de ajuste (Clark & Hosking, 1986).

El segundo método de validación se realizó a partir de la **Curva ROC**, (por sus siglas en inglés Receiver Operating Characteristic) que es un método muy usado muestra las curvas de éxito y predicción de mapas de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa evaluados por distintos métodos (Lee et *al.*, 2007). Esta curva representa gráficamente la sensibilidad frente a la especificidad, y es calculada para diferentes umbrales. La sensibilidad representa la relación de píxeles inestables por encima de un umbral deseado que el modelo predice correctamente sobre los píxeles inestables totales observados y la especificidad es la proporción de píxeles estables por debajo del umbral deseado que predijo correctamente el modelo sobre los píxeles estables totales observados. En otras palabras, representa la probabilidad de tener Verdaderos Positivos (correcta predicción del acontecimiento) es decir, la sensibilidad, versus la probabilidad de tener Falsos Positivos (Predicción incorrecta del acontecimiento). Adicionalmente, el valor del área bajo la curva para un modelo en específico debe ser superior a 0,7 para ser considerado aceptable (Vakhshoori & Zare, 2016).

Por último, la tercera prueba realizada corresponde al **Porcentaje de predicción de Choi**, en esta se realiza la validación mediante la comparación de los porcentajes de área de las regiones con presencia de movimientos en masa para cada una de las categorías de susceptibilidad (Choi *et al.*, 2010).

Los valores arrojados en los diferentes métodos de validación son mostrados y discutidos en el capítulo de resultados.

7.5 Generación mapa de amenaza

Esta fase consistió en la generación del Mapa de Amenaza, partiendo del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa que fue calculado por la metodología RL-OCH y de la posterior integración de los detonantes sísmico y climático según la metodología propuesta por SGC (2013). El mapa final de amenaza es mostrado en el capítulo de resultados.

7.5.1 Detonante sísmico:

A lo largo y ancho del territorio colombiano se presenta una sismicidad muy activa. Producto de algunos eventos de grandes magnitudes, se han registrado cuantiosas pérdidas de diversa índole. Es por ello que se ha incentivado la investigación en cuando a la amenaza sísmica generando diversos productos en los últimos años, tales como el Mapa Nacional de Amenaza Sísmica de Ingeominas (2009) y posteriores estudios derivados. Se observan las categorías de amenaza para las distintas zonas del país (Figura 21). Para el área de Bucaramanga se tiene un valor 3 de amenaza que se traduce en aceleraciones entre 150 cm/s^2 y 200 cm/s^2 (SGC, 2013).

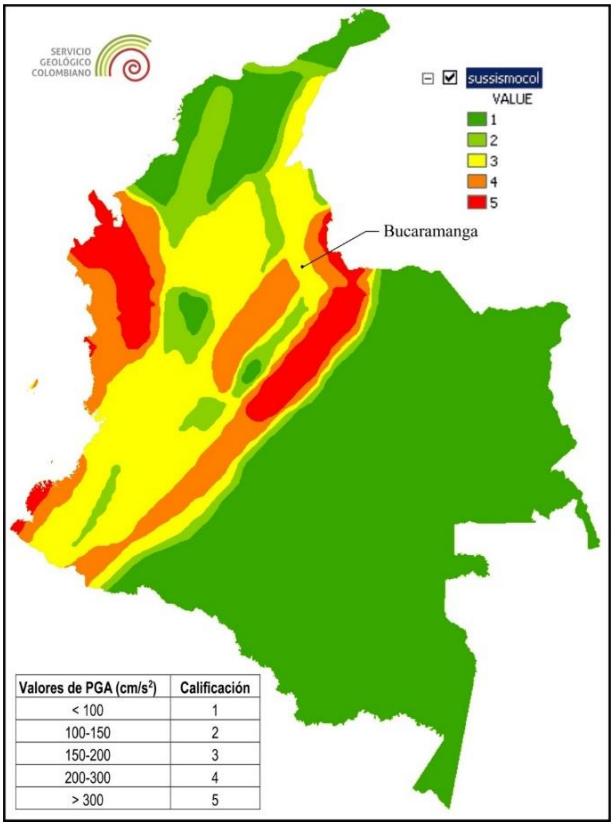


Figura 21. Aceleración máxima horizontal a nivel de roca-PGA para Colombia calificada con base en su contribución a la generación de movimientos en masa. Modificada de SGC (2013).

Para la creación del detonante sísmico, en el presente trabajo, se tomó en cuenta la investigación realizada por Valencia (2018) para el departamento de Santander. Allí se hizo uso del programa libre R-CRISIS V18, el cual cuenta con la capacidad de realizar análisis de riesgo sísmico probabilístico (PSHA) utilizando un enfoque totalmente probabilístico (Figura 22), mediante el método de máxima verosimilitud, que permite el cálculo de resultados en términos de resultados con diferentes características, es decir, gráficos de probabilidad de excedencia, conjunto de

eventos estocásticos (Ordaz & Salgado, 2017). La evaluación de la amenaza sísmica se lleva a cabo a partir de la teoría sismológica clásica teniendo en cuenta las características de sismicidad de las fuentes, las relaciones de atenuación de la energía con la distancia y el tipo de material o medio de propagación, y la integración probabilística de las intensidades sísmicas deseadas teniendo en cuenta ya sea, aceleración, velocidad o desplazamiento (Salgado, *et al.*, 2010).

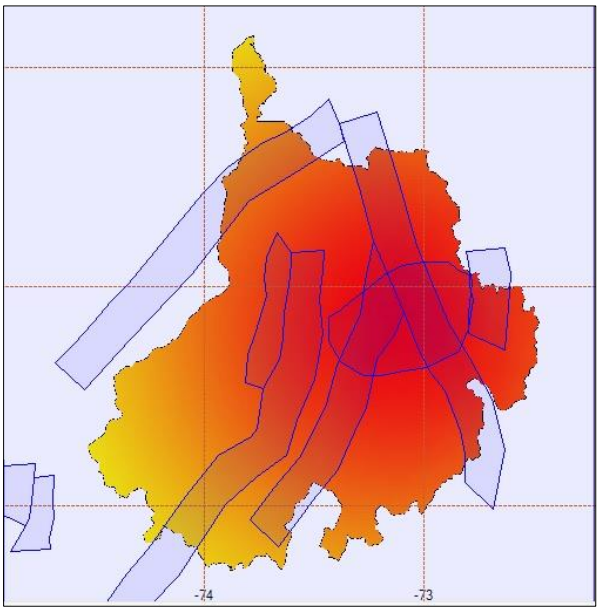


Figura 22. Mapa de Amenaza Sísmica para el departamento de Santander, mostrando datos geométricos de las fuentes sismogénicas activas. Modificada de Valencia (2018).

La metodología seguida para la elaboración del mapa de amenaza sísmica consistió, a manera de síntesis, en la identificación y modelamiento de cada una de las fallas y/o fuentes sismogénicas (estas pueden ser corticales o profundas) a nivel regional con incidencia en la zona de estudio, agrupándose por segmentos, allí se tuvieron en cuenta los datos geométricos de estas fallas activas, profundidades de despegues, tasas y tipos de movimiento. Lo anterior producto de una exhaustiva revisión bibliográfica. Posteriormente se realizó la asignación de los respectivos eventos sísmicos asociados a cada uno de los segmentos, teniendo en cuenta también su profundidad, haciendo uso de la información histórica consignada en el Catálogo Sísmico del SGC, esto con un previo depurado de todos los eventos con magnitud igual o superior a 4.0. Adicionalmente, se caracterizó cada una de las fuentes sísmicas mediante parámetros estadísticos relevantes, tales como magnitud mínima y máxima, frecuencias de eventos para diferentes rangos de magnitudes. Finalmente, los anteriores datos fueron implementados en el programa R-CRISIS en donde se realizó el análisis

probabilístico respectivo, en base a los fundamentos de las leyes de atenuación (Campbell & Bozorgnia, 2014), y finalmente con estos datos es posible calcular la amenaza sísmica en un lugar específico al integrar los efectos de las fuentes sísmicas y la distancia entre el sitio de evaluación y la fuente (Salgado, *et al.*, 2010; Triviño, 2017; Valencia, 2018).

7.5.2 Detonante climático

Colombia es un país con una variabilidad climática muy marcada, y consigo, un amplio espectro de valores de precipitación (Figura 23). Específicamente, en Bucaramanga se presentan precipitaciones mensuales alrededor de 150 mm, en promedio. Esto es concordante con los datos obtenidos del modelo estadístico para la generación del detonante asociado a la lluvia de la zona de estudio.

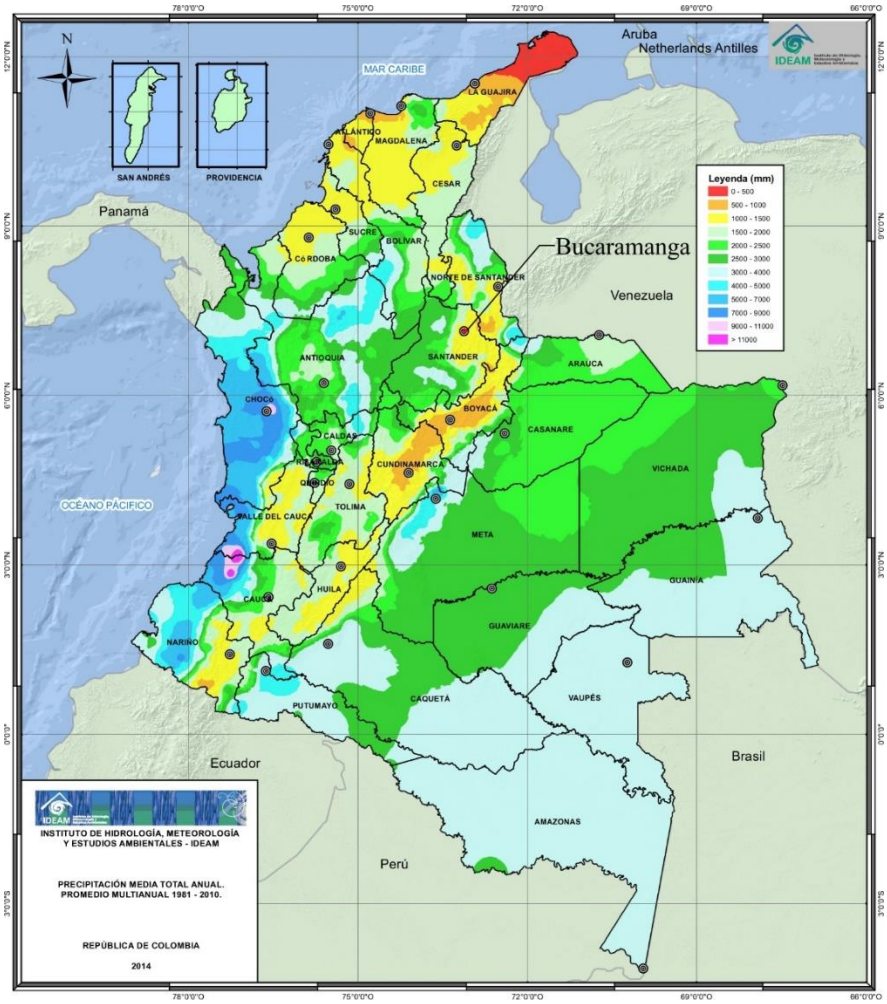


Figura 23. Contexto regional del régimen de precipitación media anual. Modificado de IDEAM, 2014.

El análisis de este factor en el presente estudio fue realizado a partir de la integración de datos históricos de 13 estaciones meteorológicas del IDEAM presentes en la región (Figura 24) y de su relación estadística de valores máximos mensuales de precipitación diaria en una línea de tiempo que abarca 59 años, evidenciada en los registros de dichas estaciones desde 1958 hasta 2017.

Aplicando la distribución de probabilidad de Poisson se realiza una lluvia de diseño de 24 horas y se calculan los valores críticos de lluvias con periodos de retorno de 100 años. Este rango de extrapolación fue definido debido a la cantidad de datos, ya que, para que los datos extrapolados sean concordantes estadísticamente, el periodo de retorno debe ser máximo 2.5 veces la cantidad del registro histórico.

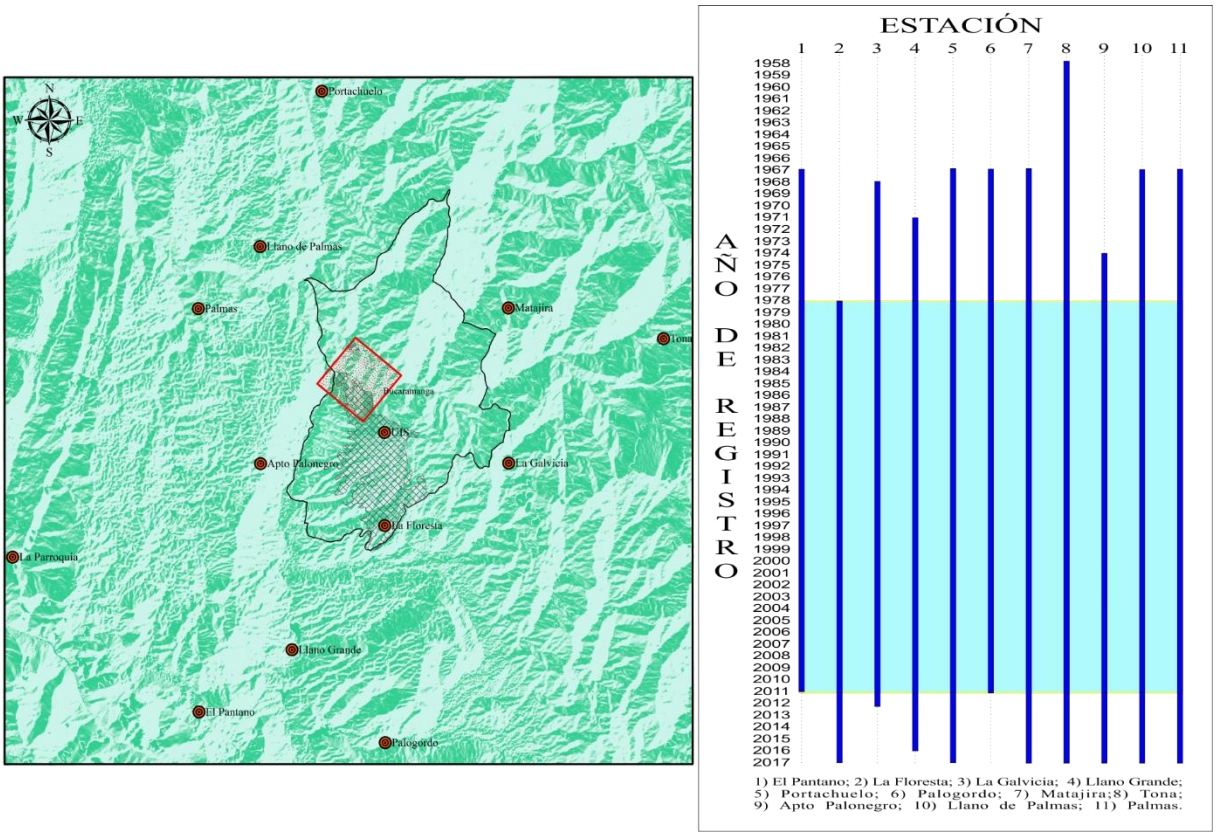


Figura 24. Distribución espacial y líneas de registro histórico de las estaciones meteorológicas usadas en el cálculo de los valores críticos de precipitaciones. La franja azul claro representa el intervalo de tiempo en el cual todas las estaciones cuentan con un registro completo que coincide para todas ellas.

Finalmente, el detonante climático se genera mediante la extrapolación de la distribución espacial de los valores críticos de cada estación pluviométrica.

7.6 Trabajo de campo.

Esta fase comprendió un trabajo de campo, en el cual se realizó el control y verificación en el terreno de los mapas finales de susceptibilidad y de amenaza por movimientos en masa. Durante esta campaña se recorrió la zona de estudio localizando, identificando e interpretando los movimientos en masa existentes y visitando aquellas zonas del mapa en las cuales se obtuvieron los peores escenarios para la ocurrencia de movimientos en masa, analizando los componentes, parámetros y posibles casusas que hacían es estas los focos críticos en el estudio de amenaza.

Es así como se corroboraron movimientos en masa previamente fotointerpretados (Figura 25, Figura 26, Figura 27) y que al localizarlos dentro del área de estudio, se encuentran dentro de zonas con alta predisposición del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa, definidas en el mapa de susceptibilidad.

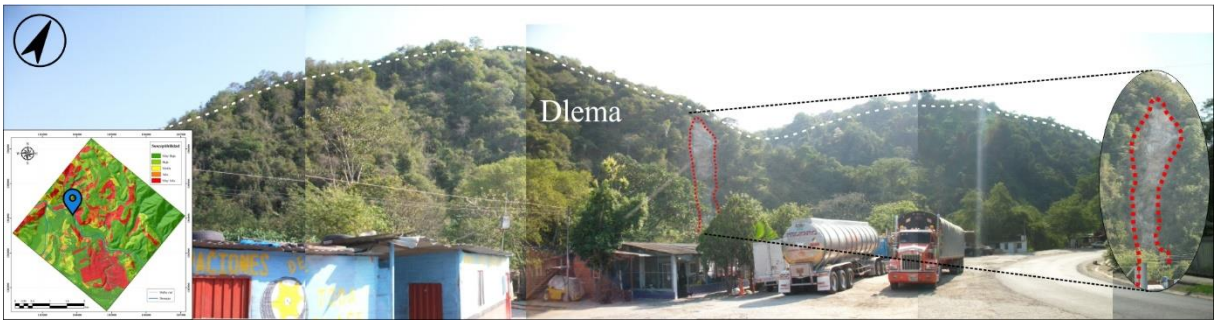


Figura 25. Panorámica desde el sector posterior de la planta de Bavaria, mostrando en detalle la evidencia de un flujo de detritos asociado a una geoforma de tipo denudacional.

Figura 26. Deslizamiento rotacional visto desde la corona (**A**) y desde el pie (**B**) ubicado en franja de Alta Susceptibilidad dentro del respectivo mapa. En zona aledaña a la urbanización Norte Club.

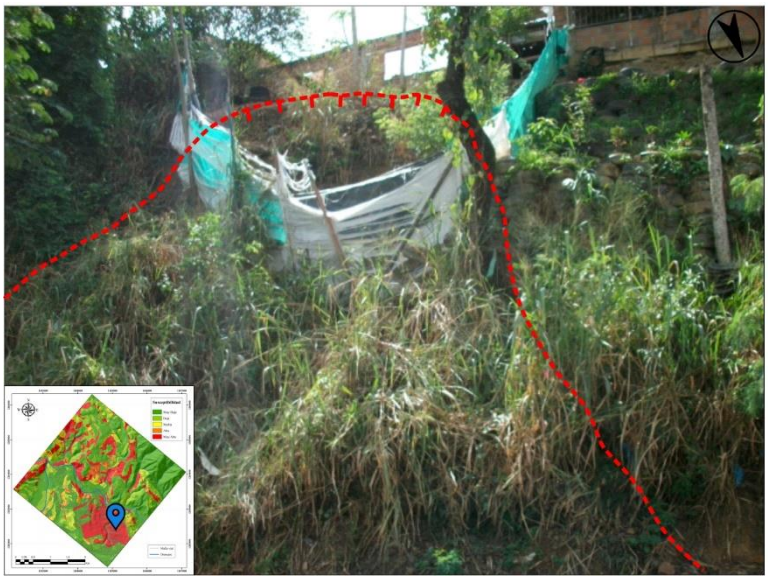


Figura 27. Deslizamiento progresivo a lo largo de la vía que comunica los barrios Jose María Córdoba y La Esperanza II.

En ciertos sectores del área de estudio, el terreno se encuentra intervenido en pro de mejorar las condiciones de estabilidad del mismo (Figura 28 [Izq]). Sin embargo, algunas de estas obras no soportaron los esfuerzos cortantes sobre los taludes y se encuentran actualmente colapsadas (Figura 28 [Der]).

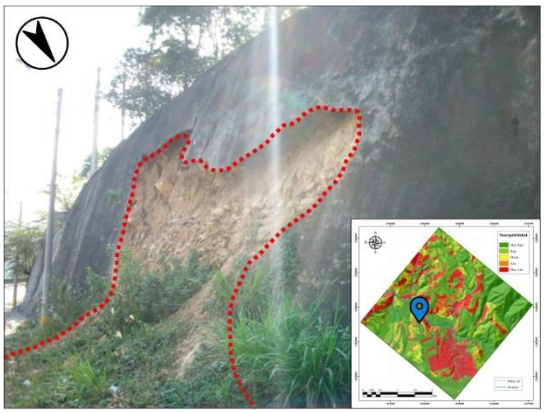


Figura 28. Estructura de contención sobre laderas inestables localizadas en la entrada del barrio Kennedy [Izq]. Talud con obra de estabilización colapsada en la vía que comunica al sector de la planta de Bavaria y el barrio Kennedy [Der].

También se encontraron algunas zonas en donde el agua subterránea entraba en contacto con la superficie, por medio de afloramientos o nacimientos de agua (Figura 29). Este factor, al interactuar con los distintos materiales, altera de manera importante la capacidad portante de suelos y rocas en el área de estudio.

Figura 29. Afloramiento de agua en la vía que comunica al barrio Regaderos con la vereda Los Cuadros.

Como elemento adicional se realizó la verificación de unidades litoestratigráficas en el área de estudio. Asimismo, en etapas previas se evaluaron y reafirmaron las principales unidades geomorfológicas desde el punto de vista de la morfogénesis (Figura 30, Figura 31, Figura 32).

Figura 30. Panorámica del sector norte de Bucaramanga, 200 metros adelante del CAI de La Virgen. Mostrando geoformas de ambientes antrópico, denudacional y estructural.

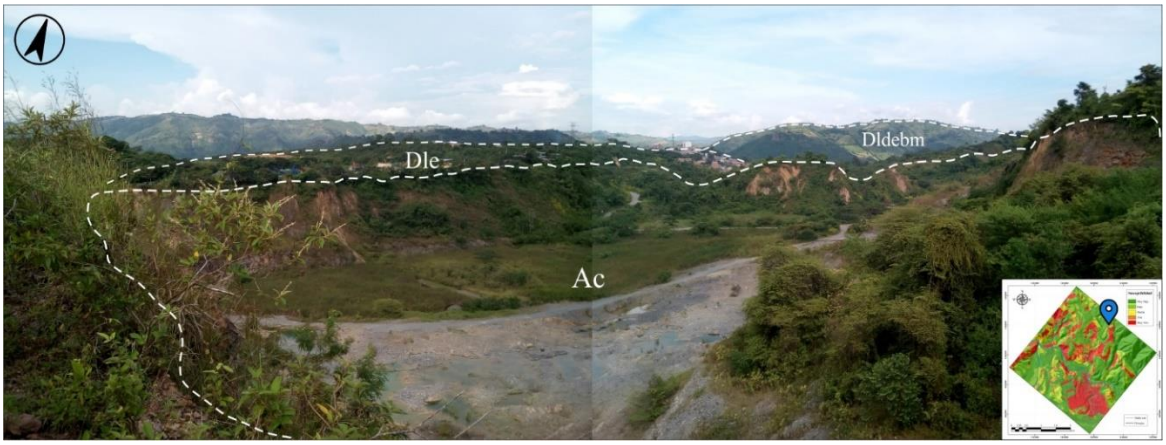


Figura 31. Panorámica de del sector norte de Bucaramanga, desde inmediaciones de Cemex. Se identifican geoformas antrópicas y denudacionales.

Figura 32. Panorámica hacia el suroeste del área de estudio desde alrededores del barrio Los Colorados. Se observan geoformas de ambientes denudacional, estructural, antrópico y fluvial.

Adicionalmente se revisaron zonas que fueron clasificadas en las categorías más altas en el mapa de susceptibilidad, con el fin de identificar los factores que aumentaban en la zona la predisposición de suelo y roca a la ocurrencia de movimientos en masa (Figura 33).

Figura 33. Afloramiento de depósito no consolidado sobre la vía Bucaramanga – Rionegro, 500 metros delante de la entrada a Cemex. En el detalle es posible observar evidencias de la acción erosiva del agua y la gravedad con cárcavas con apretura y profundidad entre 0.5 y 1 m. Esta zona de encuentra clasificada con una susceptibilidad Alta dentro del respectivo mapa.

Por último, al finalizar esta fase, se procedió a realizar el análisis y la interpretación final de los resultados obtenidos a partir de la metodología RL-OCH, mostrados en la sección de resultados.

8 Resultados

Los resultados de esta investigación se enuncian en el orden lógico usando en las diferentes fases metodológicas. En primera instancia se muestra el mapa de susceptibilidad final, elaborado mediante el modelo estadístico producto de integración de la Regresión Logística y de la Optimización por colonia de Hormigas (RL-OCH). Posteriormente se muestran los resultados de las tres pruebas de validación realizadas a dicho modelo. Para finalmente, presentar el mapa de amenaza por movimientos en masa para la zona de estudio.

8.1 Susceptibilidad

Una vez elegida la solución óptima para el análisis de la susceptibilidad mediante la metodología RL-OCH planteada y el subsiguiente cálculo de su probabilidad, se integró la matriz de datos en un mapa final de formato tipo ráster (Figura 34), que consta de 5 clases que jerarquizan el nivel de susceptibilidad a movimientos en masa (Muy Baja, Baja, Media, Muy Alta) tal como lo sugiere la metodología propuesta por SGC, 2017.

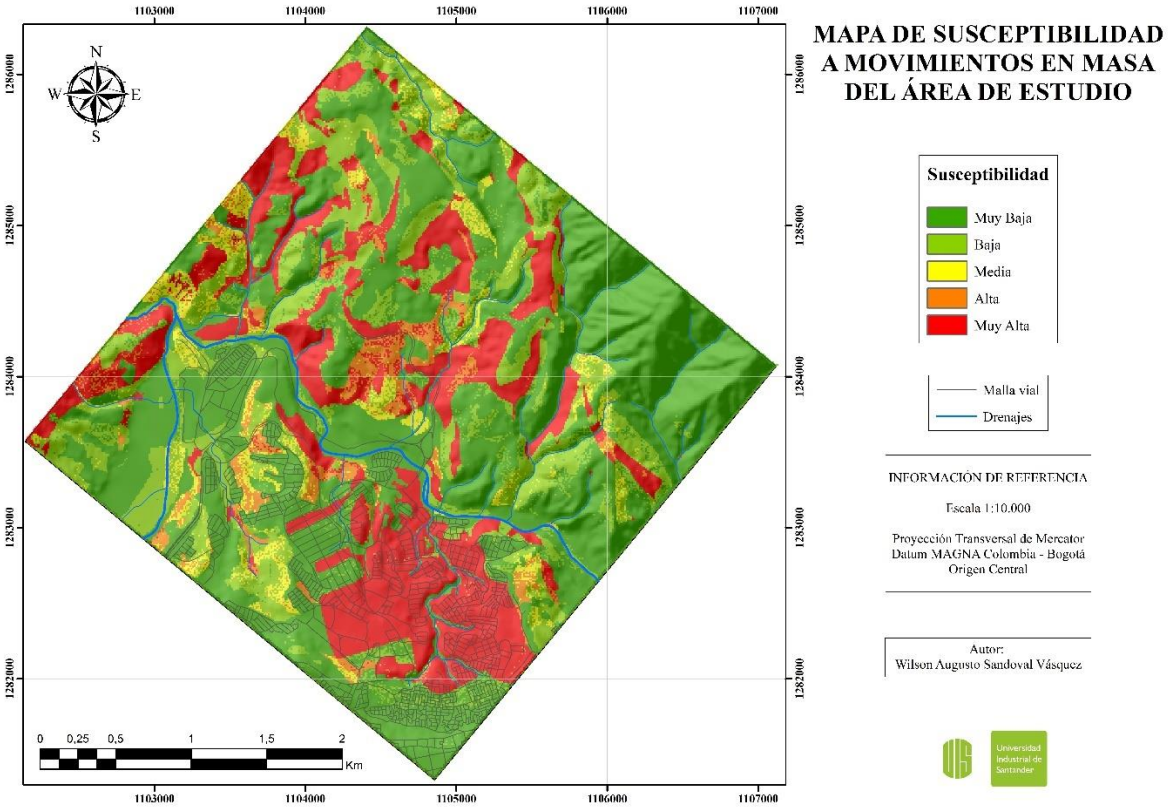


Figura 34. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa del sector norte del municipio de Bucaramanga, realizado mediante la metodología RL-OCH (APÉNDICE C).

Con base en la distribución espacial de las clases en el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, se calcula el porcentaje de área perteneciente a cada una de ellas (Figura 35). Es posible apreciar que la clase Muy Baja es la de mayor predominio con un 49%, seguida de la Muy Alta con un 22%, Baja con 18%, Media con 6% y finalmente la Alta con un 5%.

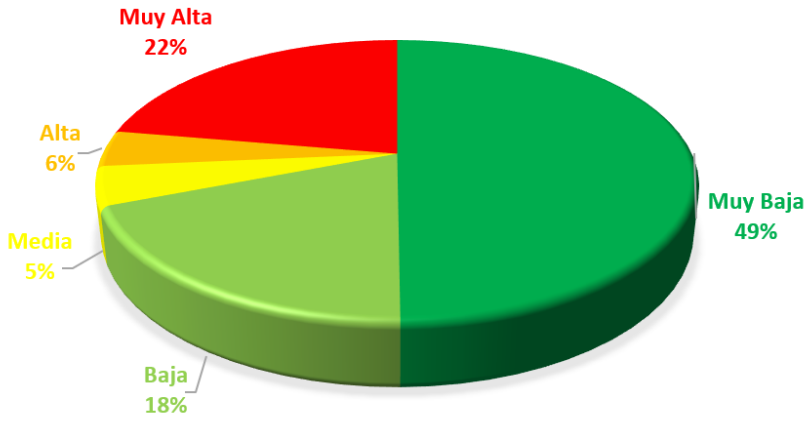


Figura 35. Distribución espacial de la susceptibilidad a movimientos en masa.

8.1.1 Resultados de las pruebas de Validación

R^2 de Nagelkerke

Para el mapa de susceptibilidad elegido para este estudio, se presenta un R^2 de Nagelkerke de 0,71135 producto del procesamiento de la RL (Tabla 8. *Resultados de la RL para el mapa de susceptibilidad final, mostrando el valor de R2 de Nagelkerke obtenido.*), mostrando un muy buen ajuste del modelo.

Tabla 8. Resultados de la RL para el mapa de susceptibilidad final, mostrando el valor de R^2 de Nagelkerke obtenido.

Resumen del modelo			
Paso	Logaritmo de la verosimilitud -2	R cuadrado de Cox y Snell	R cuadrado de Nagelkerke
1	1081,842[a]	0,464	0,711

Curva ROC

Para el presente estudio, la prueba de la curva ROC arrojó resultados satisfactorios, con un valor de 0,773 (Figura 36).

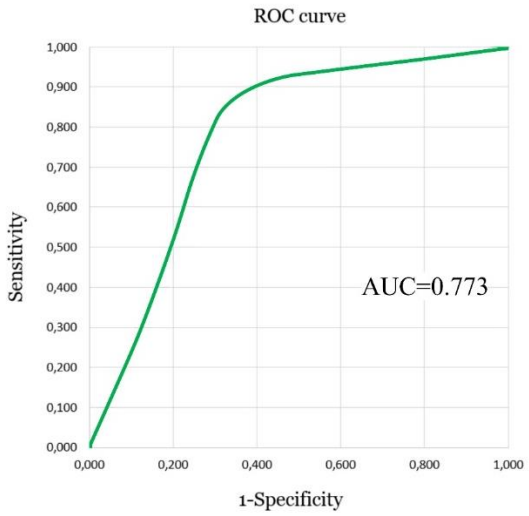


Figura 36. Gráfica de la Curva ROC para el mapa final de susceptibilidad a movimientos en masa del área de estudio, mostrando un ajuste del 77.3% representado en un Área Bajo la Curva (AUC) de 0.773.

Porcentaje de predicción de Choi

Esta relación mostró una buena correspondencia en orden de que la adición de los porcentajes de las categorías Alta y Muy Alta del mapa de susceptibilidad final predice exactamente un área de 71.12% del total de los movimientos en masa registrados en el inventario del presente estudio (Figura 37).

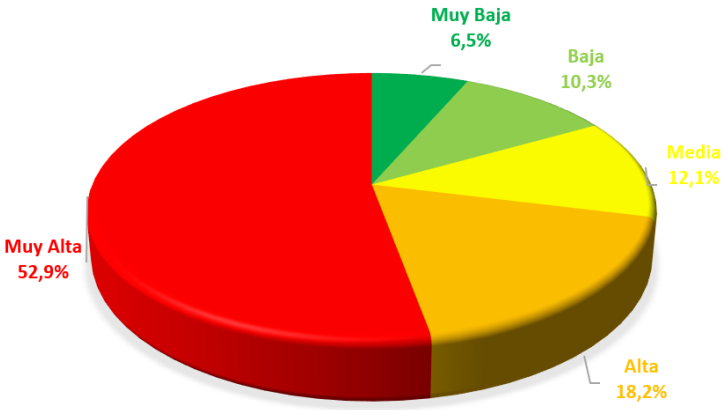


Figura 37. Porcentaje de predicción de Choi para cada categoría con movimientos en masa.

8.1.2 Análisis de la Susceptibilidad a Movimientos en Masa

De manera general los tres métodos de validación arrojan resultados positivos en cuando a la calidad del modelo mediante el cual se generó el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa de la zona de estudio.

A continuación, se muestra el análisis realizado a cada una de las clases de susceptibilidad con base en las características del terreno abarcado y su respectivo contexto.

Susceptibilidad Muy Baja

Esta categoría abarca el 49% del área de estudio. Se caracteriza por una variabilidad morfométrica muy marcada, en la que predominan valores de pendientes bajos. Adicionalmente es asociada a material más compacto y estable en donde sólo se ejercen procesos erosivos de menor intensidad, tales como Neis de Bucaramanga y Cuarzomonzonita, debido a que en las zonas con estas características no se presenta una relación de correspondencia con la ocurrencia de movimientos en masa. Comprende UGS relacionadas con rocas frescas, poco meteorizadas y con bajo grado de fracturamiento. Geomorfológicamente, abarca unidades de distintos ambientes, dentro del que sobresale el Denudacional con laderas convexas y formas redondeadas. Parcialmente se relaciona con las zonas de mayor distancia con respecto a drenajes y ríos. En cuanto a las coberturas de la tierra para esta categoría se relacionan a zonas con mayor densidad de vegetación.

Susceptibilidad Baja

Esta categoría está representada por el 18% del área total, distribuida a lo largo toda la extensión del mapa, con concentraciones parciales hacia el Oeste. Allí predominan geoformas de tipo denudacional con laderas poco inclinadas y formas redondeadas y geoformas asociadas al ambiente fluvial, con relieves relativos bajos y moderados. Se sitúa sobre rocas parcialmente fracturadas y meteorizadas de las Formaciones Tiburón y Girón además de algunos depósitos cuaternarios de Terrazas. Además, se encuentra en terrenos con coberturas vegetales densas, de tipo arbustal herbazal y mosaicos de pastos y cultivos.

Susceptibilidad Media

Esta categoría se muestra en un 5% del área total, concentrada hacia la parte central. Principalmente se muestra sobre el miembro órganos y el depósito aluvial antiguo. En UGS de suelos coluviales con un grado moderado de meteorización y rocas con moderado fracturamiento. En cuanto a las unidades morfogenéticas sobre las que se encuentra distribuida, se observa que, son por completo geoformas asociadas a un ambiente denudacional, en donde se presentan laderas erosivas abruptas. En esta región la cobertura vegetal es baja y/o se encuentra fragmentada, representada por vegetación de transición y herbazales.

Susceptibilidad Alta

Esta categoría se presenta en un 6% del área total. Distribuida a lo largo y ancho del área de estudio sobre distintas unidades geomorfológicas principalmente asociadas a ambientes denudacionales en donde se presentan laderas muy abruptas y levemente escarpadas. Esta categoría se encuentra principalmente sobre depósitos aluviales recientes y UGS con un alto grado de fracturamiento y meteorización que poseen una cobertura vegetal incipiente, los cuales cuentan con un muy poca resistencia a los esfuerzos cortantes que acentúan la predisposición del terreno a la ocurrencia de eventos morfodinámicos. En estas regiones se han presentado varios movimientos en masa a lo largo de la historia reciente.

Susceptibilidad Muy Alta

Esta categoría abarca el 22% del área total, distribuida hacia el sector central, con un foco predominante en parte importante del casco urbano Adicionalmente, en estas zonas, se encuentran aflorando varios depósitos coluviales, que no presentan las mejores condiciones de resistencia y compactación. Allí se encuentran unidades morfogenéticas asociadas a procesos denudacionales de diverso orden con laderas abruptas y algunas de muy poca inclinación pero que han sido modificadas por factores antrópicos, dentro de los que se encuentran los cortes de taludes para caminos y carreteras, la construcción de viviendas, rellenos y demás. Cada una de estas intervenciones, en ocasiones no planificada, afecta de forma negativa el sustrato en donde se cimentan estas estructuras, presentando de esta forma, un amplio rango de pendientes. También

toma en cuenta zonas sin cobertura vegetal alguna o con muy poca. Se presenta en zonas con influencia directa de drenajes que socavan y eventualmente despojan el terreno de su estabilidad aparente. Esta zona se relaciona en gran manera con la ocurrencia de movimientos en masa en el pasado.

8.2 Amenaza

La evaluación de la amenaza a movimientos en masa tuvo en cuenta, la susceptibilidad previamente calculada, el detonante sismo y el detonante lluvia.

8.2.1 Detonante Sismo

Se genera un modelo de amenaza sísmica con una grilla de 0.03°, del cual se toma el cuadrángulo de la zona de estudio de esta investigación y se le realizan las configuraciones pertinentes con el fin de generar el detonante sísmico (Figura 38). Este último, evaluado para un periodo de retorno de 475 años y una intensidad en tiempo de 0.50 segundos.

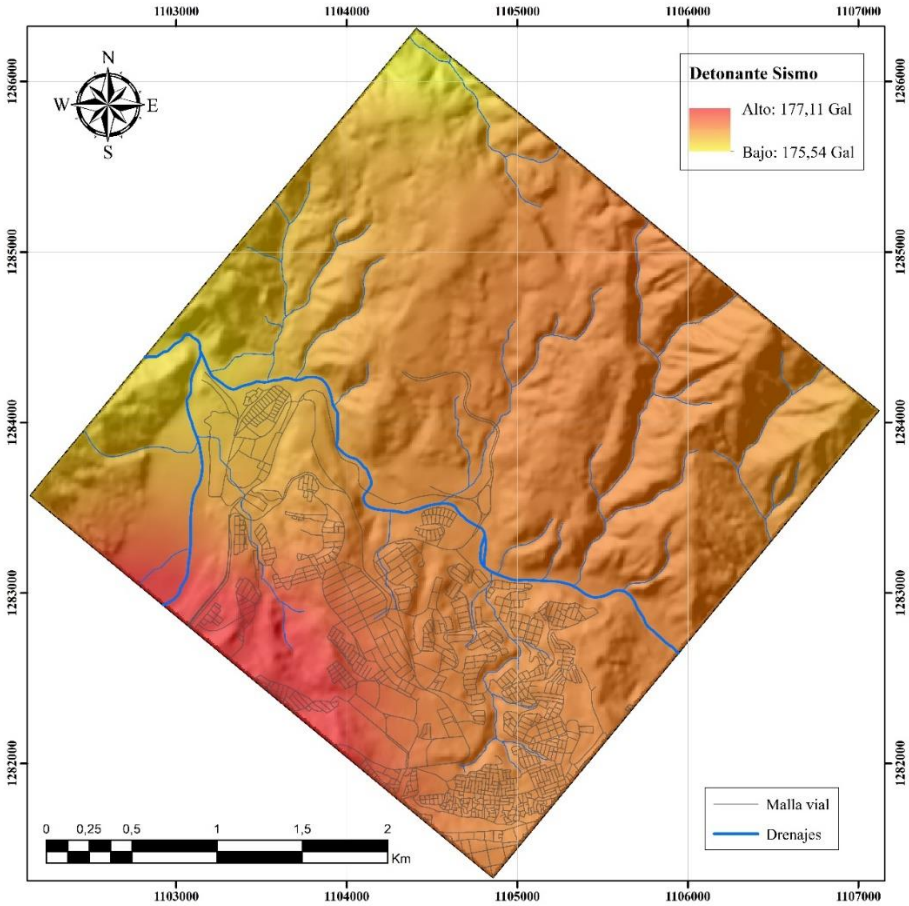


Figura 38. Detonante sísmico, asociado a la incidencia de la sismicidad histórica de la zona y la deformación tectónica asociada de zonas adyacentes, con un periodo de retorno de 475 años.

Los resultados del detonante sísmico para el área de estudio indica un rango de valores de aceleración entre 175 cm/s^2 y 177 cm/s^2. Esto es concordante por lo estipulado por SGC (2013) en su mapa de aceleración horizontal (Figura 21) que indica que para la localización geográfica de Bucaramanga se tienen valores entre 150 cm/s^2 y 200 cm/s^2.

Adicionalmente, los resultados del detonante sismo también pueden ser verificados con la curva de aceleración máxima del terreno para Bucaramanga (Figura 39), calculada en el marco de la investigación consignada en AIS (2010) la cual señala que para un periodo de retorno de 475 años se presentarán aceleraciones del orden de los 150 cm/s^2 aproximadamente. Lo cual también es concordante con los resultados del presente estudio.

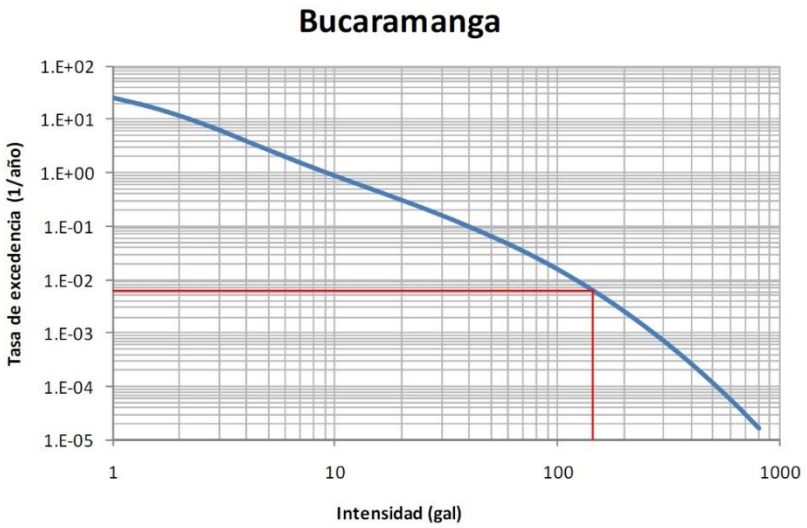


Figura 39. Curva de aceleración máxima del terreno para Bucaramanga. Modificada de AIS (2010).

En la zona de estudio, a pesar de ser un área fuertemente afectada por actividad sísmica a nivel regional, puede observarse una variación de los valores de aceleraciones a lo largo y ancho del cuadrángulo analizado. Evidenciándose de esta forma, la contribución de estructuras geológicas y fuentes sismogénicas al detonante sísmico a una mayor escala de trabajo.

8.2.2 Detonante Lluvia

Mediante la extrapolación de la distribución espacial de los valores críticos de cada estación pluviométrica se concibe el detonante climático (Figura 40).

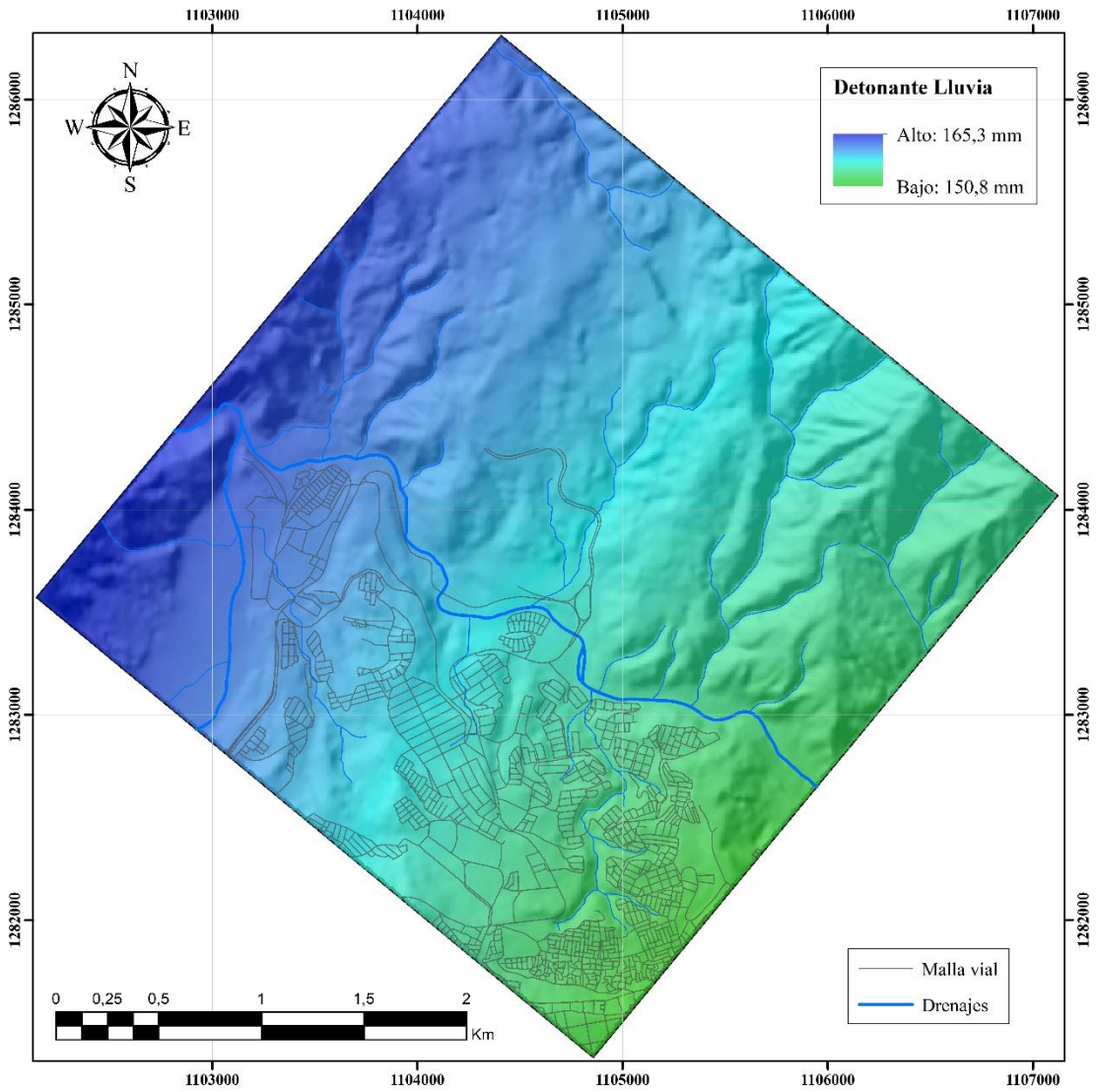


Figura 40. Detonante climático calculado con una lluvia de diseño de 24 horas para un periodo de retorno de 100 años, asociado a la precipitación histórica de la zona.

Los valores obtenidos para la detonante lluvia oscilan entre 150.8 mm y 165.3 mm lo cual es concordante con los valores de precipitaciones para la ciudad de Bucaramanga, de acuerdo con los datos consignados por (IDEAM, 2014), en donde se indica una variabilidad entre 100 mm y 200 mm a lo largo de los doce meses del año. Es posible observar un incremento de sureste a noroeste en cuanto a la cantidad de precipitación para la zona de estudio.

8.2.3 Mapa de Amenaza a Movimientos en masa

Con la integración del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa y los detonantes sísmico y climático de la zona de estudio se elaboró el mapa de amenaza a movimientos en masa (Figura 41) que clasifica el grado de amenaza, de mayor a menor, en Muy Alta, Alta, Media y Baja.

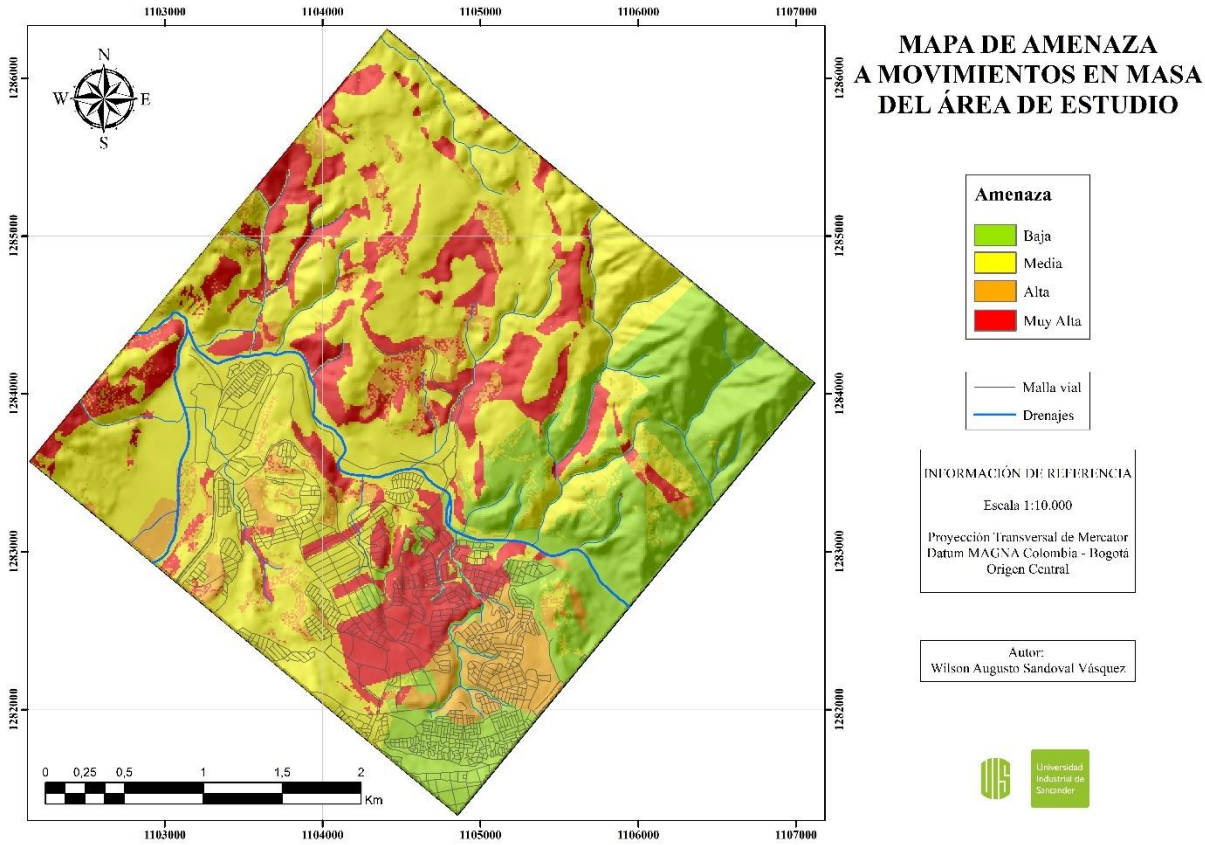


Figura 41. Mapa de amenaza a movimientos en masa del sector norte del municipio de Bucaramanga. Realizado mediante la metodología sugerida por SGC, 2013. (APÉNDICE D).

De acuerdo con la distribución espacial de la amenaza por movimientos en masa de la zona de estudio, se realizó el cálculo de los porcentajes de cada una de las clases (Figura 42) de la siguiente manera: La amenaza Baja abarca un 20%, la Media un 51%, la Alta un 10%, y la Muy Alta un 19% del área total.

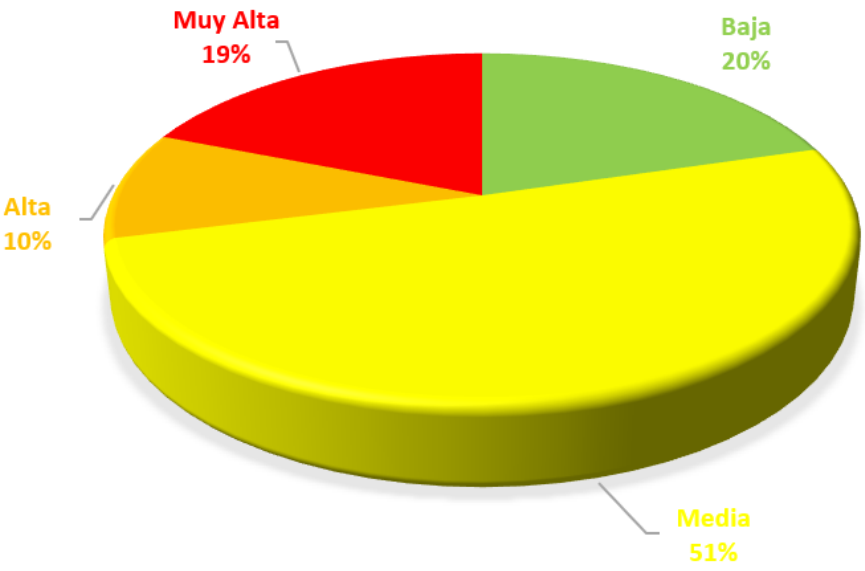


Figura 42. Distribución espacial de la amenaza por movimientos en masa.

8.2.4 Amenaza Baja

La categoría de Amenaza Baja cuenta con un área del 20% y se encuentra focalizada hacia el sur-suroriente de la zona de estudio en donde las precipitaciones son significativamente menores, con valores cercanos a 150 mm. Adicionalmente en lo que concierne al detonante sísmico, se aprecian zonas con aceleraciones del terreno por el orden de los 177 cm/s^2. A pesar de encontrarse en zona de influencia directa de la Falla de Bucaramanga, el material que conforma la expresión topográfica corresponde a rocas compactas y suelos residuales con bajo grado de meteorización. Por consiguiente, para estas zonas se esperan daños locales de menor envergadura, dentro de un contexto regional.

8.2.5 Amenaza Media

La categoría de Amenaza Media contribuye con un 51% del área total, siendo esta la de mayor frecuencia en la zona. Esta se localiza hacia el norte y occidente. Allí se presentan valores de precipitaciones con tendencia a los 165 mm, además de valores de aceleración muy variables entre 175 y 177 cm/s^2. Sin embargo, se resalta que el detonante climático es que el ejerce una leve predominancia en este rango de amenaza. Las unidades que se encuentran en esta clasificación corresponden a rocas con moderado fracturamiento, suelos residuales y en menor medida transportados con moderado grado de meteorización. Aunque en las zonas con esta clasificación,

no sea inminente la ocurrencia de movimientos en masa, no están exentas de ellos, pues las propiedades de los suelos y rocas pueden ser variables bajo la eventual influencia, mayor o menor, de los factores detonantes. Generándose de esta forma, posibles daños a las distintas obras de infraestructura y cultivos presentes en la zona.

8.2.6 Amenaza Alta

La categoría de Amenaza Alta abarca un 10% del área total y se localiza de manera aleatoria a lo largo y ancho de la región de estudio, con focos parciales hacia el Sur y hacia el Oeste. Allí se denotan valores altos de precipitaciones y grandes aceleraciones del terreno, 165 mm y 177 cm/s^2 respetivamente. La acción combinada de lluvias fuertes y/o prolongadas con factores sísmicos, estructurales y su alta densidad de fracturamiento asociada generan una alta probabilidad de aumento en la inestabilidad del terreno. Se encuentra sobre material poco resistente correspondiente a suelos transportados de depósitos recientes. En este rango se encuentran localizados una buena parte de los movimientos en masa registrados en el inventario. Estos son de manera general, flujos y deslizamientos, cuyos efectos negativos corresponderían a daños sobre la malla vial, viviendas y actividades agrícolas en zonas aledañas y afectaciones en la calidad de vida de los habitantes de estas regiones.

8.2.7 Amenaza Muy Alta

La categoría de Amenaza Muy alta conforma un 19% del área total. Esta se encuentra distribuida a lo largo de todo el mapa, sin embargo, se resaltan focos en parte importante del casco urbano con relación a la influencia de la susceptibilidad allí. En estas regiones, se presentan valores muy altos en cuanto a los detonantes lluvia y sismo con valores de 165 mm y 177 cm/s^2, respectivamente. Además, se encuentran sobre unidades correspondientes a depósitos conformados por materiales muy poco resistentes. Los sectores clasificados dentro del rango de amenaza muy alta corresponden a zonas en las que se detonan y probablemente se detonarán distintos tipos de movimientos en masa debidos a condiciones particulares desfavorables del terreno e incluso a la superposición y conjugación de ellas. Allí se ubica la mayor parte de los movimientos en masa del inventario. Siendo los flujos y deslizamientos los de mayor relevancia, cuyos efectos negativos corresponden a daños sobre la malla vial, viviendas y actividades agrícolas en zonas aledañas. Adicionalmente, en estas regiones se pueden presentar repercusiones negativas directas para los seres humanos, en lo que concierne a su calidad de vida y seguridad.

8.2.8 Amenaza en Zonas de Expansión Urbana

De acuerdo con los estudios realizados por la Alcaldía de Bucaramanga (2013) en el marco de la creación del Plan de Ordenamiento Territorial para el periodo 2014-2027 se establece una clasificación del territorio en donde se define un área de 168,49 Ha, ubicada hacia el sector norte del casco urbano del municipio de Bucaramanga. Este suelo de expansión se encuentra dentro de los límites de la zona de estudio de la presente investigación. Es por ello que se hace un análisis de la distribución de la amenaza por movimientos en masa, con base en la metodología planteada para este sector (Figura 43).

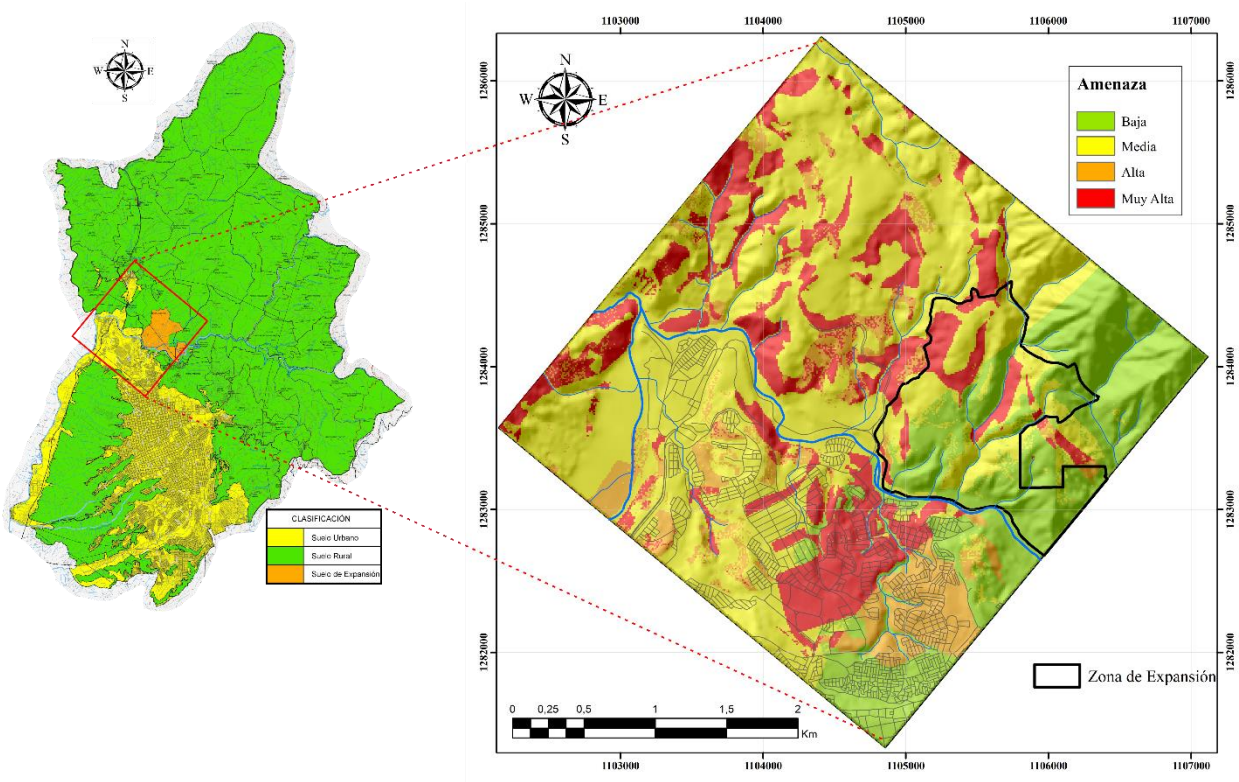


Figura 43. Amenaza por movimientos en masa para la zona de expansión urbana del municipio de Bucaramanga. Modificado de Alcaldía de Bucaramanga, 2013.

Para el sector definido como Suelo de Expansión, se encuentra que, en un mayor porcentaje, la amenaza ante la ocurrencia de movimientos en masa es baja y media. No obstante, el 34% del área delimitada se encuentra en los rangos de Amenaza Alta y Muy Alta, asociadas a condiciones que hacen desfavorables los escenarios en cuanto a la estabilidad del terreno. Estas condiciones obedecen a la configuración de características intrínsecas del terreno y a su mutua interacción, que además, con la posterior integración de detonantes asociados a la lluvia y al sismo, afectan de

manera negativa la resistencia del suelo y roca, haciendo más propensa la ocurrencia de movimientos en masa.

Ya que se tiene proyectado un desarrollo urbano para dicha zona, podrían llegar a reconsiderarse sus límites o en su defecto puntualizar análisis a detalle para sectores marcados con una muy alta probabilidad de ocurrencia de eventos morfodinámicos, con el fin de mejorar las condiciones del terreno y evitar de esta forma la materialización de emergencias futuras relacionadas a movimientos en masa que pongan en peligro la propiedad pública, privada y la calidad de vida de las personas.

9 Conclusiones

Con la creación del inventario para esta investigación se logró un registro actualizado de los eventos de movimientos en masa que han ocurrido en el área de estudio, para un total de 111, permitiendo observar las zonas con mayor impacto de estos fenómenos. Los principales tipos de movimientos se definieron como flujos y deslizamientos de tierras, siendo últimos los más frecuentes.

La correlación de parámetros permitió realizar la integración de la metodología de la RL dentro del algoritmo de la OCH de forma satisfactoria. A partir de un modelo de Susceptibilidad que toma en cuenta la acción de 10 variables y su respectiva incidencia a través de un conjunto de pesos, en función del grado de aporte a la generación de movimientos en masa, y del aumento de probabilidad y la convergencia de una de las soluciones. Haciendo de esta, una técnica mucho más certera y objetiva al hacer que la elección del modelo final de susceptibilidad.

El modelo de susceptibilidad a movimientos en masa indica que, la predisposición del terreno tiene una tendencia marcada hacia una Alta y Muy Alta ocurrencia de eventos morfodinámicos. Sin embargo, también expone zonas con una estabilidad aparente muy buena, desde el punto de vista evaluado. El ajuste del modelo fue comprobado mediante tres métodos de validación: R^2 de Nagelkerke, Curva de Éxito o Curva ROC y Porcentaje de Predicción de Choi, obteniendo muy buenos resultados (0.71135, 0.773 y 71.12% respectivamente).

Con la utilización de datos históricos de precipitaciones medias y máximas diarias mensuales, para un registro de 59 años de 13 estaciones meteorológicas, se realizó el cálculo del detonante climático de la zona de estudio, para un periodo de retorno de 100 años. Arrojando como resultado un rango comprendido entre 150 mm y 165 mm. Adicionalmente, fue ajustado para la zona el detonante sísmico creado a partir de análisis probabilísticos, generando valores de aceleraciones entre 175 cm/s^2 y 177 cm/s^2. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos de valores definidos para Bucaramanga.

Tras la integración del modelo susceptibilidad y los detonantes, se concibe el mapa de amenaza a movimientos para el área de estudio En el cual se determinan las zonas más propensas a la acción de estos eventos con una distribución del 10% para la categoría de amenaza Alta y un 19% para la Muy Alta, dentro de las que se encuentran zonas parcial y completamente urbanizadas, que probablemente estén o estarán siendo afectadas de forma negativa por estos procesos.

El sector definido en el POT como Suelo de Expansión del municipio, no se encuentra totalmente estable en cuanto a la amenaza a movimientos en masa, presentando un 34% del área total dentro del rango de Amenaza Alta y Muy Alta. Resaltándose la existencia de zonas muy propensas a la ocurrencia de movimientos en masa dentro de sus límites.

10 Recomendaciones

La integración de más variables cuantitativas en las que intervengan medidas directas sobre el terreno harían del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa un poco más certero. Estas podrían corresponder a estudios hidrogeológicos, sondeos y ensayos de laboratorio que den cuenta del comportamiento mecánico del suelo y roca en el área de estudio, los cuales no fueron realizados en el presente trabajo. Esto, con el fin de seguir las normas del Plan de Ordenamiento Municipal y la Norma Sismo Resistente 2010.

En atención del Principio de Gradualidad, de acuerdo con las zonas identificadas con mayor amenaza por movimientos en masa, a partir del escenario intermedio evaluado con el presente método estadístico-probabilístico, se hace necesaria la realización de estudios de mayor detalle, de tipo determinista, en donde se evalúen escenarios críticos con el fin de prevenir y mitigar el impacto de estos eventos, y en cumplimiento con el Decreto 1807 de 2014.

Ya que existen regiones con alta probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa dentro del sector definido como Suelo de Expansión para el municipio de Bucaramanga, se hace necesaria una evaluación más detallada de los límites y definición de estas zonas, con miras a ser tenidas en cuenta para posibles urbanizaciones futuras.

Se aclara, además, que en la zona existe un título minero, cuya área no podría ser usada a pesar de que posea valores bajos de amenaza.

Se hace la salvedad de que este mapa de amenaza es una primera aproximación, y que podrían existir cambios en la distribución de los rangos de amenaza en la medida de que sean evaluados más parámetros y escenarios críticos con un mejor ajuste a las condiciones de la realidad.

Referencias Bibliográficas

Ahmed, Y., Biswajeet, P., Mustafa, N., & Hassan, H. (2015). Landslide susceptibility mapping using ensembre bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. Environ Earth Sci, 3745-3761.

AIS. (2010). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009. Bogotá: Comité AIS-300.

Akgün, A. (2007). GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. Environ Geol 51, 1377–1387.

Akgun, A., & Erkan, O. (2016). Landslide susceptibility mapping by geographical information system-based multivariate statistical and deterministic models: in an artificial reservoir area at Northern Turkey. Arabian Journal of Geoscience.

Alcaldía de Bucaramanga. (2013). Plan de Ordenamiento Territorial de Segunda Generación 2014-2027.

Alcaldía de Bucaramanga. (2015). Plan de Desarrollo de Bucaramanga 2016–2019. Bucaramanga.

Aranaz, M. (2002). SPSS para Windows. Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España.

Atkinson, P., & Massari, R. (1998). Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central apennines, italy. Computers & Geosciences, 24, 4, 373-385.

Atkinson, P., & Massari, R. (1998). Generalized linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Appennines, Italy. Comput Geosci 24(4), 373–385.

Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko mountains, Central Japan. Geomorphology 65, 15-31.

Banco Mundial. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas. Washington.

Banco Mundial. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas. Washington.

Bell, J., & McMullen, P. (2004). Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem for the vehicle routing problem. Advanced engineering informatics, 18(1), 41-48.

Bernknopf, R., Cambell, R., Brookshire, D., & Shapiro, C. (1988). A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation. Bull Int Assoc Eng Geol.

Blum, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. Physics of Life reviews, 2(4), 353-373.

Blum, C., & Dorigo, M. (2004). The hyper-cube framework for ant colony optimization. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B, vol. 34, no. 2, 1161–1172.

Boinet, T., Bourgois, J., Mendoza, H., & Vargas, R. (1989). La Falla de Bucaramanga (Colombia): su función durante la Orogenia Andina. Geología Norandina N° 11, 3-11.

Bullnheimer, B., Hartl, R., & Strauss, C. (1999). A new rank-based version of the Ant System: A computational study. Central European Journal for Operations Research and Economics, vol. 7, no. 1, 23-38.

Campbell, C. (1968). The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting. Fourth Caribbean geological Conference, 1-30.

Can, T., Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., & Duman, T. Y. (2005). Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. Geomorphology, 72(1-4), 250-271.

Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 15(3), 403-426.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. Earth Surf Proc Land.

Carvajal, J. (2012). Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Case, J., Holcombe, T., & Martin, R. (1984). Map of geologic provinces in the Caribbean region. Geological Society of America. Memoir 162, 1-30.

Castro, I. (2014). Aspectos teóricos de la regresión logística. Curso de estadística multivariada. Bogotá.

Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, 815–848.

Chebouba, A., Yalaoui, F., Smati, A., Amodeo, L., Younsi, K., & Tairi, A. (2009). Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization. Computers & Operations Research, 36(6), 1916-1923.

Choi, J., Oh, H. J., Won, J. S., & Lee, S. (2010). Validation of an artificial neural network model for landslide susceptibility mapping. Environmental Earth Sciences, 60(3), 473-483.

Clark, W. A., & Hosking, P. L. (1986). Statistical methods for geographers. New York: (No. 310 C5).

Clavijo, J., & Vargas, G. (2017). Informe Final de Geología, Estratigrafía y Evolución Geológica. Bucaramanga: Grupo de Investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas - UIS.

Conoscenti, C., Ciaccio, M., Caballo-Arias, N., & Agnesi, V. (2015). Assessment of susceptibility to earth-flow landslide using logistic regression and multivariate adaptive regression splines: A case of the Belice River basin (western Sicily, Italy). Geomorphology, 242, 49-64.

Cordón, O., de Viana, I., Herrera, F., & Moreno, L. (2000). A new ACO model integrating evolutionary computation concepts: The best-worst Ant System. Abstract proceedings of ANTS 2000 – From Ant Colonies to Artificial Ants: Second International Workshop on

Ant Algorithms, M. Dorigo et al., Eds (pp. 22-29). Brussels: IRIDIA, Université Libre de Bruxelles.

Cornfield, J., Gordon, T., & Smith, W. (1961). Logistic regression analysis. Bull Int Stat Inst, 38, 97.

Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., & Fotopoulos, S. (2013). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 209-263.

Dai, F., & Lee, C. (2002). Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. Geomorphology 42, 213–228.

Das, I., Sahoo, S., Van Westen, C., Stein, A., & Hack, R. (2010). Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). Geomorphology, 114, 4, 627-637.

Diederix, H., Hernández, C., Toro, E., Naranjo, J., & Botero, P. (2009). Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la falla de Bucaramanga, Colombia. Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D, 9(2), 18-23.

Dikau, R., Cavallin, A., & Jäger, S. (1996). Databases and GIS for landslide research in Europe. Geomorphology, 15, 3–4, 227-239.

Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms (in italian). Ph.D. dissertation, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy.

Dorigo, M. M. (1996). Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B, vol. 26, no. 1, 29-41.

Dorigo, M., & Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. Theoretical computer science, 344(2-3), 243-278.

Dorigo, M., & Gambardella, L. (1996). Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'96) (págs. 622-627). Piscataway, NJ: T. Baeck et al., Eds. IEEE Press.

Dorigo, M., & Gambardella, L. (1997). Ant colonies for the traveling salesman problem. BioSystems, vol. 43, no. 2, 73–81.

Dorigo, M., Birattari, M., & Stützle, T. (2006). Ant Colony Optimization: Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique. Bruxelles: IRIDIA, Institut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle.

Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1991). Positive feedback as a search strategy. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy.

Duman, T., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H., & Sonmez, H. (2006). Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. Environ Geol.

Duque-Caro, H. (1980). Geotectónica y evolución de la región noroccidental de Colombia. Boletin Geológico, Vol. 23 N°3, 5-37.

Erener, A., Sivas, A., Selcuk-Kestel, S., & Düzgün, S. (2017). Analysis of training sample selection strategies for regression-based quantitative landslide susceptibility mapping methods. Computers & Geosciences, 104, 62-74.

Fajardo, N., & Mejía, L. (2017). Zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, escala 1:10.000 para el municipio de Suratá, Sanatnder, aplicando métodos estadísticos multivariables (regresión logística). Tesis de grado. Escuela de Geología. UIS.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. Engineering Geology, 102(3), 99-111.

Galvis, M., Velandia, F., & Villamizar, N. (2014). Cartografía morfoestructural de la Falla de Bucaramanga: Geometría lenticular a lo largo del valle del Río Chicamocha en Santander-Colombia. XVII Congreso Peruano de Geología. Lima.

Gambardella, L., & Dorigo, M. (1995). Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem. Proceedings of the Twelfth International Conference on Machine Learning (ML-95) (págs. 252-260). A. Prieditis and S. Russell, Eds. Morgan Kaufmann Publishers.

Geomática, G. y. (2017). Informe de Amenaza Sísmica - Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Gorsevsky, P., Gessler, P., & Foltz, R. (2000). Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and GIS. Fourth Int. Conference on Integrating GIS and Environmental Modelling. Canada.

Gutjahr, W. (2003). A Converging ACO Algorithm for Stochastic Combinatorial Optimization. International Symposium on Stochastic Algorithms (pp. 10-25). Berlin: Springer.

Guzmán, J., & Vela, Y. (2015). Determinación de la Amenaza Sísmica en Santander Mediante el Análisis de Valores Extremos. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 1-55.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology, 31(1), 181-216.

Hermelín, M. (1985). Suelos, Rocas y Formaciones Superficiales. DYNA, (106), 25-29.

Hernández, Z. (2008). Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en análisis multivariado: La Región de Zapotitlán de Méndez, Puebla. Universidad Nacional Autónoma de México.

Hosmer, D., & Lomeshow, S. (2000). Applied logistic regression, 2nd edn. . New York: Wiley.

IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000. Bogotá: Scripto Ltda.

IDEAM. (2014). Atlas climatológico de Colombia. Bogotá.

IGAC & UPRA. (2015). Leyenda de Usos Agropecuarios del Suelo a escalas mayores a la 1:25.000. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

INGEOMINAS. (1997). Microzonificación sísmica del área metropolitana de Bucaramanga, Santander, Colombia. Fase l. Bucaramanga: Informe preparado para la Gobernación de Santander, 75pp.

INGEOMINAS. (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. Bogotá.

INGEOMINAS. (2002). Catálogo Nacional de Movimientos en Masa. Bogotá.

INGEOMINAS. (2004). Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica: Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica - Volúmen I. Bogotá.

INGEOMINAS. (2008). Modelo Geodinámico del Macizo de Santander.

Jiménez, G., Speranza, F., Faccena, C., Bayona, G., & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: evidence for a 3 mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. J. S. Am. Earth Sci. 57, 12–22.

Jovell, A. (1995). Análisis de regresión logística. Centro de Investigaciones Sociológicas.

Kahatadeniya, K. S., Nanakorn, P., & Neaupane, K. M. (2009). Determination of the critical failure surface for slope stability analysis using ant colony optimization. Engineering Geology, 108(1), 133-141.

Kellogg, J. (1984). Cenozoic tectonic history of the Sierra de Perijá, Venezuela-Colombia, and adjacent basins. The caribbean South American Plate Boundary and regional tectonics. Colorado: Bulletin Geological Society of America, Memoir 162.

Kellogg, J., Ogujiofor, I., & Kansakar, D. (1985). Cenozoic tectonics of the Panama and North Andes blocks. VI Congreso Latinoamericano de Geología. Memorias, I, (pp. 34-49). Bogotá.

Lai, C., Shao, Q., Chen, X., Wang, Z., Zhou, X., Yang, B., & Zhang, L. (2016). Flood risk zoning using a rule mining based on ant colony algorithm. Journal of Hydrology, 542, 268-280.

Lee, S. (2005). Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. Int J Remote Sens 26, 1477–1491.

Lee, S., & Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. Environ Geol.

Lee, S., Ryu, J., & Kim, I. (2007). Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea. Landslides, 4, 327-338.

Liu, X., Li, X., Liu, L., He, J., & Ai, B. (2008). An innovative method to classify remote-sensing images using ant colony optimization. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 46(12), 4198-4208.

Lombardo, L., & Mai, P. (2018). Presenting logistic regression-based landslide susceptibility results. Engineering Geology, 244, 14-24.

Maniezzo, V. (1999). Exact and approximate nondeterministic tree-search procedures for the quadratic assignment problem. INFORMS Journal on Computing, vol. 11, no. 4, 358-369.

Menard, S. (1995). Applied logistic regression analysis. Sage university paper series on quantitative applications in social sciences.

Montemanni, R., Gambardella, L., Rizzoli, A., & Donati, A. (2005). Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem. Journal of Combinatorial Optimization, 10(4), 327-343.

Montes, C., Guzmán, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., & Jaramillo, C. (2009). Clockwise rotation of the Santa Marta Massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería Basins. Journal of South American Earth Science, Vol. 29 N°4, 832-848.

Nandi, A., & Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. Engineering Geology, 110(1-2), 11-20.

Niño, A., & Vargas, G. (1992). Geología y geotécnia de la escarpa noroccidental de la meseta de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físico Químicas. Departamento de Geología.

Ohlmacher, C., & Davis, C. (2003). Using multiple regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. Eng Geol 69, 331–343.

Ordaz, M., & Salgado, M. (2017). R-CRISIS Validation and Verification Document. Mexico City, Mexico: Technical Report.

Ortiz, J. (2013). Evaluación del método de colonia de hormigas para diseños de sistemas de distribución de agua. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Cicil. UIS.

París, G., & Romero, J. (1994). Fallas Activas de Colombia. Ingeominas Bol. Geol. 34 (2–3), 3-25.

Paris, G., Machette, M., R., D., & Haller, K. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. USGS.

Pfurtscheller, C., Lochner, B., & Thieken, A. (2011). Costs of Alpine hazards. WP8 report of the project ConHaz–Costs of Natural Hazards (D8. 1).

Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. Arabian Journal of Geosciences, 7(2), 725-742.

Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. Arabian Journal of Geosciences, 7(2), 725-742.

Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A. C., & Rossi, M. (2014). The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). Environmental Management, 54(6), 1372-1384.

Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Bogotá: Ingeominas.

Salgado, M., Bernal, G., Yamín, L., & Cardona, O. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. Revista de Ingeniería, (32), 28-37.

Salitchev, K. A. (1979). Cartografía. Pueblo y Educación.

Samrout, M., Yalaoui, F., Châtelet, E., & Chebbo, N. (2005). New methods to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems using ant colony optimization. Reliability engineering & system safety, 89(3), 346-354.

Servicio Geológico Colombiano. (2013). Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000. Versión No. 2. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (2015a). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (2015b). Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia, ISBN: 978-958-99528-8-7.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000. Bogotá: Dirección de Geoamenazas.

Shekhawat, A., Poddar, P., & Boswal, D. (2009). Ant Colony Optimization Algorithms: Introduction and Beyond. Bombay: Artificial Intelligence Seminar, Indian Institute of Technology.

Sim, K., & Sun, W. (2003). Ant colony optimization for routing and load-balancing: survey and new directions. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 33(5), 560-572.

Soeters, R., & Van Westen, C. (1996). Chapter 8-Slope instability recognition, analysis, and zonation. In R. Soeters, & C. Van Westen, Landslides: Investigation and mitigation. Transportation research board special report, (247).

Stützle, T., & Hoos, H. (1996). Improving the Ant System: A detailed report on the MAX–MIN Ant System. G Intellektik, FB Informatik TU Darmstadt.

Stützle, T., & Hoos, H. (2000). MAX–MIN Ant System. Future Generation Computer Systems, vol. 16, no. 8, 889-914.

Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda.

Süzen, M. (2002). Data driven landslide hazard assessment using geographical information systems and remote sensing. PhD Thesis, Middle East Technical University, Turkey.

Süzen, M., & Doyuran, V. (2004). A Comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. Environ Geol 45(5), 665–679.

Toro, J. (1990). The termination of the Bucaramanga Fault in the Cordillera Oriental, Colombia. The University of Arizona.

Triviño, M. (2017). Estimación de la amenaza sísmica causada por el proceso de subducción y su impacto sobre los asentamientos humanos para la región de América Latina y el Caribe. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá).

Tschanz, C., Marvin, R., Cruz, J., Menhert, H., & Cebula, G. (1974). Geologic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, northeastern Colombia. Geological Society of America Bulletin, Vol. 85, 273-284.

UNDRO. (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Geneve: Report of Expert Group Meeting (9 to 12 July).

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.

Valencia, J. (2018). Mapa de Amenaza Sísmica para el departamento de Santander. Manuscrito no publicado, Semillero de Investigación de Amenazas Geológicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Valencia-Ortiz, J., & Martínez-Graña, A. (2018). A neural network model applied to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia). Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9(1), 1106-1128.

Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. Natural hazards, 30(3), 399-419.

Vargas-Cuervo, G. (2000). Criterios para la clasificacion y descripción de movimientos en masa. Boletín de Geología, Vol. 22, No. 37.

Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 11-33.

Velandia, F., & Bermúdez, M. (2018). The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): Insights from geological mapping, stress tensors, and fractal analysis. Journal of Structural Geology (115), 190-207.

Veloza, G., Styron, R., & Taylor, M. (2012). Open-source archive of active faults for northwest South America. GSA Today 22 (10), 4–10.

Verstappen, H. T., & van Zuidam, R. A. (1992). The ITC System of Geomorphological Survey. ITC Publication Number 10. Enschede.

Wang, H. (2009). A two-phase ant colony algorithm for multi-echelon defective supply chain network design. European Journal of Operational Research, 192(1), 243-252.

Wang, L., Sawada, k., & Moriguchi, S. (2013). Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based on FCM sampling strategy. Computers & Geosciences, 57, 81-92.

Wang, Y., Song, C., Lin, Q., & Li, J. (2016). Occurrence probability assessment of earthquake-triggered landslides with Newmark displacement values and logistic regression: The Wenchuan earthquake, China. Geomorphology, 258, 108-119.

Xulong, D. (2016). Prediction Model of Landslide Geological Disaster Based on Ant Colony Algorithm Optimization and BP Neural Network. International Journal of Simulation--Systems, Science & Technology, 17(42).

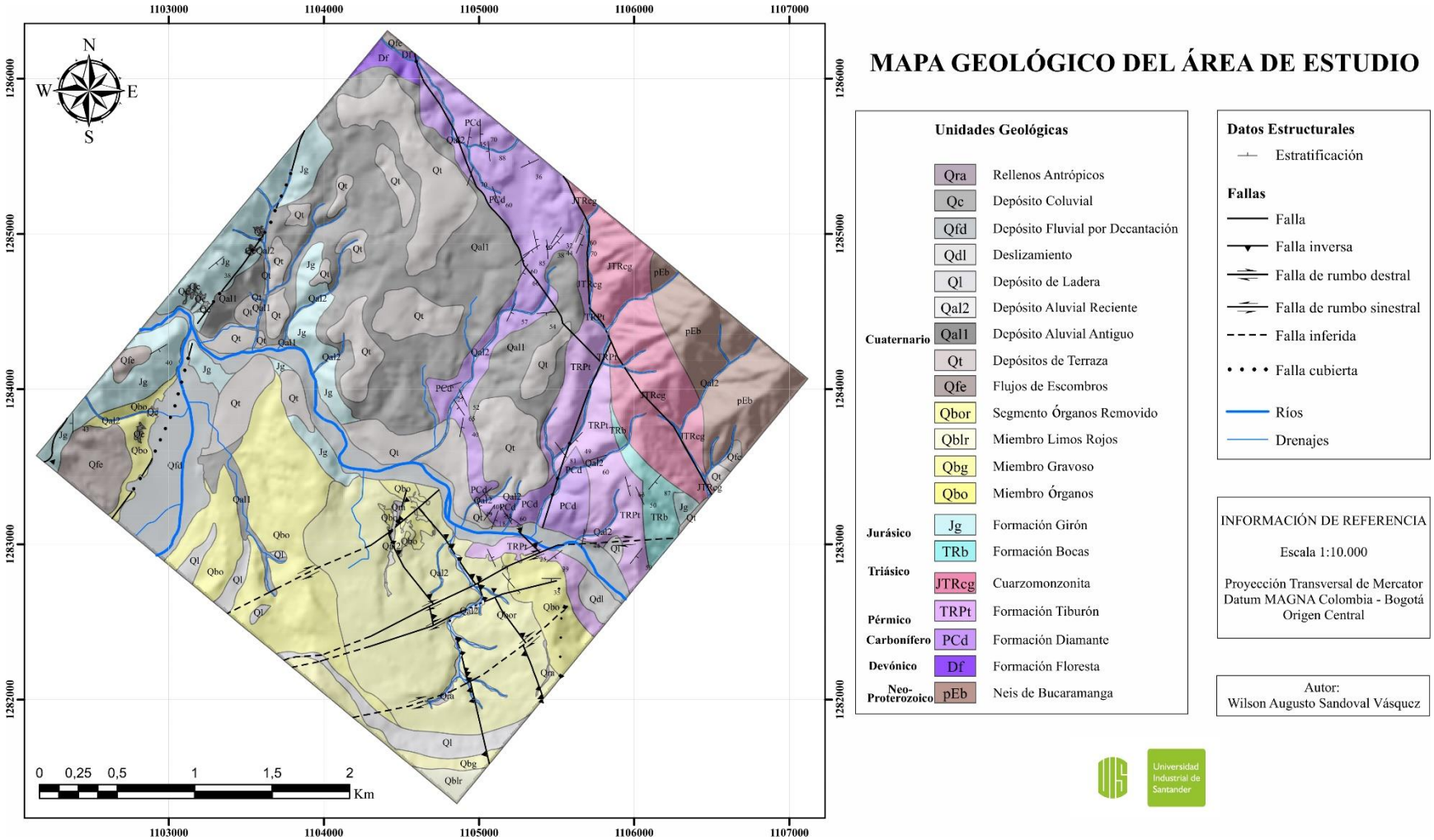
Yang, A. M., Han, Y., Han, C. C., Xin, Z. C., & Liu, Z. C. (2016). Research on Evaluation of Landslide Hazard Based on Ant Colony Algorithm_Support Vector Machine Classifier. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 13(2), 1117-1123.

Young, G., Bellizzia, A., Renz, H., Johnson, F., Robie, R., & Masvall, J. (1956). Geología de las cuencas sedimentarias de Venezuela y de sus campos petrolíferos. Boletín de Geología, publicación especial N°2, 1-140.

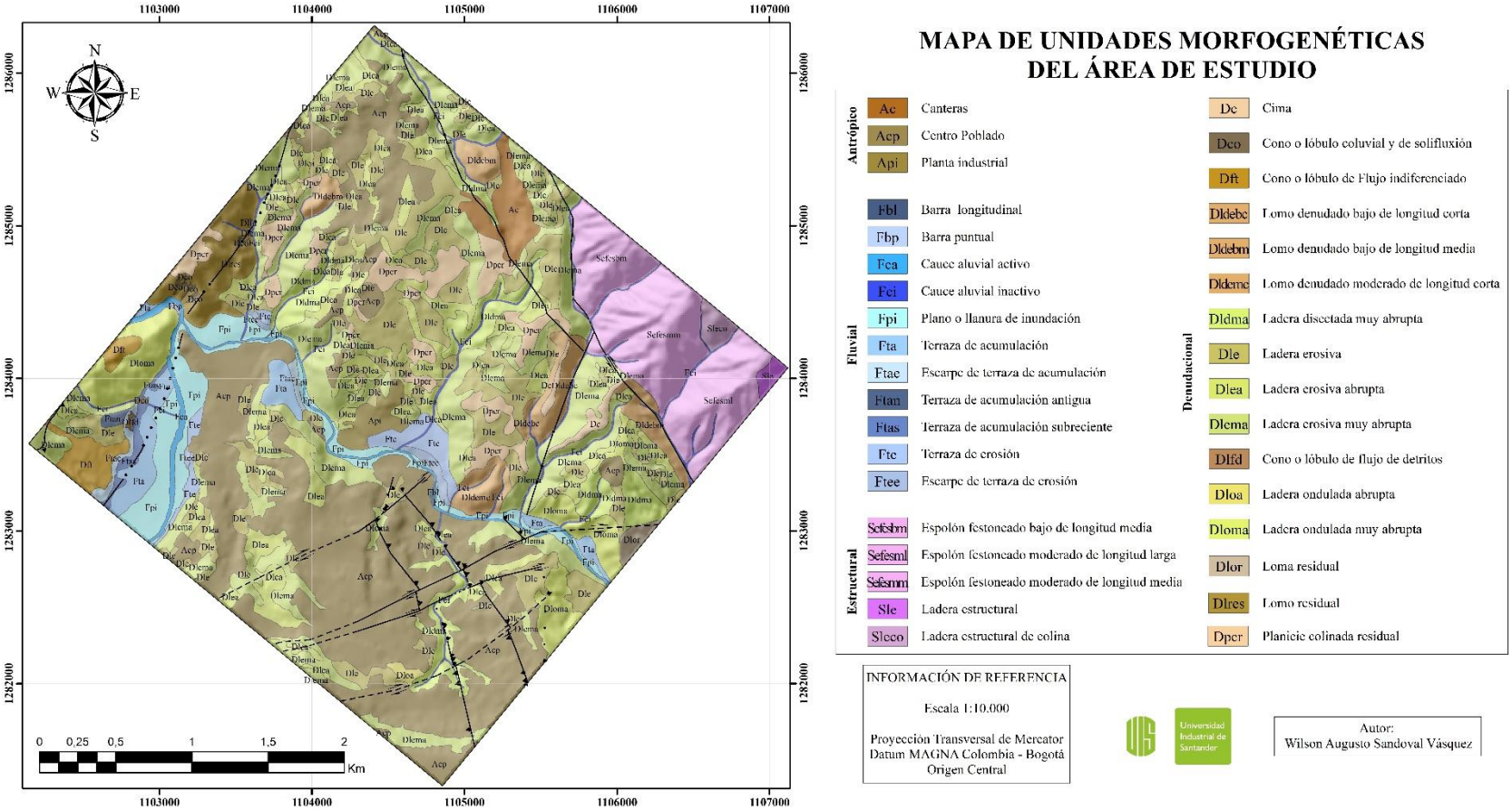
Youssef, A., Pradhan, B., Nemah, M., & El-Harbi, H. (2014). Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. Environ Earth Science.

Zinck, J. A. (2012). Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. (ITC, Ed.) Enschede: ITC Special Lecture Notes Series.

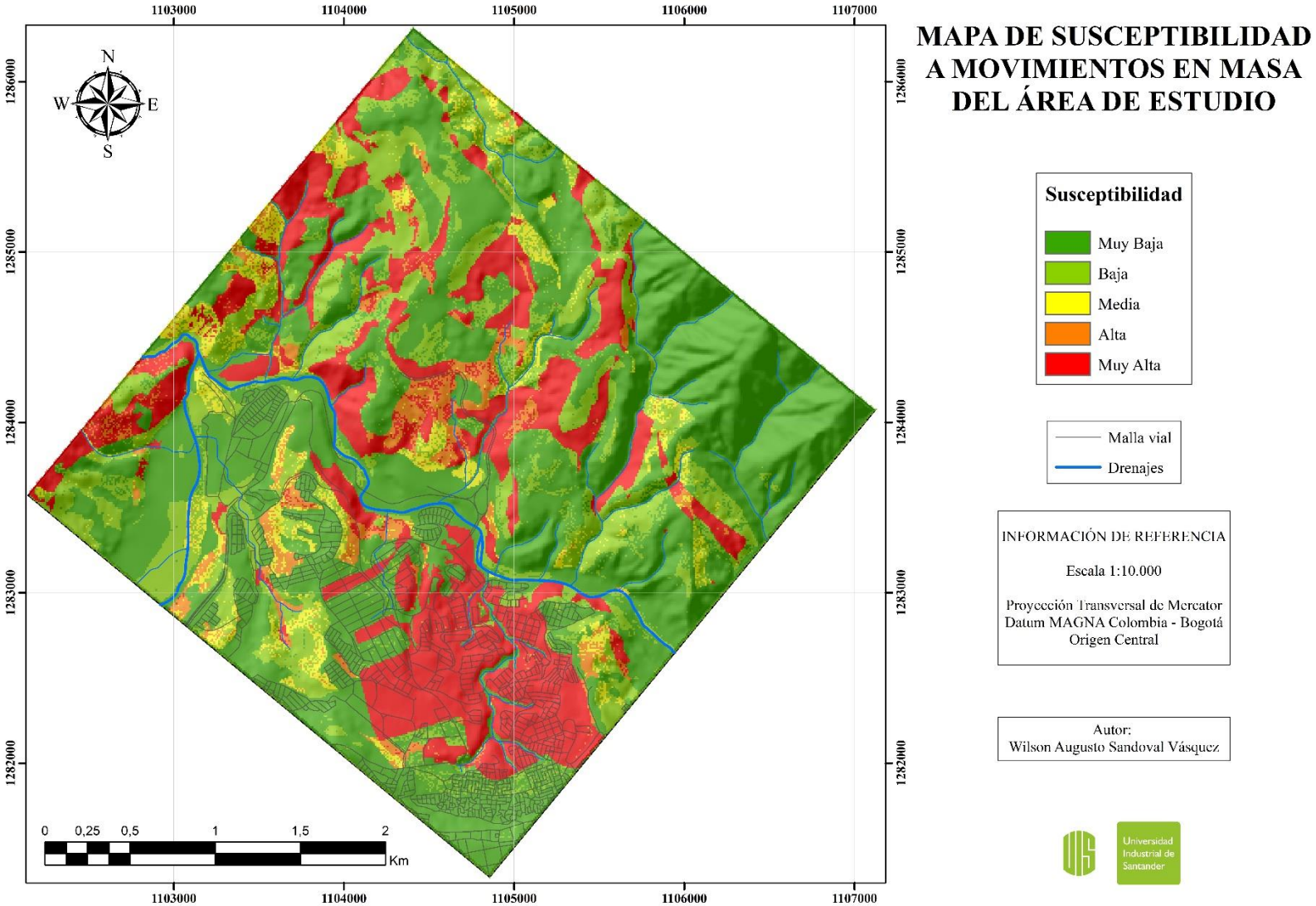
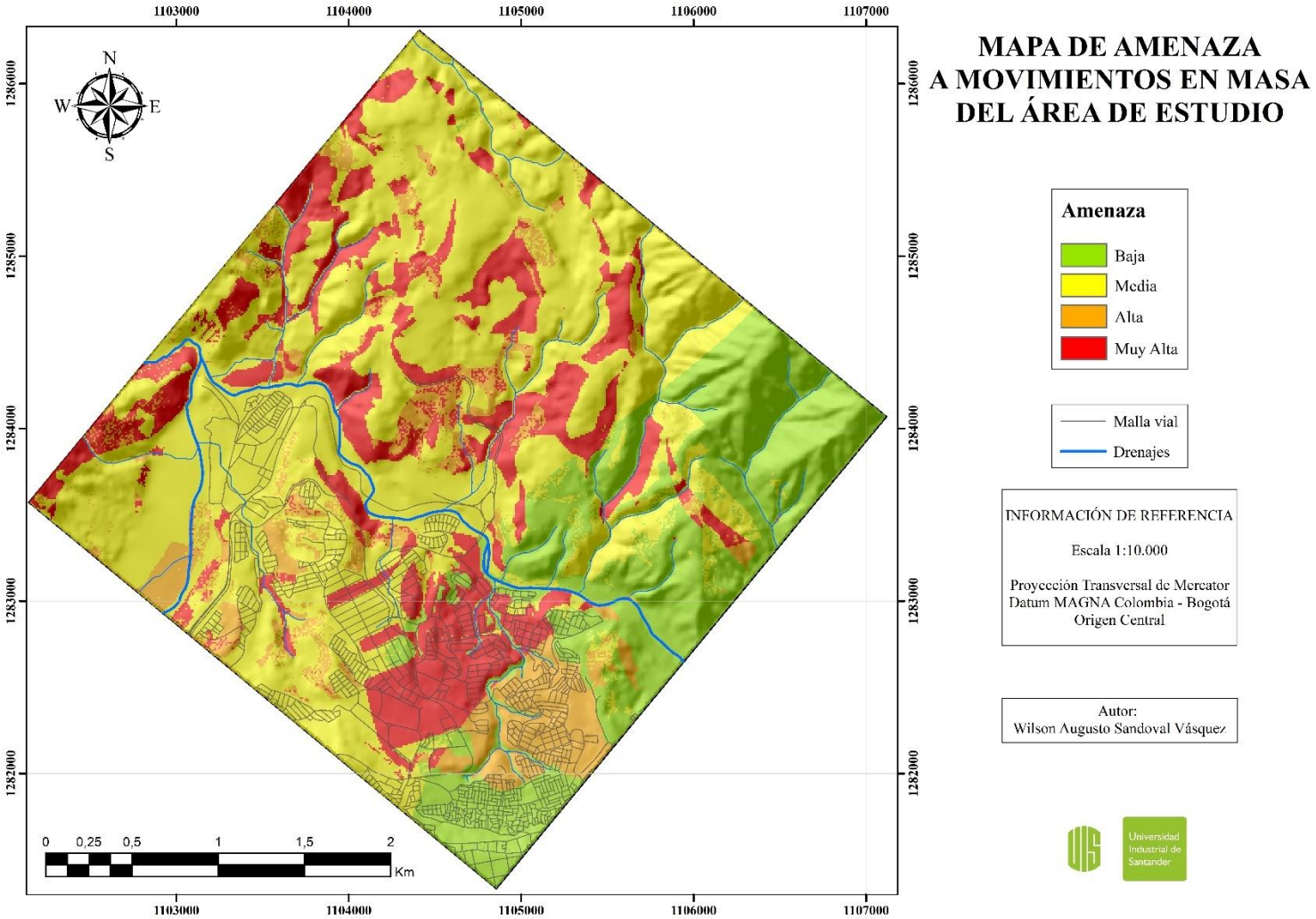
APÉNDICE A. Mapa Geológico a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga.



APÉNDICE B. Mapa Geomorfológico a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga.



APÉNDICE C. Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga.



APÉNDICE D. Mapa de Amenaza a Movimientos en Masa a escala 1:10.000 del sector norte de Bucaramanga.