

CARTOGRAFÍA DE LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A  
MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA EN ESCALA 1:50000 DEL  
MUNICIPIO DE PIEDECUESTA.

WILLIAM RENÉ ESPINOZA OSORIO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2017

CARTOGRAFÍA DE LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A  
MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA EN ESCALA 1:50000 DEL  
MUNICIPIO DE PIEDECUESTA.

WILLIAM RENÉ ESPINOZA OSORIO

Trabajo de grado en modalidad práctica empresarial como requisito para optar al  
título de Geólogo.

Director:

JUAN DIEGO COLEGIAL GUTIERREZ

Geólogo, Ph.D. en Geología.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2017

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	14
1.1. OBJETIVO GENERAL	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3. JUSTIFICACIÓN	16
4. ÁREA DE ESTUDIO	18
4.1. LOCALIZACIÓN	18
4.2. VÍAS DE ACCESO	19
4.3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	19
5. ANTECEDENTES	22
6. METODOLOGÍA	25
6.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	25
6.1.1. Derivados de sensores remotos	25
6.1.2. Mapas	26
6.1.3. Artículos, informes técnicos y registros de movimientos de remoción en masa	26
6.2. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ZONIFICACIÓN	27
6.3. TRATAMIENTO DE DATOS	29
6.4. REGRESIÓN LOGÍSTICA	30
6.5. CÁLCULO DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD	31
7. VARIABLES CONSIDERADAS	33
7.1. INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS	33

7.2.	GRADIENTE DE LA PENDIENTE	35
7.3.	GEOLOGÍA	37
7.4.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	39
7.5.	RED DE DRENAJES	41
7.6.	RED DE VÍAS	42
8.	APLICACIÓN DE LA REGRESIÓN LOGÍSTICA	44
8.1.	MATRIZ DE DATOS	44
8.2.	REGRESIÓN LOGÍSTICA EN “R”	45
9.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	47
9.1.	MAPA DE PROBABILIDAD	47
9.2.	CURVA ROC	48
9.3.	MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD	51
9.3.1.	Susceptibilidad muy baja	53
9.3.2.	Susceptibilidad baja	53
9.3.3.	Susceptibilidad media	54
9.3.4.	Susceptibilidad alta	54
9.3.5.	Susceptibilidad muy alta	54
9.4.	RECOMENDACIONES	55
10.	CONCLUSIONES	57
11.	BIBLIOGRAFÍA	58
	ANEXOS	61

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización del municipio de Piedecuesta..	18
Figura 2. Provincias tectónicas de Santander. Tomado y modificado de Royero & Clavijo (2001)	20
Figura 3. Métodos de zonificación de la susceptibilidad. Tomado y modificado de Aleotti & Chowdhury (1999).	27
Figura 4. Esquema metodológico para la creación del mapa de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa.	32
Figura 5. Inventario de MRM.	34
Figura 6. Distribución de los valores del mapa de pendientes.	36
Figura 7. Mapa de pendientes.	36
Figura 8. Mapa geológico del municipio de Piedecuesta.	39
Figura 9. Geología estructural. (a) Fallas en el área de estudio. (b) Zona de influencia de las fallas en el área de estudio (buffer).	40
Figura 10. Zona de influencia de la red de drenajes.	41
Figura 11. Red de vías. (a) Vías del municipio de Piedecuesta. (b) Zonas de influencia alrededor de las vías.	42
Figura 12. Variable dependiente. (a) Puntos de ausencia de MRM (0). (b) Puntos de presencia	44
Figura 13. Mapa de la probabilidad de ocurrencia de movimientos de remoción en masa.	48
Figura 14. Curva ROC del análisis de regresión.	49
Figura 15. Relación de la sensibilidad y la especificidad con los valores de probabilidad	50
Figura 16. Distribución de los valores de probabilidad	52
Figura 17. Mapa de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa del municipio de Piedecuesta a escala 1:50000	52

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Bandas espectrales de la misión Sentinel-2.	25
Tabla 2. Clasificación de los movimientos de remoción en masa de Cruden & Varnes (1996).	33
Tabla 3. Unidades litológicas del mapa geológico de Piedecuesta.	37
Tabla 4. Resultados test “chi-square”.	45
Tabla 5. Coeficientes obtenidos de la regresión logística.	46
Tabla 6. Clasificación de los puntos dentro del rango de probabilidad elegido.	51

## LISTA DE ANEXOS.

	pág.
Anexo A. Mapa de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa del municipio de Piedecuesta.	62
Anexo B. Inventario de movimientos de remoción en masa.	64
Anexo C. Mapa de pendientes.	66
Anexo D. Mapa geológico de Piedecuesta.	68
Anexo E. Mapa de geología estructural.	70
Anexo F. Mapa de vías de Piedecuesta.	72
Anexo G. Red de drenajes.	74

## RESUMEN

**TITULO:** CARTOGRAFÍA DE LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA EN ESCALA 1:50000 DEL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA\*

**AUTOR:** ESPINOZA OSORIO WILLIAM RENÉ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Susceptibilidad, movimientos de remoción en masa, regresión logística.

Usando un enfoque estadístico multivariado se generó la zonificación de la susceptibilidad con el fin de obtener información para el asesoramiento y la planeación del territorio, este enfoque permitió evaluar los parámetros involucrados en la generación de este fenómeno sobre una base objetiva representada en el registro de movimientos de remoción en masa. Un análisis estadístico de regresión logística valoró la importancia de las variables tenidas en cuenta en la generación de este tipo de movimientos encontrando que de las variables consideradas las que tenían relevancia estadística eran el gradiente de la pendiente, la litología y la red de drenajes.

Un mapa de probabilidad con valores entre 0 y 1 se generó con los coeficientes aportados por el análisis de regresión, con la curva ROC se eligió el rango de probabilidad para las categorías susceptibles y no susceptibles que mejor se ajustara a las condiciones particulares de la zonificación. Se determinaron 5 niveles de susceptibilidad en donde los niveles no susceptibles están por debajo de una probabilidad del 20% y los susceptibles por encima del mismo valor. Con la curva ROC se determinó que la sensibilidad de la zonificación fue de 94,3 % lo que indica la alta capacidad de predicción del modelo.

La susceptibilidad media es la que predomina en el municipio ocupando el 41% del área total, es frecuente en el sector del Macizo de Santander, en las laderas con altos gradientes de pendientes en el sector norte de la Mesa de los Santos y en el extremo suroriental de la Mesa de Ruitoque. La susceptibilidad alta y muy alta ocupa alrededor del 35% del municipio, se localiza en sectores de muy altas pendientes, a los costados de los drenajes y en sectores donde afloran unidades litológicas como el Neis de Bucaramanga y el Granito de Pescadero.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez.

## ABSTRACT

**TITLE:** LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ZONATION OF THE TOWN OF PIEDECUESTA, SCALE 1:50000\*

**AUTOR:** ESPINOZA OSORIO WILLIAM RENÉ\*\*

**KEYWORDS:** Susceptibility, landslides, logistic regression.

Using a multivariate statistical approach the zoning of susceptibility was generated in order to get information for advice and planning of the territory, this approach allowed to evaluate the parameters involved in the generation of this phenomenon on an objective basis represented in the inventory of landslides. A statistical analysis of logistic regression valued the importance of the factors considered in the generation of landslides, finding that of the variables considered those that had statistical relevance were slope gradient, lithology and drainage network.

A probability map with values between 0 and 1 was generated with the coefficients provided by the regression analysis, with the ROC curve the probability range was chosen for the susceptible and non-susceptible categories. Five levels of susceptibility were determined where the non-susceptible levels are below a 20% of probability and the susceptible levels above the same value. With the ROC curve it was determined that the sensitivity of the zoning was 94.3% indicating the high predictive capacity of the model.

The medium susceptibility is predominant in Piedecuesta occupying 41% of the total area, it is frequent in the sector of the Massif of Santander, in the slopes with high slope gradient in the northern sector of Mesa de los Santos and in the extreme southeast of Mesa de Ruitoque. The high and very high susceptibility occupies around 35% of the municipality, is located in sectors of very high slope gradient, to the sides of the drainage and in sectors where outcrop lithological units like the Neis of Bucaramanga and the Granite of Pescadero

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez

## INTRODUCCIÓN

Los movimientos de remoción en masa (MRM) son fenómenos naturales asociados a los procesos geomorfológicos que modelan la superficie terrestre, ocurren cuando un área susceptible a este tipo de movimientos por razones ligadas en mayor medida a sus características geológicas, estructurales, geomorfológicas y del suelo es afectada por la acción de la gravedad y de otros factores causantes de inestabilidad como los movimientos tectónicos, las intensas precipitaciones y la influencia antrópica.

Hay un registro amplio de los graves daños causados a la infraestructura y a la integridad de la población por los MRM a lo largo del mundo, teniendo en cuenta el crecimiento exponencial de la población y la expansión urbanística no es de extrañar la relevancia que ha tomado la gestión del riesgo para este tipo de fenómenos. En Colombia hay múltiples ejemplos históricos del alcance destructivo de estos movimientos y son numerosas las poblaciones vulnerables que están situadas sobre las cordilleras en donde el alto gradiente de pendiente crea un contexto geomorfológico que favorece la ocurrencia de MRM.

Para hacer una gestión del riesgo efectiva es necesario contar con la zonificación de la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa, esta herramienta permite identificar y calcular la distribución de los sectores más y menos propensos a ser afectados por este fenómeno brindando así un punto de partida en la evaluación de las implicaciones socioeconómicas generadas por los MRM. La precisión de la zonificación está condicionada principalmente por la cantidad y la calidad de información disponible, la escala de trabajo y la metodología empleada. Existen varios métodos aplicados a lo largo y ancho del mundo para tal fin, la elección del más apropiado y del que mejor se ajuste a las condiciones particulares de una región se basa en la calidad y la cantidad de la información de la que se disponga y de la escala de trabajo.

Piedecuesta está enmarcado en un contexto geomorfológico que favorece la ocurrencia de estos movimientos y los mapas de susceptibilidad elaborados para el municipio tienen algunas carencias relacionadas con la escala de trabajo, el método de zonificación usado y el área considerada en estos estudios. Contar con una zonificación de la susceptibilidad actualizada es un requisito para realizar una correcta gestión del riesgo por este y otros fenómenos naturales asociados.

Este trabajo de grado en la modalidad práctica empresarial busca generar la cartografía a escala 1:50000 de la zonificación de la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa del municipio de Piedecuesta gracias al convenio de apoyo interinstitucional entre la Universidad Industrial de Santander y la Alcaldía municipal de Piedecuesta el cual ofrece un escenario de mutuo beneficio en el que el estudiante complementa su formación profesional y a su vez pone los conocimientos adquiridos durante el proceso académico formativo al servicio de las entidades estatales y por supuesto de la sociedad colombiana.

La práctica empresarial es una de las modalidades que establece la Universidad Industrial de Santander en su reglamento académico para desarrollar el trabajo de grado, esta modalidad pretende que el estudiante fortalezca y desarrolle habilidades y competencias específicas mediante la interacción en un contexto empresarial a través de proyectos puntuales relacionados a la profesión.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Elaborar el mapa de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa para el municipio de Piedecuesta a escala 1:50000 articulando procedimientos existentes que permitan un ajuste adecuado a las condiciones particulares del área y del estudio.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar información geológica, geomorfológica y del suelo para conformar una base de datos sobre la que se fundamentará la zonificación.
- Seleccionar la metodología que mejor se ajuste a las condiciones del problema y generar el contenido temático necesario para aplicarla.
- Generar el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa.
- Valorar los resultados obtenidos para determinar la sensibilidad alcanzada con el método.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Piedecuesta posee un territorio diverso geomorfológicamente hablando, está compuesto por una serie de valles, mesetas, colinas y cerros que se traducen en gradientes altos de pendiente, este junto con otros factores como la densidad de fracturamiento y la influencia antrópica presente en gran parte del territorio hacen del municipio un escenario susceptible a sufrir movimientos de remoción en masa.

Es claro que una buena administración del territorio empieza por conocer las características del terreno, no tener la zonificación de la susceptibilidad a MRM dificulta varias de las responsabilidades de la administración municipal, por mencionar unas, gestionar el riesgo de los puntos potencialmente críticos a sufrir este tipo de fenómenos, administrar acertadamente el territorio, hacer un uso correcto del suelo y planear proyectos de desarrollo.

Las evaluaciones de susceptibilidad hechas por entes gubernamentales de orden nacional, departamental y municipal con el fin de identificar las zonas más propensas a sufrir este tipo de fenómenos presentan escalas que no brindan una resolución óptima lo que dificulta la interpretación del mapa de susceptibilidad para tratar situaciones de orden municipal. El control eficaz del riesgo generado por este fenómeno se compromete al no poseer un estudio de susceptibilidad elaborado con una escala y una metodología de análisis y modelamiento que se adapte a las condiciones particulares del área.

Las numerosas y extensas zonas veredales con las que cuenta el municipio no han sido incluidas en las zonificaciones hechas a escalas detalladas que por el contrario se han enfocado en sectores prioritarios como las laderas que rodean el casco urbano de Piedecuesta. El conocimiento de este tipo que se posee sobre el territorio rural del municipio es escaso y requiere actualizarse teniendo en cuenta que la ocurrencia de movimientos de remoción en masa es más alta en estos sectores

### 3. JUSTIFICACIÓN

El municipio de Piedecuesta está ubicado sobre la cordillera oriental, sector en el que se presenta una concurrencia alta de MRM asociados en mayor medida al intenso control estructural y a la evolución geomorfológica del área y en menor medida a causas más locales que varían dentro de la región como las características litológicas de las unidades rocosas superficiales, condiciones climáticas, propiedades edáficas y la cobertura vegetal.

Es largo el registro de los fatales desenlaces y las profundas afectaciones socioeconómicas que ha dejado este fenómeno en Colombia que en ocasiones puede conjugarse con otros fenómenos naturales o ser el detonante de otros como las avenidas torrenciales, flujos de lodos y materiales, represamiento de aguas, inundaciones, entre otros. Siendo Piedecuesta un municipio ubicado en un contexto que favorece la ocurrencia de estos movimientos es necesario e importante realizar una evaluación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa que sirva como un apoyo y una útil herramienta para la planeación y ejecución de proyectos que aporten al desarrollo íntegro del municipio.

Se han realizado estudios de susceptibilidad a MRM en Piedecuesta con diferentes alcances, escalas y metodologías, entre los más destacados están los trabajos regionales de susceptibilidad hechos por el SGC a escalas 1:100000<sup>1</sup> y las zonificaciones realizadas por el SGC en convenio con las administraciones municipales en las laderas que rodean los cascos urbanos de los municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga.

Las evaluaciones de susceptibilidad hechas para el municipio o algunos sectores del mismo presentan algunas limitaciones, en el caso del estudio realizado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013)<sup>2</sup>, la escala 1:100000 no brinda una resolución adecuada que permita el uso de esta zonificación para el tratamiento de problemas más locales, por otro lado, las demás evaluaciones de susceptibilidad a escala 1:5000 están enfocadas solo en algunas laderas que rodean el casco urbano

---

<sup>1</sup> SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Versión No 2. Bogotá: Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, 2013.

<sup>2</sup> SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Op. cit.

del municipio (INGEOMINAS, 2009)<sup>3</sup>. Por esto es necesario construir más y mejor conocimiento específico sobre el territorio en escalas apropiadas que faciliten una administración más acertada del municipio, que ayude a localizar los sectores potencialmente críticos para elaborar análisis más específicos y que sirva como una útil herramienta para la planeación de proyectos de desarrollo.

---

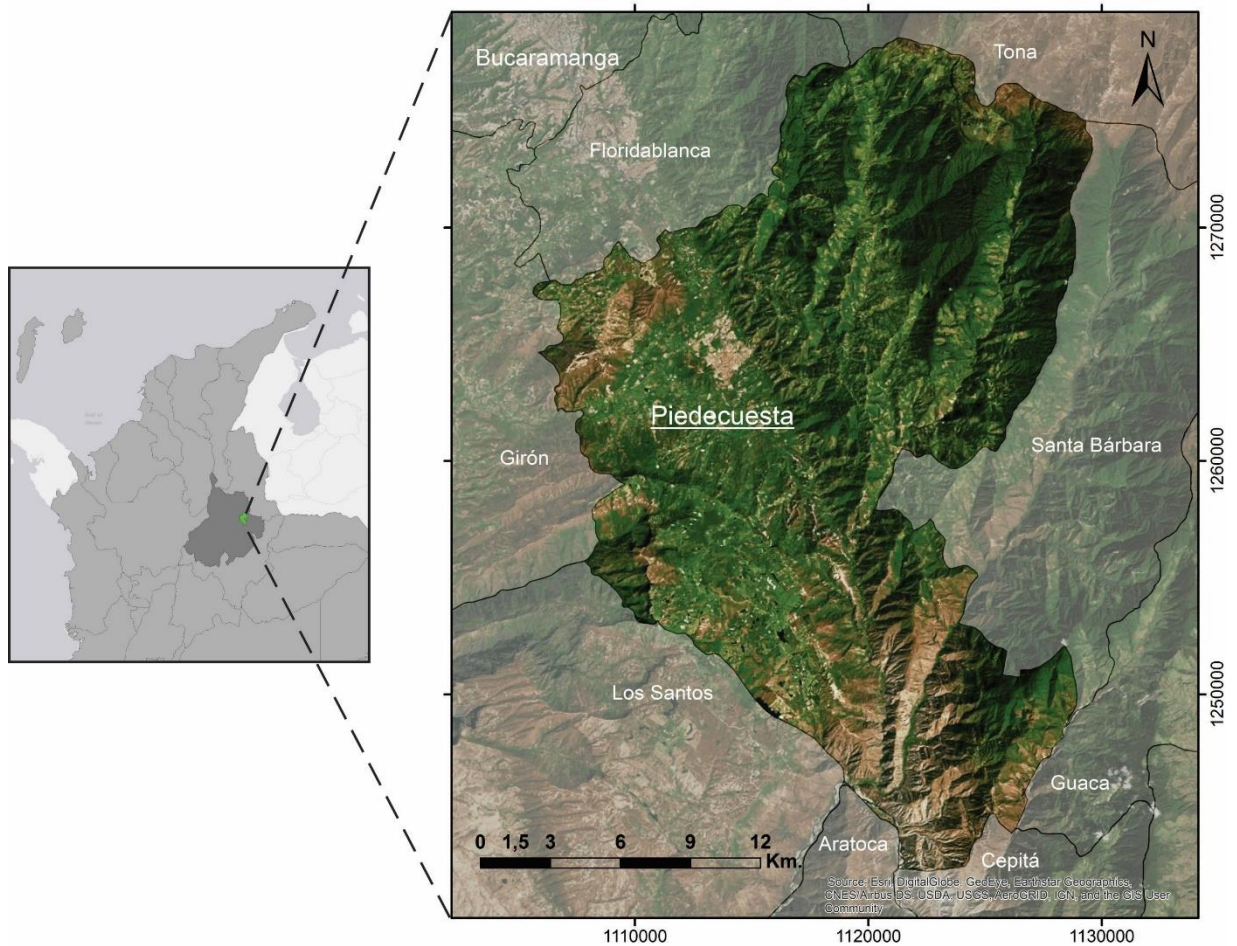
<sup>3</sup> INGEOMINAS. Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Bogotá: Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, 2009.

## 4. ÁREA DE ESTUDIO

### 4.1. LOCALIZACIÓN

El área de estudio comprende la totalidad del municipio de Piedecuesta ubicado en la región nororiental del país en el departamento de Santander cuya extensión es aproximadamente de 480 kilómetros cuadrados. Piedecuesta está sobre el costado occidental de la Cordillera Oriental en el piedemonte del Macizo de Santander a 17 kilómetros al sur de la ciudad de Bucaramanga haciendo parte del área metropolitana de Bucaramanga. El municipio limita al norte con Tona y Floridablanca, al sur con Guaca, Cepitá, Aratoca y Los Santos, al oriente con Santa Bárbara y al occidente con Girón, figura 1.

Figura 1. Localización del municipio de Piedecuesta.



## **4.2. VÍAS DE ACCESO**

Piedecuesta cuenta con una red vial que permite recorrer casi la totalidad de su extensión. La principal vía que pasa por el municipio es la troncal 45A, es una vía primaria de la Red Nacional de Carreteras y en este sector comunica en sentido sur-norte el municipio de Aratoca con el casco urbano de Piedecuesta, hay un tramo de otra red primaria, la transversal 66, que pasa en inmediaciones del límite con el municipio de Tona. Además están las vías pavimentadas que comunican el casco urbano de Piedecuesta con la Mesa de los Santos y un tramo de la vía que comunica los Curos con el municipio de Guaca. El municipio también cuenta con una red de vías veredales sin pavimentar que recorren principalmente las veredas que rodean el casco urbano del municipio.

## **4.3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL**

La región nororiental de Colombia, más específicamente la Cordillera Oriental, es una región sobre la que se mantiene un especial interés ya que tiene una evolución geológica compleja y tectónicamente dinámica con un amplio registro de eventos que han permitido reconstruir gran parte de la historia geológica del extremo Noroccidental de Suramérica. El levantamiento generalizado de esta cordillera inició en el Mioceno y está asociado a la interacción entre las placas tectónicas de Suramérica, Nazca y el Caribe (Royero G. & Clavijo, 2001)<sup>4</sup>.

Royero y Clavijo (2001)<sup>5</sup> en su trabajo sobre la geología generalizada del departamento de Santander establecieron tres provincias tectónicas, la del Macizo de Santander (MS), la de la Cordillera Oriental (CO) y la del Valle Medio del Magdalena (VMM), estas últimas separadas por el sistema de fallas La Salina, figura 2. Son abundantes las estructuras producto de un régimen tectónico compresivo, en la provincia del Valle Medio del Magdalena y de la Cordillera oriental los sinclinales y anticlinales son amplios y suaves; en la provincia del Macizo de Santander predominan las fallas inversas y de cabalgamiento con orientaciones noreste y noroeste.

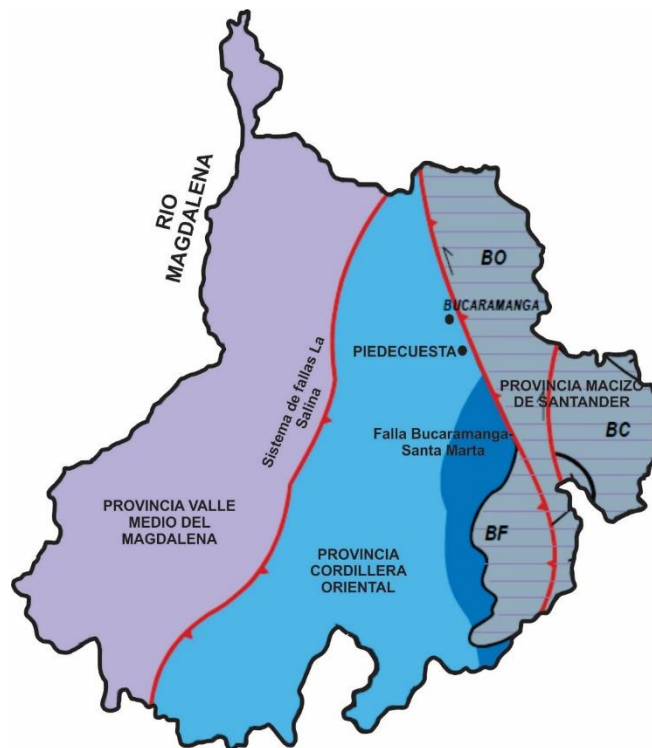
---

<sup>4</sup> ROYERO G., J. M. & CLAVIJO, J. Mapa geológico generalizado, departamento de Santander. Bogotá: INGEOMINAS, 2001.

<sup>5</sup> *Ibíd.*

La provincia MS es dividida en cuatro bloques tectónicos por Royero y Clavijo (2001)<sup>6</sup>, los bloques Ocaña, Cucutilla y Pamplona ubicados al oriente de la falla Bucaramanga-Santa Marta y el bloque Floresta ubicado al occidente de la misma. Esta provincia se caracteriza por estar formada principalmente por rocas metamórficas de origen sedimentario e ígneo que afloran a lo largo y ancho de todo el Macizo, son las rocas más antiguas de la región con edades del Proterozoico Superior y el Paleozoico. La formación metamórfica más antigua, con edad del Proterozoico es el Neis de Bucaramanga, término propuesto por Ward et al. (1973)<sup>7</sup>, Royero y Clavijo (2001)<sup>8</sup> proponen usar el término Complejo de Bucaramanga debido a la complejidad que representa clasificar esta unidad; en términos generales es una secuencia de paraneises cuarzofeldespáticos, hornbléndicos, micáceos y granatíferos de alto grado de metamorfismo. El Ortoneis de Berlín, definido así por Royero y Clavijo (2001)<sup>9</sup> es otra formación metamórfica con protolito ígneo y edades entre el Proterozoico Superior y el Paleozoico inferior.

Figura 2. Provincias tectónicas de Santander. Tomado y modificado de Royero & Clavijo (2001).



<sup>6</sup> *Ibíd.*

<sup>7</sup> WARD, D *et al.* Geología de lo cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. Memoria Explicativa. INGEOMINAS, 1973. 21 (1-3).

<sup>8</sup> ROYERO G., J. M. & CLAVIJO, J. Op cit.

<sup>9</sup> *Ibíd.*

Suprayaciendo al complejo Bucaramanga se encuentra la Formación Silgará, denominada así por Ward et al (1973)<sup>10</sup>; se trata de una secuencia de rocas clásticas con metamorfismo de bajo a medio grado, está compuesta por filitas, cuarcitas, esquistos y metareniscas, el contacto entre esta unidad y el Complejo de Bucaramanga no se ha determinado con exactitud debido a las similitudes litológicas entre ambas unidades.

Además de las rocas metamórficas el Macizo de Santander tiene una importante presencia de cuerpos ígneos que intruyen los complejos metamórficos mencionados previamente, registran edades entre el Triásico y el Jurásico; estos cuerpos ígneos son agrupados por Ward et al. (1973)<sup>11</sup> en el Grupo Plutónico de Santander conformado por los batolitos mayores del macizo entre los que se destacan la Cuarzomonzonita de la Corcova, el Granito de Durania, la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y el Batolito de Rionegro.

La provincia de la Cordillera Oriental está constituida principalmente por una cobertura sedimentaria que abarca una gran extensión de la cordillera, estas unidades fueron depositadas en ambientes marinos, transicionales y fluviales en su mayoría durante el evento marino de transgresión y regresión ocurrido por la apertura de la cuenca de rift entre el Triásico y el Jurásico. Entre las unidades más representativas de este grupo están la Formación Los Santos también conocida como la Formación Tambor, Cumbre, Rosablanca, Paja, Tablazo, Simití, entre otras.

Estructuralmente la región puede agruparse en tres grupos bien definidos, el primer grupo que comprende la región oriental en donde predomina el fallamiento de bloques por fallas inversas y de cabalgamiento, la falla de Bucaramanga-Santa Marta es el rasgo estructural más sobresaliente de este grupo; el segundo se localiza en la región central sobre las estribaciones occidentales de la Cordillera Oriental en el que se evidencian amplios plegamientos y el tercero que corresponde con el graben del Magdalena hacia el sector occidental del departamento (Royero G. & Clavijo, 2001)<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> WARD, D *et al.* Op cit.

<sup>11</sup> *Ibíd.*

<sup>12</sup> ROYERO G., J. M. & CLAVIJO, J. Op cit.

## 5. ANTECEDENTES

Los trabajos en los que se han realizado evaluaciones de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa dentro del municipio de Piedecuesta están agrupados en los estudios diagnósticos que hacen parte del Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio y en los análisis de estabilidad hechos para algunos sectores puntuales de Piedecuesta. También se ha evaluado la susceptibilidad a este fenómeno en el municipio en los trabajos regionales de zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa hechos por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

El INGEOMINAS ahora conocido como el Servicio Geológico Colombiano elaboró el mapa nacional de amenaza relativa a escala 1:1'500000 en el año 2001 en el que se determinaron 15 provincias de Amenaza Relativa<sup>13</sup>. Por su parte el IDEAM en el año 2000 calculó el mapa de susceptibilidad a movimientos de tierra a una escala de 1:1'500000. En el 2009 el INGEOMINAS y el IDEAM deciden actualizar y mejorar la escala del mapa nacional de amenaza relativa y el mapa de susceptibilidad a movimientos de tierra respectivamente. Dada la confluencia de objetivos de las dos entidades, se realiza de manera conjunta la actualización de los dos mapas, generándose el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa y el mapa de amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:500.000 (INGEOMINAS, 2010)<sup>14</sup>. Para el cálculo de este mapa se usó un método heurístico en el que se categorizaron y ponderaron los factores causantes de la susceptibilidad a MRM por medio de procesos de análisis jerárquicos (AHP por sus siglas en inglés), los parámetros generales tenidos en cuenta para el cálculo del mapa de susceptibilidad fueron la geología, geomorfología, cobertura vegetal y las características edáficas.

El SGC con el fin de continuar con la actualización y mejorar el nivel de detalle de los mapas realiza un proyecto de zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a escala 1:100000 en el año 2012; para este proyecto se usó un método heurístico en donde se tuvieron en cuenta variables cualitativas y cuantitativas que se usaron para determinar el Índice de Susceptibilidad de

---

<sup>13</sup> INGEOMINAS. Mapa de provincias de amenaza relativa por movimientos en masa de Colombia. Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear. Subdirección de amenazas geoambientales, 2001.

<sup>14</sup> INGEOMINAS. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:500000. Bogotá: Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, 2010.

Movimientos en masa (ISD) mediante procesos de análisis jerárquicos (SGC, 2013)<sup>15</sup>. Para efectos prácticos estos trabajos usaron como base la división de planchas 1:100000 usada por el IGAC en las que Piedecuesta hace parte de las planchas 120-Bucaramanga y 121-Cerrito.

Un convenio entre el INGEOMINAS, la CDMB y las administraciones municipales de Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón facilitó la elaboración de un trabajo de zonificación de amenaza por MRM para algunas laderas del área metropolitana a escala 1:5000. Cada municipio identificó las áreas prioritarias basándose en el trabajo de zonificación realizado por el INGEOMINAS en el 2001, conformándose un área de estudio total de 5.008 Ha. En este trabajo calcularon el mapa de susceptibilidad por medio de un proceso de análisis discriminante que hace parte de los métodos estadísticos multivariantes y se realizó un inventario de movimientos en masa con el fin de calibrar los resultados obtenidos (INGEOMINAS, 2009)<sup>16</sup>.

Dentro del municipio se han realizado estudios puntuales de estabilidad en la vereda Las Amarillas, en el Barrio San Cristóbal VII Etapa y en los terrenos donde se ubican los asentamientos Altos de Guatiguará, Nueva Colombia y Guatiguará-La Vega. El INGEOMINAS en abril de 1988 realizó una visita técnica a un deslizamiento ocurrido en la Vereda Las Amarillas en donde caracterizó el movimiento en masa, se especificaron sus dimensiones y se propusieron una serie de acciones orientadas a neutralizar y reducir los factores desencadenantes de este fenómeno (INGEOMINAS, 1988)<sup>17</sup>.

En el año 2000 el INGEOMINAS junto con la administración municipal de Piedecuesta con una visita técnica evaluaron la estabilidad del terreno sobre el que se ubican los asentamientos Altos de Guatiguará, Nueva Colombia y Guatiguará-La Vega. La estabilidad del terreno estaba siendo comprometida por la acción antrópica desarrollada por los casi 5000 habitantes que habitaban estos sectores para este

---

<sup>15</sup> SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Op cit.

<sup>16</sup> INGEOMINAS. Op cit.

<sup>17</sup> INGEOMINAS. Deslizamiento en la Vereda Las Amarillas, municipio de Piedecuesta, Santander. Bucaramanga: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-mineras, 1988.

año por lo que se concluyó que se debía evitar la construcción de más viviendas (INGEOMINAS, 2000)<sup>18</sup>.

El SGC en el 2014 envió una comisión al barrio San Cristóbal VII Etapa con el fin de realizar un diagnóstico sobre los factores causantes de inestabilidad del terreno en donde se presentaron movimientos de remoción en masa que afectaron a la población. Se concluyó que los deslizamientos eran causados por la morfología abrupta correspondiente a las laderas del Macizo de Santander en donde los flujos de agua superficiales y las altas precipitaciones fueron los factores detonantes de los MRM. La influencia antrópica también contribuyó a la inestabilidad del sector por hacer un uso inapropiado del suelo. Se realizaron algunas recomendaciones que incluían la construcción de sistemas de drenaje que disminuyeran la infiltración de agua en el suelo, la construcción de barreras de contención, la remoción del material deslizado y el monitoreo para identificar signos de inestabilidad para poder plantear esquemas de control futuros (SGC, 2014)<sup>19</sup>.

---

<sup>18</sup> INGEOMINAS. Concepto geológico sobre la estabilidad de los terrenos donde se ubican los asentamientos Altos de Guatiguará, Nueva Colombia y Guatiguará-La Vega, municipio de Piedecuesta, departamento de Santander. Bucaramanga: Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, 2000.

<sup>19</sup> SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Concepto técnico sobre problemas de inestabilidad que afectan el barrio San Cristóbal VII Etapa, municipio de Piedecuesta, departamento de Santander. Bogotá: Dirección técnica de geoamenazas, 2014.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Aunque no hay una metodología predeterminada para zonificar la susceptibilidad, un estudio de esta naturaleza siempre iniciará con la consulta y adquisición de información en distintos formatos y de diferentes fuentes. El grado de sensibilidad del mapa generado estará condicionado en gran medida por la calidad y la cantidad de información que se adquiriera inicialmente.

La consulta de información permitió crear una base de datos de donde se derivaron entre otras cosas la elección del método de zonificación, los mapas temáticos requeridos por el método, el inventario de movimientos de remoción en masa y las alternativas de validación del método. Los conjuntos de datos usados se resumen así:

**6.1.1. Derivados de sensores remotos.** La misión Sentinel-2 realizada por la Agencia Espacial Europea<sup>20</sup> (ESA por sus siglas en inglés) brinda información en trece bandas espectrales con una resolución de 10 metros para las bandas visibles y de infrarrojo cercano. Se usó la combinación de las bandas 4, 3 y 2 para obtener una imagen en color verdadero; otra combinación que resultó bastante útil fue la de las bandas 12, 11 y 8A llamada penetración atmosférica en la que se podían reconocer patrones texturales de los suelos, esta combinación de bandas tiene una resolución menor debido a que la resolución de esas bandas es de 20 metros, tabla 1.

La Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial desarrolló el satélite Alos Palsar el cual obtuvo imágenes de radar durante su tiempo de operación hasta el 2011 con resoluciones de 6,5 y 12,5 metros. Esta misión aportó el modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés) en formato raster con una resolución de 12,5 metros, dentro de los modelos de elevación consultados fue el de mejor resolución. También se contó con una serie de fotografías aéreas aportadas por la Oficina Gestora de Planeación del municipio, estas fotografías eran principalmente de las laderas que rodean el caso urbano del municipio.

---

<sup>20</sup> EUROPEAN SPACE AGENCY. *Sentinel-2 User Handbook*. 2013.

Tabla 1. Bandas espectrales de la misión Sentinel-2. Tomado de (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2015)

Número de Banda	Banda	Longitud de onda central (nm)	Ancho de Banda (nm)	Resolución espacial (m)
1	Blue	443	20	60
2	Green	490	65	10
3	Red	560	35	10
4	Short wave infrared (SWIR)	665	30	10
5	Short wave infrared (SWIR)	705	15	20
6	Short wave infrared (SWIR)	740	15	20
7	Short wave infrared (SWIR)	783	20	20
8	Ultrablue	842	115	10
8a	Visible and near infrared	865	20	20
9	Visible and near infrared	945	20	60
10	Visible and near infrared	1380	30	60
11	Visible and near infrared	1610	90	20
12	Visible and near infrared	2190	180	20

**6.1.2. Mapas.** Se usaron mapas temáticos principalmente geológicos, geomorfológicos y de vías con diferentes escalas obtenidos de diferentes fuentes; se utilizaron los trabajos del SGC de cartografía geológica a escala 1:100000 para la plancha 120-Bucaramanga y 121-Cerrito. La Oficina Gestora de Planeación facilitó una serie de mapas entre ellos un mapa geológico a escala 1:35000 elaborado para hacer estudios de evaluación y ajuste al plan básico de ordenamiento territorial (PBOT) en el año 2014, también realizaron un mapa geomorfológico a escala 1:35000 que brindó información sumamente útil ya que presentaba un registro de los diferentes tipos de movimientos de remoción en masa presentes en el municipio. Se contó también con mapas a escala 1:50000 entre los que están un mapa del plan vial rural, un mapa de la división veredal y un mapa de uso de suelo.

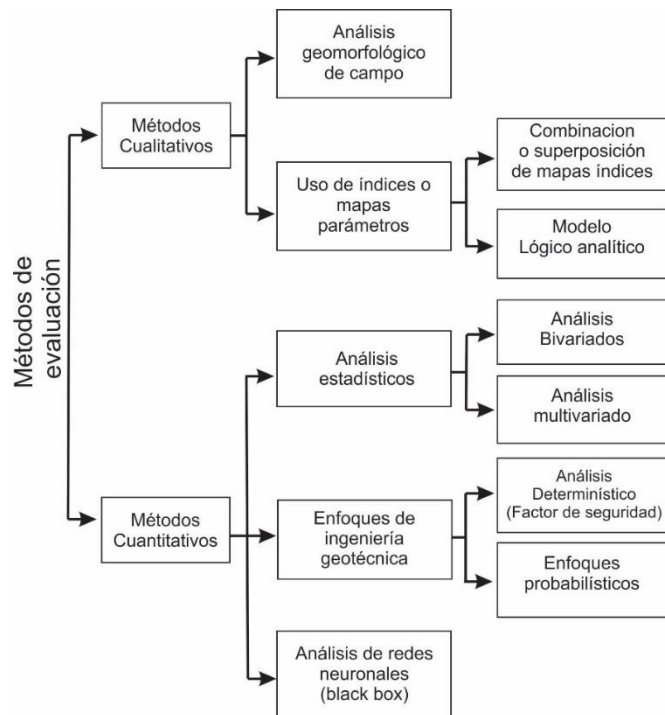
**6.1.3. Artículos, informes técnicos y registros de movimientos de remoción en masa.** Se consultaron artículos académicos sobre métodos de zonificación de susceptibilidad en donde se exponían fundamentos de los métodos en cuanto a su aplicación, funcionalidad y los requisitos para aplicarlos. También se contó con

informes técnicos elaborados por el SGC entre los que se encuentran los estudios de susceptibilidad y amenaza, los análisis de estabilidad para sectores puntuales del municipio y las memorias de las planchas geológicas a escala 1:100000. El Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del SGC se usó para obtener registros de movimientos de remoción en masa dentro del municipio.

## 6.2. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE ZONIFICACIÓN

Para elegir el método de zonificación que mejor se adaptara a las condiciones del área se consideraron aspectos como la información con la que se contaba, la escala de trabajo y el propósito de la zonificación. Todos los métodos tienen sus restricciones ya que muchos están planeados para ser aplicados a ciertas escalas y requieren de insumos diferentes, (figura 3)

Figura 3. Métodos de zonificación de la susceptibilidad. Tomado y modificado de Aleotti & Chowdhury (1999).



En general los métodos usados para este fin tienen un análisis cualitativo o cuantitativo, figura 3, un enfoque cualitativo se basa principalmente en la opinión dada por el evaluador quien asigna el grado de importancia a los factores causantes de inestabilidad apoyado sobre el conocimiento que él tenga del tema y del área de

estudio; la asignación de valores a los numerosos factores que influyen en la estabilidad del terreno sobre una base subjetiva representa la mayor desventaja de estos métodos (Chauhan, et al., 2010<sup>21</sup>; SGC, 2013<sup>22</sup>; Ayalew & Yamagishi, 2005<sup>23</sup>).

Por otra parte el enfoque cuantitativo se basa en expresiones numéricas que relacionan la distribución de MRM con los factores causantes de inestabilidad (Ayalew & Yamagishi, 2005)<sup>24</sup>. Los métodos cuantitativos se caracterizan por tener un carácter objetivo a la hora de asignar la importancia a las variables causantes de inestabilidad y no requiere de las suposiciones teóricas que se hacen frecuentemente en un análisis cualitativo. Una de las principales ventajas que ofrece este grupo de métodos es que el investigador puede validar la importancia de cada uno de los parámetros y tomar decisiones sobre los mapas finales de una manera interactiva (Aleotti & Chowdhury, 1999)<sup>25</sup>.

Considerando que se busca realizar una zonificación de carácter local a escala 1:50000 con fines informativos, de asesoramiento y de planeación se descartaron los métodos con enfoques cualitativos porque estos funcionan mejor en zonificaciones regionales a escalas menores a 1:100000, además se pensó en evitar el sesgo generado por las suposiciones teóricas y subjetivas que deben hacerse con estos métodos; otro aspecto que se consideró fue el hecho de que las zonificaciones regionales realizadas por el SGC se hicieron usando un proceso de análisis jerárquico, método con un enfoque cualitativo.

Dentro de los métodos cualitativos, los relacionados con la determinación de un factor de seguridad son adecuados para evaluar la inestabilidad en sitios puntuales, es decir, es aplicable a escalas muy detalladas por lo general de 1:5000 por lo que también se descartó para esta zonificación (Ayalew & Yamagishi, 2005)<sup>26</sup>. Los métodos estadísticos han brindado muy buenos resultados a escalas como la de este trabajo en muchos lugares del mundo, se fundamenta en la comparación de

---

<sup>21</sup> CHAUHAN, et al. Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. Landslides, 2010.

<sup>22</sup> SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Op Cit.

<sup>23</sup> AYALEW, L. & YAMAGISHI, H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology, 2005.

<sup>24</sup> *Ibíd.*

<sup>25</sup> ALEOTTI, P. & CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999.

<sup>26</sup> AYALEW, L. & YAMAGISHI, H. Op Cit.

los parámetros tenidos en cuenta con la distribución de movimientos de remoción en masa para asignar el grado de relevancia a cada parámetro.

Un enfoque estadístico bivariado relaciona cada uno de las variables consideradas con la densidad de movimientos de remoción para de esta manera asignar un grado de relevancia a cada factor causante de inestabilidad, el enfoque multivariado difiere del bivariado porque se relacionan todas las variables con la distribución de MRM, es decir, también se tiene en cuenta la relación entre las variables causantes de inestabilidad (Chauhan, et al., 2010)<sup>27</sup>.

Ya que se posee un registro histórico amplio de movimientos de remoción en masa en el municipio de Piedecuesta obtenido de diversas fuentes, el método estadístico multivariado es el más adecuado considerando las ventajas que brinda y la escala a la que permite trabajar. En general el método exige un inventario de deslizamientos (variable dependiente) y mapas temáticos sobre los parámetros involucrados (variables independientes), estos insumos son comparados y los datos obtenidos se someten a un análisis de regresión logística (RL) que determinará el grado de relevancia de cada variable independiente.

Con ArcGIS se sintetizó parte de la información consultada en los mapas temáticos que representan las variables a tener en cuenta, también se usó para extraer los valores de cada mapa en formato raster para así conformar el conjunto de datos requerido para aplicar la regresión logística. Se usó el software libre “R Statistics” con el que se realizó el análisis de regresión, los resultados obtenidos permitieron calcular un mapa de probabilidad del que luego se derivó el mapa de susceptibilidad.

### **6.3. TRATAMIENTO DE DATOS**

Esta etapa, la más extensa durante el proceso comprendió las actividades realizadas en ArcGIS, en donde se elaboraron los mapas de cada una de las variables involucradas, la dependiente y las independientes. El inventario de MRM, la variable dependiente, se construyó con la información obtenida de los distintos mapas y los sensores remotos, en total se registraron 283 ocurrencias de movimientos de remoción en masa. Las variables independientes tenidas en cuenta en este análisis fueron la geología, el gradiente de pendiente, la red de drenajes, la

---

<sup>27</sup> CHAUHAN, et al. Op cit.

red de vías y la geología estructural, para cada una de ellas se elaboraron mapas temáticos con la información disponible.

#### 6.4. REGRESIÓN LOGÍSTICA

Con los mapas temáticos creados, se relaciona la variable dependiente con las variables independientes para generar una matriz de datos que se carga en el software libre “R statistics” para hacer el análisis de regresión. R es una suite integrada de softwares que facilita la manipulación, el cálculo y la representación de datos en gráficas, es efectivo en el tratamiento y el almacenamiento de los datos, tiene un conjunto de operaciones para trabajar sobre matrices de datos (Venables & Smith, 2017)<sup>28</sup>

La regresión logística en términos generales es un análisis estadístico que relaciona una variable dependiente dicotómica (solo puede tomar dos valores) con un conjunto de variables independientes. En este caso con la regresión logística se busca encontrar el modelo más adecuado que describa la relación entre la presencia o ausencia de MRM (variable dependiente dicotómica) y un grupo de parámetros independientes como el gradiente de la pendiente, la geología, red de vías, entre otras, (Eeckhaut, et al., 2006)<sup>29</sup>. La variable dependiente, en este caso tendrá un valor de 0 para la ausencia y 1 para la presencia de MRM; las variables independientes pueden tomar valores continuos o categóricos.

La regresión logística en general involucra la variable dependiente usando una ecuación de la forma:

$$\begin{aligned} Y = \text{Logit}(p) &= \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \\ &= C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \end{aligned} \quad (1)$$

En donde  $p$  es la probabilidad de que la variable dependiente ( $Y$ ) sea 1,  $p / (1-p)$  es llamado “odds”,  $C_0$  es el intercepto y  $C_1, C_2, \dots, C_n$  son coeficientes los cuales miden

---

<sup>28</sup> VENABLES, W. N. & SMITH, D. M. An Introduction to R, 2017.

<sup>29</sup> EECKHAUT, M. V., et al. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). Geomorphology, 2006.

la contribución de los parámetros independientes ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) a las variaciones en  $Y$ , (Ayalew & Yamagishi, 2005)<sup>30</sup>.

Los coeficientes aportados por la RL indican el grado de importancia de las variables independientes sobre la variable dependiente y con estos valores se puede hacer una transformación logit de la probabilidad de que la variable dependiente sea 1. Con los datos aportados por la RL no se obtiene el mapa de susceptibilidad directamente, se obtiene un mapa de probabilidades con valores entre 0 y 1 del cual se puede derivar el mapa de susceptibilidad.

## **6.5. CÁLCULO DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD**

Usando los coeficientes obtenidos en la RL, por medio de ArcGis se puede calcular un mapa de probabilidad con valores entre 0 y 1, en donde 1 es una probabilidad del 100%. Para poder obtener la zonificación de la susceptibilidad se deben establecer los rangos de probabilidad que representarán cada uno de los niveles de susceptibilidad, para esto se usa la información aportada por una curva ROC.

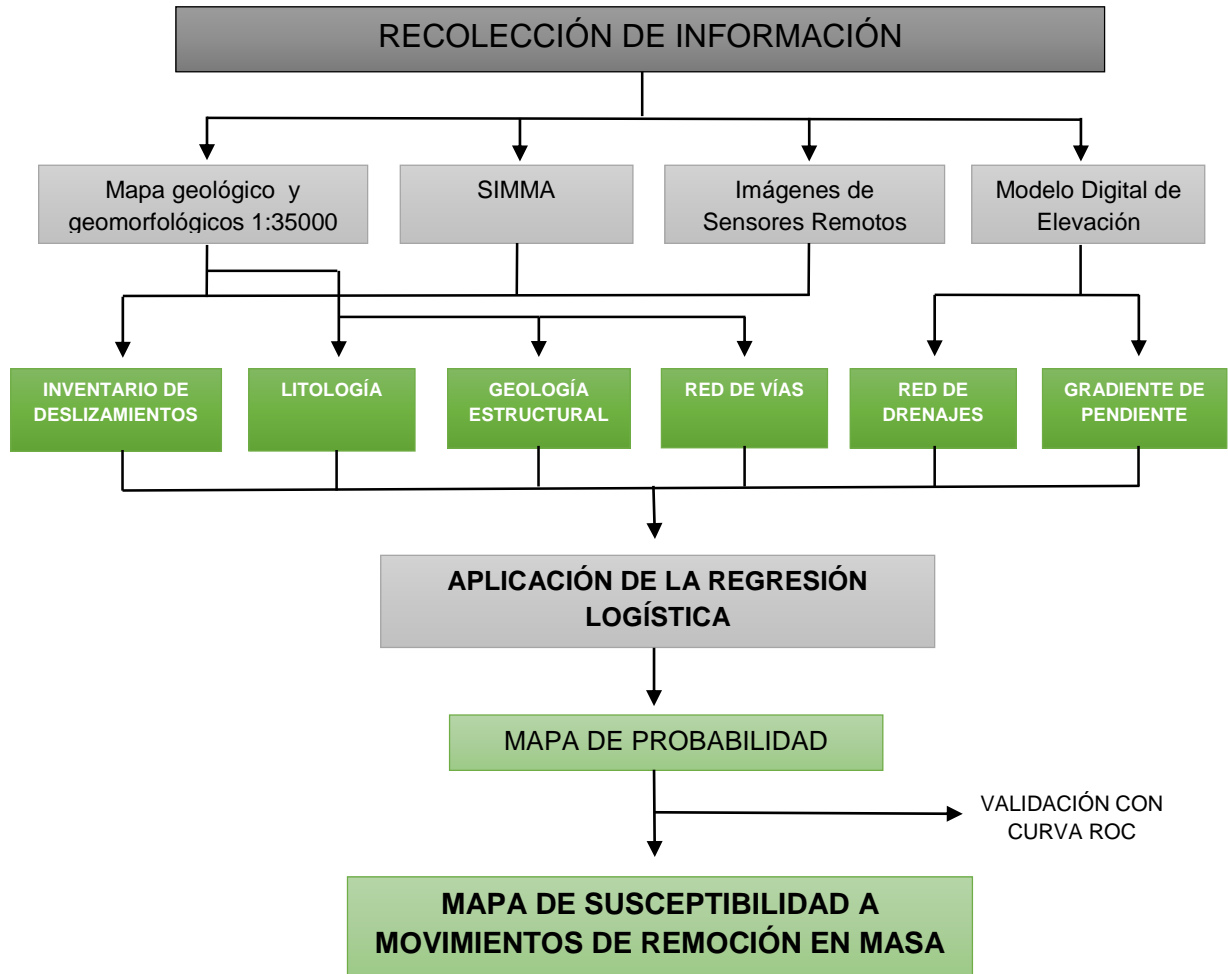
Una curva ROC (Receiver Operating Characteristic) permite evaluar precisión de una prueba diagnóstica que produce resultados continuos en términos de sensibilidad y la especificidad. Esta curva se construye con los resultados obtenidos de probabilidad para los datos de la variable dependiente, en este trabajo además de evaluar la precisión de la información obtenida con la regresión logística también se usó para definir el umbral de probabilidad más adecuado para definir los rangos de susceptibilidad según los condicionantes propios del área y de la metodología usada.

El método estadístico multivariado requiere para su aplicación una variable dependiente binaria y variables independientes continuas o categóricas. En este trabajo la ocurrencia o ausencia de deslizamientos es la variable dependiente y se representa con el inventario de deslizamientos; las variables independientes en este caso son los factores causantes de inestabilidad en el terreno, según las observaciones hechas y la bibliografía revisada se tomaron como variables independientes el gradiente de la pendiente, la litología, la geología estructural, la red drenajes y la red de vías, se usó ArcGis para realizar el tratamiento de los datos y elaborar los mapas de las variables consideradas.

---

<sup>30</sup> AYALEW, L. & YAMAGISHI, H. Op Cit.

Figura 4. Esquema metodológico para la creación del mapa de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa.



## 7. VARIABLES CONSIDERADAS

### 7.1. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA

Para la elaboración del inventario de MRM se usó la clasificación propuesta por Cruden & Varnes (1996)<sup>31</sup>, esta clasificación también es adoptada por el Servicio Geológico Colombiano en sus zonificaciones de susceptibilidad y en el SIMMA (SGC, 2013)<sup>32</sup>, tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de los movimientos de remoción en masa de Cruden & Varnes (1996).

TIPO	SUBTIPOS PRINCIPALES
Caídas	Caída de rocas
	Caída de detritos
Volcamiento	Volcamiento de roca
	Volcamiento flexural de roca
Deslizamiento Traslacional	Deslizamiento traslacional
Deslizamiento Rotacional	Deslizamiento rotacional
	Deslizamiento en cuña
Propagación Lateral	Propagación lateral lenta
	Propagación lateral por licuación
Flujo	Flujo de detritos
	Flujo de lodos
	Flujo de tierra
	Flujo de turba
	Avalancha de detritos
	Avalancha de roca
Reptación	Reptación de suelos
	Soliflucción

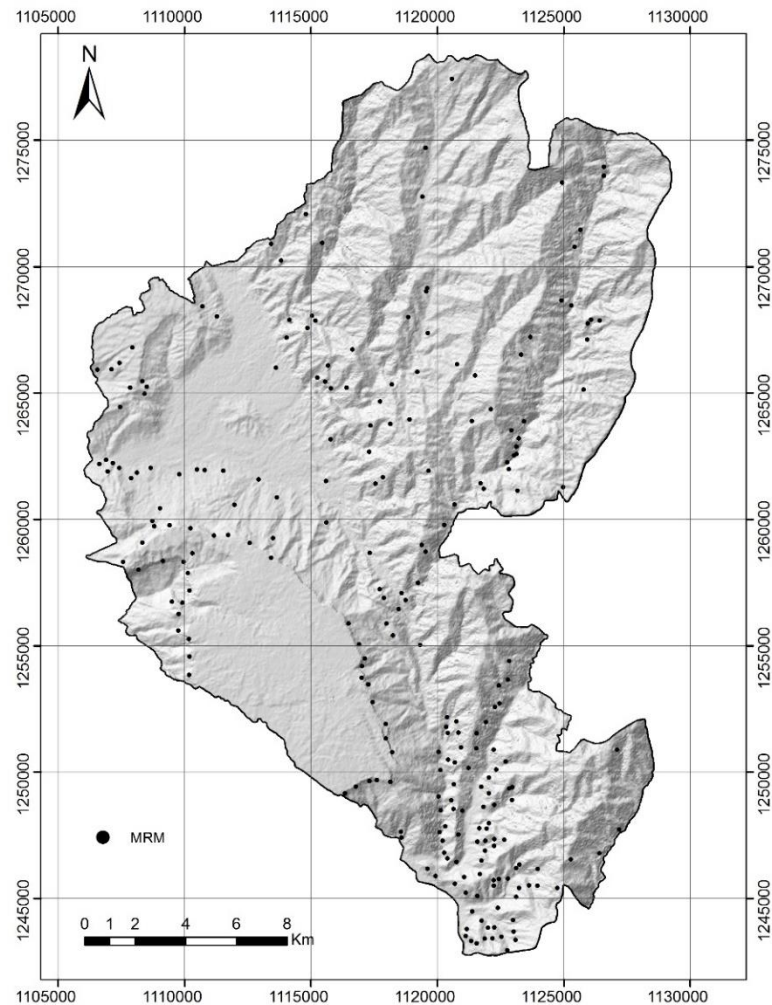
Se registraron un total de 283 movimientos de remoción en masa, este registro se obtuvo principalmente de los mapas facilitados por la Oficina Gestora de Planeación del municipio, de las imágenes brindadas por la misión Sentinel-2, del SIMMA y de algunos recorridos de campo que se realizaron principalmente en las laderas que

<sup>31</sup> CRUDEN, D. M. Y VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: Turner A.K.; Shuster R.L. (ed.). Landslides: Investigation and Mitigation. Transp. Res. Board. Special Report, 1996.

<sup>32</sup> SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Op cit.

bordean el municipio en su sector oriental. Aunque se catalogaron muchos de estos movimientos según la clasificación de Cruden & Varnes (1996)<sup>33</sup>, acá no se detalla la información ya que en muchos casos no fue posible establecer el tipo y el subtipo de MRM con la información recolectada, esto no afecta los resultados y la sensibilidad del método.

Figura 5. Inventario de MRM.



Como se mencionó previamente la variable dependiente debe ser de carácter binario, el inventario de MRM representa los puntos con presencia de este

<sup>33</sup> CRUDEN, D. M. Y VARNES, D. J. Op cit.

fenómeno, a estos puntos se les asignó el valor de 1 (ocurrencia de MRM). Aunque se tuvo un registro de 283 puntos, para realizar el mapa de ocurrencias de deslizamientos se tuvieron en cuenta 240 con el fin de tener una mejor distribución de los mismos, figura 4; para representar cada MRM se seleccionó la celda central, representar con polígonos viola algunas suposiciones estadísticas ya que todas las celdas dentro del polígono adoptarían el valor de 1 y al estar juntas crearían un problema de autocorrelación espacial (Eeckhaut, et al., 2006)<sup>34</sup>. El sector de pescadero al sur del municipio presenta la mayor densidad de MRM.

## 7.2. GRADIENTE DE LA PENDIENTE

Tal vez la variable más importante y la más relacionada con la inestabilidad del terreno es el gradiente de la pendiente (Ayalew & Yamagishi, 2005<sup>35</sup>; Eeckhaut, et al., 2006<sup>36</sup>; Chauhan, et al., 2010<sup>37</sup>; Kavzoglu, et al. 2014<sup>38</sup>). Piedecuesta presenta zonas con grados de pendientes considerables por lo que esta variable fue la primera en ser tenida en cuenta.

Es una variable continua que en este caso varía de 0 a 78 que es el valor de la mayor pendiente presente en el área de estudio. Las zonas con mayor grado de pendientes están ubicadas hacia el sector del Macizo de Santander, al oriente de la falla de Bucaramanga-Santa Marta y en el sector sur del municipio.

El mapa de pendientes se calculó a partir del modelo de elevación digital (DEM) en la plataforma ArcGis; en la figura 6 se observa la distribución de los valores obtenidos, las pendientes entre 20 y 40 grados son las más frecuentes en el área de trabajo seguidas por las pendientes entre 0 y 20 grados. Este mapa se calculó en formato raster con un ancho de celda de 12,5 metros ya que fue derivado del DEM que presenta la misma resolución, figura 7.

---

<sup>34</sup> EECKHAUT, M. V., et al. Op cit.

<sup>35</sup> AYALEW, L. & YAMAGISHI, H. Op Cit.

<sup>36</sup> EECKHAUT, M. V., et al. Op cit.

<sup>37</sup> CHAUHAN et al. Op cit.

<sup>38</sup> KAVZOGLU, et al. I. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. Landslides, 2014.

Figura 6. Distribución de los valores del mapa de pendientes.

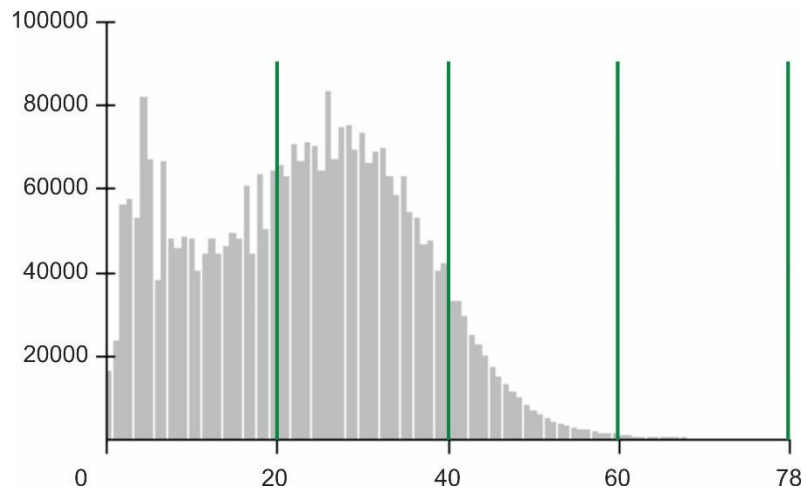
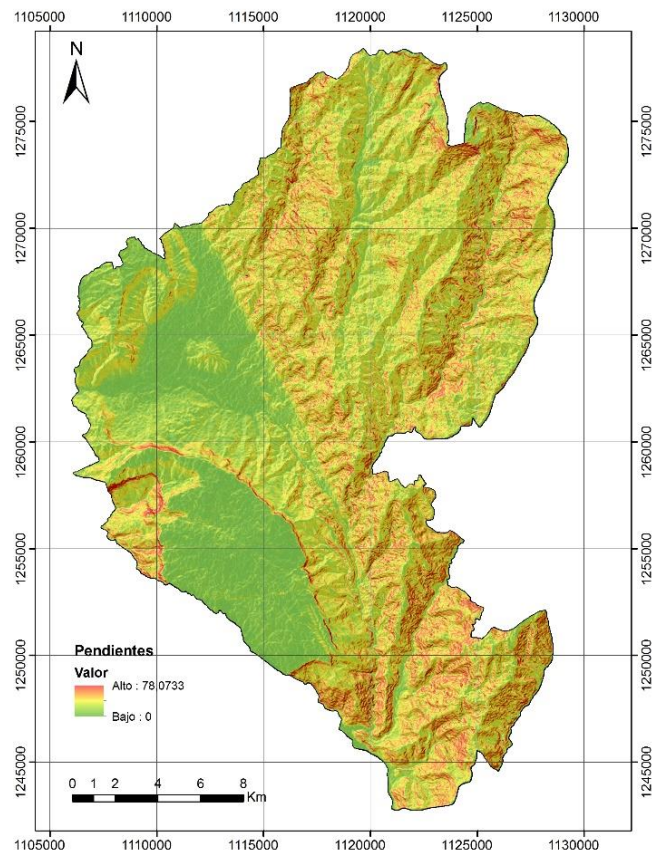


Figura 7. Mapa de pendientes.



### 7.3. LITOLOGÍA

Es bien sabido que la litología es un factor fundamental en las evaluaciones de susceptibilidad ya que las variaciones en la litología generalmente llevan a variaciones en la dureza y permeabilidad de las rocas y de los suelos (Kavzoglu, et al., 2014<sup>39</sup>; Ayalew & Yamagishi, 2005<sup>40</sup>).

El mapa geológico se construyó en ArcGis a partir del mapa geológico a escala 1:35000 aportado por la Oficina Gestora de Planeación, este mapa se refinó y complementó con la base de datos obtenida inicialmente. En el área de estudio hay 14 unidades litológicas a las que se les calculó la densidad de MRM con el fin de generar un mapa en formato raster en el que se asignó un valor numérico de 1 a 14 a las litologías de acuerdo a la densidad de movimientos de remoción en masa, el código 1 corresponde a la unidad con mayor densidad de deslizamientos, el código 14 a la de menor densidad, es importante tener esto en cuenta para interpretar los resultados de la regresión logística, tabla 3.

Tabla 3. Unidades litológicas del mapa geológico de Piedecuesta.

Código de densidad	Unidad litológica		Descripción
1	JTRgp	Granito de pescadero	Granito biotítico rosado de grano medio, alaskita.
2	Qtma	Terrazas medias aluviales	Depósitos de gravas arenosas sin matriz, con desarrollo incipiente de estratificación. Corresponde a las planicies de inundación de las principales corrientes hídricas.
3	Qcd	Cono de deyección o talud de derrubios	En algunos sectores cantos y bloques angulares, superficie de suelo pedregoso y poco o incipiente desarrollo de suelo orgánico.
4	Jg	Formación Girón	Areniscas conglomeráticas y conglomerados, con tonalidades grises y pardas, de aspectos masivos y lenticulares.
5	PEb	Neis de Bucaramanga	Esquistos, neis y migmatitas, metamorfismo de alto grado.

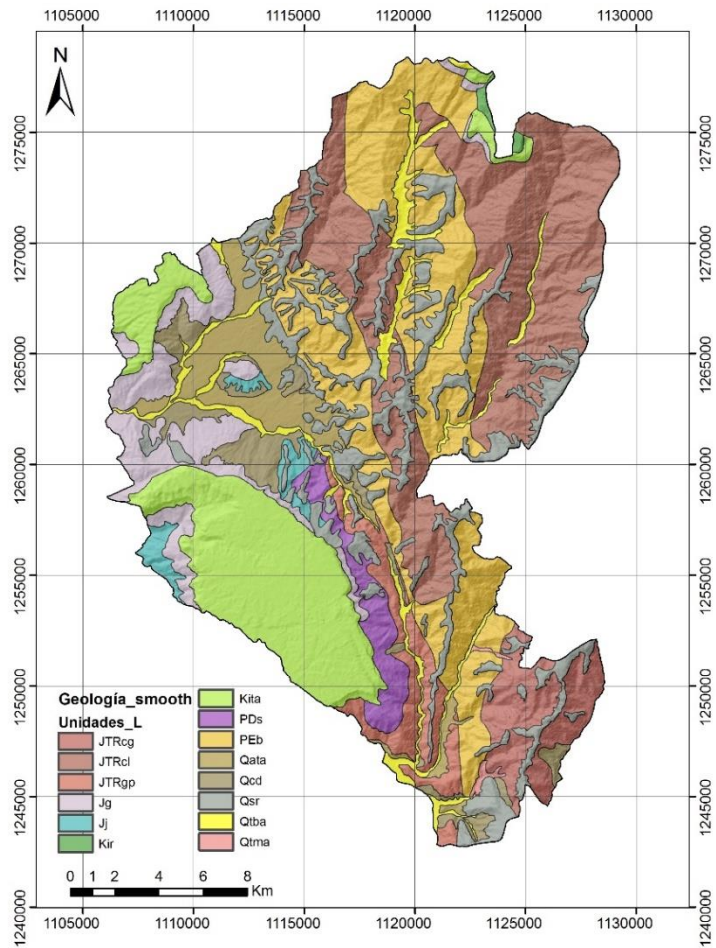
<sup>39</sup> KAVZOGLU, et al. Op cit.

<sup>40</sup> AYALEW, L. & YAMAGISHI, H. Op Cit.

6	Kita	Formación Tambor	Arenisca cuarzosa, clara, con capas. Limolitas y arenisca parda rojiza.
7	Qsr	Suelos residuales	Suelos de espesor mayor a 3 metros de textura arenolimososa con fragmentos de cuarzo.
8	JTRcl	Cuarzo monzonita La Corcova	Cuarzo monzonita biotítica gris de grano fino.
9	Qtba	Terrazas bajas aluviales	Depósitos de gravas arenosas sin matriz, con desarrollo incipiente de estratificación. Corresponde a las planicies de inundación de las principales corrientes hídricas.
10	JTRcg	Cuarzo monzonita y granito	Cuarzo monzonita y granito, biotíticos, claro o rosado pálido.
11	Qata	Abanicos terrazas altas	Depósitos de gravas arenosas sin matriz, con desarrollo incipiente de estratificación. Corresponde a las planicies de inundación de las principales corrientes hídricas
12	PDs	Formación Silgará	Filitas, esquistos y cuarcitas; menor cantidad de metavolcánicos, de bajo a medio grado de metamorfismo.
13	Kir	Formación Rosa Blanca	Caliza gris oscura, masiva, fosilífera; lutita gris oscura.
14	Jj	Formación Jordán	Limolita, arenisca de grano fino, parda rojiza, un poco calcárea en las partes más duras.

Inicialmente este mapa se hizo en formato vectorial, pero para poder usarlo como insumo para la regresión logística fue necesario convertirlo a formato raster con un ancho de celda de 12,5 metros, la misma resolución del DEM, (figura 8)

Figura 8. Mapa geológico del municipio de Piedecuesta.

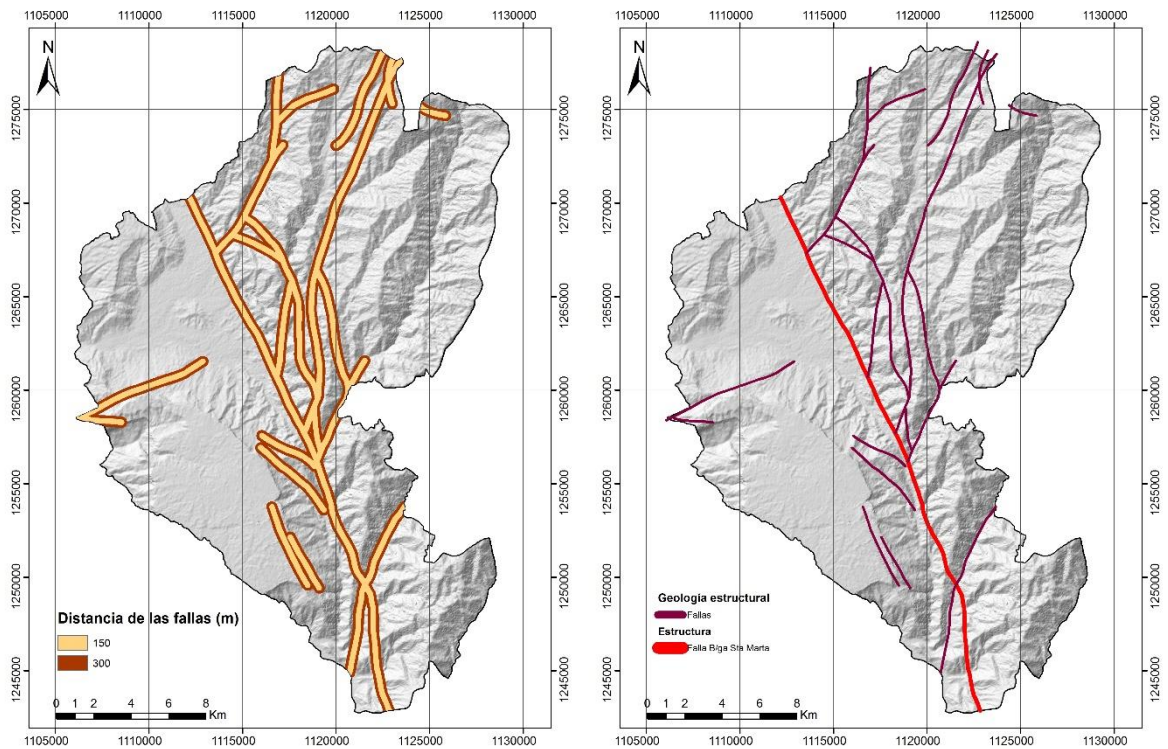


#### 7.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Se consideró la variable de geología estructural ya que la presencia de fallas es importante dentro del área de estudio, Piedecuesta es atravesada por una estructura regional importante en el sector nororiental de Colombia, la falla de Bucaramanga-Santa Marta, a esta se asocian otras fallas satélites. La distancia a estas estructuras es un causante de inestabilidad del terreno ya que estas cambian la fuerza y la permeabilidad de las unidades litológicas afectadas (Zhu & Huang, 2006)<sup>41</sup>.

<sup>41</sup> ZHU, L. Y HUANG, J. GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale. University SCIENCE A, 2006

Figura 9. Geología estructural. (a) Fallas en el área de estudio. (b) Zona de influencia de las fallas en el área de estudio (buffer).

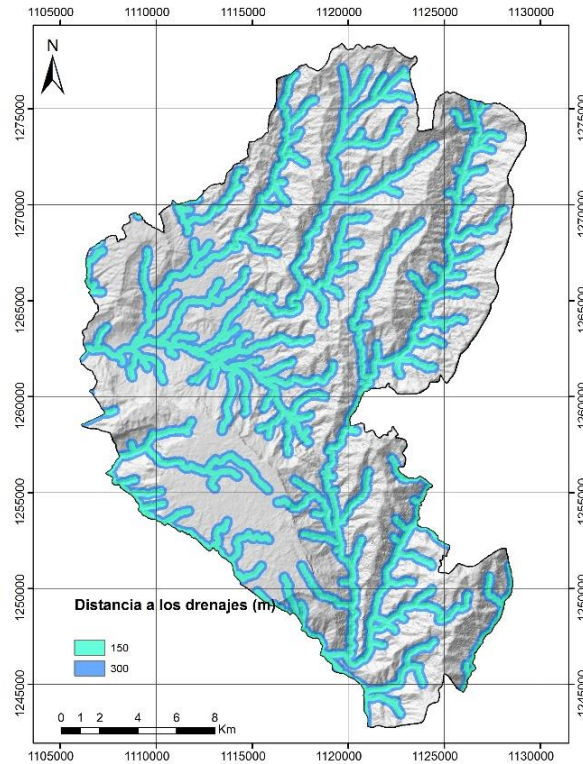


El mapa de la geología estructural se construyó principalmente con base en el mapa geológico 1:35000 usado también para elaborar el mapa de las unidades geológicas, figura 9 (a). Para considerar la influencia generada por estas estructuras dentro del análisis de regresión se crearon alrededor de las fallas buffers o zonas de influencia de 150 y 300 metros para relacionar estas estructuras con los MRM que se ubiquen en estos dominios; esto no quiere decir que las zonas de influencia real de las fallas estén dentro de este rango, el método estadístico multivariado no requiere de ese tipo de suposiciones teóricas, solo se busca calcular la cantidad de MRM dentro de estas zonas.

Las zonas de influencia se elaboraron en ArcGis, el producto fue un mapa vectorial de polígonos que para poder ser considerado dentro del análisis de regresión se convirtió en formato raster con un ancho de celda de 12,5 metros, la misma resolución del DEM, figura 9 (b).

## 7.5. RED DE DRENAJES

Figura 10. Zona de influencia de la red de drenajes.



El agua es considerada como el factor primario relacionado a la generación de MRM. Es muy común ver en el área de trabajo la relación existente entre los movimientos de remoción en masa y el régimen de flujo de los drenajes, estos se asocian a intensos procesos erosivos que son la principal causa del removimiento de masas en áreas adyacentes a los canales de drenaje (Barredo, et al., 2000<sup>42</sup>; Tien, et al., 2011)<sup>43</sup>.

El mapa de drenajes se derivó del modelo digital de elevación, con las herramientas de análisis espacial brindadas por ArcGIS se calculó la dirección de flujo y la acumulación de flujo, esto permitió generar la red de drenajes. Al igual que con la geología estructural, para considerar la incidencia de esta variable en la generación

---

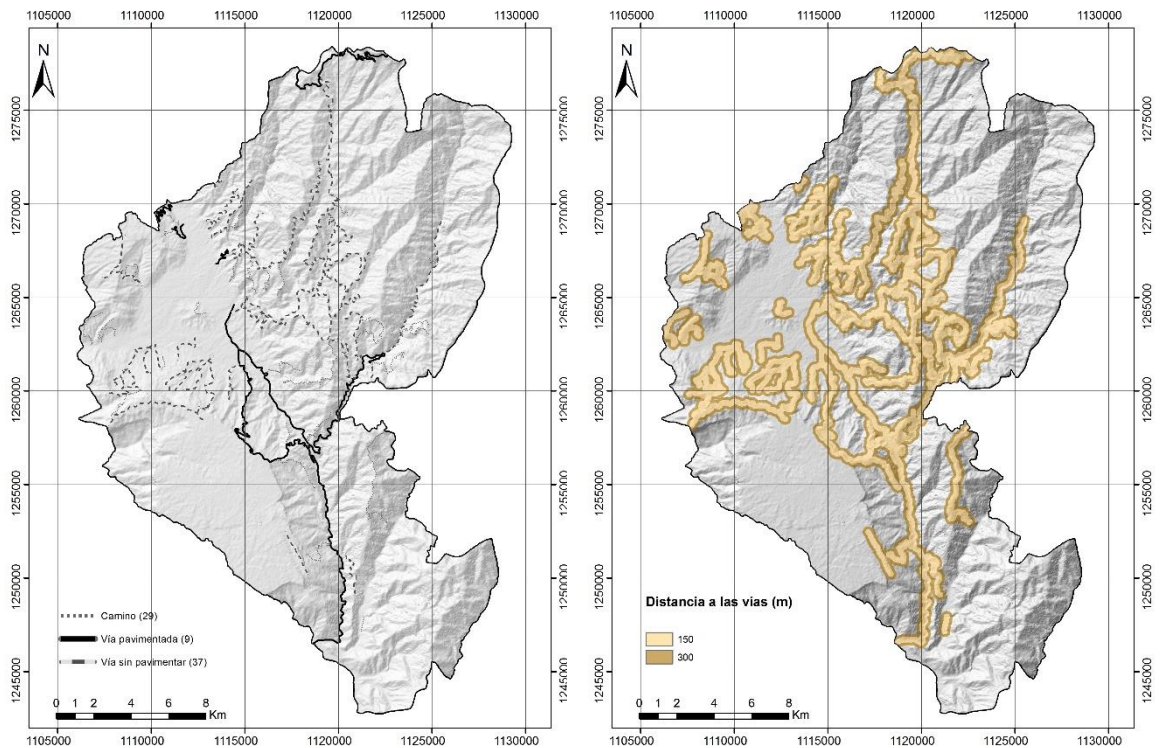
<sup>42</sup> BARREDO, J. I., et al. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2000.

<sup>43</sup> TIEN, D., et al. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 2011.

de MRM se determinaron zonas de influencia de 150 y 300 metros alrededor de los drenajes, el mapa vectorial de polígonos obtenido se convirtió a formato raster con una resolución de 12,5 metros, figura 10.

## 7.6. RED DE VÍAS

Figura 11. Red de vías. (a) Vías del municipio de Piedecuesta. (b) Zonas de influencia alrededor de las vías.



Las carreteras son un factor antropogénico importante que produce inestabilidad en el terreno, un segmento dado de una vía puede actuar como una barrera, una fuente neta, un sumidero neto o un corredor de fluidos de agua que inducen la generación de MRM (Ayalew & Yamagishi, 2005<sup>44</sup>; Tien, et al., 2011<sup>45</sup>). En esta zonificación se tuvo en cuenta esta variable por la relación evidenciada entre las vías y los MRM en algunos recorridos de campo en las laderas que rodean el casco urbano del municipio.

<sup>44</sup> AYALEW, L. & YAMAGISHI, H. Op Cit.

<sup>45</sup> TIEN, D., et al. Op cit.

En el análisis se consideraron aproximadamente 315 kilómetros de carreteras que incluyen las vías primarias y secundarias de la Red Nacional de Carreteras y la red de vías veredales con las que cuenta el municipio, se excluyeron las vías que están sobre sectores planos. Al igual que con los drenajes y la geología estructural para considerar la variable de la red de vías se crearon en ArcGIS zonas de influencia de 150 y 300 metros, el mapa vectorial de polígonos obtenido se convirtió a formato raster con resolución de 12,5 metros para poder ser usado en la regresión logística, (figura 11).

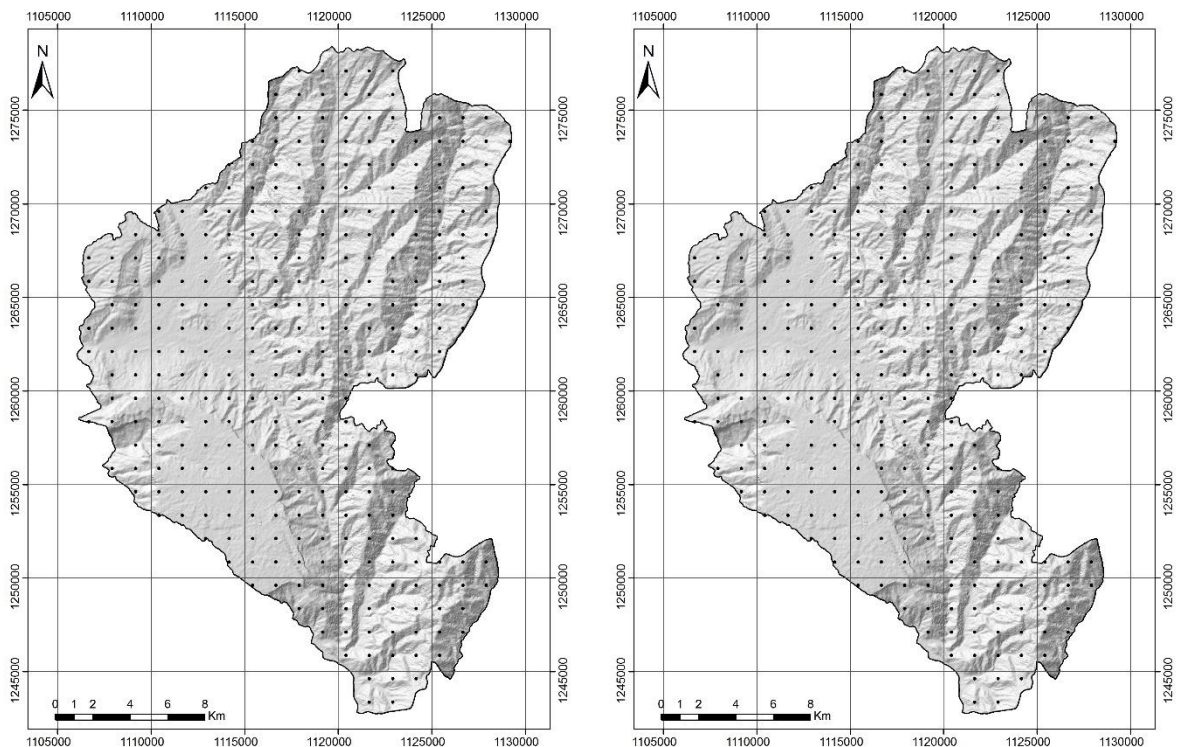
## 8. APLICACIÓN DE LA REGRESIÓN LOGÍSTICA

Con los mapas de las variables independientes en formato raster y los puntos del inventario de movimientos de remoción en masa se puede generar la matriz de datos que alimentará el modelo de regresión

### 8.1. MATRIZ DE DATOS

El inventario de movimientos de remoción en masa representa los 240 puntos con valores de 1 (presencia de MRM) de la variable dependiente binaria, figura 12 (a); para generar los puntos con valores de 0 (ausencia de MRM) se creó una grilla en ArcGIS de 313 puntos con distancias entre ellos de 1,25 kilómetros, figura 12 (b). En la regresión logística se busca usar iguales proporciones de 0 y 1 para evitar efectos que esto puede causar sobre los resultados, en este caso la proporción de ceros y unos es similar.

Figura 12. Variable dependiente. (a) Puntos de ausencia de MRM (0). (b) Puntos de presencia



Teniendo una muestra de 553 puntos en total representando la variable dependiente (presencia/ausencia de movimientos de remoción en masa) por medio de ArcGIS se extrajeron para cada punto los valores de cada mapa de las variables independientes (gradiente de pendiente, geología, geología estructural, drenajes y vías, así se construyó la matriz de datos con dimensiones de 6 columnas y 553 filas.

## 8.2. REGRESIÓN LOGÍSTICA EN “R”

Un punto de partida una vez se tenga la matriz de datos es emplear el test de “Chi-square” para analizar la importancia de los factores asociados a la ocurrencia de deslizamientos, es decir las variables independientes. En “R”, el software estadístico usado para tratar la información y calcular la función de regresión, se cargó la matriz de datos y se hizo el test de “Chi-square”, los resultados se registran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados test “chi-square”.

	Df	Desviación	Residual Df	Desviación Residual	Pr(>Chi)	
Null			552	756.96		
G. Pendiente	1	51.791	551	705.17	6.173e -13	***
Litología	1	48.530	550	656.63	3.252e -12	***
Vías	1	0.186	549	656.45	0.66635	
Estructural	1	3.164	548	653.29	0.07530	^
Drenaje	1	4.005	547	649.28	0.04536	*
-----						
Códigos de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '^' 0.1 '.' 1						

Según los resultados obtenidos las variables con más significancia estadística son las que tienen un resultado de Pr (<Chi) cercano a cero, así se determinó el código de significancia. Las variables que tienen una relevancia estadística a tener en cuenta es el gradiente de pendiente, la litología y con una significancia menor la red de drenajes. La red de vías y la geología estructural tienen una significancia estadística baja, esto no quiere decir que no sean factores que influyen en la

generación de MRM, solo que dentro del análisis de regresión no se encontró una asociación directa entre estas variables y los movimientos de remoción en masa tenidos en cuenta en la matriz de datos.

Una vez probada la relación que hay entre la variable dependiente y algunos de los parámetros tenidos en cuenta se realizó el análisis de regresión para calcular los coeficientes para cada parámetro, los coeficientes obtenidos se registran en la tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes obtenidos de la regresión logística.

	Coeficiente estimado	Error estándar	Valor de z	Pr(> z )	
Intercepto	-0.3220055	0.3469070	-0.928	0.3533	
G. Pendiente	0.0500177	0.0078371	6.382	1.75e -10	***
Litología	-0.2530217	0.0403706	-6.267	3.67e -10	***
Vías	0.0003233	0.0008272	0.391	0.6959	
Estructural	0.0017474	0.0011130	1.570	0.1164	
Drenaje	0.0015541	0.0007778	1.998	0.0457	*
-----					
Códigos de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '^' 0.1 '' 1					

Teniendo en cuenta la relevancia estadística que se muestra en la tabla 5, las variables a considerar para calcular el mapa de probabilidad son el gradiente de pendiente, la litología y la red de drenajes. En la segunda columna se registran los coeficientes para cada una de las variables, estos coeficientes serán usados para calcular el mapa de probabilidad; el coeficiente negativo de la variable de geología indica que la probabilidad de que haya presencia de MRM disminuye cuando el valor de la variable aumenta lo cual es lógico ya que teniendo en cuenta la tabla 3 en donde se registran las unidades litológicas, aquellas con los códigos de menor valor son las que presentan mayor densidad de movimientos de remoción en masa.

## 9. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 9.1. MAPA DE PROBABILIDAD

Considerando la ecuación 2 en donde “ $p$ ” es la probabilidad de ocurrencia de movimientos de remoción en masa, se puede calcular la función del estudio con los coeficientes aportados por el análisis de regresión para las variables independientes y el intercepto. Se reemplazan los valores de la ecuación (2) en donde  $C_0$  es el intercepto y  $C_1, C_2, \dots, C_n$  son los coeficientes de las variables independientes con significancia estadística ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) para obtener la ecuación 3.

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = (-0.3220055) + [0.0500177(G. Pendiente)] + [-0.2530217(Litología)] + [0.0015541(Drenajes)] \quad (3)$$

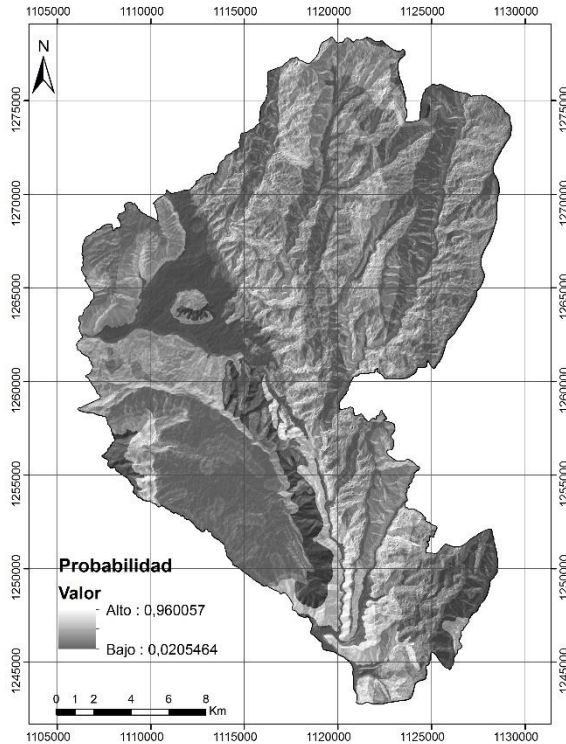
Con la función obtenida se puede calcular un mapa preliminar por medio de ArcGIS multiplicando cada mapa temático de las variables consideradas en la ecuación (3) por su respectivo coeficiente, a la suma de estos resultados se adiciona el valor del intercepto. Para obtener el mapa de probabilidad con valores entre 0 y 1 se debe despejar la variable de probabilidad “ $p$ ” de la ecuación (3); con el mapa preliminar calculado se usa la expresión (4) en ArcGIS para obtener el mapa de probabilidad, figura 13.

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \text{Mapa preliminar}$$

$$p = \frac{\text{Exp}(\text{mapa preliminar})}{1 + \text{Exp}(\text{mapa preliminar})} \quad (4)$$

El mapa calculado está dado en valores entre 0 y 1, estos valores corresponden a la probabilidad para cada pixel de que ocurra un movimiento de remoción en masa, el valor de probabilidad más bajo es de 0,02 (2% de probabilidad), el valor más alto es de 0,96 (96% de probabilidad),

Figura 13. Mapa de la probabilidad de ocurrencia de movimientos de remoción en masa.



## 9.2. CURVA ROC

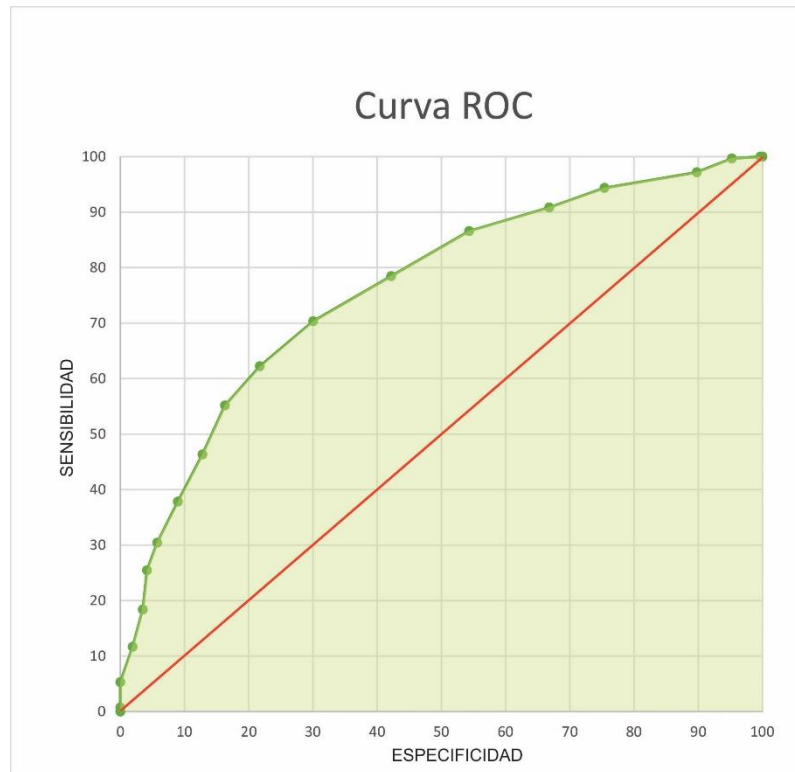
La curva ROC (Receiver Operating Characteristic) se usó para determinar el umbral de probabilidad adecuado para clasificar los niveles de susceptibilidad. Para construir esta curva se tuvieron en cuenta los 313 puntos de la variable dependiente con valor de 0, figura 12 (a); también se tuvieron en cuenta los 283 registros de MRM aunque solo se usaron 240 en la matriz de datos. Con ArcGIS se extrajeron los valores del mapa de probabilidad (figura 13) para cada uno de los 596 puntos.

La exactitud de la prueba en una curva ROC está determinada por los conceptos de sensibilidad y especificidad; en este caso la sensibilidad hace referencia a la capacidad de la prueba de identificar como susceptible a los 283 puntos con valor de 1 (presencia de MRM) que representan el inventario de deslizamientos; por su parte la especificidad se refiere a la capacidad de la prueba de identificar como no

susceptible a los 313 puntos con valor de 0 (ausencia de MRM) que conformaron la grilla.

Con los valores de probabilidad para cada uno de los 596 puntos considerados en la validación se generó la curva ROC de la figura 13 en donde se relacionan los conceptos de sensibilidad y especificidad de la prueba.

Figura 14. Curva ROC del análisis de regresión.



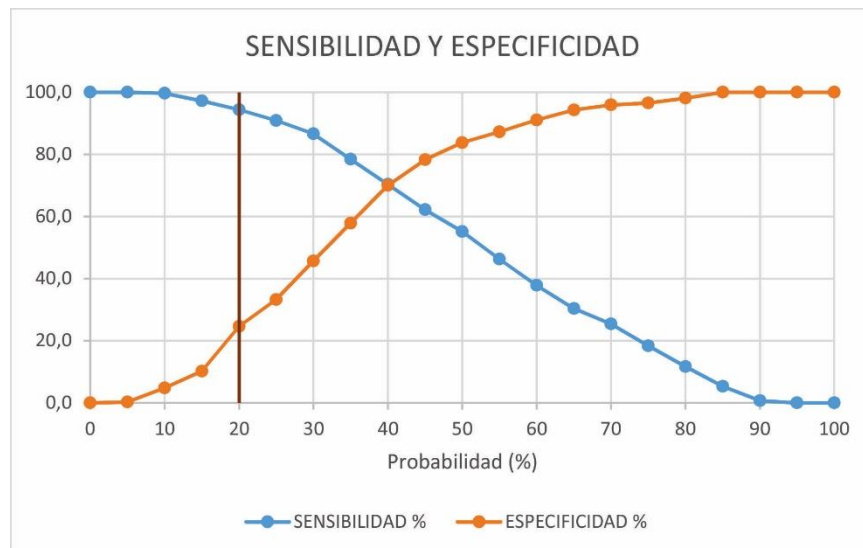
Para realizar el análisis de la curva es necesario tener en cuenta que los 313 puntos de valor 0 (ausencia de MRM) que se consideraron para el análisis de regresión y para su validación están distribuidos uniformemente dentro del área de estudio por lo que la mayoría de ellos están en lugares susceptibles a movimientos de remoción en masa. Para nuestros propósitos no se busca que la especificidad de los resultados sea alta ya que en este caso está dada por la capacidad de la prueba para identificar como no susceptibles a los 313 puntos de la grilla.

Gráficamente una curva ROC tiene alta sensibilidad y especificidad cuando la curva se acerca al límite superior e izquierdo, es decir cuando se aleja de la línea diagonal roja de la figura 14. En este caso no se espera lograr una curva de alta precisión ya

que la exactitud de la curva está condicionada por la especificidad como se mencionó previamente. Sin embargo en la figura 14 se observa una curva con un área bajo la curva de 0,7 unidades aproximadamente, la curva se aleja de la línea roja diagonal lo que indica que tiene una buena capacidad para clasificar correctamente los puntos de presencia y ausencia de deslizamientos. La curva obtenida no es perfecta (área bajo la curva=1) ya que su especificidad no es buena debido a la metodología empleada lo que no tiene implicaciones en la calidad y precisión en el modelo de probabilidad obtenido ya que en este análisis se busca una sensibilidad alta y una especificidad baja.

Para generar el mapa de susceptibilidad a partir del mapa de probabilidad se determinó el valor de probabilidad desde el cual se considera que una zona es susceptible a sufrir movimientos de remoción en masa. Para elegir este valor de probabilidad se elaboró la gráfica de la figura 15 en donde se relacionan los valores de sensibilidad y especificidad para cada valor de probabilidad de presencia de MRM.

Figura 15. Relación de la sensibilidad y la especificidad con los valores de probabilidad



Considerando que se busca obtener una sensibilidad alta y una especificidad baja, se determinó el porcentaje aproximado de los 313 puntos considerados como puntos de ausencia de MRM (valor = 0) que se encuentran en zonas planas en donde no se espera encontrar este tipo de fenómenos, el porcentaje calculado fue del 20%, este valor corresponde a la especificidad que se ajusta a los datos. En la

figura 15 se observa que para un valor de probabilidad del 20% la especificidad se aproxima al 20% y el valor de la sensibilidad sobrepasa el 90%, por esto se seleccionó este valor de probabilidad como el límite entre las categorías susceptibles (media, alta, muy alta) y no susceptibles (baja y muy baja).

Una vez determinado el rango de probabilidad usado para categorizar las zonas susceptibles y las no susceptibles se puede determinar la sensibilidad y la especificidad exacta del modelo clasificando los 596 puntos usados en función de su valor como variable dependiente (0 y 1) y si fueron correctamente clasificados dentro del rango de probabilidad elegido (20%).

Tabla 6. Clasificación de los puntos dentro del rango de probabilidad elegido.

		Probabilidad		
		>20%	<20%	
Puntos (presencia/ausencia MRM)	1	267	16	283
	0	236	77	313

Teniendo en cuenta que los puntos con probabilidad mayor al 20% son susceptibles a MRM, de los 283 registros de movimientos de remoción en masa 267 fueron clasificados correctamente lo que da una sensibilidad del 94,3%; por otro lado de los 313 puntos usados como puntos de ausencia de MRM 77 fueron clasificados correctamente lo que determina una especificidad del 24,6%. Estos valores validan el modelo obtenido ya que debido a la metodología usada se esperaba una sensibilidad alta y una especificidad baja que estuviera acorde con los datos.

### 9.3. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

El análisis con la curva ROC permitió establecer la probabilidad desde la cual un sector se consideraría como susceptible a sufrir movimientos de remoción en masa. Se adoptó la clasificación de 5 categorías usada por el Servicio Geológico Colombiano en sus trabajos de zonificación a escala 1:100000 en este caso las zonas susceptibles (probabilidad mayor al 20%) se dividirán en media, alta y muy alta susceptibilidad y las zonas no susceptibles (probabilidad menor al 20%) se clasificarán como de baja o muy baja susceptibilidad. Para establecer los límites de probabilidad restantes se revisó la distribución de probabilidades, de esta manera se determinaron gráficamente los intervalos de distribución, figura 16.

Figura 16. Distribución de los valores de probabilidad

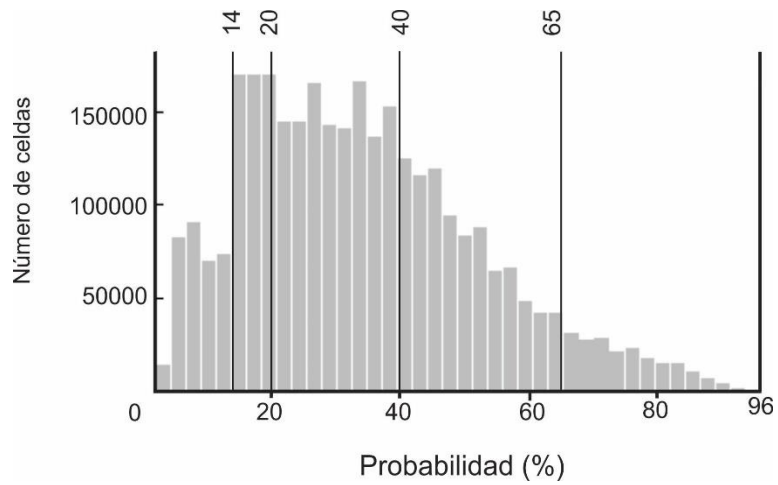
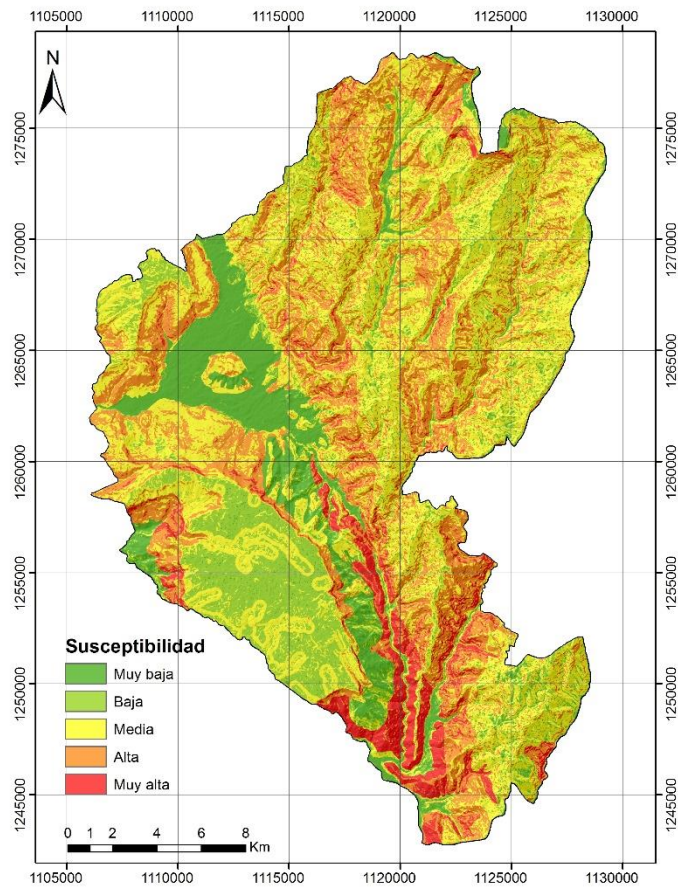


Figura 17. Mapa de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa del municipio de Piedecuesta a escala 1:50000



Con los intervalos de probabilidad definidos para cada clase de susceptibilidad (figura 16), en ArcGIS se reclasificó el mapa de probabilidad determinando 5 clases de susceptibilidad, las clases no susceptibles ( $p < 20\%$ ) representadas por colores verdes y las clases susceptibles ( $p > 20\%$ ) representadas con color amarillo para la susceptibilidad media, naranja para la susceptibilidad alta y rojo para la susceptibilidad muy alta, figura 17.

**9.3.1. Susceptibilidad muy baja.** Se incluyen en esta categoría las zonas con una probabilidad menor al 14%, en el mapa se identifican con el color verde oscuro y ocupa el 10,73% de la extensión total del municipio. Se observa en la figura 16 que esta clase de susceptibilidad está presente en las zonas planas que rodean el sector denominado como la cantera, esto incluye el casco urbano del municipio de Piedecuesta, gran parte de la vereda Guatiguará, Barroblanco, Los Llanitos y Los Colorados. También se presenta susceptibilidad muy baja en las laderas orientales y nororientales de la Mesa de los Santos, es un sector de gradientes de pendientes entre 20 y 30 grados y en donde aflora principalmente la Formación Silgará.

**9.3.2. Susceptibilidad baja.** En esta clase se incluyen los valores de probabilidad que están entre el 14% y el 20%, este último es el límite entre las clases susceptibles y las no susceptibles; se representa en el mapa con el color verde claro y cubre una extensión 13,6% de la superficie total del municipio.

En el mapa se observa que esta clase predomina sobre el sector conocido como la Mesa de los Santos en donde se encuentran las veredas de La Navarra, Mesitas de San Javier, La Esperanza-El Duende, Holanda y Los Cacaos; es un área con bajos gradientes de pendientes y en donde aflora la Formación Tambor, esta puede ser la razón por la que presenta un grado de susceptibilidad un poco más alto que las zonas planas que rodean la cantera y que fueron clasificadas en la clase de muy baja susceptibilidad. Esta clase se también se encuentra distribuida en pequeñas proporciones pero uniformemente en algunos sectores del Macizo de Santander o en la región sur del municipio en las Veredas Rio Negro, La Aguada y el Mangle.

**9.3.3. Susceptibilidad media.** Se clasifican en esta clase las celdas con probabilidad entre el 20 y el 40%, es la clase con mayor extensión ocupando el 41% del área total, se representa en el mapa de susceptibilidad con el color amarillo.

Esta clase se encuentra presente en casi la totalidad del mapa, siendo evidente la predominancia de esta categoría en el Macizo de Santander al oriente de la falla de Bucaramanga-Santa Marta, en las laderas al norte de la Mesa de los Santos, en el sector conocido como la Mesa de Ruitoque y en el alto topográfico denominado como La Cantera al occidente del casco urbano de Piedecuesta. Estos sectores se relacionan por tener un alto gradiente de pendiente, esta fue la variable con mayor relevancia estadística lo que explica la mayor probabilidad a que ocurra un movimiento de remoción en masa en comparación con las categorías mencionadas previamente en donde los gradientes de pendientes eran bajos.

**9.3.4. Susceptibilidad alta.** En esta categoría se incluyen los sectores con probabilidades entre el 40 y el 65%, es la clase que ocupa la segunda mayor extensión dentro del área de trabajo con un 28,1% del total, se representa con el color naranja.

Esta categoría al igual que la susceptibilidad media está presente en varias zonas del mapa, predomina sobre las laderas del Macizo de Santander adyacentes al oriente de la falla de Bucaramanga-Santa Marta, laderas que rodean el casco urbano del municipio en su sector oriental; en las veredas de La Nevera, Cristales, La Loma, Planadas, La Vega, La Cuchilla, Alto de Vacas y el Fical ubicadas sobre el Macizo de Santander también predomina esta clase; estos sectores se relacionan por presentar altos grados de pendiente y porque en ellos aflora el Neis de Bucaramanga.

En las laderas al norte de la Mesa de los Santos y al suroriente de la Mesa de Ruitoque en donde aflora la Formación Girón predomina la susceptibilidad alta asociada a esta unidad litológica ya que es la cuarta con mayor densidad de movimientos de remoción en masa; en las pendientes altas que rodean la Mesa de los Santos también predomina esta clase. Este nivel de susceptibilidad se evidencia en las áreas adjuntas a los drenajes en la región del Macizo de Santander.

**9.3.5. Susceptibilidad muy alta.** En este grupo entran las celdas con probabilidad mayor a 65%, es la clase que ocupa la menor extensión en el municipio con un 6,7% del área total, se representa con el color rojo. Es claro que esta clase predomina sobre las Veredas de Pescadero, Cabrera, El Salado y San Pio, estos sectores

tienen en común que en ellos aflora la unidad ígnea conocida como el Granito de Pescadero, esta es la unidad con mayor densidad de movimientos de remoción en masa que pueden estar asociados al alto grado de meteorización que presenta esta unidad.

Este grado de susceptibilidad también se evidencia en los sectores de alta pendiente que rodean la Mesa de los Santos y el costado suroriental de la Mesa de Ruitoque especialmente en los lugares conocidos como el Salto del Duende y el Salto del Mico, en estas áreas las caídas de rocas es el tipo de movimiento de remoción en masa más frecuente según el registro de MRM elaborado. En las regiones adjuntas al río Umpalá al sur del municipio en las veredas Umpalá Centro, El Fical, Urgua y Alto de Vacas también hay un grado muy alto de susceptibilidad asociado a la cercanía con el curso del río.

Sobre el sector del Macizo de Santander esta categoría aunque no es la que predomina y no cubre una gran extensión si se presenta en regiones cercanas al casco urbano de Piedecuesta, uno de estos sectores es el valle del Río de Oro que se ubica entre las laderas adjuntas al municipio por su costado oriental en donde la susceptibilidad alta se observa en ambos márgenes del valle, figura 16; lo mismo ocurre con otros valles ubicados entre las laderas cercanas al municipio sobre el Macizo.

#### **9.4. RECOMENDACIONES**

A manera general se recomienda socializar el presente documento entre las dependencias y las personas de la alcaldía municipal que desarrollen tareas asociadas a la administración y planeación del territorio para que sea tenido en cuenta en las labores que lo requieran, igualmente se recomienda incluir la presente zonificación y los documentos derivados en la base de datos del municipio en donde se tenga esta clase de información.

Se sugiere identificar las zonas con susceptibilidades altas y muy altas principalmente y que tengan prioridad por razones asociadas a la población asentada en el lugar, la infraestructura comprometida y las implicaciones socioeconómicas de los movimientos de remoción en masa para realizar valoraciones más específicas que permitan evaluar el riesgo y tomar las medidas requeridas para su mitigación.

La troncal 45A de la Red Nacional de Carreteras tiene un tramo de aproximadamente 13 kilómetros que va desde el sector de los cueros pasando por pescadero hasta llegar al límite con el municipio de Aratocha, este tramo de vía primaria está enmarcado en un escenario de muy alta susceptibilidad, el inventario de MRM indica que la caída de rocas es frecuente en este sector por lo que se recomienda realizar una valoración que permita tomar las medidas de mitigación y señalización sobre la vía.

Las laderas occidentales del Macizo de Santander adyacentes al casco urbano del municipio por obvias razones son sectores de especial atención, hay registro de movimientos de remoción en masa que afectaron la población asentada en estas áreas (INGEOMINAS, 1988; SGC, 2014). Teniendo esto en cuenta se requiere hacer la valoración de estabilidad de los terrenos involucrados para tomar las medidas de mitigación y prevención requeridas.

El río de Oro antes de incurrir en el casco urbano de Piedecuesta por el barrio de Cabecera del Llano recorre los valles del Macizo de Santander, estos valles son profundos, tienen márgenes con altos grados de pendiente y registran ocurrencias de MRM; teniendo en cuenta lo anterior y que la susceptibilidad en los márgenes del valle es alta y muy alta es importante realizar una valoración que considere las implicaciones que tendría la generación de movimientos de remoción en masa en este sector del valle y monitorear permanentemente el cauce del río. Múltiples movimientos de remoción en masa o uno de grandes dimensiones en un sector del valle del río de Oro puede causar el represamiento de aguas y de diversos materiales generando así fenómenos naturales altamente destructivos como las avalanchas y las avenidas torrenciales que comprometerían la integridad de varios barrios empezando por el barrio Cabecera del Llano, en Colombia son numerosos los casos como estos que lamentablemente han ocurrido.

## 10. CONCLUSIONES

El método estadístico multivariado permite realizar la zonificación de la susceptibilidad a movimientos de remoción en masa a escala 1:50000 sobre una base objetiva sustentada en el inventario de MRM, esta metodología no requiere de suposiciones teóricas o juicios de un experto. El análisis de regresión logística determinó que las variables estadísticamente relevantes en este trabajo eran el gradiente de la pendiente, la litología y la red de drenajes, con sus respectivos coeficientes fue posible generar un mapa de probabilidades.

Con la curva ROC se determinaron los rangos de probabilidad para las clases susceptibles y no susceptibles que mejor funcionarán en este caso; se obtuvo una sensibilidad alta en la prueba del 94,3%, por otra parte el valor de la especificidad fue del 24,6%, se esperaba un porcentaje bajo por razones asociadas al método.

Las clases no susceptibles (baja y muy baja) están por debajo del 20% de probabilidad y cubren el 24% del municipio, corresponden a las regiones planas alrededor de la cantera y sobre la Mesa de los Santos. La susceptibilidad media es la más frecuente ocupando un 41% del área total predominando en el sector del Macizo de Santander, el sector suroriental de la Mesa de Ruitoque y la región norte de la Mesa de los Santos. La susceptibilidad alta ocupa un 28% del área, predomina en los sectores con alto gradiente de pendiente y en donde aflora el Neis de Bucaramanga. La susceptibilidad muy alta ocupa el 6,6% del área total, predomina en el sector sur del municipio en donde aflora el granito de pescadero y en las regiones con más altas pendientes.

En Piedecuesta hay infraestructura y asentamientos humanos que se encuentran en regiones de alta susceptibilidad a MRM, por esto es importante tener en cuenta los resultados de este trabajo dentro de las labores relacionadas con la administración del territorio y considerar las implicaciones socioeconómicas que puedan tener los movimientos de remoción en masa sobre la población civil y la infraestructura en cualquier sector del municipio.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

Aleotti, P. & Chowdhury, R.. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1999. 58: 21-44.

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

Barredo, J. I., Benavidesz, A., Herhl, J. & Van Westen, C. J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2000. 2(1): 9-23.

Chauhan, S., Sharma, M. y Arora, M. K. Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model. *Landslides*, 2010. 7: 411-423.

Cruden, D. M. y Varnes, D. J. Landslide types and processes. In: Turner A.K.; Shuster R.L. (ed.). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transp. Res. Board. Special Report, 1996. 247: 36-75.

Eeckhaut, M. V., Van Den D. M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Vandekerckhove, L. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 2006. 76: 392-410

EUROPEAN SPACE AGENCY. *Sentinel-2 User Handbook*. 2013. 64 p.

INGEOMINAS. Deslizamiento en la Vereda Las Amarillas, municipio de Piedecuesta, Santander. Bucaramanga: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-mineras, 1988. 20 p.

INGEOMINAS. Concepto geológico sobre la estabilidad de los terrenos donde se ubican los asentamientos Altos de Guatiguará, Nueva Colombia y Guatiguará-La Vega, municipio de Piedecuesta, departamento de Santander. Bucaramanga: Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, 2000. 8 p.

INGEOMINAS. Mapa de provincias de amenaza relativa por movimientos en masa de Colombia. Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear. Subdirección de amenazas geoambientales, 2001.

INGEOMINAS. Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Bogotá: Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, 2009. 631 p.

INGEOMINAS. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:500000. Bogotá: Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, 2010. 127 p.

Kavzoglu, T., Sahin, E. & Colkesen, I. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides*, 2014. 11: 425-439.

Royero G., J. M. & Clavijo, J. Mapa geológico generalizado, departamento de Santander. Bogotá: INGEOMINAS, 2001. 92 p.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Versión No 2. Bogotá: Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental, 2013. 158 p.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Concepto técnico sobre problemas de inestabilidad que afectan el barrio San Cristóbal VII Etapa, municipio de Piedecuesta, departamento de Santander. Bogotá: Dirección técnica de geoamenazas, 2014. 24 p.

Tien, D., Lofman, O., Revhaug, I. & Dick, O. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 2011. 59: 1413-1444.

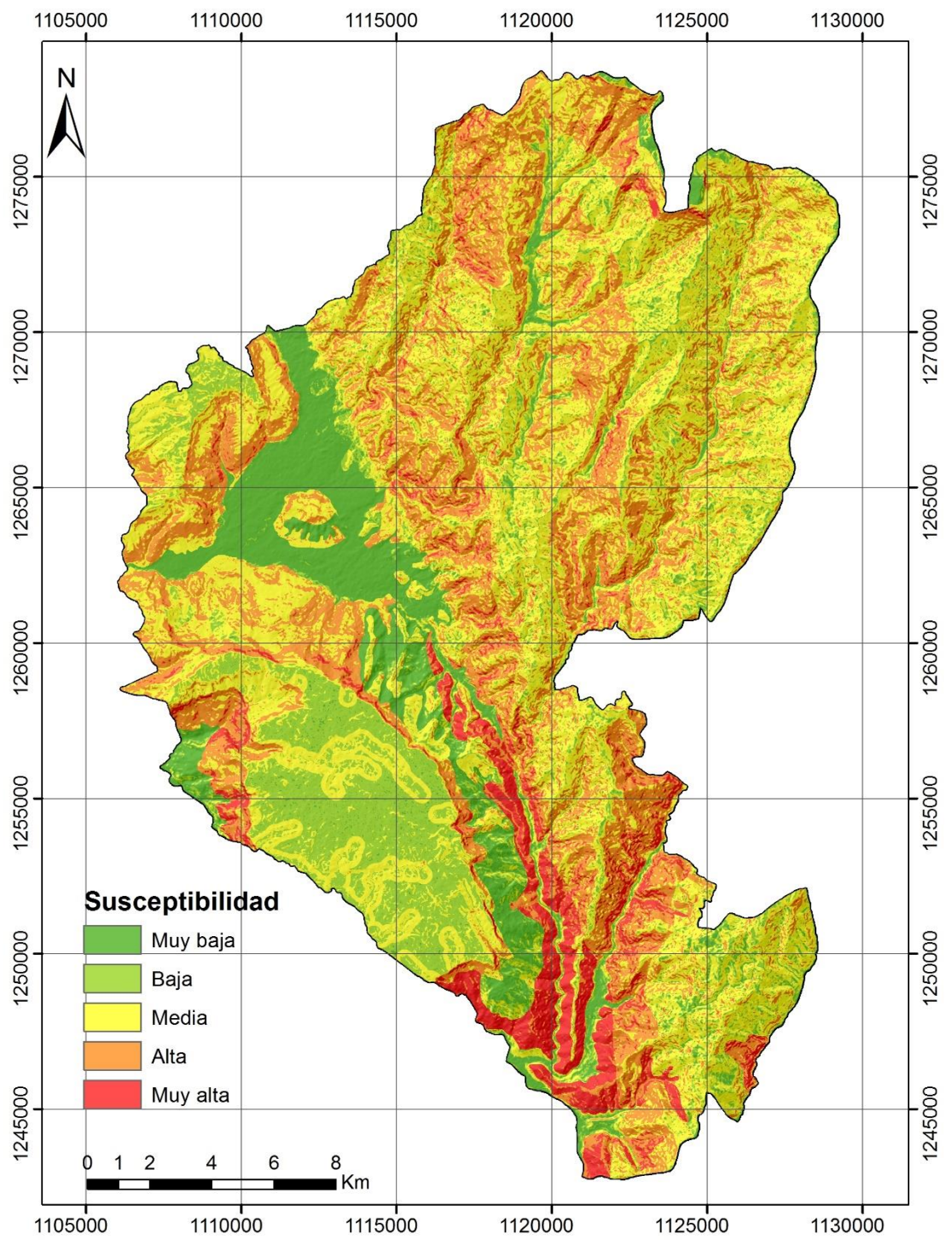
Venables, W. N. & Smith, D. M. *An Introduction to R*, 2017. 105 p.

Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J.; Restrepo, H.; Gomez, E. Geología de lo cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. Memoria Explicativa. INGEOMINAS, 1973. 21 (1-3). 144 p.

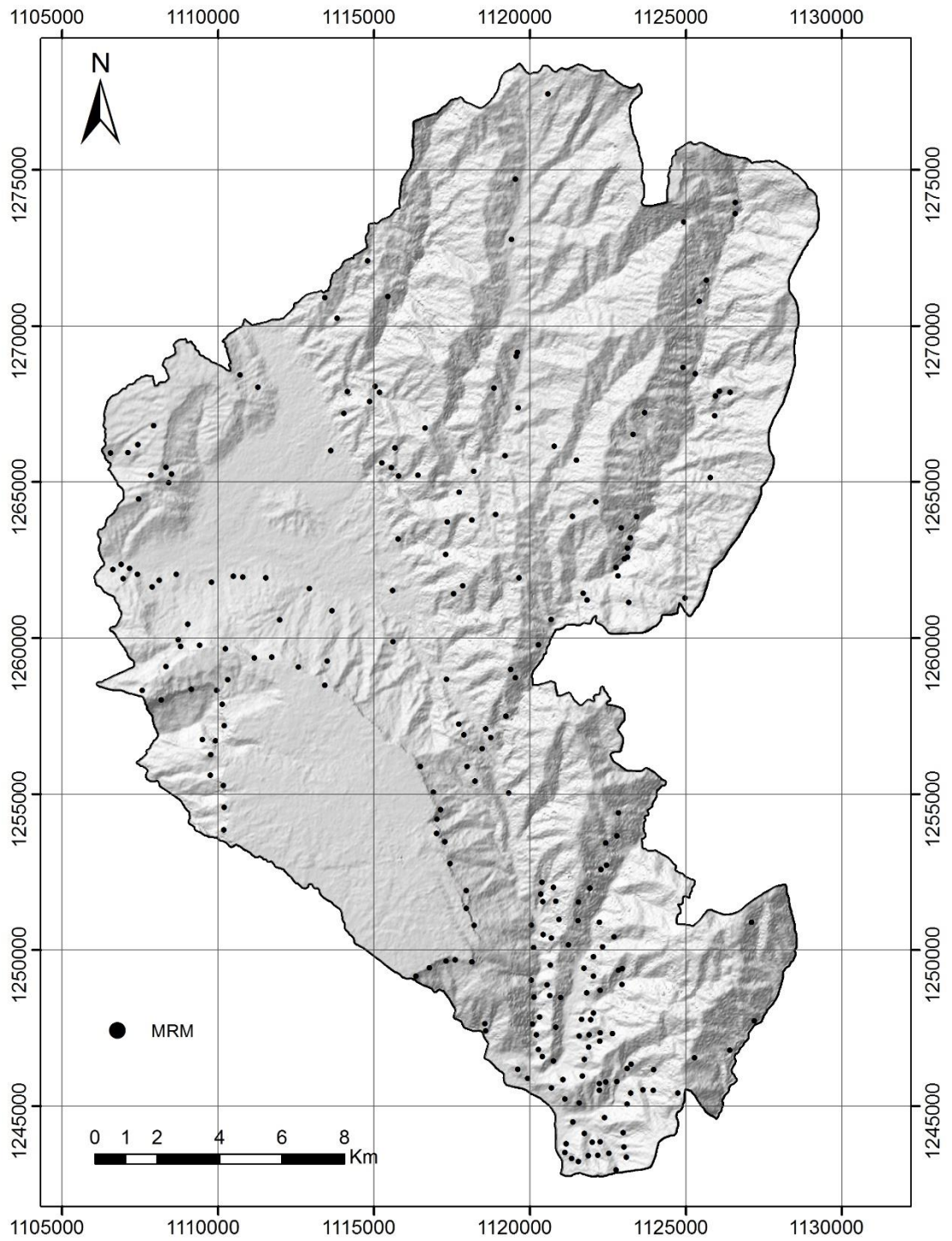
Zhu, L. y Huang, J. GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale. University SCIENCE A, 2006. 12: 2007-2017.

## **ANEXOS**

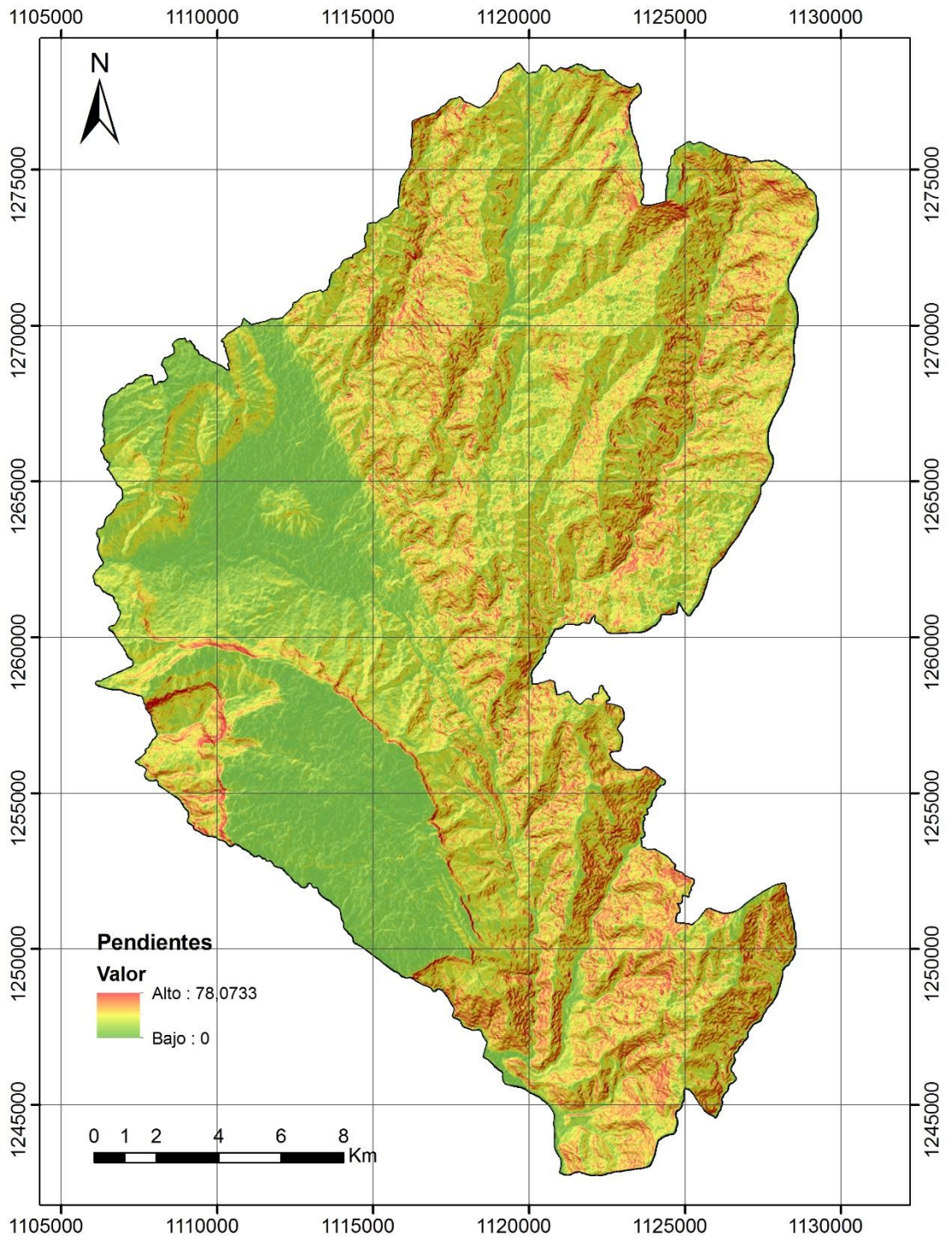
### **ANEXO A. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA DEL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA**



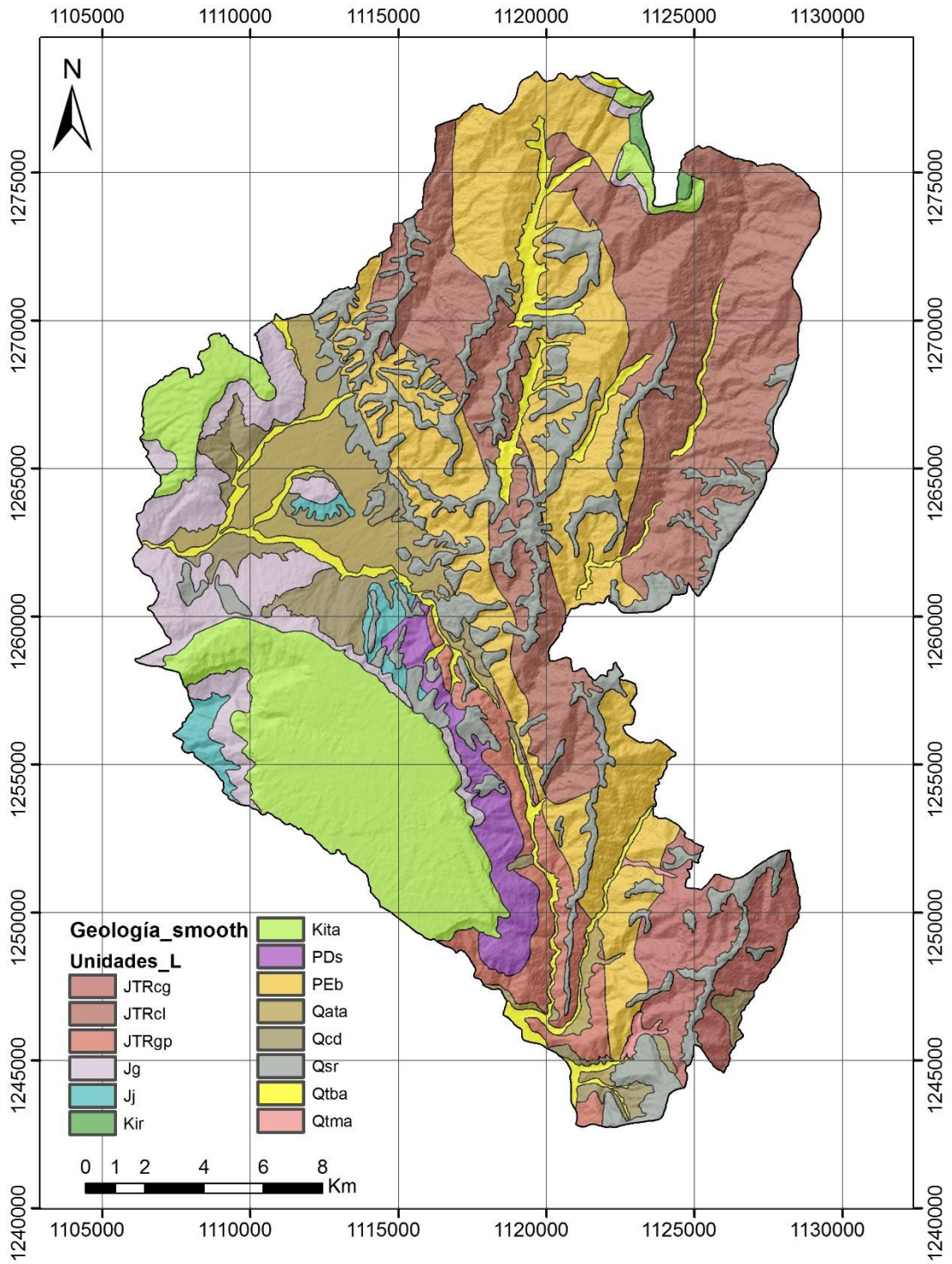
**ANEXO B. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN  
MASA**



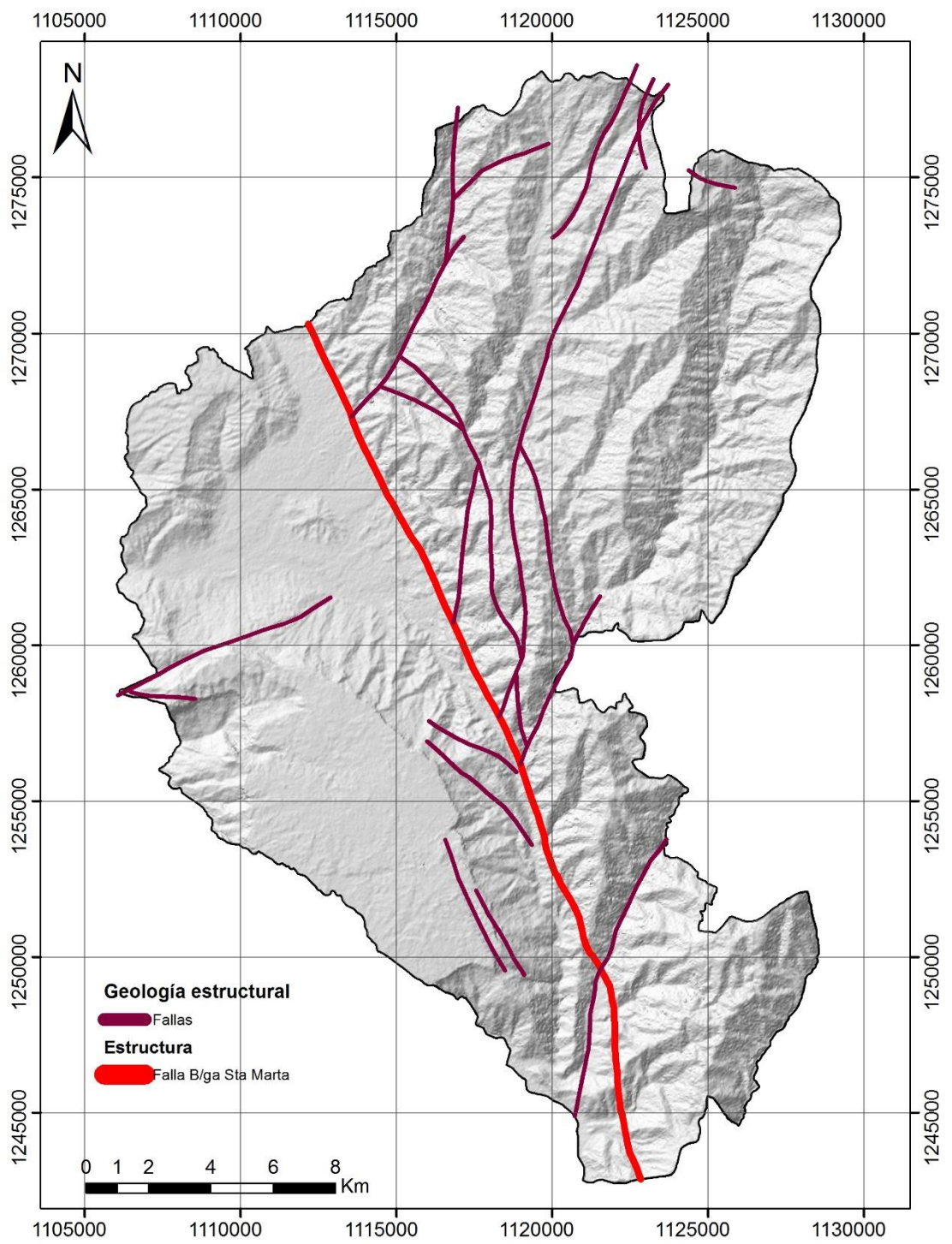
## **ANEXO C. MAPA DE PENDIENTES**



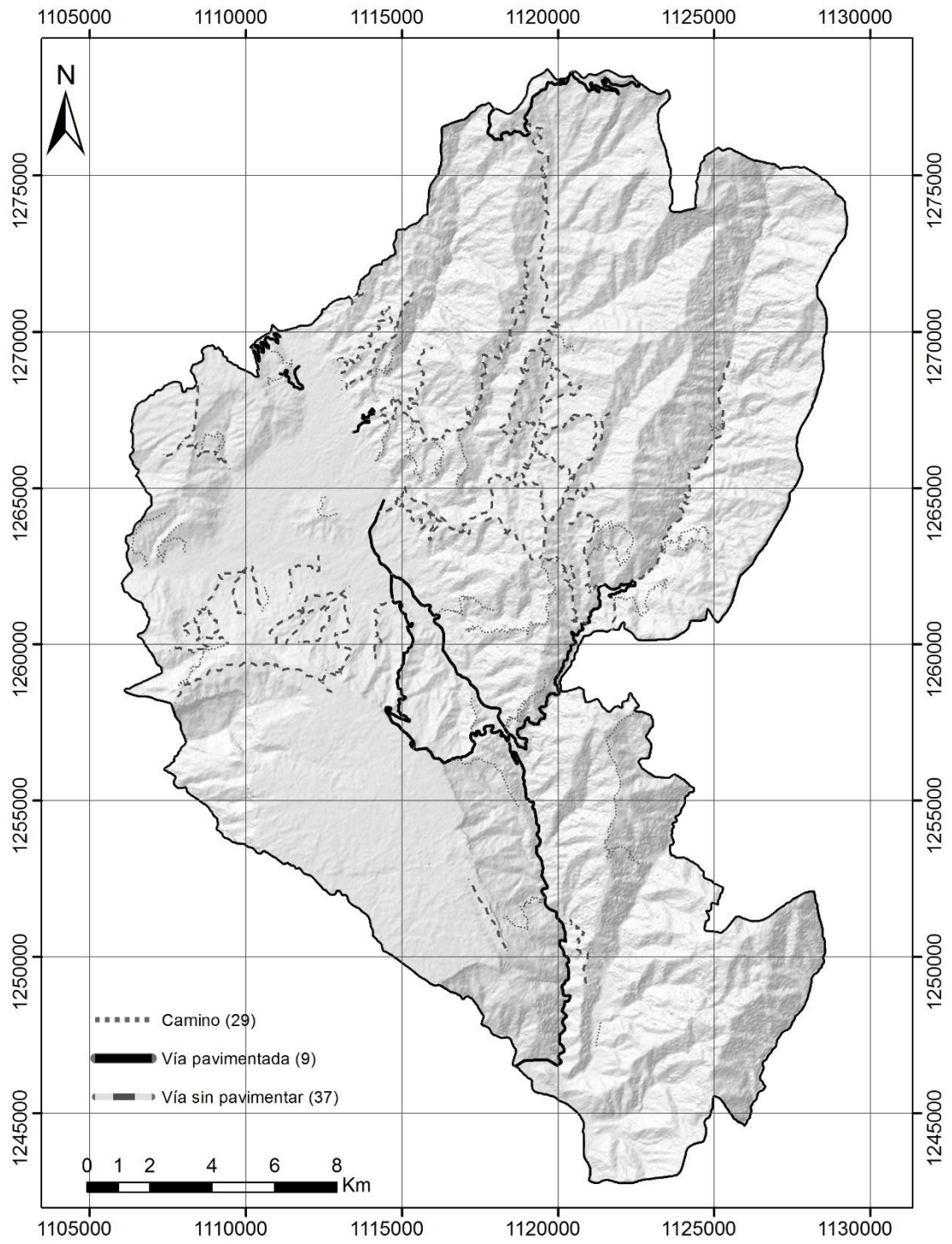
## **ANEXO D. MAPA GEOLÓGICO DE PIEDECUESTA**



## **ANEXO E. MAPA DE GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**



## **ANEXO F. MAPA DE VÍAS DE PIEDECUESTA**



## **ANEXO G. RED DE DRENAJES**

