

Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, escala 1:25.000 para la zona sur del municipio de Landázuri, Santander, aplicando el método bivariado.

Laura Yadid Solano Palacios y Sergio Andrés Díaz Olave

Trabajo de Grado para Optar al Título de geólogo

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo, Doctor en Ciencias Geológicas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedicado especialmente a mis padres Adolfo y Marinita, que han sido mi pilar, mi motivación y mi fuerza es este trayecto.

A mis hermanos Diana, Javier y Andrés cuyo apoyo está presente siempre conmigo.

A Dani mi persona especial cuya persistencia y motivación me alentaron a finalizar esta linda etapa.

Laura

Quisiera iniciar dedicándole el fruto de este tiempo de preparación profesional a mis padres Ezequiel y Nubia, que han sido las personas que siempre me apoyaron a iniciar, continuar y terminar este sueño, que siempre me dieron sus consejos, su amor y esa fuerza que necesite en ocasiones.

A mis hermanos Elvia, Andrew y Mayra que siempre han creído en mí y me han dado siempre su amor y su respaldo.

Sergio

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón a mis padres Adolfo y Marinita, a mis hermanos Diana, Javier y Andres, y a Dani por su apoyo, fe en mí, por sus palabras de motivación, por su
compañía en momentos complicados.

Gracias a mi director de tesis Juan Diego Colegia por su paciencia, tiempo y dedicación.

A la escuela de geología y profesores que me enseñaron con tanto esmero.

A todas las personas que me apoyaron durante este proceso, compañeros y compañeras
con quienes compartí, aprendí y me permitieron crecer junto con ellos.

Laura

Gracias a Dios por darme ayudarme de superar mis temores y culminar esta etapa.

Agradezco a mis padres Ezequiel y Nubia, por dar todo de sí mismos para completar este
camino, por darme su amor y su apoyo incondicional.

Gracias a mis hermanos Elvia, Andrew, Mayra por darme su apoyo, sus consejos y su
amor que me sirvieron durante todo este camino.

Gracias a mi compañera Laura por su apoyo, su paciencia y su perseverancia.

Gracias al profesor Juan Diego Colegial por darnos su tiempo, su conocimiento y su
dedicación como director en esta tesis.

Gracias a la escuela de geología y sus docentes que me formaron en esta bonita profesión,
a aquellos compañeros con los que aprendí y crecimos juntos en este camino, especialmente a
mis amigos Juank, Diego y Nancy que siempre me dieron su apoyo.

Sergio

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivo Específicos	13
2. Alcances y limitaciones	14
3. Planteamiento del problema.....	15
4. Justificación	16
5. Localización	17
6. Marco de referencia	18
6.1 Marco geológico	19
6.2 Marco conceptual.....	23
7. Metodología	23
7.1 Fase I. Revisión bibliográfica y recopilación de información.	25
7.2 Fase II. Caracterización geoambienta y procesamientos de datos	25
7.3 Fase III. Validación en campo	25
7.4 Fase IV. Análisis de susceptibilidad y aplicación de métodos.	25
7.5 Fase V. Generación de mapa de susceptibilidad por movimientos de remoción en masa en el municipio de Landázuri-Santander a escala 1:25.000	27
7.6 Fase VI. Análisis e interpretación final.....	28
8. Presentación de resultados	28

8.1 Caracterización Geoambiental	28
8.1.1 Inventario de procesos morfodinámicos	28
8.1.2 Subunidades geomorfológicas	31
8.1.3 Unidades geológicas superficiales	37
8.1.4 Cobertura y uso del suelo.....	38
8.2 Análisis de susceptibilidad.....	40
8.2.1 Unidad de Análisis.....	40
8.2.2 Alistamiento de la información.....	40
8.2.3 Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento	41
8.2.4 Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída.....	48
8.2.5 Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo reptación	51
8.2.6 Mapas de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25000 para la zona sur del Municipio de Landázuri-Santander.....	52
9. Discusión.....	52
10. Conclusión	57
11. Recomendaciones	58
Referencias.....	58

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Coordenadas de la zona de estudio</i>	18
Tabla 2 <i>Métodos aplicados a cada tipo de movimiento</i>	26
Tabla 3 <i>Tipo de procesos morfodinámicos que conforman el IPM del municipio de Landázuri</i> 29	29
Tabla 4 <i>Subunidades geomorfológicas para el área de estudio</i>	32
Tabla 5 <i>Rango de pendiente y áreas</i>	35
Tabla 6 <i>Unidades Geológicas Superficiales</i>	37
Tabla 7 <i>Pesos de evidencia de la variable UGS</i>	43
Tabla 8 <i>Pesos de evidencia de la variable Cobertura y Uso de Suelos</i>	44
Tabla 9 <i>Pesos de evidencia de la variable Pendiente del terreno</i>	45
Tabla 10 <i>Pesos de evidencia de la variable Curvatura</i>	45
Tabla 11 <i>Categorías de Susceptibilidad</i>	50

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Ubicación del municipio de Landázuri-Santander</i>	17
Figura 2 <i>Delimitación de Zona de estudio dentro del municipio de Landázuri-Santander</i>	18
Figura 3 <i>Extracto Plancha 150- Cimitarra</i>	19
Figura 4 <i>Propuesta Mapa geológico 1:25000</i>	20
Figura 5 <i>Esquema metodológico principal</i>	24
Figura 6 <i>Esquema metodológico, cálculo de susceptibilidad por mov. tipo deslizamiento</i>	26
Figura 7 <i>Ecuaciones de pesos de evidencia expresados en términos de pixeles</i>	27
Figura 8 <i>Esquema metodológico, cálculo de susceptibilidad por movimientos tipo Caída</i>	27
Figura 9 <i>Mapa de procesos morfodinámicos a escala 1:25000 para el municipio de Landázuri-Santander</i>	28
Figura 10 <i>Principales movimientos en la zona de estudio</i>	30
Figura 11 <i>Ambientes geomorfológico</i>	31
Figura 12 <i>Mapa geomorfológico zona sur dl municipio de Landázuri-Santander</i>	33
Figura 13 <i>Laderas de contrapendiente (Slcp)</i>	34
Figura 14 <i>Mapa de pendientes</i>	36
Figura 15 <i>Capa de Curvatura</i>	36
Figura 16 <i>Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS)</i>	38
Figura 17 <i>Unidades de cobertura de la tierra en un tiempo actual</i>	39
Figura 18 <i>Mapa de cobertura</i>	40
Figura 19 <i>Capa ráster de cada factor</i>	41

Figura 20	<i>Capa ráster de la variable de agrupamiento</i>	42
Figura 21	<i>Mapa producto de la función de susceptibilidad</i>	46
Figura 22	<i>Curva de éxito y validación</i>	47
Figura 23	<i>Mapa de susceptibilidad por movimientos en más tipo deslizamiento</i>	48
Figura 24	<i>Susceptibilidad por movimientos tipo caída en zonas de inicio</i>	49
Figura 25	<i>Susceptibilidad por movimientos tipo caída en zonas de deposito</i>	49
Figura 26	<i>Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa tipo Caída</i>	51
Figura 27	<i>Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa tipo Reptación</i>	51
Figura 28	<i>Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa</i>	52
Figura 29	<i>Categorías de susceptibilidad para movimientos en masa escala 1:25000</i>	53
Figura 30	<i>Extracto mapa de susceptibilidad EOT (2003) y mapa de susceptibilidad plancha 150 SGC (2016)</i>	56

Lista de Apéndices**pág.**

Apéndice A. Inventario de movimientos

Apéndice B. Movimientos en masa por veredas

Apéndice C. Subunidades geomorfológicas

Apéndice D. Unidades Geológicas superficiales (UGS)

Apéndice E. Unidades de cobertura y uso de suelos

Apéndice F. Calculo Bivariado

Apéndice G. Curva de éxito y Validación

Apéndice H. Estaciones de campo

Apéndice I. Formatos movimientos en masa en campo

Apéndice J. Mapas Insumos y resultados

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”

Resumen

Título: Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, escala 1:25.000 para la zona sur del municipio de Landázuri, Santander, aplicando el método bivariado.*

Autor: Solano Laura y Díaz Sergio**

Palabras Clave: Zonificación Susceptibilidad, Movimientos en masa, método estadístico Bivariado, Landázuri, Colombia.

Descripción:

En el presente proyecto se realizó un estudio detallado con un área delimitada de 82,6 km², ubicada en la zona sur del municipio de Landázuri, departamento de Santander. La zona ha experimentado frecuentes movimientos de ladera en vías, zonas urbanizadas y zonas asociadas a la cuenca del río Guayabito, esto justificó determinar zonas susceptibles a movimientos en masa para mejorar la comprensión de la inestabilidad del terreno, utilizando como base la “Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa en escala 1:25000” SGC (2017); el procedimiento para el análisis de la susceptibilidad requiere, una caracterización geoambiental donde se determinan los factores condicionantes y un catálogo e inventario de procesos morfodinámicos. El inventario incluyó un total de 164 movimientos, 109 de tipo deslizamiento, 6 de tipo caída, 8 de tipo flujo, 1 de tipo reptación, y 40 movimientos antiguos, de los cuales 49 permanecen activos y 115 inactivos. Los productos de la caracterización geoambiental consisten en mapas de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), Subunidades Geomorfológicas (SGFM), y Unidades de cobertura y uso del suelo, tales factores conjugados con el inventario de procesos morfodinámicos generan zonas hipotéticas con diferente grado de susceptibilidad. El análisis y resultado se genera teniendo en cuenta cada tipo de movimiento. Para movimientos de tipo deslizamiento y flujo, se utilizaron el método estadístico bivariado (WofE) y se obtuvieron categorías de susceptibilidad tales como Alta (2.9%), Media (61.7%) y Baja (35.4%). Para movimientos de tipo caída, se utilizó un método basado en criterios geológicos y geomorfológicos, y se obtuvieron categorías de susceptibilidad de Alta (0.36%) y Media (35.4%). De ante mano las susceptibilidades Muy altas (2.7%) se asocian el conjunto total de movimientos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez Geólogo, Doctor en Ciencias Geológicas.

Abstract

Title: Zoning of susceptibility to mass movements, scale 1:25,000 for the southern zone of the municipality of Landázuri, Santander, using the bivariate method *

Author(s): Solano Laura y Diaz Sergio**

Key Words: Susceptibility Zoning, Mass Movements, Bivariate statistical method, Landázuri, Colombia.

Description:

In the present project, a detailed study was conducted on a delimited area of 82.6 km² located in the southern zone of the municipality of Landázuri, department of Santander. The area has experienced frequent slope movements in roads, urbanized areas, and areas associated with the Guayabito river basin. This justified the determination of areas susceptible to mass movements to improve the understanding of terrain instability, using as a basis the "Methodological Guide for zoning of threat by mass movements in 1:25000 scale" SGC (2017). The susceptibility analysis procedure requires a geo-environmental characterization where conditioning factors and a catalog and inventory of morphodynamic processes are determined. The inventory included a total of 164 movements, 109 of sliding type, 6 of falling type, 8 of flowing type, 1 of crawling type, and 40 ancient movements, of which 49 remain active and 115 inactive. The products of the geo-environmental characterization consist of maps of the Superficial Geological Units (UGS), Geomorphological Subunits (SGFM), and Units of coverage and land use. These factors combined with the inventory of morphodynamic processes generate hypothetical zones with different degrees of susceptibility. The analysis and results are generated taking into account each type of movement. For sliding and flowing type movements, the bivariate statistical method (WofE) was used, and susceptibility categories were obtained such as High (2.9%), Medium (61.7%), and Low (35.4%). For falling movements, a method based on geological and geomorphological criteria was used, and susceptibility categories of High (0.36%) and Medium (35.4%) were obtained. The very high susceptibilities (2.7%) are associated with the total set of movements.

* Degree Work

** Faculty of Physical Chemistry. School of Geology Academic program. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez Geologist, PhD in Geological Sciences.

Introducción

Los movimientos en masa corresponden a un movimiento ladera debajo de masa rocosa, de detritos o tierra (Cruden, 1991). Estos fenómenos dependen de factores condicionantes y detonantes del terreno tales como el clima, sismicidad y/o de sistemas volcánicos, litológicos, estructurales, topográficos, antrópicos, etc. Generando inestabilidad en las laderas y la sobrecarga de un determinado material rocoso, que puede romper la barrera de equilibrio que mantiene las partículas unidas y estables en una ladera, produciendo movimientos en masa de diferentes tipos como deslizamientos, caídas, flujo y reptación principalmente. Las consecuencias pueden resultar en pérdidas económicas y de terrenos.

La facilidad con que un movimiento en masa pueda ocurrir a partir de las características del terreno, representadas por los factores que determinan su predisposición hacia una condición de inestabilidad, se define como la susceptibilidad a movimientos en masa (UIS, 2017).

Este trabajo presenta los resultados de la cartografía de la susceptibilidad por movimientos en masa en una zona al sur del municipio de Landázuri-Santander, con base en la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000 (SGC, 2017). Esta metodología establece una primera etapa de caracterización geoambiental que requiere del inventario de procesos morfodinámicos y la elaboración de los factores condicionantes (geomorfología, geología y cobertura y uso de suelo). La conjunción de estos permite el análisis de susceptibilidad utilizando diferentes metodologías para zonificación de susceptibilidad de movimientos en masa. Dichos métodos corresponden al método de pesos de evidencia y método geomorfológico, los cuales permiten un análisis detallado de la zona de estudio.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25000 de un área al sur del municipio de Landázuri, siguiendo la metodología propuesta por el SGC (2017).

1.2 Objetivo Específicos

Recopilar y analizar información existente de los elementos de la caracterización geoambiental.

Analizar los procesos morfodinámicos que ocurren en la zona de estudio, a través de la elaboración e interpretación del mapa de inventarios de procesos morfodinámicos a escala 1:25.000.

Analizar los principales factores que inciden en la susceptibilidad del terreno a presentar movimientos en masa, para lo cual se elaboran e interpretan los mapas de UGS, coberturas y uso de suelos, geomorfología; con el fin de determinar dentro del área de estudio las zonas propensas a presentar movimientos en masa.

2. Alcances y limitaciones

La zona de estudio contempla un área de 82,6 kilómetros cuadrados, incluyendo la cabecera municipal, las vías, el nacimiento y la cuenca alta del río Guayabito. Esta área cuenta con pocos estudios geológicos, geomorfológicos, de cobertura y uso de suelos a escala detallada.

Los estudios con mayor detalle para el área corresponden a mapa geológico de la plancha 150 a escala 1:100.000 (INGEOMINAS, 2008), mapa geomorfológico de la plancha 150 a escala 1:100.000 SGC (2018), el Esquema de ordenamiento territorial EOT (2003) del municipio de Landázuri con mapas a escala 1:75000 y estudios de zonificación de susceptibilidad para la plancha 150 a escala 1:100.000 SGC (2016).

Este trabajo presenta cartografía a escala 1:25000 de los componentes geológico, geomorfológico, Uso y cobertura de suelo, pendiente y curvatura, base para futuros estudios tales como zonificación de amenaza en el área. Análisis multitemporales no fueron incluidos por la falta de información reciente (menor a 10 años), recomendado por el SGC (2017).

Este proyecto se vio afectado por la pandemia y el confinamiento, limitando el acceso a la zona y el trabajo continuo.

3. Planteamiento del problema

Landázuri-Santander se sitúa en una zona donde constantemente se generan daños y afectaciones debido a movimientos en masa. Sin embargo, hasta el momento, el municipio no cuenta con estudios y seguimientos detallados sobre las condiciones, factores y lugares más afectados por estos fenómenos.

Geológicamente, la cartografía existente se encuentra a escalas de trabajo 1:100.000 (Plancha 150, INGEOMINAS 2008) y 1:75000 (EOT, 2003). Por lo tanto, es pertinente generar cartografías geológicas a una escala media de 1:25000, para el estudio de fenómenos de remoción. Adicionalmente, la formación “La Luna” planteada en el servicio geológico INGEOMINAS (2008), requiere ser diferenciada en las Formaciones Salada, Pujamana y Galembó definidas en Etayo (2020). Desde el punto de vista estructural, la zona está afectada por un fuerte control estructural asociado al sinclinal de Armas y las fallas La Salina, Landázuri y Cimitarra, sumado a estructuras aún no registradas en estudios anteriores.

Geomorfológicamente, el municipio se encuentra en una zona montañosa asociada a ambientes estructurales, denudacional y fluvial que contienen subunidades geomorfológicas aún no registradas y que son importantes desde el punto de vista de la inestabilidad.

Por lo tanto, la pregunta de investigación fue ¿Cuáles son las áreas más propensas para que se generen movimientos en masa en la zona de influencia de la cabecera municipal y las vías del municipio de Landázuri?

4. Justificación

Los movimientos en masa representan para el municipio de Landázuri-Santander una pérdida económica, de infraestructura y agrícola. En los últimos años, a lo largo de las vías se han generado movimientos en masa, dejando incomunicado el municipio en varias ocasiones (ejemplo en junio del 2018 y 2019, diciembre del 2020).

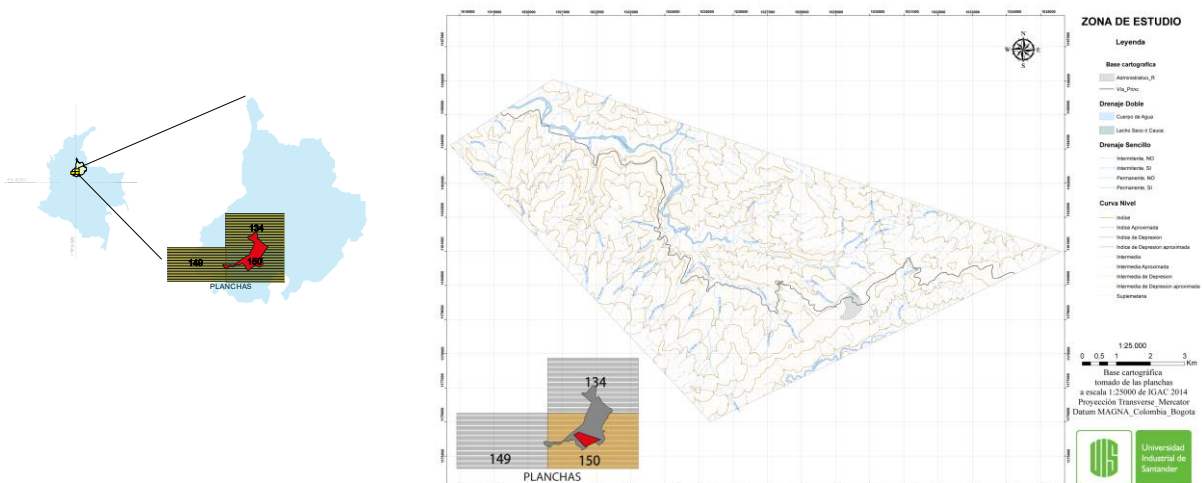
El proyecto se justifica por su relevancia para la planificación territorial y el desarrollo sostenible, ya que permite tomar decisiones informadas y oportunas para reducir la vulnerabilidad ante los movimientos en masa. Además, la metodología desarrollada podrá ser replicada en otras zonas afectadas por estos fenómenos, contribuyendo así a la generación de conocimiento y la gestión del riesgo de desastres.

5. Localización

El municipio de Landázuri se sitúa al suroccidente del departamento de Santander, limita con el municipio de Vélez (al norte y oriente), con el municipio de Bolívar (al Sur), y con el municipio de Cimitarra (al occidente). Se encuentra dentro de las planchas 1:100.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi con numero 134-Puerto Parra, 149 -Puerto Serviez y 150-Cimitarra (Figura 1). En la Figura 1, a la derecha se delimito un polígono para realizar los estudios dentro del municipio, la Tabla 1 muestra las coordenadas es esta área de interés.

Figura 1

Ubicación del municipio de Landázuri-Santander.



Nota. A la izquierda en color rojo se muestra la ubicación y límites del municipio de Landázuri-Santander con las planchas 1:100.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi que lo contienen, con numero 134-Puerto Parra, 149 -Puerto Serviez y 150-Cimitarra. A la derecha, ubicación del área de estudio dentro de municipio aplicando base cartográfica para la plancha 150 (150ID, 150IIC, 150IIIB y 150 IVA) a escala 1:25000 IGAC (2014).

Tabla 1

Coordenadas de la zona de estudio

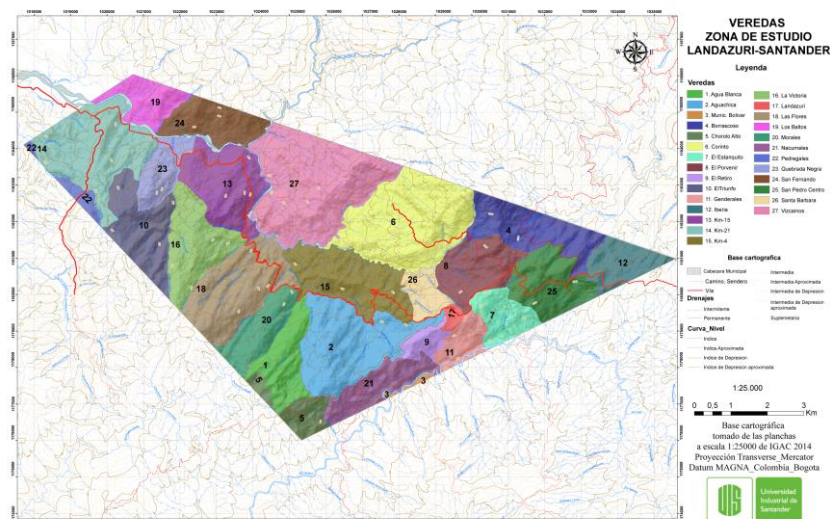
(1) X: 1020714 Y: 1186037	(2) X: 1035583 Y: 1180978
(3) X: 1017715 Y: 1184106	(4) X: 1025331 Y: 1176006

Nota. Complemento Figura 1, vértices del polígono de izquierda a derecha.

El municipio de Landázuri se encuentra en el piedemonte de la Cordillera Oriental, ubicado en el flanco occidental sirve de límite entre el Valle Medio del Magdalena y la cordillera. Se caracteriza por un relieve de pendientes que van desde moderadas a fuertes. Tienen una vasta red hídrica compuesta de nacimientos, caños, quebradas y algunos ríos. Los principales corresponden al Río Horta, Río Carare, Río Guayabito, las quebradas La Armera, La Negra de Armas, La Vizcainera y otras. El área de estudio delimitada dentro de este municipio se ubica al sur e incluye 27 veredas, el casco urbano, la vía principal y parte de cuenca del río Guayabito (Figura 2).

Figura 2

Delimitación de Zona de estudio dentro del municipio de Landázuri-Santander



Nota. Base cartografica plancha 150ID, 150IIC, 150 IIB,150IVA IGAC (2014).

6. Marco de referencia

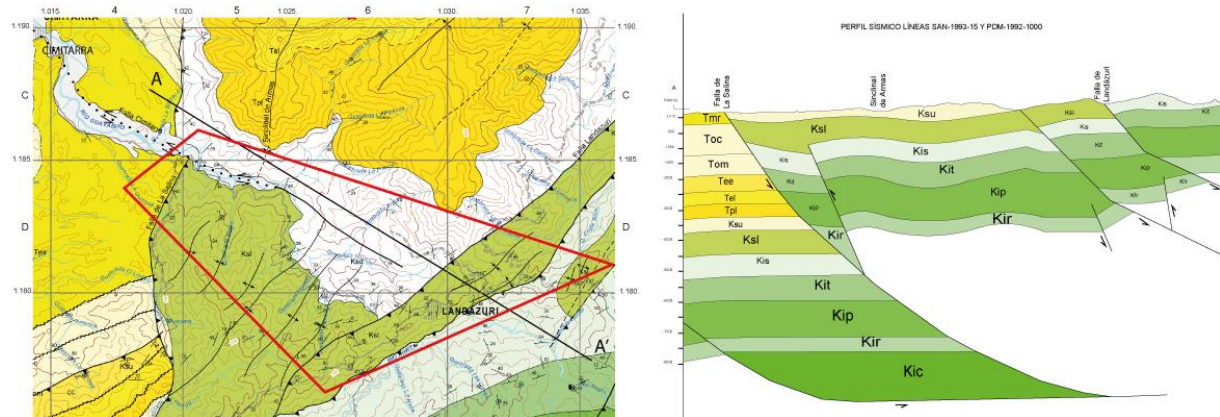
6.1 Marco Geológico

6.1.1 Estratigrafía

Las unidades geológicas presentes en la zona de estudio corresponden a rocas sedimentarias del periodo cretácico y terciario (Gómez et al., 2008), las unidades contenidas en la zona de estudio corresponden a la Formación Rosablanca, Formación Paja, Formación Tablazo, Formación Simití, Formaciones Salada, Formación Pujamana, Formación Galembo, Formación Umir, Formación Lisama, Formación La Paz, Formación Esmeralda, Formación Mugrosa, Formación Colorado y Grupo Real (Figura 3). Cabe mencionar que se asume retomar la definición original de Wheeler, (1929) respecto del rango formacional de los denominados Miembros Salada, Pujamana y Galembo de la Formación La Luna, de acuerdo a lo presentado en Etayo et al (2020).

Figura 3

Extracto Plancha 150- Cimitarra

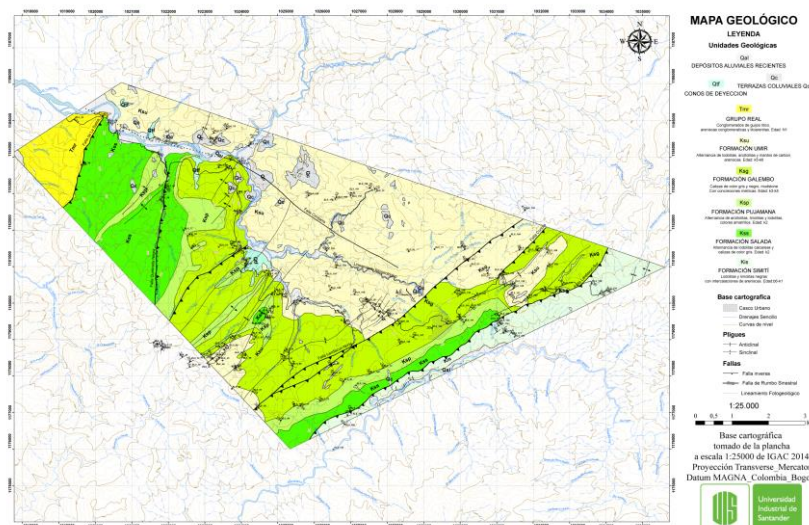


Nota. Extracto del perfil sísmico de la plancha 150 Cimitarra, la línea de corte (A-A'), Zona de estudio marcada con un polígono rojo.

Expuestas en superficie a lo largo de la zona de estudio se exponen las formaciones Simití, Salada, Pujamana, Galembó, Umir y por contacto fallado se expone el Grupo Real; de otra parte, se presentan depósitos sedimentarios recientes coluviales y aquellos relacionados a los ríos Guayabito, Horta y afluentes. Nuevos aportes en la geológica se generan en la Figura 4, cabe mencionar que dentro de las bases para la generación de los nuevos aportes están la memoria explicativa y el mapa geológico de la plancha 150-Cimitarra (Gómez et al., 2008).

Figura 4

Propuesta Mapa geológico 1:25000



Nota. Mapa geológico actualizado de la zona de estudio, propuesta 1:25000.

6.1.1.1 Formación Simití (Ks). Consiste en shales color gris a negro, localmente calcáreo y desarrollo de concreciones. La edad de la Formación Simití se basa en amonitas del Albiano inferior, medio y superior. Cuenta con espesores varían entre 250 y 650 m (Gómez et al., 2008).

6.1.1.2 Formación Salada (Kss). Asociada a rocas calcáreas, entre ellas capas delgadas de shale negros calcáreos, capas delgadas de calizas oscuras y concreciones piritosas de formas

elípticas, Mudstone intercalado con lodolitas calcares. De edad Turoniano Inferior, caracterizada por espesores que varían entre los 50 y 100 metros (Etayo, 2020).

6.1.1.3 Formación Pujamana (Ksp). Consiste en intercalaciones de arcillolita, limolitas y lodolitas amarillas. El espesor estimado se encuentra en un rango de 50 a 250 metros y la edad asignada es Turoniano Superior y posiblemente Coniaciano Inferior (Etayo, 2020).

6.1.1.4 Formación Galembo (Ksg). Etayo et al. (2020) describe la composición de la formación como calizas con textura mudstone y wackestone con foraminíferos planctónicos, de color gris oscuro a gris. Contienen concreciones micríticas de forma elíptica, centimétricas hasta métricas. Espesores entre 140- 350 metros, de edad Santoniano-Coniaciano.

6.1.1.5 Formación Umir (Ksu). Según Gómez et al., (2008) la parte inferior de la unidad contiene lodolitas grises azuladas a negras intercaladas con láminas carbonáceas. La parte superior está compuesta de shale blando, gris oscuro a gris verdoso con esporádicas capas de areniscas de grano fino y delgados mantos de carbón. La edad se relaciona al Maastrichtiano y espesor aproximado es de 1000 m.

6.1.1.6 Grupo Real (Tmr). litológicamente esta unidad está compuesta por capas gruesas de areniscas líticas de color gris y ocre. Cuenta con un espesor de unos 3900 m. La edad asociada a la formación se encuentra entre el mioceno medio y superior (Gómez et al., 2008).

6.1.2 Geología Estructural

Según Gómez et al., (2008) la zona de estudio se encuentra afectada estructuralmente por 3 fallas principales que modelan el relieve: La Salina, Landázuri y San Cayetano. Además, se observan varias estructuras importantes como el Sinclinal de Armas, junto con unas secuencias de anticlinales y sinclinales asociados (Figura 3).

6.1.2.1 Fallas.

6.1.2.1.1 Sistema de Fallas Landázuri (SFL). Según Gómez et al., (2008), este sistema de fallas sigue una dirección con rumbo SSW – NNE, es una estructura cordillerana que afecta las secuencias del cretácico, corresponde a cabalgamientos con marcados rasgos geomorfológicos en el drenaje y la topografía de la región. Para la zona de estudio se identificaron dentro de este sistema de fallas las Falla Landázuri Norte- Landázuri Sur. Como aporte del presente proyectos, se incluyen las fallas Quebrada Negra, Quebrada Morrocoy, falla corinto y falla Aguachica, de carácter inverso (Figura 4).

6.1.2.1.2 Sistema de Fallas de La Salina (SFS). Según Gómez et al., (2008), el sistema de fallas Salinas con rumbo regional SSW – NNE, pone en contacto rocas del Cretáceo Superior - Paleógeno con rocas del Mioceno – Oligoceno registrando un salto estratigráfico cercano a los 300 m. Formado por un sistema de cabalgamientos regionales con vergencia occidental. Asociado a margen occidental del rift mesozoico del norte de Colombia y en la configuración del borde occidental de la Cordillera Oriental.

6.1.2.1.3 Falla de Cimitarra (FC). Según Gómez et al., (2008), el carácter dominante de la falla Cimitarra es de rumbo deslizante con desplazamiento lateral izquierdo afectando rocas de las secuencias terciarias en la provincia de piedemonte occidental de la Cordillera Oriental, con alto ángulo de buzamiento. La edad de esta falla se asocia a la orogenia andina.

6.1.2.2 Pliegues.

6.1.2.2.1 Sinclinal de Armas (SA). Ubicado al SW del municipio de Landázuri. Según Gómez et al., (2008), corresponde a una estructura amplia, abierta, con gran longitud de onda y amplitud moderada. El plano axial es subvertical y presenta un cabeceo de 6.9° hacia N30E. En su

núcleo se encuentran rocas de las formaciones Lisama y La Paz y en sus flancos afloran rocas de la Formación Umir la cual presenta numerosos pliegues de segundo y tercer orden.

6.2 Marco Conceptual

6.2.1 Movimientos en masa: fenómeno de remoción en masa (Co, Ar), proceso de remoción en masa (Ar), remoción en masa (Ch), fenómeno de movimiento en masa, movimientos de ladera, movimientos de vertiente. Movimiento ladero abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras (Cruden, 1991)

6.2.2 Factores condicionantes: Según SGC (2017) corresponde a una colección de datos espaciales que, de acuerdo con la hipótesis planeada, pueden explicar la ocurrencia de movimiento en la zona de estudio. Su caracterización se genera por medio del levantamiento geológico, geomorfológico, cobertura de la tierra y uso de suelos.

6.2.3 Factores detonantes: SGC (2017) los define como estímulos externos que sobre el terreno pueden modificar las condiciones existentes, tales como Sismos, lluvias intensas, erosión del caño, entre otros, y propiciar movimientos en masa.

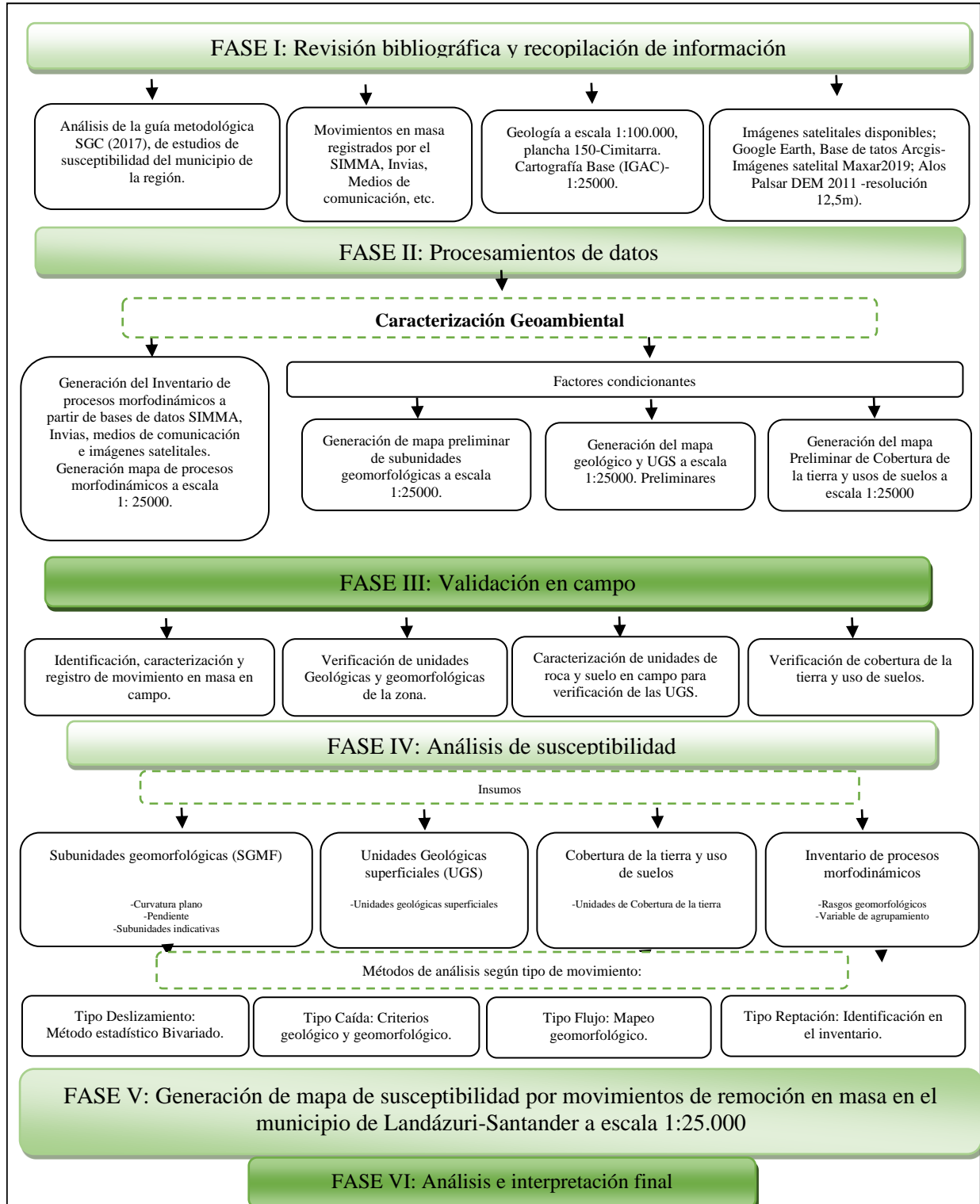
6.2.7 Métodos estadísticos bivariado PESOS DE EVIDENCIA (WofE): Este método evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes y áreas inestables mediante. Asociando las UGS, Pendiente, curvatura y Usos con la ocurrencia de movimientos (SGC, 2017).

7. Metodología

El desarrollo del presente proyecto basa su proceso en la guía metodología para la zonificación de amenazas por remoción en masa escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano SGC (2017), es así que se establecer una serie de 6 fases mostradas en la Figura 5.

Figura 5

Esquema metodológico principal



7.1 Fase I. Revisión bibliográfica y recopilación de información.

En esta primera fase se recopiló información disponible de la zona de estudio, como la base cartográfica 1:25000 (IGAC, 2014), el mapa geológico de la plancha 150 a escala 1:100.000 INGEOMINAS (2008), mapa geomorfológico de la plancha 150 a escala 1:100.000 SGC (2018), el EOT (2003), imágenes satelitales (Alos, Palsar resolución 12,5 m, 2019), artículos, tesis, documentos, libros; se revisaron y se tomó información de bases de datos tales como el IGAC, Invias, SIMMA y el SGC.

7.2 Fase II. Caracterización geoambiental y procesamientos de datos

Durante esta fase se generó el catálogo de movimiento, el mapa preliminar de procesos morfodinámicos o de movimientos en masa, las capas y mapas preliminares para los factores condicionantes que corresponden a la geomorfología, la geología y la cobertura y usos de suelos de la zona de estudio.

7.3 Fase III. Validación en campo

La fase de campo realizada entre 6 marzo y 14 marzo del 2021, permitió corroborar y modificar los mapas preliminares de los factores condicionantes y registro de movimientos de meses anteriores.

7.4 Fase IV. Análisis de susceptibilidad y aplicación de métodos.

En esta fase se generó el análisis de susceptibilidad para cada tipo de movimiento en masa. Para esto se dispuso un método de análisis adecuado para cada movimiento, esto dispuesto en SGC (2017) y mostrado en la Tabla 2. Para movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo se aplicó el método estadístico bivariado (Figura 6); para movimientos tipo caída, se utilizó el criterios geológicos y geomorfológicos (Figura 8); para movimientos tipo reptación se toma directamente del inventario.

Tabla 2

Métodos aplicados a cada tipo de movimiento

Tipo	Método	Zonas de Análisis
Deslizamiento	Estadístico bivariado (Pesos de evidencia-WofE)	Zonas de inicio y depósito
Caída	Criterios geológicos y geomorfológicos	Zonas de inicio y depósito
Flujo	Mapeo geomorfológico	Zonas de depósito
Reptación	Identificación en el inventario	Zonas afectadas directa

Nota. Método aplicado a cada tipo de movimiento para encontrar la susceptibilidad. Tomado de SGC (2017).

Para el análisis de susceptibilidad para movimientos tipo deslizamiento (Figura 6), se generaron las variables de agrupación e hipótesis de falla, aplicando el procesamiento estadístico (Método bivariado), utilizando las fórmulas de pesos, expresada en la Figura 7. Permitiendo obtener el peso final (Wf) para cada factor y hallando la función de susceptibilidad final.

Figura 6

Esquema metodológico, cálculo de susceptibilidad por movimientos tipo deslizamiento

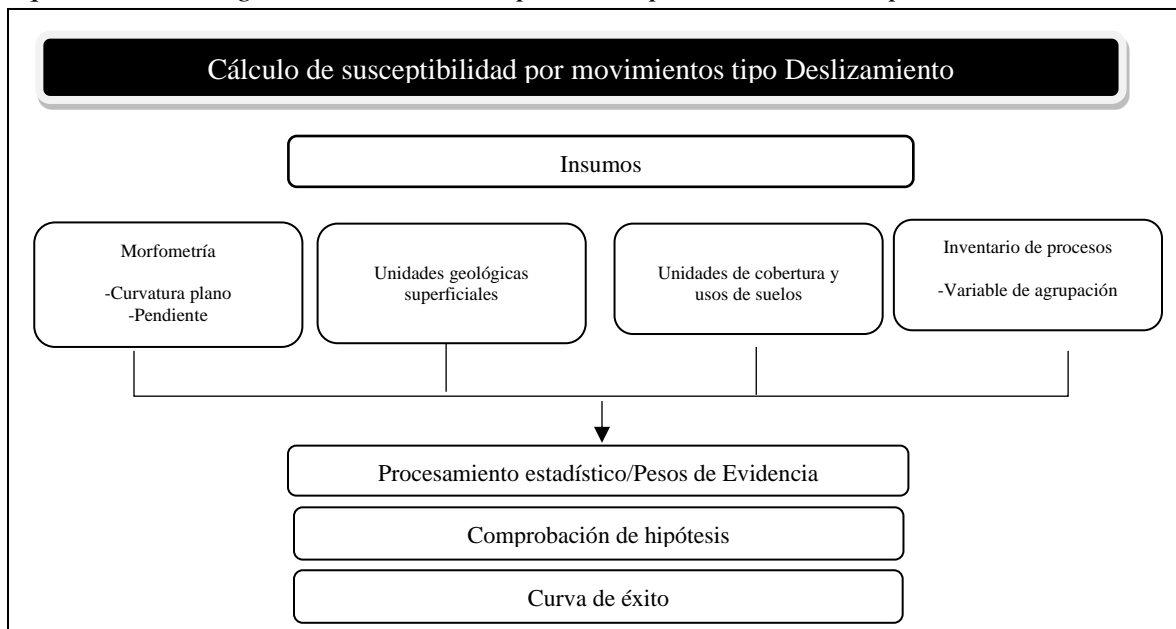


Figura 7

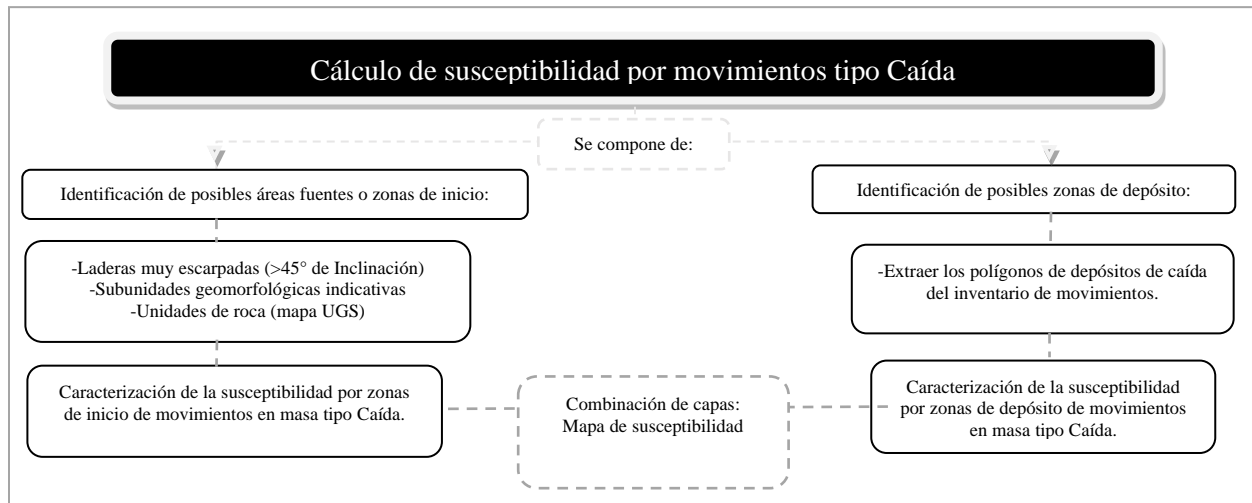
Ecuaciones de pesos de evidencia expresados en términos de pixeles

Para el peso positivo	Para el peso negativo
$W_i^+ = \ln \left(\frac{N_{pix\ 1}}{N_{pix\ 1} + N_{pix\ 2}} \cdot \frac{N_{pix\ 3}}{N_{pix\ 3} + N_{pix\ 4}} \right)$ <p>Donde el peso positivo indica la importancia de la presencia del factor en el deslizamiento</p>	$W_i^- = \ln \left(\frac{N_{pix\ 2}}{N_{pix\ 1} + N_{pix\ 2}} \cdot \frac{N_{pix\ 4}}{N_{pix\ 3} + N_{pix\ 4}} \right)$ <p>Donde el peso negativo indica la importancia de la ausencia del factor en el deslizamiento</p>
$W_f = W_i^+ - W_i^-$ <p>Ecuación final de peso</p> <p>En seguida se aplicó la función de susceptibilidad (LSI), expresada de la siguiente manera: LSI = Wf Pendiente + Wf Curvatura + Wf UGS + ... Wf Uso del suelo.</p>	

Nota. Ecuaciones finales para encontrar el peso final. Tomado de SGC, 2017.

Figura 8

Esquema metodológico, cálculo de susceptibilidad por movimientos tipo Caída



7.5 Fase V. Generación de mapa de susceptibilidad por movimientos de remoción en masa en el municipio de Landázuri-Santander a escala 1:25.000

Finalmente se generó el mapa de susceptibilidad por movimientos de remoción en masa a escala uno 1:25.000. Aplicando la siguiente matriz de cambio para superponer las capas finales.

7.6 Fase VI. Análisis e interpretación final

En esta fase se determinaron los factores que contribuyen en mayor medida a la ocurrencia de los deslizamientos en la zona de estudio. En consecuencia, se definieron las zonas más susceptibles por movimientos en masa, como zonas de Alta, Media y Baja susceptibilidad por movimientos en masa.

8. Presentación de resultados

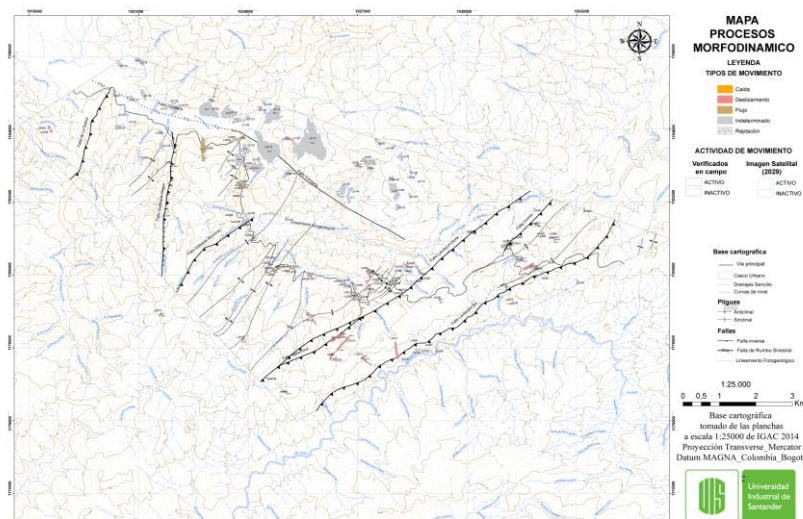
8.1 Caracterización Geoambiental

8.1.1 Inventario de procesos morfodinámicos

El inventario de procesos morfodinámicos se conforma por el mapa de procesos morfodinámicos y la base de datos para cada movimiento (Apéndice A).

Figura 9

Mapa de procesos morfodinámicos a escala 1:25000 para el municipio de Landázuri-Santander.



En la Figura 9, se observa la representación cartográfica del inventario de procesos morfodinámicos. Contiene sus características más importantes, disposición, tipos de movimientos. Su representación se generó a partir de polígonos y puntos (Buffer de 12,5).

8.1.1.2 Catálogo e inventario de información secundaria. Utilizando la base de datos SIMMA se obtuvieron un total de 21 eventos, de los cuales sus eventos principales corresponden a: 2 de tipo caída, y 19 a movimientos tipo deslizamiento. A partir de noticias y registros regionales de los últimos años se determinaron 3 movimiento tiempo deslizamiento. Siguiendo la metodología del SGC (2017), se analizó la fotogeología, de la cual se obtuvieron 102 movimientos: 56 deslizamiento, 1 reactivación de tipo reptación (también registrado por el SIMMA), 5 de tipo flujo y 40 movimiento indeterminados (asociados a depósitos de ladera antiguos). A partir de la fase de Campo se obtuvieron 39 movimientos: 4 de tipo caída, 3 de tipo Flujo y 31 de tipo deslizamiento. Es así que el total de movimientos en masa registrados corresponden a 164 movimiento (6 de tipo caída, 8 de tipo flujo, 1 de tipo reptación, 109 de tipo deslizamiento, más 40 de tipo indeterminado), de los cuales 49 movimientos se mantienen activos y 115 inactivos (Tabla 3).

Tabla 3

Tipo de procesos morfodinámicos que conforman el IPM del municipio de Landázuri

Procesos Morfodinámicos	Cantidad de procesos		Total	Area km ²
	Activos	Inactivos		
Deslizamientos	40	69	109	0,283273
Flujo	4	4	8	0,041494
Caída	4	2	6	0,025384
Reptación	1	--	1	0,040834
Movimiento antiguos - Indeterminados	--	40	40	1,844687
Total	49	115	164	2,23567

Nota. Estado movimientos en relación con el tipo de movimiento y áreas.

Las veredas con más movimientos generados corresponde a la vereda Aguachica con 20 movimientos principalmente de tipo deslizamiento, vereda Vizcaínos con 14 movimientos, la vereda Km-15 con 13 movimientos en masa (principalmente deslizamientos traslacionales), vereda Km-4 con 12 movimientos (deslizamientos traslacionales y caída de roca) , vereda San Pedro Centro con 12 movimientos, vereda Corinto con 10 movimientos, San Fernando con 10 movimientos en masa (movimientos antiguos) , Santa Barbara con 9 movimiento, El Porvenir con 8 movimientos (Figura 10). El Apéndice B, presenta una descripción de movimientos detallada por vereda.

Figura 10

Principales movimientos en la zona de estudio



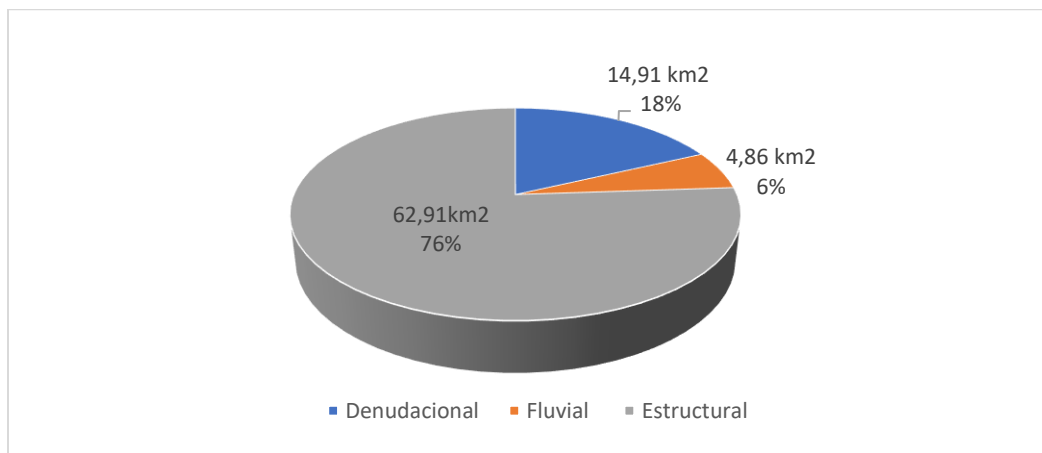
Nota. A. Movimientos tipo deslizamiento traslacional y en cuña, vereda Aguachica; B. Movimiento tipo deslizamiento traslacional vereda Km-4; C. Mov. Traslacional planar vereda Km-15; D. Mov. En cuña vereda San Pedro centro; E. Deslizamiento rotacional y caída de rocas, vereda el estanquito.

8.1.2 Subunidades geomorfológicas

Los principales ambientes geomorfológicos en el municipio de Landazuri-Santander, comprenden ambientes estructurales, denudacionales y fluviales. Esto debido al contexto geomorfológico en el que se encuentra, hace parte del piedemonte occidental de la cordillera oriental y se encuentra afectado por esfuerzos estructurales que hacen de esta zona, una zona rocosa muy plegada y fracturada. Adicional a los factores estructurales, cuenta con una suma importante de nacimientos de agua además de la precipitación continua en gran parte del año. En la Figura 11, se representa esquemáticamente el porcentaje de los ambientes según el área que ocupan en la zona de estudio.

Figura 11

Ambientes geomorfológico



Nota. Las áreas para este estudio están dadas en Km². El ambiente principal corresponde al ambiente estructural

De acuerdo con lo anterior a continuación en la Tabla 4, se describen las geoformas mostradas en el mapa de subunidades geomorfológicas (Figura 12) y sus áreas en Km². Para más detalles revisar el Apéndice C.

Tabla 4*Subunidades geomorfológicas para el área de estudio*

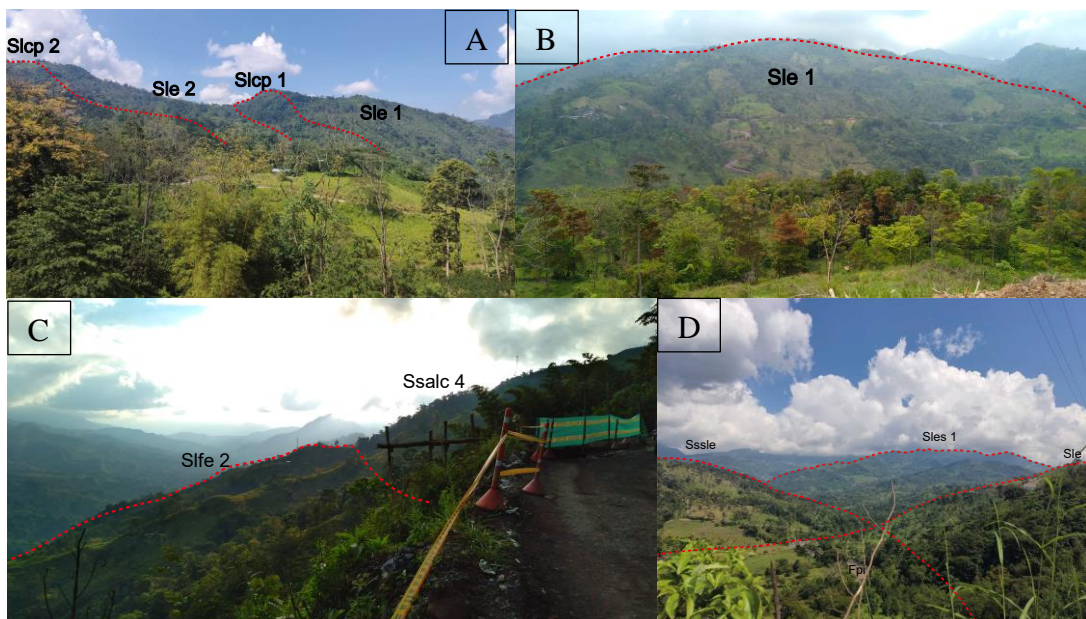
Ambiente	Código	Unidad	Área (Km ²)	% de Area
Denudacional	Dcrem	cerro remanente o relicto	0,236	0,286%
	Ddi	cono de deslizamiento indiferenciado	1,878	2,271%
	Ddrt	Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	0,012	0,014%
	Ddtr	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	0,176	0,213%
	Dft	cono o lóbulo de flujo indiferenciado	0,016	0,019%
	Dld	lomo denudado	4,220	5,105%
	Dldi	lomeríos disectados	0,600	0,726%
	Dle	ladera erosiva	6,235	7,541%
	Dlfd	cono o lóbulo de flujo de detritos	0,139	0,168%
	Dlfl	cono o lóbulo de flujo de lodo	0,004	0,005%
	Dlo	ladera ondulada	1,394	1,686%
	Fluvial	Fbl	barra longitudinal	0,048
Fbp		barra puntual	0,054	0,065%
Fc		cauce aluvial	1,076	1,301%
Fcdy		Cono de deyección	0,465	0,563%
Fpi		plano o llanura de inundación	1,998	2,417%
Fta		terraza de acumulación	0,021	0,025%
Fte		terraza de erosión	0,461	0,558%
Ftee		escarpe de terraza de erosión	0,735	0,889%
Estructural	Slcp	ladera de contrapendiente	4,208	5,090%
	Sle	ladera estructural	8,981	10,863%
	Sles	ladera escalonada	8,051	9,738%
	Slfe	escarpe de línea de falla	3,783	4,576%
	Sloe	lomeríos estructurales	1,470	1,778%
	Ss	Sierra estructural	10,425	12,610%
	Ssalc	ladera de contrapendiente de sierra anticlinal	3,322	4,018%
	Ssale	ladera estructural de sierra anticlinal	3,712	4,490%
	Ssh	sierra homoclinal denudada	5,243	6,342%
	Sshle	ladera estructural de sierra homoclinal	0,228	0,276%
	Ssslc	ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	4,676	5,656%
	Sssle	ladera estructural de sierra sinclinal	8,808	10,654%
Total			82,674	100,000%

veredas La victoria, El triunfo, Vizcaínos, km 21, El Porvenir y Borrascoso principalmente, estas zonas se encuentran visiblemente afectadas por la contante precipitación de agua en la zona.

El ambiente Fluvial representa el 6% del área de estudio con un área de 4.86 km², comprende geformas como plano o llanura de inundación, cauce aluvial principal, escarpe de terraza de erosión, cono de deyección, terraza de erosión, barra puntual, barra longitudinal y terraza de acumulación. Estas geformas se encuentran asociadas a los dos ríos principales que afectan esta zona, correspondiente al río Guayabitos y el río Horta.

Figura 13

Laderas de contrapendiente (Slcp)



Nota. A. laderas estructurales (Sle), laderas de contrapendiente (Slcp 1) en la vereda Km 15; B. Ladera de contrapendientes, vereda Km 15; C. Escarpe de falla (Slfe 2) y Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal (Ssalc 4) en la vereda San Pedro Centro; D. estructural Ladera escalonada (Sles 1), ladera estructural de sierra sinclinal (Sssle), ladera estructural (Sle 1) y llanura aluvial (Fpi), vereda km15.

8.1.2.2 Morfometría.

8.1.2.2.1 Pendiente del terreno. En el municipio de Landázuri se exponen desde pendiente de tipo plano a extremadamente abruptas (Figura 14). las pendientes entre 8-16° (Moderadamente inclinado) corresponde al 22.8% de área de estudio, se asociado a deposito aluviales, coluviales, laderas estructurales y de contrapendiente.

Tabla 5

Rango de pendiente y áreas

Inclinación (°)	Categoría	Área km ²
0-2	Plano a casi plano	1,946069
2-4	Suavemente inclinado	1,125581
4-8	Inclinado	4,711248
8-16	Moderadamente abrupto	18,863918
16-35	Abrupto	49,879188
35-55	Muy abrupto	6,031231
>55	Extremadamente abrupto	0,100394

Nota. Rangos de pendientes y áreas en km² en el área de estudio

8.1.2.2.2 Curvatura. En la Figura 15, donde las mayores áreas corresponden a las categorías Cóncava y Convexa. Teniendo en cuenta que en las zonas cóncavas se concentran el flujo, sumado a la captación de aguas lluvia en la región que hacer del área una zona propensa a movimientos en masa.

Figura 14

Mapa de pendientes

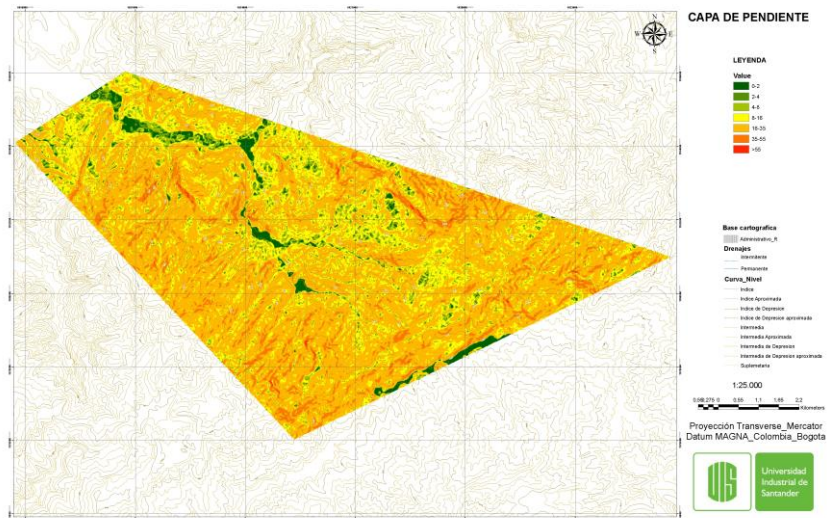
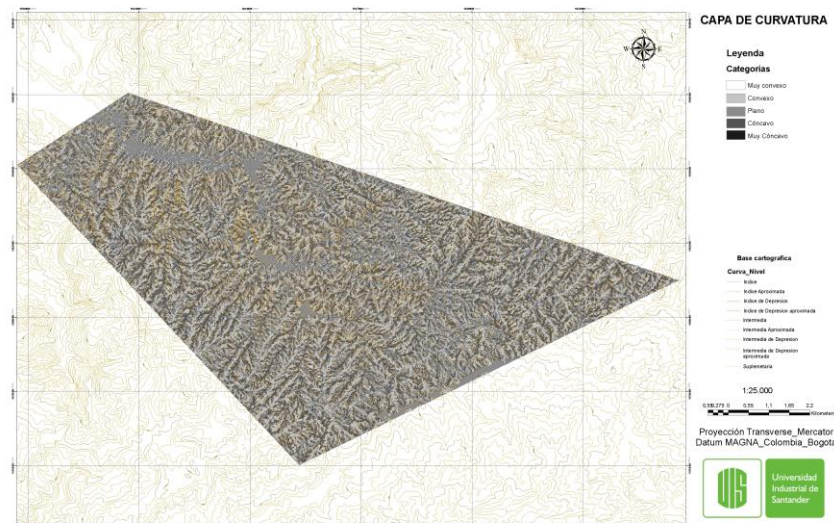


Figura 15

Capa de Curvatura



Notal. Se categorizo por superficies muy convexo, convexo, plano, cóncavo y muy cóncavo.

Donde las zonas cóncavas se asocian con zonas de gran captación de aguas, generadora de movimientos en masa. Fuente: Autor

8.1.3 Unidades geológicas superficiales (UGS)

En la Zona de estudio se identificaron 20 UGS, de la cuales 6 unidades de tipo Suelo (5 Unidades de Suelo transportado y 1 Suelo Residual) y 14 unidades correspondientes a Roca (Sedimentarias) (Tabla 6).

Las rocas predominantes corresponden a rocas de calidad regular o intermedia de Lutitas Calcárea de la Formación Galembo (Rilfg) con un 24,9%. Las unidades de suelo más abundantes corresponden a Suelo Transportado Matriz-Soportado de Llanura Aluvial (Stla) con el 3%, seguido Suelo Transportado Clasto-Soportado de Coluvial Inactivo (Stco) con el 2,26%.

Tabla 6

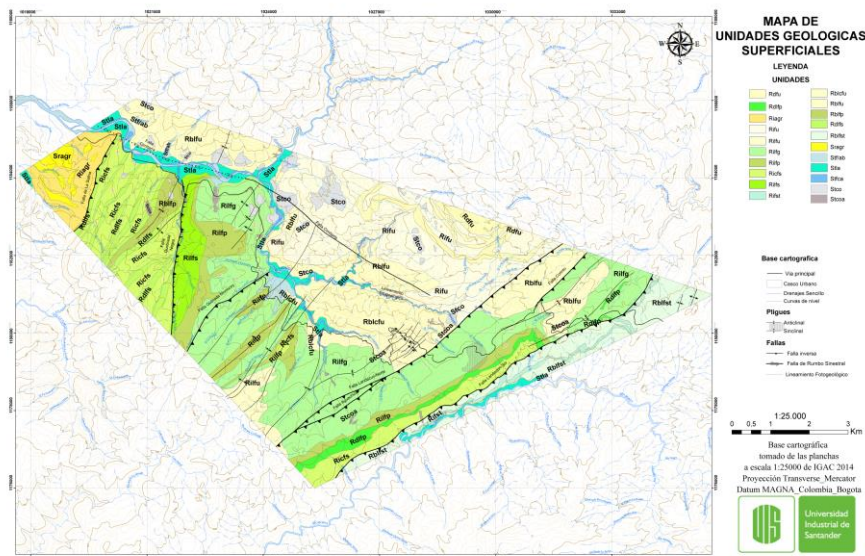
Unidades Geológicas Superficiales

Tipo/Origen	Acrónimo	Nombre	Área (km ²)	% Área
Suelo	Stla	Suelo Transportado Matriz-Soportado de Llanura Aluvial	2,476	2,995%
	Stfca	Suelo Transportado Matriz-Soportado de Cause activo	0,990	1,197%
	Stf/ab	Suelo Transportado Matriz-soportado de conos aluviales	0,509	0,616%
	Stcoa	Suelo Transportado Clasto-Soportado de Coluvial activos	0,261	0,316%
	Stco	Suelo Transportado Clasto-Soportado de Coluvial Inactivo	1,869	2,261%
	Residual	Sragr	Suelo Residual No Cohesivo asociado a Areniscas del Grupo Real	0,747
Roca	Rblfst	Roca Blanda de Lodolitas Negras de la Formación Simití.	4,486	5,426%
	Rifst	Roca Intermedio heterogéneo de la formación Simití	0,643	0,777%
	Rilfs	Roca Intermedia lodolitas calcáreas de la Formación Salada	1,821	2,202%
	Ricfs	Roca Intermedia calizas de la Formación Salada	7,113	8,604%
	Rdlfs	Roca dura de calizas y lodolitas calcáreas de la Formación Salada	2,134	2,581%
	Rblfp	Roca Blanda compuesta por limolitas y arcillolitas de la Formación Pujamana	0,929	1,124%
	Rilfp	Roca Intermedia de heterogéneo de la Formación Pujamana	4,623	5,592%
	Rdlfp	Roca Dura de lutitas (arcillolitas, limolitas) de la Formación Pujamana	1,158	1,401%
	Rilfg	Roca Intermedia de Lutitas Calcárea de la Formación Galembo	20,653	24,982%

Rblfu	Roca Blanda heterogénea del segmento inferior e intermedio Formación Umir.	9,743	11,785%
Rblcfu	Roca Blanda de Lutitas, lutitas carbonosas y carbón del segmento intermedio de la Formación Umir.	5,444	6,585%
Rifu	Roca Intermedia heterogénea de segmento intermedio y superior de la formación Umir.	11,370	13,753%
Rlifu	Roca Intermedia de Lutitas y carbón del segmento intermedio de la Formación Umir.	1,201	1,453%
Rdfu	Roca Dura heterogénea del segmento superior de la Formación Umir.	2,147	2,597%
Riagr	Roca Intermedia de Areniscas del Grupo Real.	2,354	2,847%

Figura 16

Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS)



Nota. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales

8.1.4 Cobertura y uso del suelo

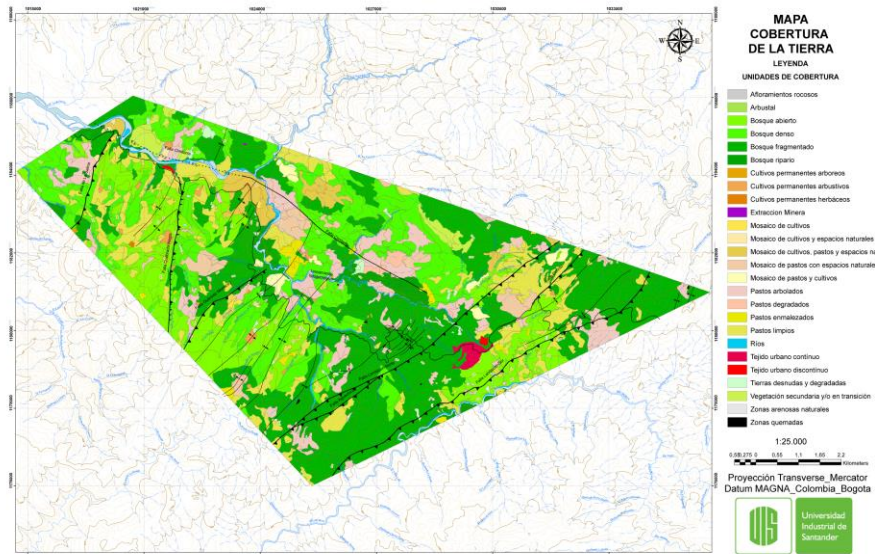
De acuerdo con el mapa de Cobertura de la tierra del municipio de Landázuri (Figura 18) el 35,6% del área está cubierta por Bosques fragmentados, distribuidos en su mayoría en las veredas Aguachica, km 4, Chorolo, San Frenando Corinto, Borrascoso, San Pedro centro entre otro. En segundo lugar, se encuentran los bosques densos que equivalente al 18,4%, asociado a veredas como Morales, Corinto (parte sur), La Victoria, Vizcaínos, etc. El 13,8% y el 10,878%

corresponden a Bosques abiertos y a Pastos limpios respectivamente, asociadas veredas como Morales, Pedregales, La victoria y el Km15, entre otras. Para más información revisar el Apéndice E. A continuación, se realiza la definición de cada una de las unidades de Cobertura encontradas en la zona de estudio:

Figura 17

Unidades de cobertura de la tierra en un tiempo actual

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	Área km2	%Área
Territorios artificiales	Zonas urbanizadas	Tejido urbano continuo	0,347946	0,421%
		Tejido urbano discontinuo	0,070711	0,086%
	Zonas de extracción minera y escombreras	Zonas de extracción minera	0,00389	0,005%
		Zonas de disposición de residuos		0,000%
Territorios agrícolas	Cultivos permanentes	Cultivos permanentes herbáceos	0,016121	0,019%
		Cultivos permanentes arbustivos	0,359732	0,435%
		Cultivos permanentes arbóreos	0,025858	0,031%
	Pastos	Pastos limpios	8,993143	10,878%
		Pastos arbolados	6,087751	7,364%
		Pastos enmalezados	0,682163	0,825%
		Pastos degradados	0,284051	0,344%
	Áreas agrícolas heterogéneas	Mosaico de cultivos	0,160083	0,194%
		Mosaico de pastos y Cultivos	0,757903	0,917%
		Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1,845676	2,232%
		Mosaico de pastos con espacios naturales	1,83846	2,224%
		Mosaico de cultivos con espacios naturales	0,175157	0,212%
	Bosque y áreas seminaturales	Bosques	Bosques densos	15,263083
Bosques abiertos			11,48139	13,888%
Bosque fragmentado			29,47582	35,653%
Bosque de galería o ripario			1,957714	2,368%
Espacios de vegetación herbácea y/o arbustiva		Herbazal		0,000%
		Arbustal	0,006224	0,008%
		Vegetación secundaria o en transición	1,071876	1,297%
Área abierta, sin o con poca vegetación		Zonas arenosas naturales	0,105249	0,127%
		Afloramientos rocosos	0,015663	0,019%
		Tierras desnudas y degradadas	0,547239	0,662%
	Zonas quemadas	0,027198	0,033%	
Superficies de agua	Aguas Continentales	Ríos	1,073643	1,299%
			82,673735	100,000%

Figura 18*Mapa de cobertura*

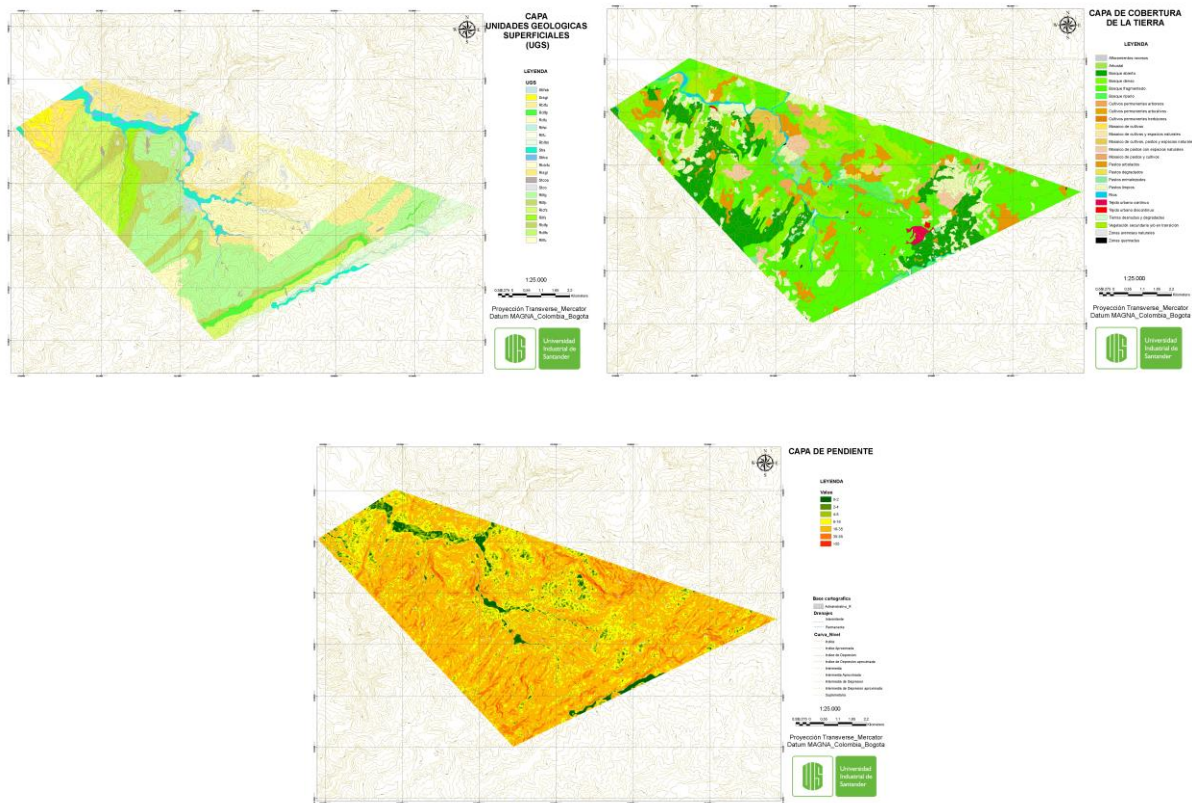
8.2 Análisis de Susceptibilidad

8.2.1 Unidad de Análisis

Para el caso del municipio Landázuri-Santander la unidad de análisis corresponde al tamaño de pixel del modelo digital de elevación (DEM) utilizado, el cual corresponde al modelo ALOS PALSAR de 12,5 m.

8.2.2 Alistamiento de la información

Se obtiene las capas ráster, teniendo en cuenta la resolución espacial y área de estudio (Figura 19); La capa de UGS se rasteriza por unidad definida; la capa de uso de cobertura y uso de suelos se rasteriza de acuerdo a la unidad de cobertura; y finalmente las capas de pendiente y curvaturas generadas a partir del DEM se rasterizan según la clase y categoría respectivamente.

Figura 19*Capa ráster de cada factor*

Nota. Capas utilizadas para el análisis de susceptibilidad.

8.2.3 Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento

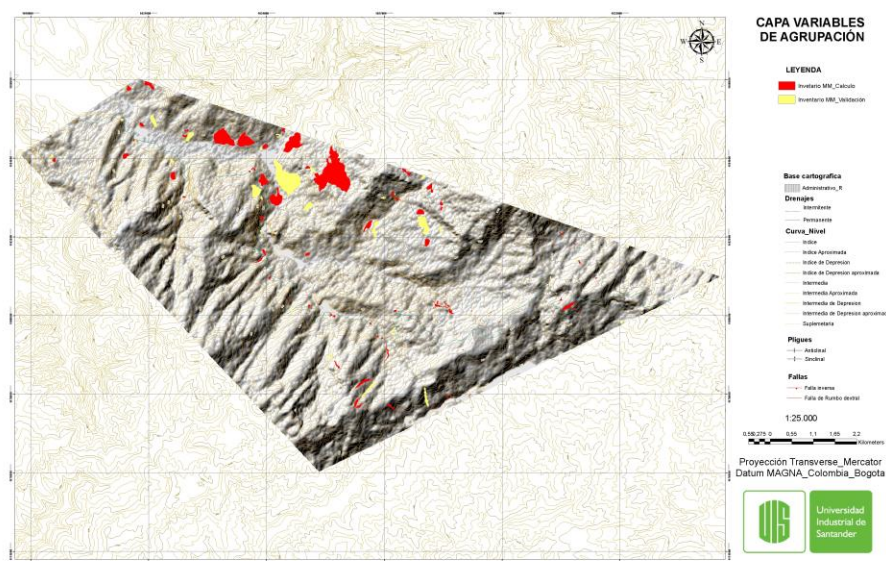
8.2.3.1 Variable de agrupamiento – inventario de movimientos en masa. La variable de agrupamiento se definió a partir de la uniendo de los polígonos correspondientes a las áreas de depósito y escarpes de cada movimiento, generado un polígono individual para cada movimiento en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado. Para los movimientos representados como punto, se realizó un buffer de 12,5 m.

El área deslizada corresponde a los movimientos tipo deslizamientos traslacionales, en cuña rotacional y flujos con un área total de 2,17 km² o 217.5 ha esto corresponde 13.94 Pixeles

de la zona de estudio (258594 Píxeles). Del área deslizada se escogió aleatoriamente el 70% de la muestra (9356 píxeles) para el cálculo de la función de susceptibilidad y el 30% de los movimientos en masa restantes (4588 píxeles) se utilizaron para la generación de la curva de validación de la función de susceptibilidad (Figura 20).

Figura 20

Capa ráster de la variable de agrupamiento



Nota. Variables de agrupamiento utilizadas en el análisis de susceptibilidad.

8.2.3.2 Hipótesis de falla. Se asocian la mayor densidad de movimientos en masa tipo deslizamientos y flujos con pendientes abruptas (16° - 35°), asociadas en su mayoría con unidades de roca blandas e intermedias, tales como rocas intermedias compuestas por lutitas de la formación Galembo y rocas intermedias heterogéneas del segmento intermedio y superior de la formación Umir. Estas zonas están asociadas a cobertura tales como bosques fragmentados. Las zonas de depósitos de movimientos están asociadas con zonas de cultivos. A demás se asocia el trazo de las

vías como factor antrópico que desestabiliza la ladera causando perdida de soporte generando movimientos tipo deslizamiento.

8.2.3.3 Factores condicionantes y peso de evidencia. A continuación en las Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10, se muestran los valores de peso de evidencia en términos de pixeles, las áreas de los movimientos en relación con las áreas de los factores condicionantes (pendiente, curvatura, unidad geológica superficial, cobertura y uso de la tierra). Cabe mencionar que cada capa se reclasifica según el Wf.

Tabla 7

Pesos de evidencia de la variable UGS

<i>UGS</i>	<i>MM(Pixel)</i>	<i>MM%</i>	<i>UGS(Pixel)</i>	<i>UGS%</i>	<i>Wf</i>
<i>Stf/ab</i>	22	0,101%	5088	0,615%	-1,83477417
<i>Sragr</i>	1	0,005%	7478	0,905%	-5,31908013
<i>Rblfu</i>	634	2,911%	104940	12,693%	-1,60248035
<i>Rdlfp</i>	9	0,041%	11478	1,388%	-3,55432262
<i>Rdfu</i>	1	0,005%	21494	2,600%	-6,3927075
<i>Rifst</i>	4	0,018%	6413	0,776%	-3,77718129
<i>Rifu</i>	518	2,378%	113675	13,750%	-1,90418515
<i>Rblfst</i>	24	0,110%	44890	5,430%	-3,97983708
<i>Stla</i>	8	0,037%	24734	2,992%	-4,45720761
<i>Stfca</i>	35	0,161%	9905	1,198%	-2,04284315
<i>Rblcfu</i>	108	0,496%	46936	5,677%	-2,51727687
<i>Riagr</i>	113	0,519%	23558	2,850%	-1,74958841
<i>Stcoa</i>	2049	9,408%	3329	0,403%	4,1774945
<i>Stco</i>	17651	81,042%	18754	2,268%	8,04413738
<i>Rilfg</i>	347	1,593%	182203	22,039%	-2,89187364
<i>Rilfp</i>	45	0,207%	46195	5,588%	-3,38017011
<i>Ricfs</i>	173	0,794%	94870	11,475%	-2,81253647
<i>Rilfs</i>	22	0,101%	18203	2,202%	-3,12913165
<i>Rblfp</i>	14	0,064%	9293	1,124%	-2,89761004
<i>Rdlfs</i>	1	0,005%	21293	2,576%	-6,38305509
<i>Rilfu</i>	1	0,005%	12005	1,452%	-5,79818124
	21780		826734		

Tabla 8

Pesos de evidencia de la variable Cobertura y Uso de Suelos

<i>Categorías de Cobertura y Usos</i>	<i>MM(Pixel)</i>	<i>MM%</i>	<i>Cobertura y Uso(pixeles)</i>	<i>Cobertura y Uso%</i>	<i>Wf</i>
<i>Bosque abierto</i>	443	2,034%	114823	13,888%	-2,0768482
<i>Ríos</i>	73	0,335%	10710	1,295%	-1,3820017
<i>Bosque ripario</i>	74	0,340%	19573	2,367%	-1,98559397
<i>Pastos arbolados</i>	4541	20,845%	60884	7,364%	1,25246051
<i>Bosque fragmentado</i>	5371	24,655%	294781	35,655%	-0,53971896
<i>Mosaico de cultivos y espacios naturales</i>	1	0,005%	1755	0,212%	-3,86221124
<i>Pastos limpios</i>	2408	11,053%	89923	10,877%	0,01860418
<i>Cultivos permanentes arbóreos</i>	1	0,005%	259	0,031%	-1,94365586
<i>Bosque denso</i>	1654	7,592%	152680	18,467%	-1,03350072
<i>Cultivos permanentes arbustivos</i>	1	0,005%	3591	0,434%	-4,58075299
<i>Mosaico de cultivos</i>	7	0,032%	1607	0,194%	-1,82393864
<i>Tierras desnudas y degradadas</i>	554	2,543%	5480	0,663%	1,44408146
<i>Tejido urbano continuo</i>	4	0,018%	3469	0,420%	-3,15872536
<i>Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales</i>	4648	21,336%	18462	2,233%	2,74300469
<i>Mosaico de pastos con espacios naturales</i>	495	2,272%	18379	2,223%	0,02299098
<i>Pastos enmalezados</i>	1	0,005%	6814	0,824%	-5,22546328
<i>Cultivos permanentes herbáceos</i>	1	0,005%	163	0,020%	-1,47817332
<i>Zonas arenosas naturales</i>	351	1,611%	1061	0,128%	2,92046043
<i>Mosaico de pastos y cultivos</i>	332	1,524%	7571	0,916%	0,53379855
<i>Zonas quemadas</i>	27	0,124%	273	0,033%	1,40101821
<i>Afloramientos rocosos</i>	23	0,106%	159	0,019%	1,83330508
<i>Tejido urbano discontinuo</i>	1	0,005%	706	0,085%	-2,94944971
<i>Arbustal</i>	1	0,005%	62	0,007%	-0,50132536
<i>Vegetación secundaria y/o en transición</i>	772	3,544%	10730	1,298%	1,07606391
<i>Pastos degradados</i>	1	0,005%	2836	0,343%	-4,34370104
	21785		826751		

Tabla 9*Pesos de evidencia de la variable Pendiente del terreno*

<i>Categorías de Pendientes</i>	<i>MM(Pixel)</i>	<i>MM%</i>	<i>Pendientes (píxeles)</i>	<i>Pendientes %</i>	<i>Wf</i>
<i>0-2°</i>	871	6,239%	12536	2,369%	1,05504971
<i>2-4°</i>	951	6,812%	7532	1,424%	1,73150599
<i>4-8°</i>	3400	24,355%	31274	5,911%	1,72781182
<i>8-16°</i>	6270	44,914%	120924	22,855%	1,04660799
<i>16-35°</i>	2313	16,569%	316798	59,875%	-2,06586757
<i>35-55°</i>	154	1,103%	39357	7,439%	-1,99938004
<i>>55</i>	1	0,007%	676	0,128%	-2,90771546
	13960		529097		

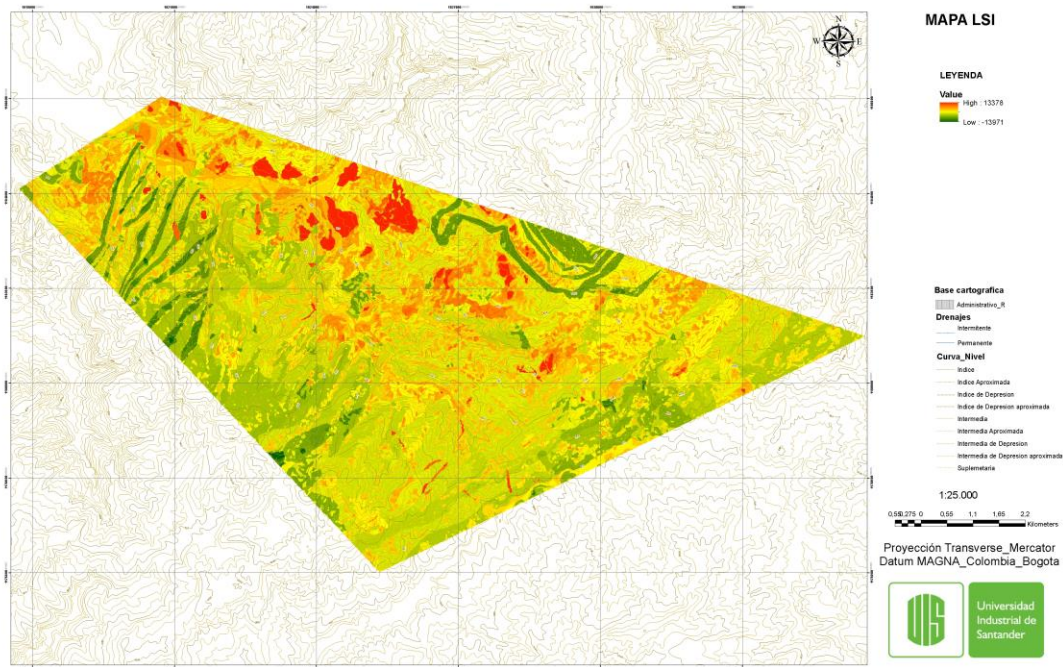
Tabla 10*Pesos de evidencia de la variable Curvatura*

<i>Categorías de curvatura</i>	<i>MM(Pixel)</i>	<i>MM%</i>	<i>Curvatura (píxeles)</i>	<i>Curvatura %</i>	<i>Wf</i>
<i>(-5) Muy convexo</i>	1	0,007%	102	0,019%	-1,00656661
<i>(-5 a -0.001) Convexo</i>	5401	38,706%	229501	43,376%	-0,19831934
<i>(-0.001 a 0.001) Plano</i>	3284	23,534%	62675	11,846%	0,85943223
<i>(0.001 a 5) Cóncavo</i>	5267	37,745%	236690	44,735%	-0,29662608
<i>(Mayor a 5) Muy Cóncavo</i>	1	0,007%	129	0,024%	-1,24352878
	13954		529097		

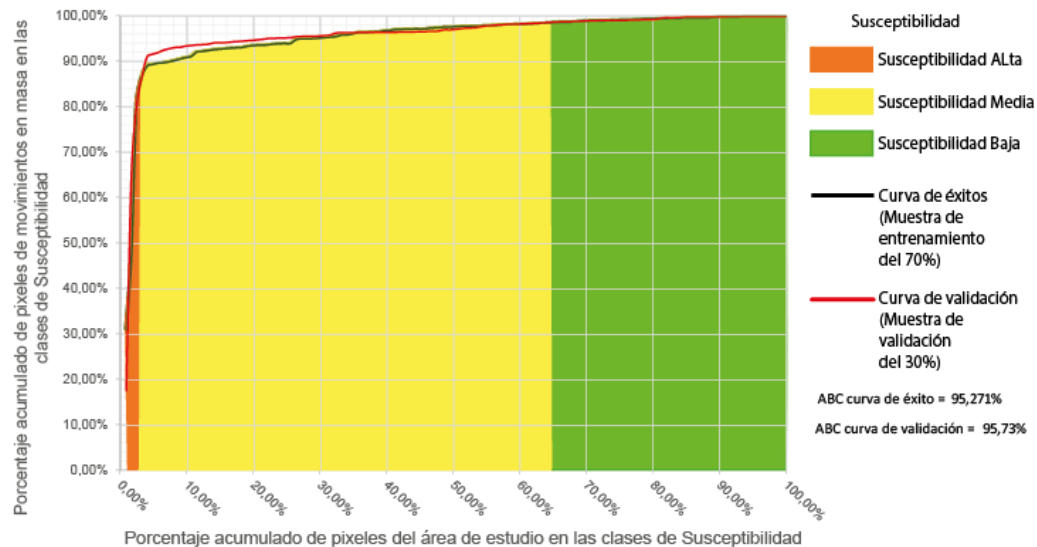
8.2.3.4 Cálculo de la función de susceptibilidad. A partir de la superposición de las capas reclasificadas se obtuvo el mapa de LSI mostrado en la Figura 21. Nótese que los valores más altos representan una mayor susceptibilidad a movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo no canalizado.

Figura 21

Mapa producto de la función de susceptibilidad



8.2.3.5 Curva de éxito y validación del modelo. Según SGC (2017), para establecer la calidad de ajuste de los datos se evalúa el área bajo la curva (ABC). Cuando más pronunciada sea la parte inicial de la curva y mayor el ABC, mejor será la capacidad de la función para describir los movimientos en masa. En este caso el área bajo la curva (ABC) de la curva de éxito corresponde al 95,2%, mostrando un buen ajuste del modelo a los datos, esto indica que las causas planteadas como hipótesis de falla son explicadas por la función calculada. En cuanto al ABC de la curva de validación corresponde al 95,7%, generando una diferencia entre las dos curvas del 0,5%. Lo cual muestra un buen ajuste de la modelación de susceptibilidad (Figura 22).

Figura 22*Curva de éxito y validación*

Nota. Curva de éxito y validación de la función de la susceptibilidad. Fuente: autores

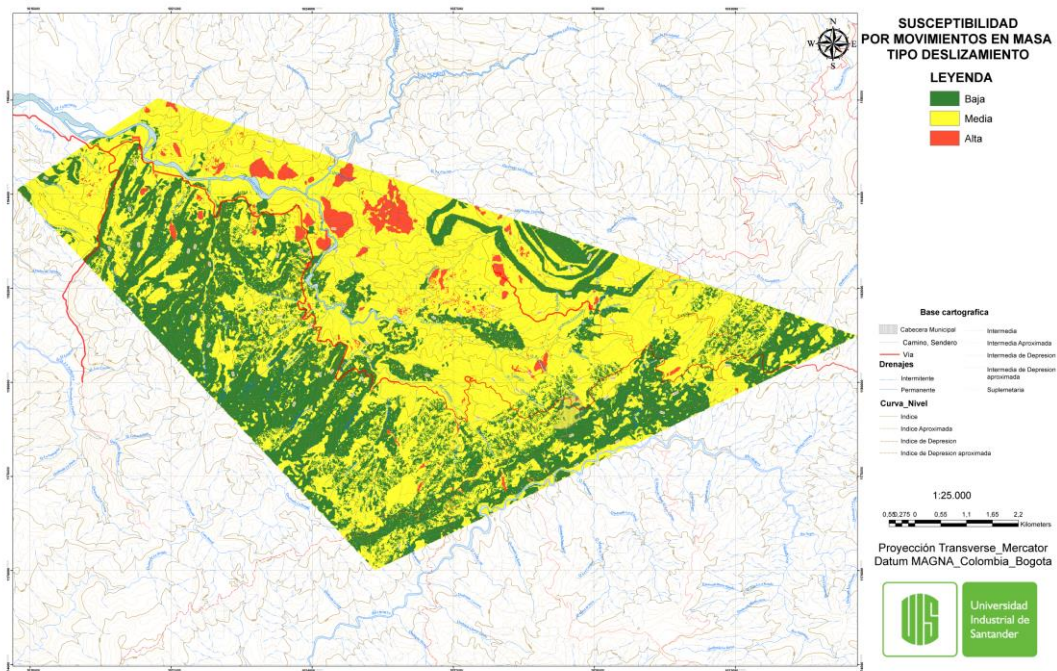
8.2.3.6 Categorización y Mapa de susceptibilidad por movimientos en más tipo deslizamiento. Según SGC (2017), se propone la siguiente categorización para el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento:

- Susceptibilidad Alta: porcentaje de todos los movimientos en masa >75%.
- Susceptibilidad Media: porcentaje de todos los movimientos en masa hasta el 25%.
- Susceptibilidad Baja: porcentaje de todos los movimientos en masa <2%.

Es así que se obtiene el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento mostrado en la Figura 23.

Figura 23

Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento



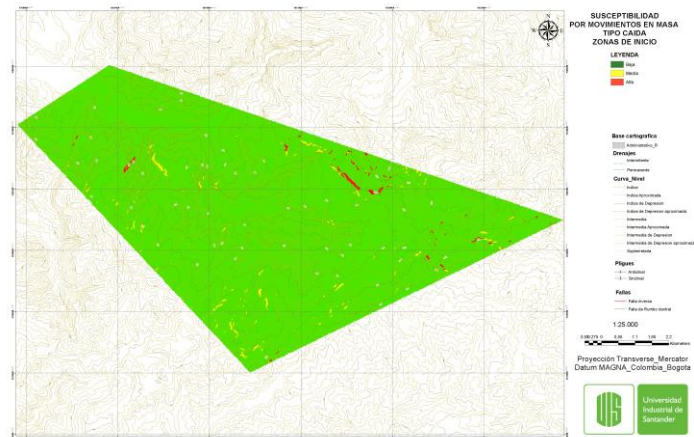
Nota. Revisar mas detalle en Apéndice J.

8.2.4 Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo caída

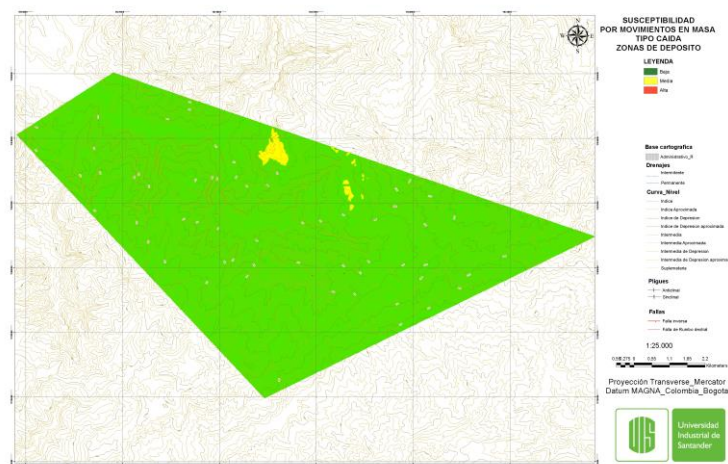
En la Figura 24 se observan las zonas de inicio fuente y en la Figura 25 se observan la zona de depósito. Al superponer estas dos capas y aplicando una matriz de cambio se obtiene el mapa de susceptibilidad por movimientos tipo caída.

Figura 24

Susceptibilidad por movimientos tipo caída en zonas de inicio

**Figura 25**

Susceptibilidad por movimientos tipo caída en zonas de deposito



8.2.4.1 Hipótesis de falla. En la zona de estudio se presentan geformas tales como la ladera escalonada con pendientes entre $35-55^\circ$ y mayores de 55° asociadas con zonas de inicio. Esta zona corresponde a macizos rocosos intermedios y de rocas duras, caracterizados por intercalaciones de lodolitas muy fisiles, limolitas y rocas más duras como Areniscas que en la zona se encuentran diaclasadas, presentes en los segmentos intermedios de la formación Umir.

Pendientes menores a 16° en esta misma geoforma se asocian con zonas de depósito. Geoformas como laderas erosivas, laderas de contrapendiente, sierra estructural, asociadas a pendientes de 45°, asociadas a las formaciones Salada, Pujamana y Galembó se asocian a zonas de inicio.

8.2.4 Categorización y Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo Caída

Según SGC (2017), la siguiente categorización para el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo Caída para zonas de inicio y zonas de depósito:

Tabla 11

Categorías de Susceptibilidad

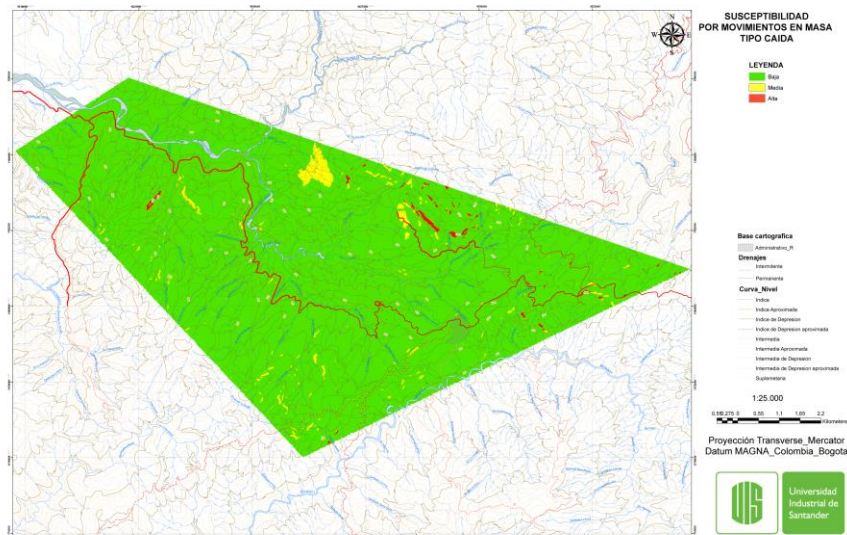
Clases o Categorías de Susceptibilidad	Descripción de criterios	
	Zonas fuentes o de inicio	Zonas de depósito
Alta	Zonas con pendiente mayor a 45°. Presencia de subunidades geomorfológicas indicativas. Macizos rocosos de mala y muy mala calidad.	Evidencias de zonas de depósito de procesos recientes.
Media	Zonas con pendientes mayores a 45°. Presencia de subunidades geomorfológicas indicativas. Macizos rocosos de regular calidad.	Evidencias geomorfológicas de zonas de depósito antiguas
Baja	Zonas con pendientes menores a 45°. No se encuentran subunidades geomorfológicas indicativas. Macizos rocosos de buena y muy buena calidad.	No hay evidencias geomorfológicas o registros de inventario de zonas de depósito de rocas por movimientos tipo caída.

Nota. Criterios para la categorización de zonas de inicio y depósito para movimientos tipo caída.

Teniendo en cuenta la Tabla 11, se obtienen el siguiente mapa de susceptibilidad por movimientos tipo caída (Figura 26).

Figura 26

Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa tipo Caída

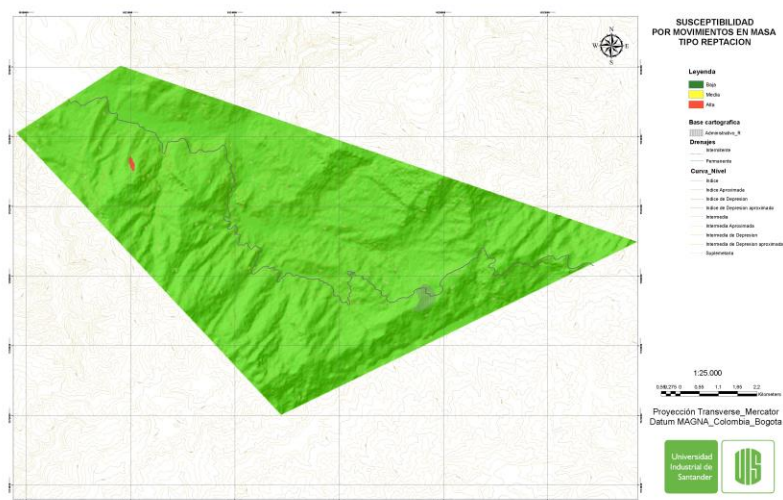


8.2.5 Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa tipo reptación

La Figura 27 muestra el único movimiento de reptación en la zona de estudio, ubicado al NW de casco urbano.

Figura 27

Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa tipo Reptación

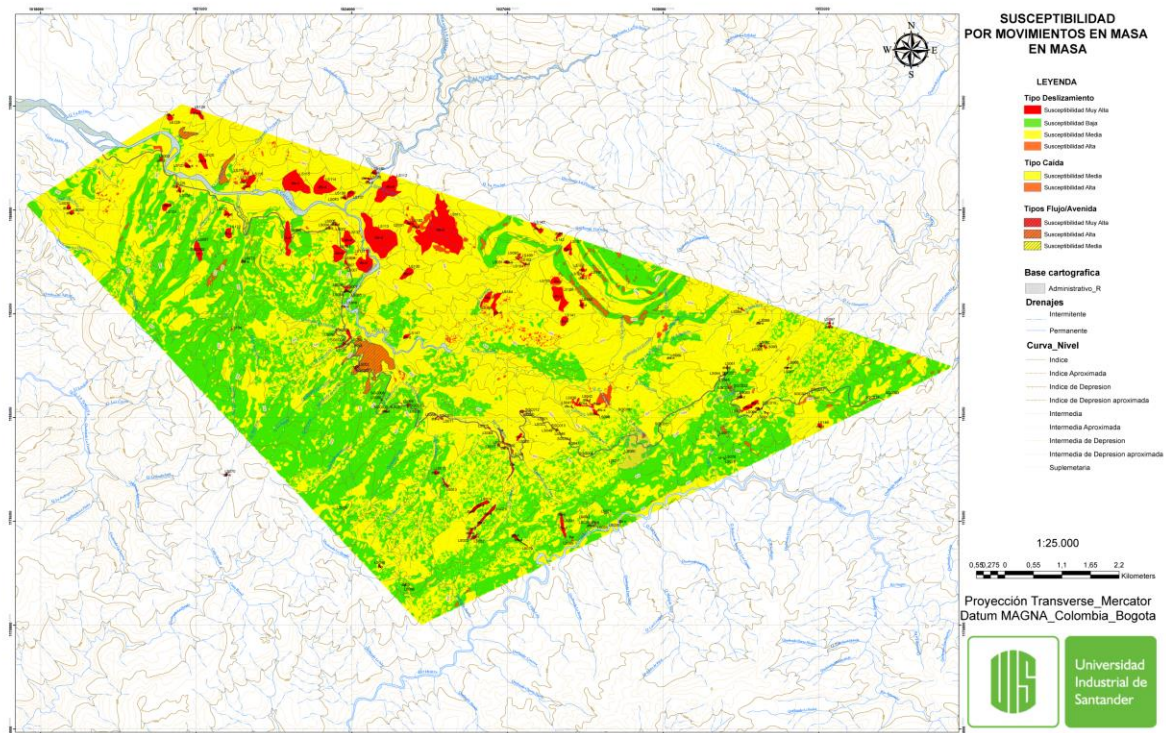


8.2.6 Mapas de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25000 para la zona sur del Municipio de Landázuri-Santander.

Para el mapa final se integra las todas las capas para el análisis de susceptibilidad de los movimientos tipo deslizamiento y flujo, Caída y Reptación, principales movimientos generados en la zona de estudio. La superposición y análisis tiene en cuenta la matriz de comparación entre zonas de susceptibilidad por diferentes tipos de movimiento expuesta en SGC (2017), comienza con la superposición y reclasificación de las capas de susceptibilidad a movimientos tipo deslizamiento y caída, continua la de flujo y finaliza con la de reptación. Obtener así, las categorías y mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa (Figura 28 y Figura 29).

Figura 28

Mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa



Nota. Para mejor resolución de imagen revisar el apéndice J.

Figura 29

Categorías de susceptibilidad para movimientos en masa escala 1:25000

CATEGORIAS DE SUSCEPTIBILIDAD	Descripción
MUY ALTA	<p>Ocupada el 2,7% del área total de estudio (2,23 km²). Incluye todos los movimientos en masa registrados y cartografiado, con un total de 164 movimiento (6 de tipo caída, 8 de tipo flujo, 1 de tipo reptación y su reactivación, 109 de tipo deslizamiento, más 40 de tipo indeterminado). Siendo los más frecuentes de tipo deslizamiento rotacional, traslacional planar.</p> <p>Susceptibilidad asociados a pendientes moderadamente inclinadas, abruptas y muy abruptas. Unidades de suelos transportados y a unidades intermedias y blandas en las formaciones Galembo y formación Umir (miembro intermedio). Subunidades geomorfológicas de tipo ladera estructural y de contrapendiente. Esta categoría se ubica principal eme en la vereda Aguachica, vereda Km-15, vereda Km-4, vereda San Pedro Centro, San Fernando, Santa Barbara, El Porvenir. En cuanto a movimientos antiguos la vereda con más procesos corresponde a la vereda Corinto y Vizcaínos.</p>
ALTA POR MOVIMIENTOS TIPO DESLIZAMIENTOS Y FLUJOS	<p>Ocupa el 2.9% del área de estudio, equivalente a 2.47 km² (24700 ha). Abarca el 87,3% (1,899 km²) del área deslizada, asociada a movimientos en masa tipo deslizamiento (0,120 km²), flujo (0.0080 km²) y movimientos antiguos o indeterminados (1.77 km²). Estos movimientos se presentan generalmente sobre laderas abruptas a muy abruptas. Geomorfológicamente se asocia a laderas estructurales y de contrapendiente, sierra estructural. Estructuralmente estos movimientos se asocian con sinclinales y anticlinales locales. Esta categoría está asociada a unidades geológicas superficiales de rocas de calidad mala e intermedia de lutitas calcáreas de la formación Galembo, roca intermedia heterogéneo del segmento intermedio y superior de la Formación Umir. La cobertura asociada a esta zona corresponde a pastos limpios, pastos arbolados, bosques fragmentados y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales. Asociados a usos como pastoreo, sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería. Ubicados en las veredas Aguachica, Aguablanca, Km 15, Corinto, Vizcaínos, El Porvenir y San Pedro Centro.</p>
ALTA POR MOVIMIENTOS TIPO CAIDA	<p>Corresponde al 0,36% (0,3 km²) del área de estudio, localizada principalmente en la vereda Corinto, La Victoria y en menor proporción en las veredas Borrascoso y San Pedro Centro. Geomorfológicamente estas áreas se relacionan con laderas escalonada, laderas de contrapendientes, con pendientes superiores a 45° asociadas a las zonas de inicio de este tipo de movimiento y se generan en macizos rocosos de mala e intermedia calidad principalmente de la formación Umir. La unidad de cobertura que predomina en estas áreas es de bosque denso y bosque abiertos. El uso principal corresponde a Producción y Protección.</p>

<p>MEDIA POR MOVIMIENTOS TIPO DESLIZAMIENTOS Y FLUJOS</p>	<p>Ocupa el 61,7% (50,869 km²) del área de estudio. Se extiende a lo largo de la zona de estudio, sin embargo, las veredas principales que contienen esta categoría corresponden a la vereda El Porvenir, Corinto, Vizcaínos, Aguachica y Km-4. Esta categoría abarca el 11,3% (0,2402 km²) del área deslizada. Se presenta en laderas con pendientes moderadamente abruptas (8° - 16°) a abruptas (16° - 35°) y muy abrupta (35°-55°) asociadas a rocas de mala calidad de lutitas carbonosos de la formación Umir, rocas de calidad mala y regula heterogéneas de la formación Umir, roca intermedia de lutitas calcáreas de la formación Galembó, roca intermedia de areniscas del Grupo Real, rocas intermedias de lutitas negras de la formación Simití. Las coberturas que predominan son bosques densos, fragmentados, abiertos, en menor medida pastos, mosaico de pastos, mosaicos de cultivos y vegetación secundaria. Los Usos principales corresponden a producción y protección, sistemas combinados de ganadería y forestería, y sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería.</p>
<p>MEDIA POR MOVIMIENTOS TIPO CAIDA</p>	<p>Ocupa el 1,572% (1,2987 km²) del área de estudio. Se localiza principalmente en las veredas Vizcaino, Corinto, San Pedro Centro, Chorolo, Aguachica, Aguablanca, La Victoria. Se asocia con pendientes suavemente inclinadas en zonas de depósitos antiguos y pendientes mayores de 45° para zonas de inicio. Relacionadas a subunidades geomorfológicas tales como laderas escalonadas, laderas erosivas, laderas de contrapendiente, sierra estructuras y escarpe de línea de falla. Asociadas a rocas de calidad regular de lutitas de la formación Pujamana, suelo transportado clasto-soportado de depósitos de gravedad y ladera inactivos, rocas de calidad regular lutitas calcáreas de la Formación Galembó y roca de calidad regular heterogénea (Tipo IV, areniscas y limolitas) de la formación Simití. En esta categoría predominan los bosques fragmentados, pastos arbolados, bosques densos, pastos limpios y bosques abiertos. El uso asociado a la protección-Producción, sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería, pastoreo semi-intensivo y sistemas combinados de ganadería y forestería.</p>
<p>BAJA</p>	<p>Ocupa el 35,4% (29,237 km²) del área de estudio. Comprende 1,265 % (0,0275 km²) del área deslizada, que incluye movimientos tipo deslizamiento (0,026 km²), flujos (0,001042 km²) y movimientos antiguos (0,000432 km²). Se distribuye principalmente en parte de las veredas Km-21, La Victoria, Las flores, Morales, El retiro y El estanquito. Las laderas de esta categoría tienen pendientes menores a 35° asociadas a rocas de regular calidad de calizas, lodolitas calcáreas de la Formación Salada, roca de calidad buena de caliza y lodolitas calcáreas de la formación Salada, roca de calidad intermedia de lutitas de la formación Pujamana. Suelo residual no cohesivo asociado areniscas del Grupo Real. La unidad de cobertura predominante corresponde bosque abierto, bosque fragmentado y bosque denso, con uso principal de protección-producción.</p>

9. Discusión

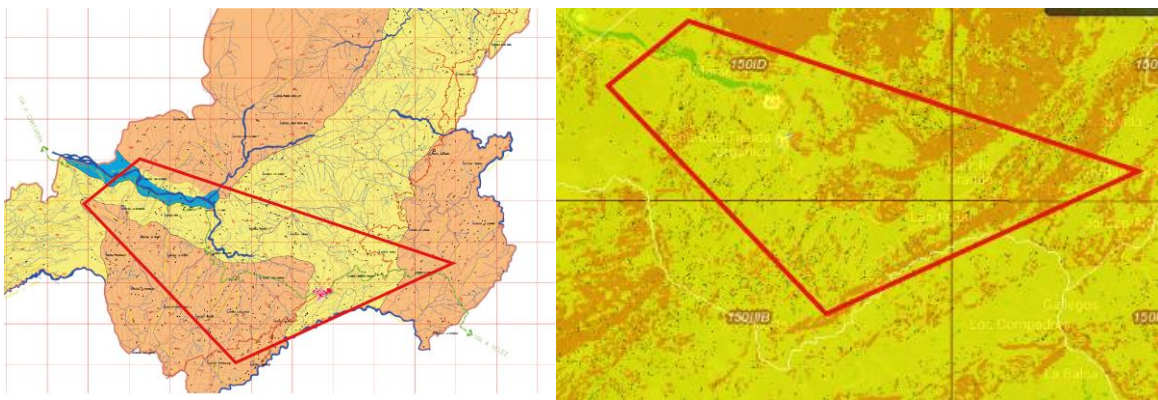
Relacionando el mapa de susceptibilidad a escala 1:75000 presente en el EOT (2003) (Figura 30) y el mapa de susceptibilidad en el presente proyecto a escala 1:2500 se establecen algunas diferencias a lo largo del área de estudio. En el EOT (2003), se destaca susceptibilidades bajas, a lo largo de toda la región norte del área de estudio, incluyendo las veredas El porvenir, San Pedro centro, Borrascoso, Corinto, Vizcaínos, San Fernando, Km 15, Quebrada Negra, Km 21, las cuales en la actualidad muestran susceptibilidades medias y altas principalmente asociados a movimientos en masa, esto, producto del análisis de procesos morfodinámicos donde el 50% de los movimientos registrados se encuentran en esta zona, sumado al análisis de variables tales como: geológicas asociadas a unidades de calidad mala y regular; geomorfológicas asociadas a unidades indicativas y pendientes moderadamente abruptas a muy abruptas; cobertura y uso del suelo asociados a bosques, cultivos, pastos y mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales.

El SIMMA en su página oficial permite visibilizar del mapa de susceptibilidad a escala 1:100000 SGC (2016) (Figura 30), que muestran susceptibilidades para la zona de estudio principalmente medias, corroborando los datos obtenidos en este proyecto y la necesidad de que esta área cuente con un seguimiento riguroso y estudios detallados de la zona y el municipio. En el EOT (2003) se menciona que las áreas consideradas con susceptibilidad moderada a fenómenos de erosión y remoción en masa, corresponden a zonas de mediano fracturamiento y meteorizadas, en donde los materiales son no consolidados y poco permeables. Tales zonas mencionadas se distribuyeron en la zona sur de área de estudio, y comparten con este proyecto áreas de susceptibilidad Media. Sin embargo, en el mapa actual se aportan susceptibilidades Bajas, Altas y Muy Alta en menor medida. Cabe mencionar que debido a la escala de trabajo del presente

proyecto se obtienen resultados más detallados, permitiendo un análisis más riguroso para las áreas más afectadas utilizando métodos cualitativos y cuantitativos que dan un muy buen grado de certeza al ser asertivos con la realidad de la zona.

Figura 30

Extracto mapa de susceptibilidad EOT (2003) y mapa de susceptibilidad plancha 150 SGC (2016)



Nota. A la izquierda se visualiza parte del mapa de susceptibilidad a escala 1:75000 EOT (2003), donde el color rosado representa susceptibilidad Medias y el amarillo susceptibilidad Baja. A la derecha se muestra parte del mapa de susceptibilidad a escala 1:100.000 de la plancha 150 SGC (2016), donde el color amarillo representa una susceptibilidad media y el anaranjado susceptibilidad Alta.

Se propone que un factor clave de inestabilidad corresponde al trazo de la vía Vélez-Landázuri-Cimitarra. El EOT (2003) menciona como uno de los factores de inestabilidad la forma de corte en los taludes a lo largo de estas vías, corte hecho de forma paralela a la inclinación de los estratos, haciendo de la vía un trazo propenso a movimientos en masa. Adicionalmente el 42% de los movimientos registrados se generaron en ladera adyacentes a las vías principales. Esto

sugiere que el trazo de la vía y los cortes de talud como factores de inestabilidad en la zona de estudio.

10. Conclusión

Se realizó la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25000 de un área al sur del municipio de Landázuri, siguiendo la metodología propuesta por el SGC (2017). Se encontraron niveles de susceptibilidades Muy Alta, Alta, Media y Baja para movimientos tipo deslizamiento, flujo, caída y reptación.

La susceptibilidad predominante corresponde a la categoría media (61,2% del área de estudio) para movimientos tipo deslizamiento y flujo, asociada a laderas con pendientes moderadamente abruptas ($8^\circ - 16^\circ$) abruptas ($16^\circ - 35^\circ$) y muy abrupta ($35^\circ - 55^\circ$), subunidades indicativas tales como ladera escalonada, ladera estructural y anticlinal de sierra sinclinal, UGS tales como roca intermedia de lutitas calcáreas de la formación Galembó, rocas de mala calidad de lutitas carbonosas de la formación Umir, rocas de calidad mala y regala heterogéneas de la formación Umir. Las coberturas principales corresponden a bosque densos, fragmentados y abiertos y pastos arbolados con usos de producción y protección.

Se encontraron y registraron un total de 164 movimientos, 109 de tipo deslizamiento, 6 de tipo caída, 8 de tipo flujo, 1 de tipo reptación, y 40 de tipo indeterminado. Los movimientos tipo deslizamientos corresponden a los movimientos más frecuentes en la zona de estudio (66%), seguido de los movimientos tipo Flujo (5%), Caída (4%), Reptación (1%) y los movimientos antiguos o indeterminados (24%). En cuanto al área ocupada, de las $82,6 \text{ km}^2$ que cubre el área de estudio del municipio de Landázuri, $0,283 \text{ km}^2$ corresponden al área de movimientos tipo deslizamientos, $0,041 \text{ km}^2$ corresponden a movimientos tipo flujo, $0,025 \text{ km}^2$ corresponden a

movimientos tipo caída, 0.040 km² y 1.844 km² corresponden a movimientos tipo reptación e indeterminados respectivamente. Para un total en área de 2.235 km².

Las veredas con mayor número de movimientos registrados corresponden a la vereda Aguachica con 20 movimientos, la vereda Vizcaínos con 14 movimientos, vereda Km-15 con 13 movimientos, vereda Km-4 con 12 movimientos, vereda San Pedro Centro con 12 movimientos en masa, vereda Corinto con 10 movimientos, San Fernando con 10 movimientos en masa, Santa Barbara con 9 movimiento, El Porvenir con 8 movimientos.

El trazado de la vía Vélez-Landázuri-Cimitarra representa un factor de inestabilidad debido al corte paralelo a inclinación de los estratos.

11. Recomendaciones

Este proyecto trabaja hasta la sección de susceptibilidad siguiendo SGC (2017). Por consiguiente, se recomienda tomara como insumos para estudios de zonificación de amenaza a movimiento en masa.

Se recomienda la generación de estudios geológicos, geotécnicos, factores erosivos, estudios temporales para cobertura y uso de suelos con el fin de determinar el grado de inestabilidad, además del análisis de factores detonantes como son las lluvias y la sismicidad, puestos que en ocurrencia de estos factores se generan más movimientos.

Debido a la disposición del trazo de las vías se recomienda implementar medidas de estabilización del talud y de protección de la vía, un monitoreo periódico del estado de los taludes y la vía, para detectar posibles problemas y tomar medidas preventivas.

Referencias

- Cruden, D. M. (1991). A Simple definition of a landslide: *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27–29. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Duarte, D. (2003). *Esquema de ordenamiento territorial del municipio de Landazuri*. Landazuri: Alcaldía municipal.
- Etayo-Serna, F. (2020). *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena* (Vol. 23). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Gómez, L. A., Lancheros, J. A., López, C., Patiño, A., Beltrán, A., Renzoni, G., & Guerra, A. (2008). *Cartografía geológica y muestreo geoquímico escala 1:100000 de la plancha 150-Cimitarra*. Bogotá: Ingeominas.
- IGAC. (2014). *Base cartográfica planchas 150ID, 150IIC, 150IIIB, 150IVA*. Obtenido de <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- INGEOMINAS. (2008). *Geología de la plancha 150-Cimitarra. Escala 1:100.000*. Bogotá: SGC.
- Pérez, R., Castro, J., García, H., Chaparro, J., Hernández, A., Sandoval, A., Ramírez, K., Reyes, A., Méndez, L., ... Uribe, F. (2019). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de San Eduardo – Boyacá. Escala 1:25.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p., 1 CD-ROM.

- Ruiz, G., Medina, D., Navarro, S., Rangel, M., Contreras, N., Sandoval, A., Ramírez, K., Murcia, C., Galindo, A., Reyes, A., Pérez, M. y Olivera, M. (2019). Zonificación de amenaza por movimientos en masa en la cuenca alta del Río Guamal – Meta. Escala 1:25.000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (2016). *Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 : plancha 150 - Cimitarra*. Bogota: Servicio Geologico Colombiano .
- SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. Bogota: Servicio Geologico Colombiano.
- SGC. (2018). *Mapa geomorfológico de la placaha 150-Cimitarra. Escala 1:100.000*. Bogota: Servicio Geologico Colombiano.
- UIS - Universidad Industrial de Santander, G. (2017). Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del municipio de Vélez, departamento de Santander.. Bucaramanga: Publucaciones Uis.
- Wheeler, O. C. (1929). *Report on the Palmira Series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama y La Paz Formations near the eastern part of De Mares Concession*. Informe Geológico 37, Ecopetrol.