



**Especialización en Prevención, Reducción y Atención de Desastres.**

**ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL SECTOR LAS MINAS, MUNICIPIO DE SANTACRUZ, DEPARTAMENTO DE NARIÑO, SW COLOMBIA.**

Isabella Andrade Sánchez



**Universidad<sup>®</sup>  
Católica  
de Manizales**

VIGILADA MINEUCACIÓN

*Obra de Iglesia  
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad  
*Dominicas de La Presentación*  
de la Santísima Virgen

# **ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL SECTOR LAS MINAS, MUNICIPIO DE SANTACRUZ, DEPARTAMENTO DE NARIÑO, SW COLOMBIA.**

Monografía presentada como requisito para optar al título de *Especializacista en Prevención, Reducción y Atención de Desastres.*

*Asesor*

MSc. Faber Mosquera Alvarez

*Autor*

Isabella Andrade Sánchez

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESPECIALIZACIÓN EN PREVENCIÓN, REDUCCIÓN Y ATENCIÓN DE  
DESASTRES  
MANIZALES, CALDAS  
2024

A mi padre, quien me dio las fuerzas para seguir creciendo profesionalmente,  
Mi madre siendo ejemplo de valentía y pasión,  
Mi hermana, quien siempre me acompaña en el camino del estudio.

## Agradecimientos

Agradeciendo primeramente a la Virgen de las Lajas por todo lo concedido a lo largo de estos meses y por ser el refugio de mis pensamientos en cada momento.

A mi asesor de monografía Faber Mosquera, quien fue de gran apoyo en su conocimiento de Gestión del Riesgo de Desastres para así poder desarrollar este proyecto que busca generar un mayor crecimiento en el sector Las Minas y en todo el departamento de Nariño,

Y, por último, a mis compañeros de la especialización quienes aportaron con un granito de conocimiento en mi crecimiento profesional, mil gracias eternamente.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	10
2.	Preliminares.....	11
	Planteamiento del problema.....	11
	Justificación.....	13
3.	Localización.....	14
4.	Objetivos.....	15
	Objetivo General.....	15
	Objetivos Específicos.....	15
5.	Marco de referencia.....	16
	Antecedentes.....	16
6.	Marco teórico.....	20
7.	Metodología.....	27
	ETAPA I Recopilación Bibliográfica.....	27
	ETAPA II Interpretación.....	27
	ETAPA III Preliminares.....	33
	Etapa IV Trabajo de Oficina.....	35
	ETAPA V Elaboración Documento Final.....	39
8.	Análisis y Discusion de resultados.....	40
	Identificar los factores detonantes y procesos morfodinámicos activos para la materialización de los movimientos en masa en el área de estudio.....	40
	Calcular el nivel de susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las Minas, municipio de Santa Cruz, departamento Nariño, mediante las siguientes variables: geología (lineamientos, fallas), geomorfología (análisis morfométrico) y procesos morfodinámicos. 45	
	Analizar los resultados obtenidos de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las Minas.....	56
9.	Conclusiones.....	59
10.	Recomendaciones.....	59
11.	Referencias.....	60
12.	Anexos.....	1

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Localización del municipio de Santa Cruz Guachavez. Fuente: Elaboración propia.....	14
Figura 2 Diagrama explicativo de las etapas a realizar en la monografía. Elaboración propia.....	27
Figura 3 Mapa de precipitación anual período 1994 - 2024. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos de pluviométricos del IDEAM .....	41
Figura 4 Mapa de precipitación máxima anual período 1994 - 2024. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos de pluviométricos del IDEAM .....	42
Figura 5 Mapa de cobertura de la tierra o uso del suelo. Fuente: Adaptado de IDEAM, 2018.....	43
Figura 6 Procesos morfodinámicos activos para los años 2017, 2019, 2023. Fuente: Elaboración Propia con base en: Imagen satelital de Google Earth.....	44
Figura 7 Geología Estructural Elaboración Propia a partir de Plancha 428 Tuquerres. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.....	46
Figura 8 Unidades Litológicas Elaboración Propia a partir de Plancha 428 Tuquerres. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.....	47
Figura 9 Mapa de pendientes para el área de estudio local. Fuente Elaboracion Propia.....	49
Figura 10 Histograma de frecuencia de pendientes del área local. Fuente Elaboracion Propia.....	50
Figura 11 Mapa Geomorfológico del área local. Fuente Elaboracion Propia .....	51
Figura 12 <i>Mapa de elementos calificados para cada variable selecciona en el cálculo de susceptibilidad. Fuente Elaboracion Propia .....</i>	54
Figura 13 <i>Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. Fuente Elaboracion Propia .....</i>	56
Figura 14 <i>Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa escala 1:100000. Fuente Servicio Geológico Colombiano.....</i>	57

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Reporte de Registros de Inventario Encontrado para el municipio de Santacruz. Fuente: SIMMA, DESINVENTAR .....	12
Tabla 2 Tipo de Estudio Básico según la clase de suelo. Fuente: Ley 388 de 1997.....	21
Tabla 3 Tipos de Movimientos en masa. Recuperado de SGC.....	22
Tabla 4 Descripción de estaciones pluviométricas tomadas para el análisis de detonantes.....	28
Tabla 5 Datos precipitación comprendiendo año 1994-2024. Fuente: IDEAM.....	29
Tabla 6 Calificación de los intervalos de lluvia máxima mensual promedio.....	30
Tabla 7 Unidades de cobertura terrestre de la Leyenda CLC 1:100000.....	31
Tabla 8 Calificación de los elementos de cobertura vegetal en la zona de estudio local .....	32
Tabla 9 Imágenes adquiridas y navegación en internet.....	33
Tabla 10 Valores de clasificación y tipo de procesos morfodinámicos identificados en la zona de estudio .....	33
Tabla 11 Clasificación de la Geología a partir de unidades geomorfológicas de la zona de estudio local.....	34
Tabla 12 Clasificación de las unidades geomorfológicas de la zona de estudio local .....	34
Tabla 13 Clasificación de la pendiente en porcentaje y sus valores asociados a la amenaza de movimiento en masa.....	35
Tabla 14 Clasificación del grado de susceptibilidad por movimiento en masa para pendiente.....	36
Tabla 15 Clasificación del grado de susceptibilidad por movimiento en masa para las unidades geomorfológicas.....	37
Tabla 16 Clasificación del grado de susceptibilidad por movimiento en masa para las unidades geológicas.....	37
Tabla 17 Escala de comparación de pares propuesta por Saaty. (1979).....	38
Tabla 18 Variación procesos morfodinámicos para los años 2017, 2019, 2023 .....	45
Tabla 19 Matriz de comparación de variables, Fuente: Elaboración Propia. ....	55
Tabla 20 Vectores propios para la matriz de comparación, Fuente: Elaboración Propia.....	55
Tabla 21 Vectores propios para la matriz de comparación, Fuente: Elaboración Propia.....	55

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Área de estudio sector Las Minas. Elaboración Propia.....	1
Anexo 2 Mapa de precipitación anual período 1994 - 2024. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos de pluviométricos del IDEAM .....	2
Anexo 3 Mapa de precipitación máxima anual período 1994 - 2024. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos de pluviométricos del IDEAM .....	3
Anexo 4 Mapa de cobertura de la tierra o uso del suelo. Fuente: Adaptado de IDEAM, 2018.	4
Anexo 5 Geología Estructural Elaboración Propia a partir de Plancha 428 Tuquerres. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.....	5
Anexo 6 Unidades Litológicas Elaboración Propia a partir de Plancha 428 Tuquerres. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.....	6
Anexo 7 Mapa Geomorfológico del área local. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres. ....	7
Anexo 8 Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. Fuente Elaboracion Propia .....	8

## RESUMEN

El sector las Minas se encuentra ubicado en el municipio de Santacruz (Guachavez), esta zona se ha caracterizado por presentar eventos de remosion en masa a lo largo de los años, en el cual se presento un evento en el año 1988 accionado por las fuertes precipitaciones que se presentaron, en donde se perdieron 7 vidas humanas, viviendas y vías en total afectación, ademas de la información recopilada por DESINVENTAR y SIMMA desde los años 2004-2017.

Teniendo en cuenta que el presente estudio tiene como finalidad zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa en el sector las Minas, a escala 1:25000, donde se obtuvieron los resultados identificándose zonas con susceptibilidad baja a alta, en la zona norte del área de estudio predomina una susceptibilidad de media-alta.

Donde mediante las variables de análisis que se asignaron tales como: geología, geomorfología, procesos morfodinámicos, pendientes, de los cuales las tres (3) ultimas variables descritas anteriormente obtuvieron un mayor peso al momento de realizar el respectivo calculo a partir del geoprocasamiento con el sistema de Información Geografico mediante la calculadora Raster esto a partir de la metodología heurística AHP.

Esta investigacion servira como insumo principal para la siguiente etapa como es la zonificacion de la amenaza en el área de estudio, teniendo en cuenta lo desarrollado en el primer objetivo planteado.

Finalmente los resultados obtenidos para la zonificacion en el área de estudio son los siguientes:

**Susceptibilidad media:** en la zona de estudio se presenta una susceptibilidad media que se encuentra en un rango de 3,0171 - 3,3452 con un área de 4902 Ha, ubicándose en la parte norte del sector Las Minas.

**Susceptibilidad baja:** en la zona de estudio se presenta una susceptibilidad baja que se encuentra en un rango de 2,1833 - 2,6891 con un área de 6098 Ha, ubicándose en la parte sur del sector Las Minas.

**PALABRAS CLAVE:** zonificación, susceptibilidad, movimientos en masa, AHP,

# 1. Introducción

Inicialmente los fenómenos de origen natural o antrópico no intencionales, como inundaciones, sismos, movimientos en masa o deslizamientos, avenidas torrenciales, son unos de los más influyentes en causar pérdidas humanas, incluyendo los costos de reparación a nivel cultural, social y económico.

En la actualidad se evidencia la importancia de realizar la evaluación de la susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo por cualquier tipo de evento que se presente, ya que es uno de los temas de mayor interés en cuanto a nivel investigativo, como también social, cultural y económico como lo había dicho anteriormente, es por eso que la siguiente monografía tiene como objetivo aportar al conocimiento de diferentes elementos metodológicos y técnicos para así conocer la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las minas, municipio de Santacruz de Guachaves, departamento de Nariño.

Para el desarrollo de este proyecto se tienen las siguientes etapas de las cuales se debe dar cumplimiento para obtener los resultados esperado: recopilación bibliográfica e información secundaria, seguidamente de la interpretación de Ortofoto, imágenes satelitales esto para realizar un análisis multitemporal e identificar los diferentes procesos morfodinámicos que se han presentado, en la etapa de preliminares se adjuntaran los respectivos mapas geológicos, geológico- estructural y geomorfología recopilados de las Planchas 428 y 429 de Tuquerres y Pasto respectivamente, posteriormente se procederá a realizar el trabajo de oficina donde se integraran los datos implementándose la metodología para hacer la respectiva zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, finalmente, se efectuara un análisis y posteriormente las conclusiones y recomendaciones.

## 2. Preliminares

### Planteamiento del problema

Teniendo en cuenta que el planeta Tierra se encuentra en constante cambio y movimiento, por lo tanto, se presentan diversos procesos terrestres, tales como: inundaciones, sismos, tsunamis, incendios forestales, movimientos en masa o fenómenos de remoción en masa.

Los movimientos en masa, también conocidos como deslizamientos, derrumbes, movimientos de remoción en masa y volcanes; entre otras denominaciones, son en términos generales el desplazamiento de suelo, roca y/o tierra ladera abajo por acción de la fuerza de gravedad. Aunque tienen diferentes clasificaciones, se pueden agrupar en cinco tipos básicos de movimientos, estos son: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral y flujos. (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2020)

Las causas de los movimientos en masa intervienen en diferente medida factores naturales como la cobertura del suelo, la pendiente del terreno, las características intrínsecas de los materiales, la lluvia y la actividad tectónica. En Colombia las lluvias intensas y/o prolongadas son el principal detonante de estos eventos. Sin embargo, también están influenciados por factores antrópicos como el uso inadecuado del territorio. (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2020)

En Colombia los movimientos en masa han sido de especial atención debido a los efectos que han tenido sobre la población y la infraestructura. Según el (Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), 2018), millones de hectáreas del territorio, son susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa y de acuerdo con los registros del Sistema de Información de Movimientos en Masa - SIMMA del SGC, desde 1900 hasta 2019, en el país se reportaron 16.969 movimientos en masa siendo el departamento de Antioquia el que mayores eventos presentó seguido por Cauca y Cundinamarca. Muchos de estos deslizamientos han sido detonados por las fuertes lluvias o actividad sísmica.

Dicho anteriormente existen programas como SIMMA - Sistema de Información de Movimientos en Masa, captura la información de los deslizamientos, reptación, flujo, caída entre otras, donde profesionales expertos en el tema realizan la cartografía existente, DesInventar es un programa en el cual también se obtiene información de eventos que se han materializado indicando de esta manera la afectación desde en vidas humanas, hasta en infraestructura.

De igual manera es importante mencionar que en el área de estudio, se han presentado eventos de mayor relevancia como en el año 1988 donde se presentó un deslizamiento de gran magnitud accionado por las fuertes precipitaciones y favorecido por la fuerza de gravedad en zonas de alta pendiente, donde el material se desplazó varios kilómetros, teniendo la pérdida de siete vidas humanas, como también afectación en viviendas, de acuerdo a la información recopilada actualmente existe información sobre relacionada al análisis de Susceptibilidad por movimientos

en masa del oriente del municipio de Santa Cruz el cual abarca corregimientos como: Manchag, Santa Rosa, Píramag y Balalaica en una escala de 1:25000. (CORPONARIÑO, 2021).

Tabla 1 Reporte de Registros de Inventario Encontrado para el municipio de Santacruz. Fuente: SIMMA, DESINVENTAR.

TIPO DE MOVIMIENTO	FECHA EVENTO	VEREDA
Deslizamiento	19/01/2017	Santacruz
Deslizamiento	10/05/2016	Santacruz
Deslizamiento	12/12/2013	Santacruz
Deslizamiento	04/12/2013	Santacruz
Deslizamiento	23/11/2010	Píramag
Caída	16/04/2009	Santacruz
Deslizamiento	24/04/2008	Manchag
Deslizamiento	10/04/2008	Santacruz
Deslizamiento	09/04/2008	Santacruz
Deslizamiento	12/04/2006	Santacruz
Deslizamiento	13/05/2004	Santacruz

Debido a lo anteriormente expuesto, se evidencia una baja investigación a detalle relacionada con la susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las Minas, municipio de Santa Cruz Guachavez, departamento de Nariño. En base a lo anteriormente dicho se proyecta esta monografía, considerando que se cuenta con la información secundaria como geología, geomorfología regional, estudios de amenaza por movimientos en masa Planchas 428 Tuquerres, Plancha 429 Pasto. Finalmente, este proyecto busca incrementar el conocimiento en cuanto a temas relacionados directamente con la Gestión del Riesgo de Desastres frente a fenómenos como movimientos en masa.

#### **PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN:**

¿Cuáles son las zonas con mayor susceptibilidad y variables que inciden en su ocurrencia en el sector Las Minas, municipio Santacruz Guachavez?

## Justificación

Esta investigación servirá como instrumento para la implementación de estudios de zonificación por susceptibilidad a movimientos en masa para municipios tanto de la región Abades como también de manera general en el departamento de Nariño, adicionalmente es un insumo principal en cuanto a la planificación territorial en la sección de estudios básicos para la gestión del riesgo.

De manera regional el departamento de Nariño se encuentra ubicado en la región Andina y Pacífica, por su geomorfología, geología, geología estructural y procesos geodinámicos presenta una alta susceptibilidad a movimientos en masa. Por tal razón es necesario la realización de estudios que tienen como objetivo la zonificación de susceptibilidad, los cuales permiten la toma oportuna de decisiones para el ordenamiento territorial y diferentes medidas prospectivas y correctivas que sean adecuadas para la mitigación del escenario.

Para la presente monografía, se cuenta con información primaria y secundaria, como la Plancha de geología 428 y 429 de Nariño, geomorfología regional, análisis geológico local, geomorfológico local, además del software adecuado en el tema de Sistemas de Información Geográfica – SIG para llevar a cabo el respectivo análisis de susceptibilidad.

Este proyecto permitirá mejorar las condiciones de conocimiento de la parte de susceptibilidad, teniendo en cuenta las diferentes variables que influyen en la materialización de estos eventos, permitiendo así dar a conocer a las comunidades ante que se están enfrentando, además de ser un insumo primordial para los entes gubernamentales tanto del municipio, como guía a municipios aledaños, para la actualización del plan de Ordenamiento Territorial en el capítulo de estudios básicos para la Gestión del Riesgo.

### 3. Localización

Santacruz se encuentra ubicado al sur occidente de Nariño, a una distancia de 108 Km. de Pasto, sus coordenadas geográficas: Latitud norte 1º 18' 16" longitud oeste de Greenwich 77º 42'. La altura promedio es de 2800m sobre el nivel del mar, su temperatura promedio es de 14°C la superficie total del municipio es de 527 Km cuadrados en cuatro pisos térmicos.

#### Límites:

- **NORTE:** Municipio de Samaniego
- **SUR:** Municipio de Sapuyes
- **ORIENTE:** Municipio de Tuquerres y Providencia
- **OCCIDENTE:** Municipio de Mallama y Ricaurte

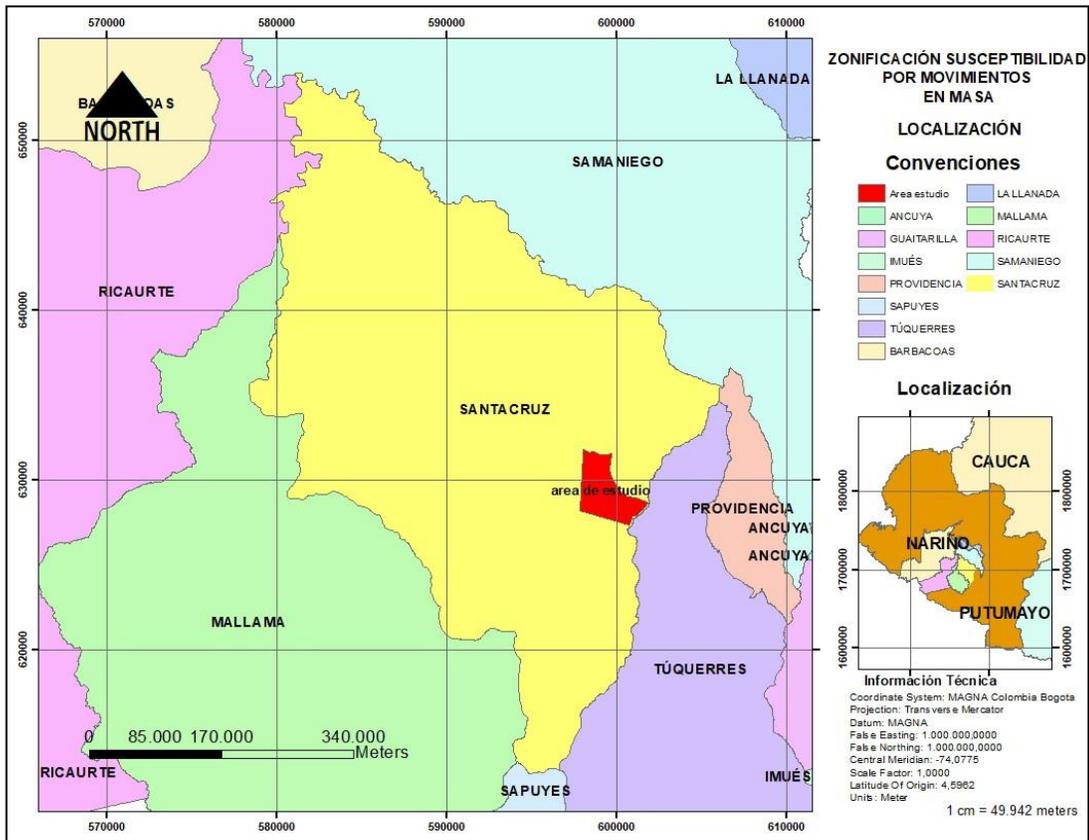


Figura 1 Mapa de Localización del municipio de Santa Cruz Guachavez. Fuente: Elaboración propia

## 4. Objetivos

### Objetivo General

Determinar la susceptibilidad por movimientos en masa en el Sector Las Minas, municipio de Santa Cruz, departamento Nariño, SW Colombia.

### Objetivos Específicos

- Identificar los factores detonantes y procesos morfodinámicos activos para la materialización de los movimientos en masa en el área de estudio.
- Calcular el nivel de susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las Minas, municipio de Santa Cruz, departamento Nariño, mediante las siguientes variables: geología (lineamientos, fallas), geomorfología (análisis morfométrico), procesos morfodinámicos.
- Analizar los resultados obtenidos de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las Minas.

## 5. Marco de referencia

### Antecedentes

#### **MEMORIA EXPLICATIVA DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000 PLANCHA 428 - TÚQUERRES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO.**

En este documento se presenta la memoria explicativa del Mapa de Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza Relativa por Movimientos en Masa generado para la plancha 428 - Túquerres, la cual hace parte del proyecto Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000; con él se busca mejorar la resolución de los productos existentes generados por el Servicio Geológico Colombiano y el IDEAM, en el año 2010, cuando se actualizó el Mapa Nacional de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, a escala 1:500.000 y a partir del cual se definieron las zonas de mayor amenaza para estudios a escalas más detalladas. (Servicio Geologico Colombiano (SGC), 2015)

La plancha 428 se localiza en el sector suroccidental del país y cubre parte del departamento de Nariño, donde se localizan parte de los municipios de Guachucal, Sapuyes, Túquerres, Mallama (Piedrancha), Santa Cruz (Guachavés), Ricaurte, Pupiales, Providencia, Samaniego, Cumbal y Barbacoas. La zona donde se localiza el área de trabajo se encuentra sobre la cordillera Occidental al occidente de la depresión Cauca - Patía. (Servicio Geologico Colombiano (SGC), 2015)

#### **DETERMINANTES AMBIENTALES PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO, SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS SECTOR ESTE DEL MUNICIPIO (CORREGIMIENTOS DE MANCHAG, SANTA ROSA, PIRAMAG Y BALALAICA).**

Estudio de CORPONARIÑO- Corporación Autónoma Regional de Nariño Subdirección de conocimientos y evaluación ambiental - SUBCEA. Estudio de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa del municipio de Santacruz de Guachavez. Escala 1:25000. Se dan a conocer el tipo de medidas a implementar por el municipio, de manera preventiva se tiene que dar a conocer las zonas de susceptibilidad a través de estrategias de comunicación, evitar el sobrepastoreo y actividades agrícolas en las zonas de mayor afectación. En cuanto a medidas correctivas es informar sobre la restricción para ocupar zonas de susceptibilidad muy alta, alta y media, además de la estabilización de taludes susceptibles a sufrir deslizamientos activos. (CORPONARIÑO, 2021)

#### **LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT: SUMMARY REVIEW AND NEW PERSPECTIVES.**

Este artículo presenta una revisión resumida y una clasificación de los principales enfoques que se han desarrollado en todo el mundo. El primer paso es la subdivisión entre

métodos cualitativos y cuantitativos. El primer grupo se basa principalmente en la experiencia de expertos en lugares específicos, con la susceptibilidad/peligro determinado directamente sobre el terreno o combinando diferentes mapas de índices. Los enfoques del segundo grupo son formalmente más rigurosos. Es posible distinguir entre análisis estadísticos (bivariados o multivariados) y métodos deterministas que implican el análisis de lugares o laderas específicos basados en modelos de geoingeniería. Estos análisis pueden ser deterministas o probabilísticos. Entre los métodos cuantitativos analizados se encuentra el enfoque de redes neuronales, que sólo se ha aplicado recientemente a los problemas de ingeniería geológica. Por último, se presentan varias consideraciones sobre el concepto de riesgo aceptable y la gestión del riesgo. (Aleotti & Chowdhury, 1999)

#### **LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ZONING NORTH OF YENICE (NW TURKEY) BY MULTIVARIATE STATISTICAL TECHNIQUES.**

“Generalmente, estos estudios incluyen la identificación y localización de los deslizamientos. El principal beneficio es proporcionar una base para los estudios estadísticos de zonificación de susceptibilidad. En el presente estudio, se lleva a cabo una zonificación de la susceptibilidad a los corrimientos de tierras cerca de Yenice (noroeste de Turquía) utilizando el enfoque del análisis factorial. El ángulo de la pendiente, la elevación, el aspecto de la pendiente, el uso del suelo, la profundidad de meteorización y las condiciones del agua se consideraron los principales factores condicionantes, mientras que las fuertes precipitaciones son el principal desencadenante de los deslizamientos. En la zona de estudio, el valor de pertenencia más bajo para la susceptibilidad a los corrimientos de tierras se calculó en 0,20. En consecuencia, combinando todos los resultados, se obtuvo un mapa de susceptibilidad a los deslizamientos. En comparación con el mapa obtenido, una gran mayoría de los deslizamientos (86%) identificados en el campo se encontraban en zonas susceptibles y altamente susceptibles”. (ERCANOGLU, GOKCEOGLU , & VAN ASCH, 2003)

#### **MASS MOVEMENTS SUSCEPTIBILITY MAPPING BY USING HEURISTIC APPROACH. CASE STUDY: PROVINCE OF TÉTOUAN (NORTH OF MOROCCO).**

“El objetivo de este trabajo de investigación es modelizar la susceptibilidad a los movimientos en masa (MM) en la provincia de Tetuán. En primer lugar, identificamos las características y la cartografía espacial de los diferentes tipos de MMS (colapso, flujos de lodo y deslizamientos complejos) mediante la interpretación de imágenes de satélite y a partir del trabajo de campo. Posteriormente, seleccionamos los parámetros predictivos que controlan la aparición de los MM, como la litología, el uso del suelo, la densidad de las fallas, la densidad de la red hidrográfica, los grados de inclinación, los aspectos de las pendientes y la elevación. Se utilizó el método heurístico de modelización de la susceptibilidad a los movimientos en masa (MMMS). La elección de este método frente a otros (fractal, factorial y neuronal) se justifica por las posibilidades de intervención y el juicio del experto que se basa en la verdad del terreno para seleccionar los parámetros, identificar las clases y asignar los pesos a cada una; a diferencia de

otros métodos con pasos que se realizan de forma automática y aleatoria. Los resultados de la validación del mapa de susceptibilidad corresponden al 70% en comparación con los datos de campo e incluye cinco clases de susceptibilidad (no susceptible, baja, moderada, alta y muy alta)” (Meryem & Lahcen, 2021) esto obtenido según estos autores.

De hecho, la originalidad de este trabajo radica en el hecho de que la creación de nuestro mapa de susceptibilidad indicará con el tiempo las zonas de carreteras, viviendas, ampliación de la urbanización y presas, que se encuentran en zonas de riesgo de MM. “Nuestro mapa es también una poderosa herramienta de toma de decisiones para llevar a cabo planes de gestión y orientar la selección de emplazamientos para construir nuevos proyectos, lo que ayuda a mitigar los impactos socioeconómicos que suelen producirse cuando se desencadenan movimientos en masa en la provincia de Tetuán”. (Meryem & Lahcen, 2021)

### **ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DEL RÍO NUEVO PRESIDENTE, CORREGIMIENTO LAS MERCEDES - SARDINATA Y MUNICIPIO DE TIBÚ EN EL DEPARTAMENTO NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA.**

“El presente estudio tiene la finalidad de analizar la susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Nuevo Presidente, Corregimiento Las Mercedes, Sardinata y Municipio de Tibú en el Departamento Norte de Santander, a escala 1:25000, donde con los diferentes resultados obtenidos se identifica una zona con aparente estado de inestabilidad por la parte alta y media baja de la cuenca, y en la parte baja de la cuenca se evidencia poca susceptibilidad debido a que cuenta con una topografía plana, de igual manera se identificó falta de estos insumos en los instrumentos de planificación. Por otra parte, se verificaron los factores condicionantes, con un análisis detallado del geoprocesamiento con los Sistema de Información Geográfico - SIG, a partir de la metodología heurística AHP por sus siglas en inglés (Analytic Hierarchy Process) Con la metodología AHP y la escala 1:25000 aumento el detalle de los factores condicionantes como las unidades geológicas superficiales, geomorfológica, cobertura vegetal permitiendo aumentar la calidad de análisis, una limitante para el cálculo es la baja cantidad de movimientos en masa por la escala, sin embargo, los resultados obtenidos determinan las conclusiones para los municipios afectados en Gestión de Riesgo de Desastre”. (Paz Molina, 2021) de acuerdo al trabajo realizado para analizar la susceptibilidad.

### **ANÁLISIS DE LA AMENAZA, Y VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA EN LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA MONSERRATE, EN EL MUNICIPIO SANTA ROSA DE CABAL – RISARALDA.**

“Santa Rosa de Cabal, por su ubicación, características topográficas, geológicas geomorfológicas y demás factores tanto intrínsecos como externos hace que este territorio sea susceptible a generar movimientos en masa. Es así como en el área que comprende la Microcuenca Monserrate se observan un número considerado de movimientos en masa activos y otros pocos inactivos, que demuestra la alta susceptibilidad que presenta a movimientos en masa. Es de

resaltar que esta microcuenca se ubica muy cerca al límite urbano del municipio y se proyecta como zona de expansión de esta; la planeación municipal en la actualidad es deficiente y antigua, razón por la cual no se dimensiona los peligros geológicos y los posibles daños potenciales para las comunidades asentadas actualmente en el territorio y para los desarrollos urbanísticos futuros”. Según (Álzate,, 2021)

### **ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS DE MASA DEL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE "BERLÍN" Y EL TANQUE DE ABASTECEDOR "TEJARES" DEL ACUEDUCTO DE VILLA MARÍA (CALDAS).**

El estudio realizado por (Tapasco, 2021) tiene como propósito:

“Desarrollar el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa de la línea de conducción del acueducto del municipio de Villamaría, correspondiente al tramo localizado entre la planta de tratamiento “Berlín” y el primer tanque abastecedor “Tejares” localizado en el sector que tiene el mismo nombre. Para establecer la susceptibilidad del tramo ya mencionado, inicialmente se realizó la búsqueda de antecedentes e información del área de estudio, con el fin de determinar si en la zona anteriormente han ocurrido movimientos en masa o existen procesos erosivos activos. Posteriormente se realizó un recorrido de campo durante el cual se identificaron las características de la zona respecto a unidades geológicas y geomorfológicas, adicionalmente se establecieron los puntos críticos o susceptibles a movimientos en masa. En la etapa final se elaboró el mapa de susceptibilidad frente a movimientos en masa para el tramo comprendido entre la planta de tratamiento “Berlín” y el tanque abastecedor “Tejares”, para elaborar dicho mapa se usaron como insumo los mapas de geología, geomorfología, pendientes y uso del suelo; a partir del mapa de susceptibilidad y con la información obtenida durante las diferentes etapas de la investigación fue posible determinar el tipo de proceso presente en la zona y realizar recomendaciones tanto de tipo correctivo como prospectivo que permitan la prevención y mitigación de los movimientos en masa y de los efectos que pueden tener estos en la infraestructura del acueducto municipal. Adicional a ello, los resultados obtenidos proporcionan un insumo para los estudios específicos 10 de riesgo que debe desarrollar tanto la administración municipal como la empresa prestadora del servicio”.

## 6. Marco teórico

Para tener un mejor desarrollo del proyecto mediante la búsqueda bibliográfica se obtuvieron distintos conceptos que ayudan a comprender la temática de estudio, también para afianzar las actividades que se pretenden desarrollar para así lograr la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las Minas, municipio de Santacruz.

Inicialmente mediante conceptos básicos se pretende dar a conocer información de suma importancia para esta monografía, como se presenta a continuación:

### **Gestión del Riesgo de Desastres**

Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y la promoción de una mayor conciencia de este. De igual manera, busca impedir o evitar que el riesgo se genere, reduciéndolo o controlándolo cuando ya existe, así mismo para prepararse y manejar las situaciones de desastre, y la posterior recuperación (entendida como rehabilitación y reconstrucción) post-desastre. (Gestor Normativo, 2012)

### **Ordenamiento territorial**

El ordenamiento territorial es un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal, tendiente a lograr una adecuada organización político administrativa del estado en el territorio, para facilitar el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial, entendido este como desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambientalmente y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico, culturalmente pertinente, atendiendo a la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia. (Gestor Normativo, 2011)

### **Estudios de detalle**

En el artículo 189 del Decreto - Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones.

### **Artículo 2°. Estudios técnicos para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial.**

Teniendo en cuenta el principio de gradualidad de que trata la Ley 1523 de 2012, se deben realizar los estudios básicos para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial o la expedición de nuevos planes y en su ejecución se deben realizar los estudios detallados.

**Artículo 5°. Escala de trabajo.** De conformidad con las clases de suelo establecidas en la Ley 388 de 1997, los estudios se elaboran, como mínimo, en las siguientes escalas: (Gestor Normativo, 2014)

Tabla 2 Tipo de Estudio Básico según la clase de suelo. Fuente: Ley 388 de 1997

TIPO DE ESTUDIO	CLASE DE SUELO	ESCALA
<b>Estudio Básico</b>	Urbano	1:5.000
	Expansión Urbana	1:5.000
	Rural	1:25.000
<b>Estudio Detallado</b>	Urbano	1:2.000
	Expansión Urbana	1:2.000
	Rural Suburbano	1:5.000

### **Susceptibilidad**

La susceptibilidad se entiende como la predisposición de un lugar a presentar determinados fenómenos amenazantes, estas condiciones del terreno son intrínsecas, como por ejemplo la geología, la pendiente, la precipitación, entre otras. Aunque se espera que los movimientos en masa ocurran con más frecuencia en la mayoría de las zonas susceptibles, en los análisis de susceptibilidad, no se tiene en cuenta el tiempo de recurrencia (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC).)

### **Movimientos en masa**

Los movimientos en masa, también conocidos como deslizamientos, derrumbes, movimientos de remoción en masa y volcanes; entre otras denominaciones, son en términos generales el desplazamiento de suelo, roca y/o tierra ladera abajo por acción de la fuerza de gravedad. Aunque tienen diferentes clasificaciones, se pueden agrupar en cinco tipos básicos de movimientos, estos son: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral y flujos. (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2020)

Las causas de los movimientos en masa intervienen en diferente medida factores naturales como la cobertura del suelo, la pendiente del terreno, las características intrínsecas de los materiales, la lluvia y la actividad tectónica. En Colombia las lluvias intensas y/o prolongadas son el principal detonante de estos eventos. Sin embargo, también están influenciados por factores antrópicos como el uso inadecuado del territorio. (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2020)

## Tipos de movimientos en masa

El ingeniero Hutchinson contribuyó de manera significativa al desarrollo de la terminología de los movimientos en masa a través de sus clasificaciones publicadas en 1968 y 1988, con aplicación principalmente en el ambiente alpino y glaciar del medio europeo. En la clasificación de 1988, su interés se centró en interpretar los procesos en cuanto a sus rasgos geológicos y geomorfológicos y su aplicación en análisis geotécnicos, y contribuyó a la comprensión de procesos de inestabilidad de escala regional asociados a hundimientos profundos de montañas (sagging) en las laderas de las montañas en Europa, Norteamérica y otras regiones. Posteriormente, colaboró con Cruden & Varnes (1996) al desarrollo más reciente sobre la terminología y caracterización de los deslizamientos –publicado en inglés–, y con Hungr y su grupo canadiense (2001) en una tarea similar relacionada con los movimientos en masa del tipo flujo.

Tabla 3 Tipos de Movimientos en masa. Recuperado de SGC.

<b>A</b>	<b>Rebote (rebound)</b>	Movimientos asociados con excavaciones antrópicas.
		Movimientos asociados con erosión de valles.
<b>B</b>	<b>Creep</b>	Superficial, predominantemente estacional o creep del manto superficial.
		Profundo, continuo o de masa.
		Prefalla o creep progresivo
		Prefalla o creep progresivo
<b>C</b>	<b>Hundimientos profundos de laderas de montañas (Sagging of mountains slopes)</b>	Asociados con la etapa inicial de un deslizamiento.
		Asociados con la etapa inicial de deslizamientos dobles que permiten la expansión y el hundimiento en el centro de la montaña
		Asociados con volcamiento múltiple
<b>D</b>	<b>Deslizamientos (Landslides)</b>	Fallas confinadas en taludes: naturales y hechos por el hombre.
		Rotacionales: único, sucesivo y múltiple
		Compuestos: liberado por cizallamiento interno en materiales moderadamente frágiles o muy frágiles y con mecanismo progresivo.
		Traslacionales: láminas, lajas, turba, rocas (planar, escalonado, cuña), detritos y fallas por propagación repentina.
<b>E</b>	<b>Movimientos de detritos del tipo flujo (Debris movements of flow-like form)</b>	Flujo de lodo (no periglacial).
		Flujo de lodo periglacial (geliflucción de arcillas)
		Deslizamientos tipo flujo (Flowslide).
		Flujos de detritos
		Avalanchas de rocas (Sturzstroms)
<b>F</b>		Delimitados por discontinuidades preexistentes.

	<b>Volcamientos (Topples)</b>	Liberados por fallas de tensión en la parte superior de una masa
<b>G</b>	<b>Caídas (Falls)</b>	Primaria, que involucra la roca desalojada inicialmente (rocas y suelos).
		Secundaria, involucra el material caído previamente, que se desprende desde otro sitio
<b>H</b>	<b>Movimientos complejos de taludes (Complex slope movements)</b>	Combaduras y pandeos o abultamientos de valles (Cambering and valley-bulging).
		Movimientos de laderas del tipo Bloque (Block-type slope movements).
		Acantilados o farallones de arcilla abandonados (Abandoned clay cliffs)
		Deslizamientos que irrumpen en la pata de deslizamientos de lodo o flujos (Landslides breaking down into mudslides or flows at the toe)
		Deslizamientos causados por erosión asociada a filtración (Slide caused by seepage erosion)
		Deslizamientos en varios niveles (Multi-tiered slides)
Deslizamientos de varios pisos (Multi-storeyed slide).		

### Métodos de Zonificación

Para los mapas de zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa existe una relación estrecha entre los siguientes factores que se consideran determinantes (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC).):

- El propósito de la zonificación (información, Planes de ordenamiento territorial)
- El nivel de zonificación (Básico, Intermedio y Avanzado)
- La escala de zonificación.

### MÉTODO HEURÍSTICO

Conocido como “método geomorfológico subjetivo” (PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS (PMA: GCA), 2007). Este método se fundamenta en categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de movimientos en masa. Es un método conocido como indirecto, los resultados se pueden extrapolar a zonas sin movimientos en masa con una combinación de factores similar (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC).)

Para los modelos heurísticos, se utilizan las opiniones de expertos para estimar el potencial de deslizamientos a partir de datos de las variables independientes del lugar. El diseño de este tipo de modelos requiere un análisis exhaustivo de los factores causales y su relación en el área de estudio (Castellanos, 2008).

Los resultados del modelo dependen fuertemente de la experiencia y los conocimientos de los investigadores, incluso más que en las evidencias de campo y los datos; sin embargo, es el

único enfoque posible para deslizamientos causados por diferentes mecanismos (Ruff, 2008). Las áreas de amenaza se clasifican por términos tales como "muy alta", "alta", "moderada", "baja" y "muy baja" (Castellanos, 2008) Aunque la cartografía geomorfológica detallada es esencial, esta técnica permite la valoración cualitativa a la susceptibilidad a deslizamientos para grandes áreas en un tiempo relativamente corto (M. Van Den Eeckhaut, 2010)

La escala de susceptibilidad siempre es subjetiva y se debe indicar en una leyenda especial en el mapa de terreno. En este método es clave la experiencia del geomorfólogo (PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS (PMA: GCA), 2007) debido a este grado de subjetividad no se pueden comparar documentos producidos por diferentes autores.

Dentro de este método se ha utilizado el denominado AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) que consiste en un método semicualitativo que involucra una comparación por pares realizada por los expertos a partir de una matriz de atributos o variables que contribuyen a los movimientos en masa. Se pueden realizar dos tipos de análisis heurísticos mediante el análisis geomorfológico y mapa de combinación cualitativo. Estos métodos permiten la regionalización o estudio a escala regional y son adecuados para aplicaciones en el campo de los sistemas expertos (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC).)

#### **Análisis Geomorfológico.**

Es un método para producir un mapa combinado de amenaza basado en el mapeo de testigos mudos; este método se conoce como método directo puesto que la amenaza se determina directamente en el campo por los expertos. Se basa en la experiencia individual y el uso de razonamiento por analogía (*reasonings analogy*) atributos semejantes en cosas diferentes. Las reglas de decisión son entonces difíciles de formular a causa de que varía de lugar a lugar (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC).)

#### **Mapa de Combinación Cuantitativa.**

Para evitar el problema de reglas ocultas propias del mapeo geomorfológico se usan métodos basados en la combinación de mapas cualitativos. En estos mapas los científicos de la tierra usan su experiencia para asignar pesos en una serie de mapas de parámetros. Las condiciones del terreno de un gran número de sitios se suman de acuerdo con estos pesos para obtener valores de amenaza que se puedan agrupar en clases. Sobre la base de su conocimiento en las causas de la inestabilidad se asignan pesos para diferentes clases o número de mapas de parámetros. El problema con este método es la determinación exacta de los pesos de manera que puedan ser replicables. A menudo si no hay datos suficientes de campo se pueden llegar a hacer generalizaciones inaceptables (SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC).)

## MÉTODO ESTADÍSTICO UNIVARIADO

El modelamiento cuantitativo estadístico univariado, utiliza como variable independiente el mapa de densidad de procesos morfodinámicos, el cual se aplica donde se tiene un buen registro de movimientos en masa actuales y pasados. En este método se determina el peso o fragilidad que cada unidad de terreno tiene hacia la generación de movimientos en masa. Las unidades de terreno consideradas para el modelamiento en el SIG son básicamente: geología, geomorfología, coberturas terrestres, pendientes, rugosidad, relieve relativo y curvatura. (INGEOMINAS – CVC, 2001)

Este método de zonificación de susceptibilidad se basa principalmente en identificar y determinar cuantitativamente el grado de influencia que cada variable o factor intrínseco, tiene en la generación de los movimientos en masa cartografiados. El peso o grado de influencia que cada factor interno del terreno tiene sobre la generación de los movimientos en masa, se determina calculando la sumatoria de las áreas de cada tipo de movimiento en masa que se encuentren dentro de las áreas que abarca cada unidad cartográfica de parámetro, así:

$$WW = DZDD/S$$

Dónde:

W= Peso o susceptibilidad de la unidad respecto al movimiento en masa analizado.

DZDD= Superficie acumulada de movimiento en masa de tipo DD ( $m^2$ ) que hay sobre la unidad.

S= Superficie total de la unidad ( $m^2$ ).

Los rangos de susceptibilidad se definen con base en un análisis estadístico de dispersión mediante el ajuste de los datos a una curva de distribución normal para todos los mapas índice, según el tipo de proceso. El máximo de las curvas indica la categoría media, a partir de la cual se seleccionan los rangos desde nula a muy alta. Estos rangos pueden ajustarse según el criterio del profesional a cargo cuando se haga la validación de lo obtenido en el procesamiento comparado con la realidad vista en el campo (INGEOMINAS – CVC, 2001)

## MÉTODO ESTADÍSTICO BIVARIADO

En los análisis estadísticos de amenaza por movimientos en masa se combinan factores que han generado los movimientos en masa en el pasado y que se pueden determinar de forma estadística. De esta manera se hacen predicciones cuantitativas para áreas libres de movimientos en masa donde existen condiciones similares (SGC, 2013).

En el análisis estadístico bivariado cada factor condicionante (como la geología, la geomorfología, la pendiente, la rugosidad, el relieve relativo y la cobertura terrestre), se combina con la frecuencia de los movimientos en masa y se calculan valores ponderados de densidades de

movimientos en masa para cada clase, por lo tanto, en menor área acumulada de susceptibilidad se encuentra un mayor porcentaje de movimientos en masa. (Chalkias, 2014)

Para este método, específicamente denominado método de proporción de la frecuencia (frequency ratio method), método del índice estadístico (The statistical index method) o de información ponderada, la evaluación de la susceptibilidad involucra tres pasos:

- El inventario de movimientos en masa.
- El mapeo de los parámetros más significativos (factores condicionantes) en la distribución espacial de los movimientos y su análisis.
- La definición de los pesos relativos a cada factor asociado a la localización de movimientos en masa. (CORANTIOQUIA - EAFIT, 2015)

Este método asigna un valor de peso determinado  $W_i$  a cada clase de parámetro, por ejemplo, una unidad geológica o una unidad geomorfológica. Van Westen (1997) define el valor  $W_i$  como el logaritmo natural de la densidad de deslizamientos dentro de la clase, dividido por la densidad de deslizamientos en general en todo el mapa. A continuación, se presenta la expresión utilizada para la calificación de las unidades al interior de los diferentes factores. (CORANTIOQUIA - EAFIT, 2015)

$$WW = \ln \left( \frac{Densclas}{Densmap} \right) = \ln \left( \frac{N_{pix}(S)}{\sum N_{pix}(S)} \right) \cdot \frac{N_{pix}(N)}{\sum N_{pix}(N)}$$

$WW$  = Ponderación dado a determinado parámetro de clase (ejemplo, tipo de roca).

$Densclas$  = Densidad de los deslizamientos dentro del parámetro de clase.

$Densmap$  = Densidad de los deslizamientos dentro del todo el mapa.

$N_{pix}(S)$  = Número de pixeles que contienen deslizamientos dentro de un determinado parámetro de clase.

$N_{pix}(N)$  = Número total de pixeles y un determinado parámetro de clase.

## 7. Metodología

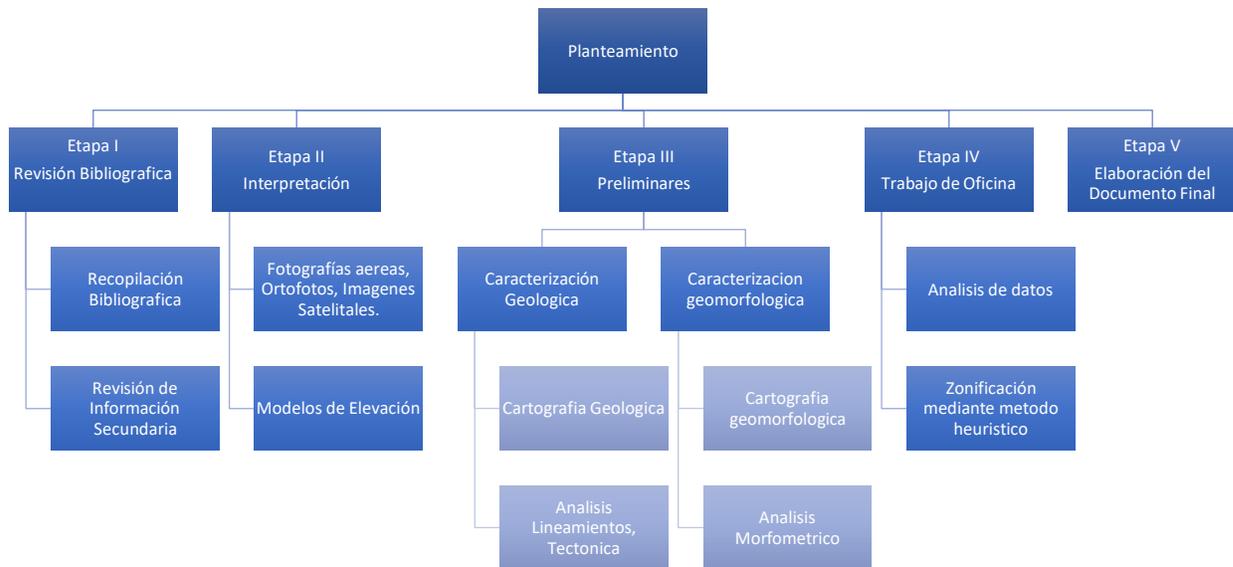


Figura 2 Diagrama explicativo de las etapas a realizar en la monografía. Elaboración propia.

El presente trabajo de carácter descriptivo-aplicado, debido a los análisis geológicos, caracterización, teniendo en cuenta la identificación geológica, geomorfológica, identificación de procesos morfodinámicos, factores detonantes entre otros, donde principalmente se analizará la susceptibilidad que presenta el sector Las Minas ante un fenómeno amenazante como es en este caso los movimientos en masa.

### ETAPA I Recopilación Bibliográfica

Inicialmente se apoyará en información basada en la revisión y análisis de la literatura existente sobre la geología local, geología estructural, geomorfología regional y local, además de antecedentes históricos en el área. Se analizarán distintos trabajos e inclusive desde el Plan de Ordenamiento territorial, Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres, Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Finalmente, se recolectará bibliografía de normatividad donde establece las condiciones que deben cumplir y como realizar la zonificación de susceptibilidad ante movimientos en masa.

### ETAPA II Interpretación

Mediante la recolección de fotos aéreas, Ortofoto e imágenes satelitales para realizar el respectivo análisis desde la identificación geológica, geomorfológica e identificación de procesos morfodinámicos que permitirá la comparación y determinación de los cambios sobre el terreno

en un intervalo de tiempo definido de 6 años (2017-2023), donde se efectuará el análisis de los principales factores detonantes de los eventos presentados.

## **FACTORES DETONANTES**

Los factores detonantes a evaluar en este estudio para el cálculo de la susceptibilidad por movimiento en masa en el sector Las Minas, son la precipitación, cobertura del suelo y análisis multitemporal de procesos morfodinámicos

### ○ **PRECIPITACIÓN**

Para calcular una aproximación de la precipitación media anual en el área de estudio se realizó inicialmente el análisis de la precipitación se realizó a partir de datos de pluviosidad mensual obtenidos para los últimos 30 años en un periodo comprendido desde el 1994 al 2024. Se contó con información de 4 estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio, para la elaboración del mapa detonante por este factor se utilizaron estas mismas estaciones ubicadas en: Vivero Linares, Samaniego, El Paraíso, Sande.

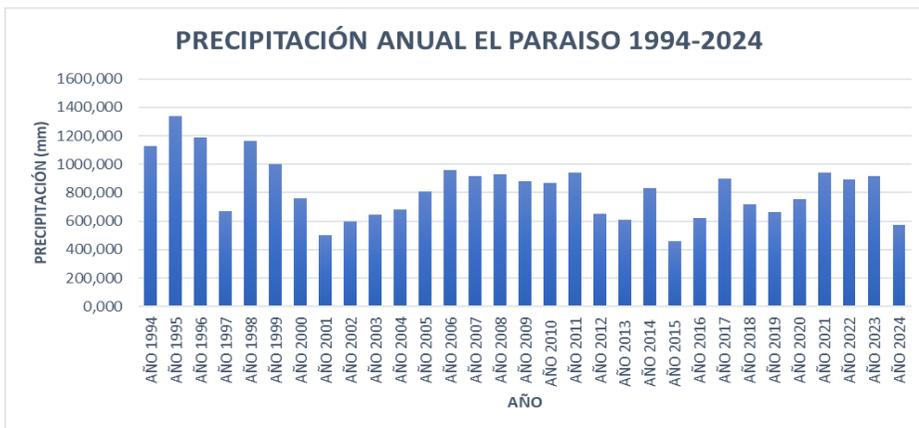
Inicialmente, se solicita la información mediante la plataforma de acceso libre IDEAM, encontrando entonces, una disponibilidad de datos multianuales con frecuencia mensual, donde se acoto el análisis en los años anteriormente dichos. Posterior al acceso a los datos, se clasificaron los años y precipitaciones para realizar un comparativo anual de meses de criticidad en cuanto a altas precipitaciones reflejando los siguientes resultados:

Tabla 4 Descripción de estaciones pluviométricas tomadas para el análisis de detonantes.

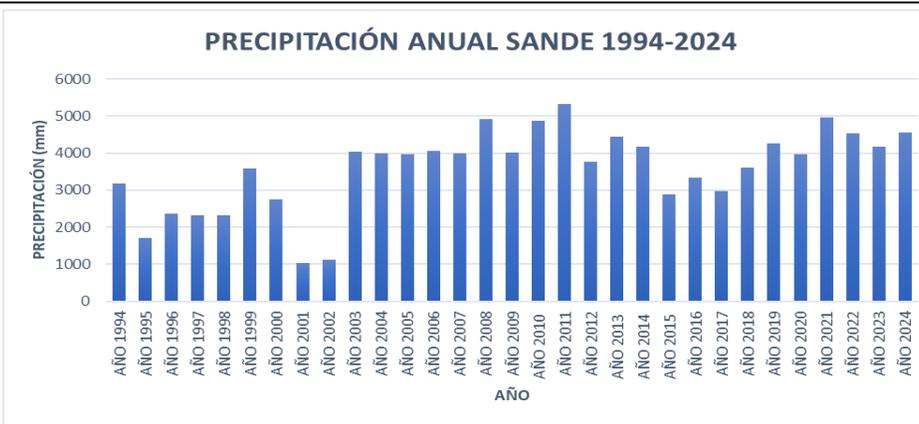
<b>Cód. Estación</b>	<b>Nombre estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Institución</b>	<b>Periodo</b>
<b>52055220</b>	<b>EL PARAISO</b>	1,0707	-7,7636	<b>IDEAM</b>	1994-2024
<b>52060050</b>	<b>EL SANDE</b>	1,4047	-7,7777	<b>IDEAM</b>	1994-2024
<b>52050140</b>	<b>VIVERO LINARES</b>	1,3481	-7,7526	<b>IDEAM</b>	1994-2024
<b>52050020</b>	<b>SAMANIEGO</b>	1,3414	-7,7591	<b>IDEAM</b>	1994-2024

Tabla 5 Datos precipitación comprendiendo año 1994-2024. Fuente: IDEAM.

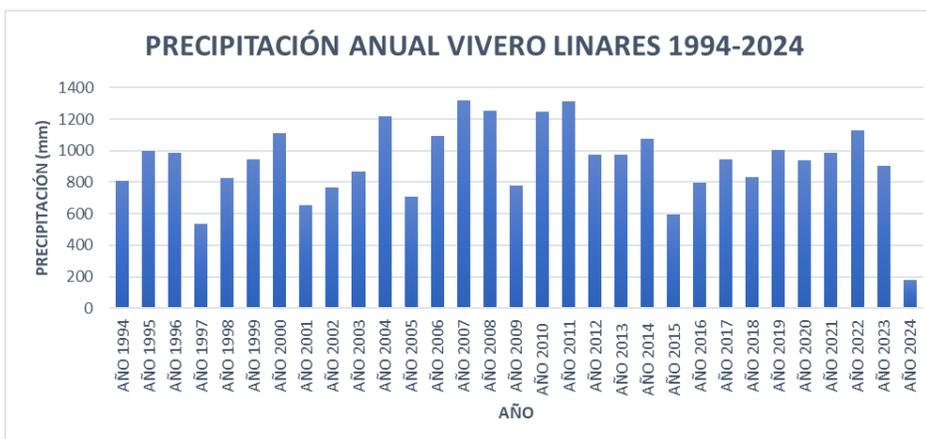
**ESTACIÓN EL PARAISO – MUNICIPIO TUQUERRES**



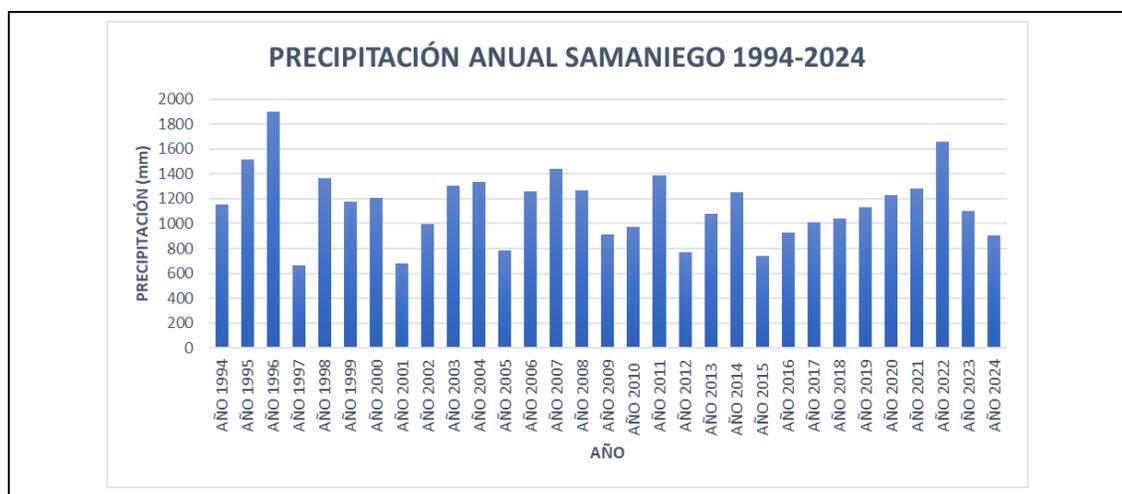
**ESTACIÓN EL SANDE – MUNICIPIO SANTACRUZ**



**ESTACIÓN VIVERO LINARES – MUNICIPIO LINARES**



**ESTACIÓN SAMANIEGO – MUNICIPIO SAMANIEGO**



Mediante el software ArcGIS y los valores promedio anual de cada estación se realizó la interpolación para obtener un mapa de precipitación usando la herramienta de Kriging, la cual se basa en un análisis estadístico que tiene como principio la correlación espacial en la distancia y dirección entre los puntos de muestra y la variación en la superficie.

Inicialmente, se ubicaron las estaciones a partir de las coordenadas en una capa llamada “Estaciones”, se utilizaron todas las estaciones ubicadas en el área de estudio en el periodo 1994-2024. Para este mapa se definió los valores que se representaría para un posible cálculo de amenaza ya que las lluvias son detonantes de movimientos en un periodo de 15 días.

Como resultado se obtuvo un ráster de precipitación con valores que fluctúan entre 811 mm a 3200 mm. Se determinaron 2 rangos que se clasificaron en intervalos iguales, donde a mayor precipitación, mayor posibilidad de que el evento se materialice.

Tabla 6 Calificación de los intervalos de lluvia máxima mensual promedio.

Precipitación (mm)	Valor
811,4423828 - 1.999,875854	4
1.999,875855 - 3.188,309326	4,5

Estas precipitaciones pueden generar un incremento en el nivel freático y aumento de presión de poros, esto generalmente se produce en las zonas donde el macizo rocoso presente una alta permeabilidad y resistencia moderada.

○ **COBERTURA DEL SUELO**

La cobertura de la tierra se refiere a la vegetación y las construcciones humanas que ocupan un área específica y cubren la superficie terrestre (IDEAM, 2012b). Esta variable

se incluye en el análisis de amenaza por movimiento en masa con base a que la cobertura vegetal y uso del suelo incide directamente en el cambio de la dinámica natural de la superficie. La metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa planteada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, al igual que el método heurístico propuesto por el SGC para la Evaluación de Susceptibilidad y Amenaza por Movimiento en Masa, incluyen la cobertura vegetal dentro de sus análisis.

En este estudio se decide incluir la cobertura vegetal como una variable más para la identificación de los detonantes. Para determinar la distribución de cobertura vegetal, se buscó información secundaria en el área de estudio, donde mediante el Mapa de Coberturas de la Tierra escala 1:100.000 del Sistema de Información Ambiental de Colombia.

El Catálogo de patrones de cobertura de la tierra está basado en la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra adoptada por Colombia según la metodología CLC e ilustra los patrones de cobertura hasta el nivel 3.

Tabla 7 Unidades de cobertura terrestre de la Leyenda CLC 1:100000.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	
<b>1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS</b>	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo	
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo	
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales o comerciales	
		1.2.4. Aeropuertos	
	1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	1.3.1. Zonas de extracción minera	
		1.3.2. Zonas de disposición de residuos	
	1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	1.4.1. Zonas verdes urbanas	
		1.4.2. Instalaciones recreativas	
	<b>2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS</b>	2.1. Cultivos transitorios	2.1.2. Cereales
			2.1.4. Hortalizas
			2.1.5. Tubérculos
		2.2 Cultivos permanentes	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos			
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos			
2.3 Pastos		2.3.1. Pastos limpios	
		2.3.2. Pastos arbolados	
		2.3.3. Pastos enmalezados	
2.4 Áreas agrícolas heterogéneas		2.4.1. Mosaico de cultivos	
		2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	
		2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	
		2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	
		2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	
<b>3. BOSQUES Y ÁREAS SEMI-NATURALES</b>		3.1. Bosque	3.1.1. Bosque denso
	3.1.2. Bosque abierto		
	3.1.3. Bosque fragmentado		

		3.1.4. Bosque de galería y ripario
		3.1.5. Plantación forestal
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazal
		3.2.2. Arbustal
		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.1. Zonas arenosas naturales
		3.3.2. Afloramientos rocosos
		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
		3.3.4. Zonas quemadas
<b>4. ÁREAS HÚMEDAS</b>	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1. Zonas Pantanosas
		4.1.2. Turberas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
	4.2. Áreas húmedas costeras	4.2.1. Pantanos costeros
		4.2.2. Salitral
		4.2.3. Playones de bajamar
<b>5. SUPERFICIES DE AGUA</b>	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos (50 m)
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
		5.1.3. Canales
		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
	5.2. Aguas marítimas	5.2.2. Mares y océanos
		5.2.3. Estanques para acuicultura marina

De esta manera teniendo el catálogo base, se logra realizar el respectivo análisis para la zona de estudio, una vez realizado el mapa de cobertura de la tierra y uso del suelo se procede a dar la calificación de los elementos dentro de esta variable, como se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 Calificación de los elementos de cobertura vegetal en la zona de estudio local.

Patrón de Cobertura Nivel 3	Calificación
2.3.1 Pastos Limpios	1
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2
3.1.1. Bosque denso	1
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	3

#### ○ ANALISIS MULTITEMPORAL DE PROCESOS MORFODINAMICOS

El análisis multitemporal permite la identificación de los cambios continuos que se han presentado sobre el área de estudio en determinado tiempo. En donde se puede analizar los diferentes cambios que se han producido por las acciones del hombre socio-naturales y fenómenos naturales.

Se tomo como análisis información secundaria en la zona de influencia del área de estudio las cuales corresponden a imágenes satelitales propuestas en Google Earth. De acuerdo con la información disponible se realizo la interpretación en los años 2017, 2019 y 2023.

Tabla 9 Imágenes adquiridas y navegación en internet.

Insumos	Descripción	Año
Imágenes Satelitales	Google Earth	2017, 2019 y 2023

Para el año 2017, 2019 y 2023, se usaron imágenes satelitales de la herramienta Google Earth Pro, los cuales presentan una baja resolución, siendo de gran utilidad para la identificación de los procesos presentes. Se transformó la capa de la zona local a formato KML para cargarla en el portal de Google Earth. Delimitado el área de estudio, se prosigue con la creación de la carpeta para añadir allí los polígonos asociados a los procesos morfodinámicos a una escala aproximadamente 1:20000. Terminado el proceso cartográfico, se usó nuevamente la herramienta de conversiones para importar el archivo en ArcGIS en formato *Shape*.

Tabla 10 Valores de clasificación y tipo de procesos morfodinámicos identificados en la zona de estudio.

PROCESO MORFODINAMICO	DESCRIPCIÓN	GRADO DE ACTIVIDAD	VALOR DE PONDERACIÓN
Remoción en masa	Deslizamientos complejos, planares, rotacionales, caída de rocas, flujo de lodos y escombros y reptación	Activo	5
		Moderadamente activo	4

### ETAPA III Preliminares

En esta etapa se iniciará con la búsqueda de estudios geológicos en la zona de interés, con la finalidad de iniciar la caracterización geológica, mediante la cartografía geológica y definir cada una de las unidades litológicas encontradas. Los trabajos que se utilizaran de mayor a menor escala son: Mapa Geológico de Colombia 2015 (escala 1:1'000.000), Plancha 429 Pasto 2009 (escala 1:100.000), Plancha 428 Tuquerres (escala 1:100.000).

Además, se comenzará una revisión bibliográfica para tener conocimiento general de las fallas y sistemas de fallas que se encuentran en la zona de estudio, donde posteriormente serán digitalizadas las fallas identificadas en los diferentes mapas geológicos y tectónicos disponibles a diferentes escalas.

Para el análisis geomorfológico inicial se construirá el mapa geomorfológico a una escala 1:25000 a partir Memoria Explicativa Mapa Geomorfológico Aplicado A Movimientos En Masa, escala 1:100.000, Plancha 429 – Pasto, Geología y Geomorfolología de la Plancha 428 Túquerres 2002, Escala 1:100000.

Y se dará cumplimiento con el análisis morfométrico, en el cual mediante diferentes técnicas se determinarán los atributos del relieve, se determinarán las variables de acuerdo al DEM 12.5 m que se vaya a utilizar.

## CARACTERIZACIÓN GEOLOGICA

Se realizó la respectiva búsqueda de la información en diferentes informes, estudios geológicos ubicados en el área de interés o que este inmersa en el lugar, con la finalidad de construir el respectivo mapa geológico. Las planchas e información analizada se basan en: Mapa Geológico de Colombia 2015 (escala 1:1'000.000), Plancha 428 Tuquerres (escala 1:100.000), Plancha 429 Pasto (escala 1:100.000).

Se usó el software ArcGIS para georreferenciar y posteriormente digitalizar los mapas y planchas mencionados. Se produce el mapa geológico del área de estudio con la información secundaria obtenida y con ayuda de la herramienta SIG para generar los mapas, para la descripción de las unidades geológicas se usaron los documentos de Geología y Geomorfología de la Plancha 428 Tuquerres, como también Plancha 429 Pasto, entre otros estudios en los cuales se describían la litología, origen y evolución.

Tabla 11 Clasificación de la Geología a partir de unidades geomorfológicas de la zona de estudio local.

Unidades Geomorfológicas	Geología
Vertientes montañosas escarpadas de Vargas (V.m.e.V)	Grupo Diabásico (K2db)
Vertientes montañosas escarpadas suavizadas por depósitos piroclásticos de Guachavés (V.m.e.s.p.G)	Grupo Dagua (K2daa)

## CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLOGICA

El análisis geomorfológico se realiza con la misma metodología aplicada para la caracterización geológica, inicialmente a partir de Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa (Plancha 428 Tuquerres) escala 1:100.000 del SGC, Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa (Plancha 429 Pasto) escala 1:100.000 del SGC.

Tabla 12 Clasificación de las unidades geomorfológicas de la zona de estudio local.

Unidades Geomorfológicas
Vertientes montañosas escarpadas de Vargas (V.m.e.V)
Vertientes montañosas escarpadas suavizadas por depósitos piroclásticos de Guachavés (V.m.e.s.p.G)

De acuerdo al mapa geomorfológico local se realizó el respectivo procesamiento de SIG, para seguir con la metodología aplicada en el área de estudio y determinar las principales variables que formarían parte de la zonificación por susceptibilidad.

○ **PENDIENTE**

Este parámetro fue calculado en ArcGIS a partir del DEM de 12.5 m de resolución, usando la herramienta *Slope*. De esta manera se obtuvo el valor de la pendiente en porcentaje, esto quiere decir la máxima inclinación, donde posteriormente se continúa un proceso de reclasificación de los valores de pendiente.

Según la metodología de (Gallego & Jaramillo, 2012) tiene la respectiva clasificación del parámetro de pendiente que permite zonificar los diferentes segmentos de relieve. En la Tabla 13 se muestra los valores que se tomaron.

Tabla 13 Clasificación de la pendiente en porcentaje y sus valores asociados a la amenaza de movimiento en masa.

<b>PENDIENTE</b>	<b>VALOR</b>
<8%	Muy Baja
8%-20%	Baja
20%-45%	Media
45%-65%	Alta
65%-80%	Muy Alta

**Etapa IV Trabajo de Oficina**

Con la información obtenida anteriormente se procederá en el trabajo de oficina en el cual se integran los datos obtenidos anteriormente y se aplica la metodología heurística aplicando conocimientos de la metodología implementada por el Servicio Geológico Colombiano para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000 por medio de la herramienta SIG.

Mediante la metodología heurística donde se realizará la evaluación de los parámetros del suelo que inciden a la favorabilidad de la ocurrencia de un movimiento en masa, teniendo en cuenta las variables geología, geomorfología (análisis morfométrico), procesos morfodinámicos. Y finalmente, se usará el método del Proceso Analítico Jerárquico, donde se asignará un peso ponderado a cada parámetro para posteriormente realizar el cálculo mediante la herramienta de álgebra de mapas ArcGIS y así obtener el resultado de la zonificación por susceptibilidad en el área de estudio.

## SELECCIÓN DE VARIABLES

Avanzados los capítulos de caracterización geológica y geomorfológica se disponen de un mapa geológico local, mapa geomorfológico local, mapa tectónico local, procesos morfodinámicos activos y parámetros morfométricos tales como pendiente.

Una vez analizada la distribución de los procesos morfodinámicos respecto al comportamiento de todas las variables, se seleccionaron cuatro parámetros correspondientes a geología superficial, unidades geomorfológicas, procesos morfodinámicos activos, pendiente. Posteriormente se procedió a determinar el grado de susceptibilidad ante un movimiento en masa de cada elemento dentro del parámetro, donde se estableció una escala de tipo semáforo de 1 a 5, donde 1 significa muy baja susceptibilidad, 2 baja susceptibilidad, 3 susceptibilidad media, 4 alta susceptibilidad y 5 equivale a la susceptibilidad muy alta.

## PUNTUACIÓN DE ELEMENTOS

- **Pendiente:** para asignar el grado de susceptibilidad en esta variable, inicialmente se realizó el ráster con la clasificación de la pendiente según lo establecido, de esta manera se concluyó que las pendientes predominantes en esta zona y que se encuentran ligadas a los procesos morfodinámicos activos son aquellas que presentan un porcentaje en un rango de 20-45%.

Tabla 14 Clasificación del grado de susceptibilidad por movimiento en masa para pendiente.

Pendiente (%)	Calificación	Susceptibilidad
(0 - 8)	1	Muy Baja
[8 - 20)	2	Baja
[20 - 45)	3	Media
[45 - 65)	4	Alta
[>65)	5	Muy Alta

- **Procesos Morfodinámicos:** la capa de procesos morfodinámicos usada para el cálculo de la susceptibilidad corresponde a los procesos del año 2023 identificados en el análisis multitemporal más la inclusión de algunos procesos identificados en los años 2017 y 2019, los cuales presentaron cicatrices notorias. La calificación de estos procesos como se indicó fue de 4 y 5 dependiendo del grado de actividad de cada uno. Esta calificación correspondiente a un grado de susceptibilidad alto y muy alto.
- **Geomorfología:** una de las variables más importantes para el análisis de la susceptibilidad ante la ocurrencia de un evento por movimiento en masa, al

identificarse las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio de acuerdo a la información secundaria encontrada.

Tabla 15 Clasificación del grado de susceptibilidad por movimiento en masa para las unidades geomorfológicas.

UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	VALOR
Vertientes montañosas escarpadas de Vargas (V.m.e.V)	4
Vertientes montañosas escarpadas suavizadas por depósitos piroclásticos de Guachavés (V.m.e.s.p.G)	3

- **Geología superficial:** en el área de estudio se presentan dos unidades que son el Grupo Diabásico y Dagua; siendo rocas volcánicas y sedimentarias respectivamente. De composición corresponden a diabasas, basaltos y rocas siliciclásticas areno-arcillosas. Estas rocas de acuerdo a su composición, fracturamiento se estima un valor de susceptibilidad, asociando también a zonas de falla en cercanías al área de estudio.

Tabla 16 Clasificación del grado de susceptibilidad por movimiento en masa para las unidades geológicas.

GEOLOGIA SUPERFICIAL	VALOR
Grupo Diabásico	3
Grupo Dagua	4

## PONDERACIÓN DE VARIABLES

Una vez se obtienen los valores de cada variable calificados en función de la desventaja que significa ante la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, el siguiente paso es ponderar y asignar un peso a las variables, ya que cada una de ellas tiene un valor de importancia para determinar la susceptibilidad de la zona de estudio.

Para este estudio se usó la metodología de decisión multicriterio AHP o Proceso Analítico Jerárquico para determinar el grado de importancia que tiene cada una de las variables y su respectiva ponderación.

El AHP es una de las herramientas que se utiliza para la toma de decisiones multicriterio. Este método lo propone Thomas L. Saaty, el cual se realiza por medio de la determinación de pesos ponderados los cuales determinan la importancia. (Vallejo-Borda, Jose Gutiérrez-Bucheli,, & Laura Ponz-Tienda, 2016)

Tabla 17 Escala de comparación de pares propuesta por Saaty. (1979)

Numérico	Escala Verbal	Explicación
1	Igual Importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Importancia Moderada	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Importancia Fuerte	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
7	Importancia Muy Fuerte	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica.
9	Importancia Extrema	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios usados para matizar	

Para evaluar la consistencia de la matriz, se calcula la razón de consistencia (RC), la cual viene dada como el cociente entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatorio (ICAP) (Moreno, 2002), esto es:

$$RC = IC/ICA, \text{ donde:} \quad (1)$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (2)$$

$$ICA = \frac{1,98(n-2)}{n} \quad (3)$$

Finalmente se obtuvo una matriz con n igual a 4. El RC debe ser menor al 10%. Una vez comprobada la consistencia de cada una de las matrices se procedió a calcular el vector propio de estas el cual corresponde a los valores asignados para cada criterio estableciendo la prioridad de estos.

### **CALCULO DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTO EN MASA:**

Luego de obtener la ponderación de las 4 variables seleccionadas, se determinó la siguiente fórmula para el cálculo de la susceptibilidad.

$$\underline{Susceptibilidad = 0,0867 GS + 0,5050 G + 0,2441 PM + 0,1642 P}$$

Donde,

- GS = Geología Superficial
- G = Unidades Geomorfológicas
- PM = Procesos Morfodinámicos
- P = Pendiente

Posteriormente el cálculo de la susceptibilidad por movimiento en masa se realizó en el software ArcGIS usando en la herramienta *Ráster Calculator* la fórmula anterior, la cual permitió realizar la suma de los 4 factores ponderados seleccionados y reclasificados con valores de 1 a 5. Para usar esta herramienta fue necesario transformar las capas de polígonos de geomorfología y geología a formato ráster con tamaño de celda 12x12 m. El resultado del álgebra de mapas para el cálculo de la susceptibilidad fue un mapa en formato ráster con una resolución espacial de 12,5 m.

## **ETAPA V Elaboración Documento Final**

En esta etapa se realizará el documento final donde se encuentran los resultados obtenidos y las conclusiones de la investigación que buscarán contribuir al conocimiento sobre la susceptibilidad a movimientos en masa en el sector Las Minas, municipio de Santacruz Guachavez.

Resultados geológicos, caracterización, teniendo en cuenta la identificación geológica, geomorfológica, identificación de procesos morfodinámicos, factores detonantes entre otros, donde principalmente se analizará la susceptibilidad que presenta el sector Las Minas ante un fenómeno amenazante como es en este caso los movimientos en masa.

## 8. Análisis y Discusion de resultados

### **Identificar los factores detonantes y procesos morfodinámicos activos para la materialización de los movimientos en masa en el área de estudio.**

Los factores detonantes son un factor externo que genera una respuesta traducida en una remoción en masa mediante el rápido incremento de esfuerzos o la reducción de la resistencia del material de una ladera. (Wieczorek, 1996). Un agente detonante se caracteriza principalmente por la existencia de un corto lapso entre causa y efecto.

Entre los agentes desencadenantes más comunes de remociones en masa se encuentran principalmente: las lluvias de gran intensidad, los sismos y la cobertura de tierra.

#### **PRECIPITACIÓN**

El análisis de la precipitación se realizo a partir de los datos de pluviosidad diaria obtenidos para los últimos 30 años en un periodo comprendido desde 1994 al 2024. Se conto con información de 4 estaciones pluviométricas cercanas al área de estudio, para la elaboración del análisis se utilizaron las mismas 4 estaciones, esto con la finalidad de analizar como uno de los factores detonantes.

La Figura 3 muestra el mapa de precipitación anual obtenido para la zona de estudio local, se puede observar que los valores de precipitación varían entre 5300 y 2900 mm anuales para el área de influencia como es el municipio de Santa Cruz (Guachavez). Según los datos colectados de las estaciones locales en más de 20 años de registros, en la zona de estudio, se presentan unos altos de lluvia para los períodos 2007-2008 y 2010-2011.

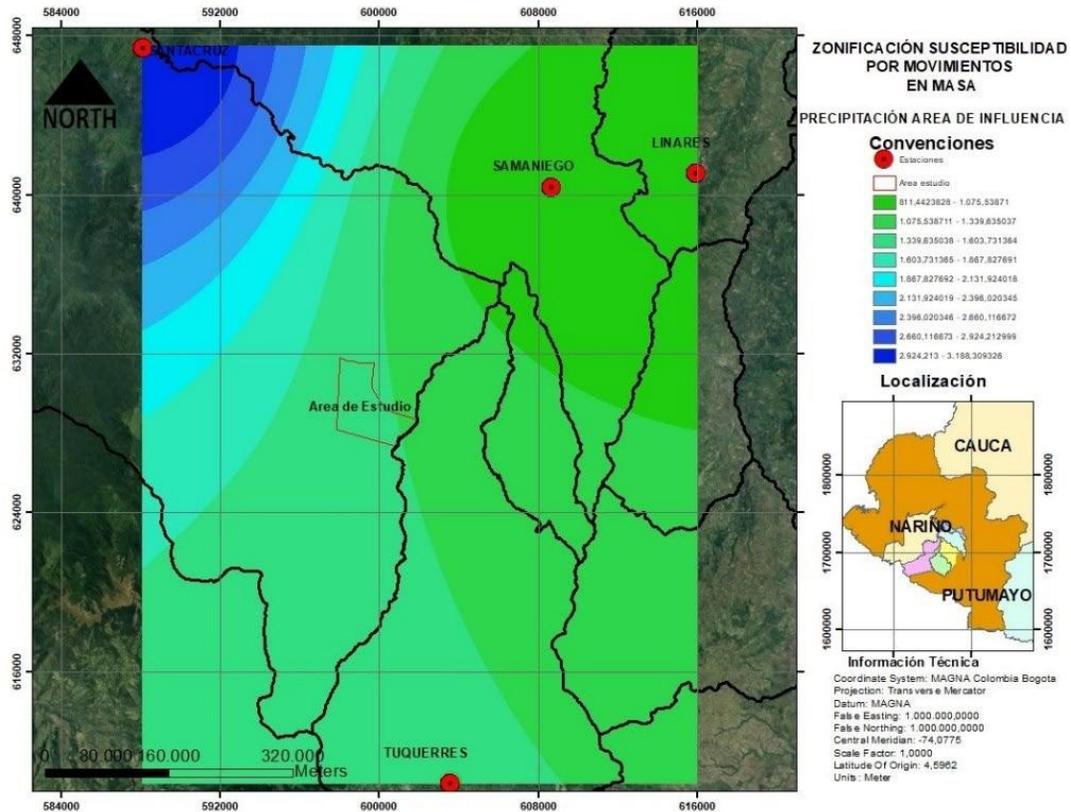


Figura 3 Mapa de precipitación anual período 1994 - 2024. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos de pluviométricos del IDEAM.

Por otra parte, se muestra en la Figura 4 el mapa de precipitación máxima, el cual expone que las precipitaciones máximas mayores se presentan en la margen este de la zona de estudio, donde se ubica el punto de interés del trabajo.

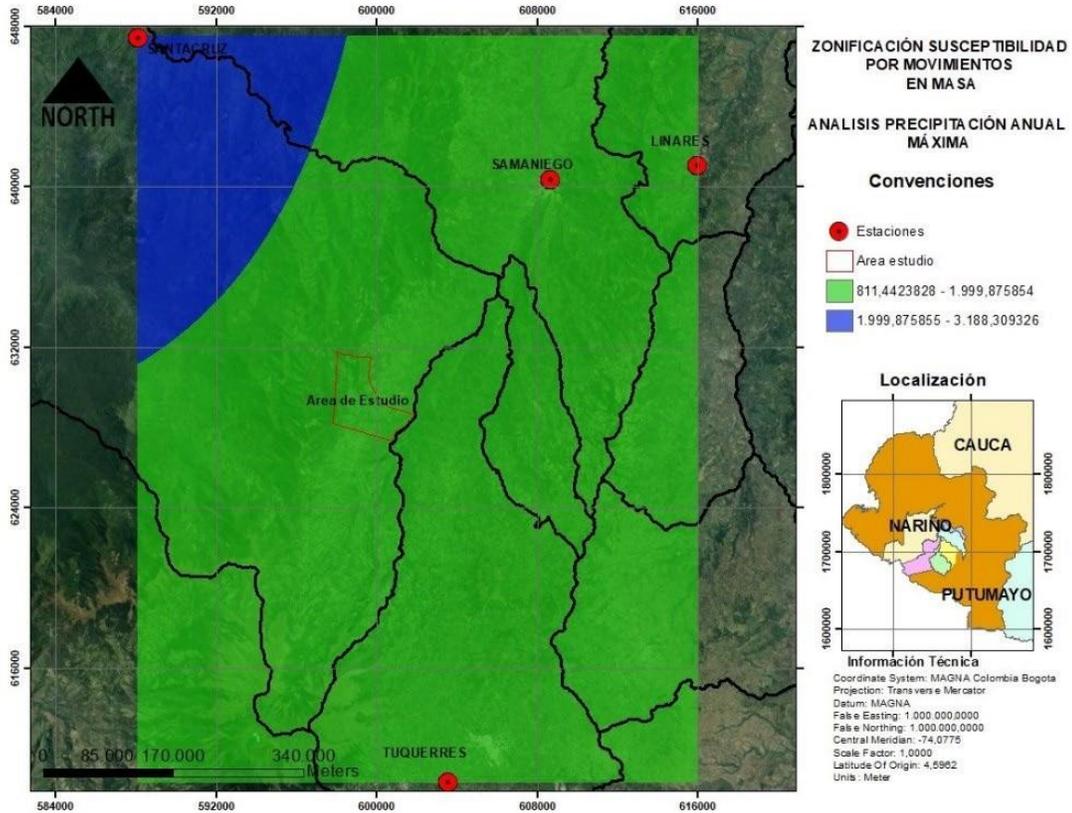


Figura 4 Mapa de precipitación máxima anual período 1994 - 2024. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos de pluviométricos del IDEAM.

## COBERTURA VEGETAL DEL SUELO

La cobertura de la tierra se refiere a la vegetación y las construcciones humanas que ocupan un área específica y cubren la superficie terrestre. (IDEAM, 2012b), esta variable es uno de los factores detonantes identificados para la materialización de un proceso en remoción en masa.

La Figura 5 muestra el mapa de cobertura de la tierra escala 1:100.000 para el área de estudio local, obtenido mediante el catálogo del Sistema de Información Ambiental de Colombia, el cual nos muestra que en la zona predomina lo siguiente: pastos limpios, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, bosque denso, vegetación secundaria o en transición, presentando patrones de cobertura de nivel 3 de acuerdo a las unidades cobertura terrestre según la leyenda propuesta Tabla 7.

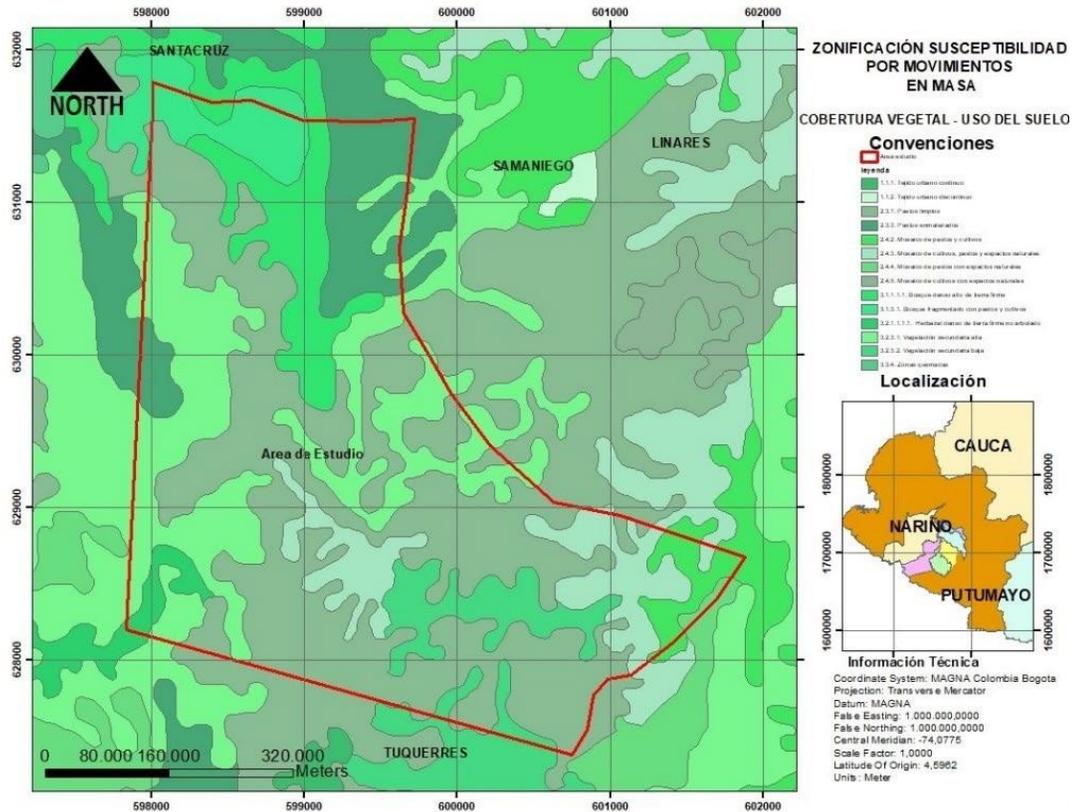


Figura 5 Mapa de cobertura de la tierra o uso del suelo. Fuente: Adaptado de IDEAM, 2018.

## PROCESOS MORFODINAMICOS

Los procesos morfodinámicos son aquellos que se caracterizan por modelar las superficies de la tierra, estos dependen de factores tanto externos como internos que se encuentran relacionados con los diferentes agentes como agua o viento y el factor interno como es el suelo y su composición.

En este ítem se analizarán los procesos morfodinámicos de remoción en masa en el área de estudio y como han evolucionado en los últimos 7 años.

A continuación, se presentan los procesos morfodinámicos identificados mediante un análisis multitemporal.

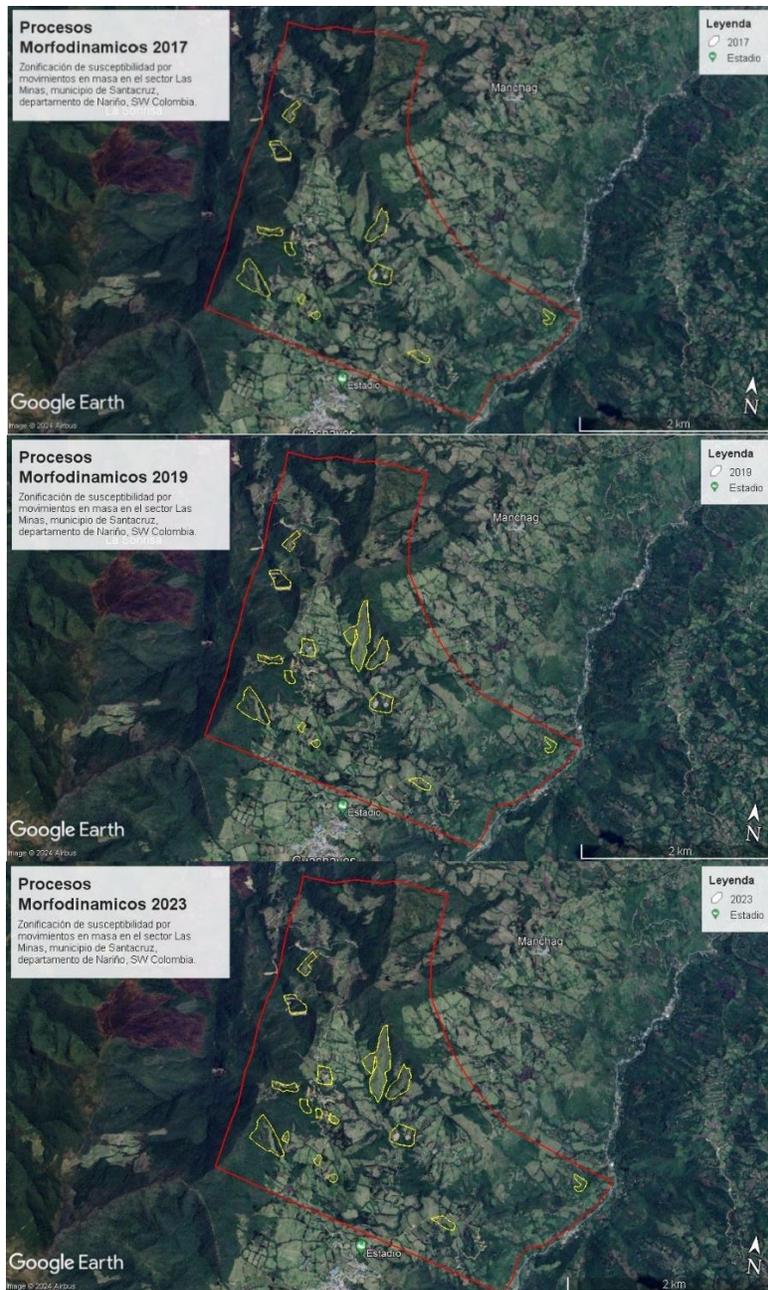


Figura 6 Procesos morfodinámicos activos para los años 2017, 2019, 2023. Fuente: Elaboración Propia con base en: Imagen satelital de Google Earth.

Los procesos identificados en los diferentes años, se presentan en la Tabla 18. En donde se muestran las hectáreas afectadas. La clasificación de los procesos presentes en el área de estudio se dio de acuerdo al nivel de actividad que se encuentre presente.

Tabla 18 Variación procesos morfodinámicos para los años 2017, 2019, 2023.

<b>PROCESOS MORFODINAMICOS</b>		
<b>Año</b>	<b>Procesos De Remoción</b>	
	<b>Numero De Eventos</b>	<b>Metros cuadrados Afectadas</b>
2017	11	266,176
2019	2	129,49
2023	3	15,428

**Año 2017:** el análisis de procesos morfodinámicos a partir de imágenes satelitales para este año, se identificaron 11 eventos, de los cuales son procesos de remoción en masa ubicados hacia la parte este-oeste del área de estudio ocupando un 266,166  $m^2$ .

**Año 2019:** se realiza el análisis de la imagen satelital para el año 2019, donde se presentan 3 nuevos eventos, ubicados en la zona este-oeste ocupando un área de 129,49  $m^2$ .

**Año 2023:** el análisis de procesos morfodinámicos para este año donde se identificaron 3 nuevos eventos, ubicándose en la zona oeste ocupando un área de 15,428  $m^2$ .

**Calcular el nivel de susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las Minas, municipio de Santa Cruz, departamento Nariño, mediante las siguientes variables: geología (lineamientos, fallas), geomorfología (análisis morfométrico) y procesos morfodinámicos.**

## **GEOLOGIA LOCAL**

En este capítulo se presentan los resultados del diagnostico estructural en la zona de estudio, como tambien la geología local del área de acuerdo a la Plancha 428 Tuquerres a una escala 1:100000 con su respectiva descripción litológica detallada a la cual corresponda en el área de estudio, esto con la información secundaria obtenida como principal fuente de información para el desarrollo de este proyecto.

### **○ ANALISIS ESTRUCTURAL**

#### **▪ DEFINICIÓN DE LA TECTÓNICA LOCAL**

La Falla Río Vargas toma su nombre del río del mismo nombre en la esquina nororiental de la Plancha 428 Túquerres. Tiene una dirección de N35°W y una longitud de 25 km dentro de la plancha. Los datos de campo recolectados sobre la falla no son concluyentes para determinar su tipo de movimiento.

En la parte noreste de la Plancha 428 Túquerres se cartografiaron planos de fallas compresivas con dirección N10/35°E y en la carretera Balalaica - Guachavés con rumbo EW. En el sector de la

mina La Balvanera, los planos de fallas tienen dirección N20- 126 28ºE, que buzan 50-60º SE, cerca al contacto de rocas volcánicas del Grupo Diabásico con sedimentitas del Grupo Dagua. Anexo 5

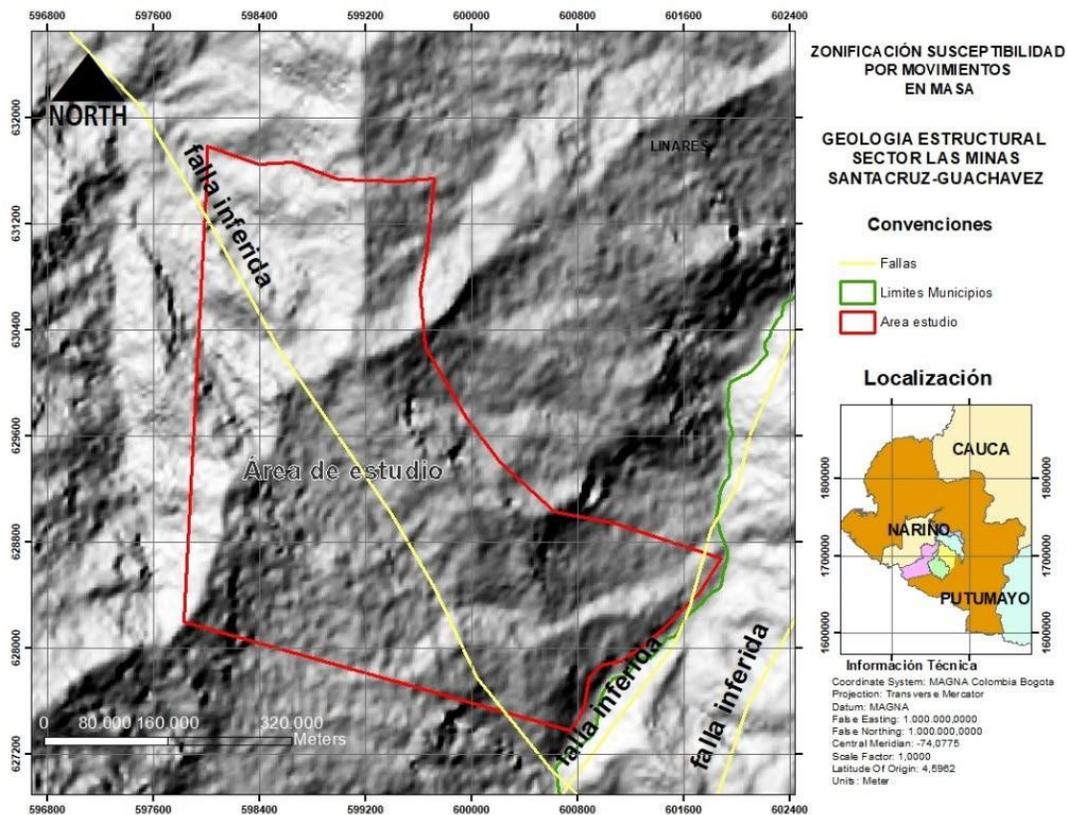


Figura 7 Geología Estructural Elaboración Propia a partir de Plancha 428 Tuquerres. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.

## ○ DESCRIPCIÓN DE UNIDADES LITOLÓGICAS

En este ítem se presenta el resultado de la cartografía geológica local a escala 1:100000 obtenida mediante la Plancha 428 Tuquerres y de acuerdo a información secundaria. Por el análisis realizado la litología predominante en el área de estudio corresponde a rocas volcánicas del Grupo Diabásico y sedimentaria del Grupo Dagua. Anexo 6

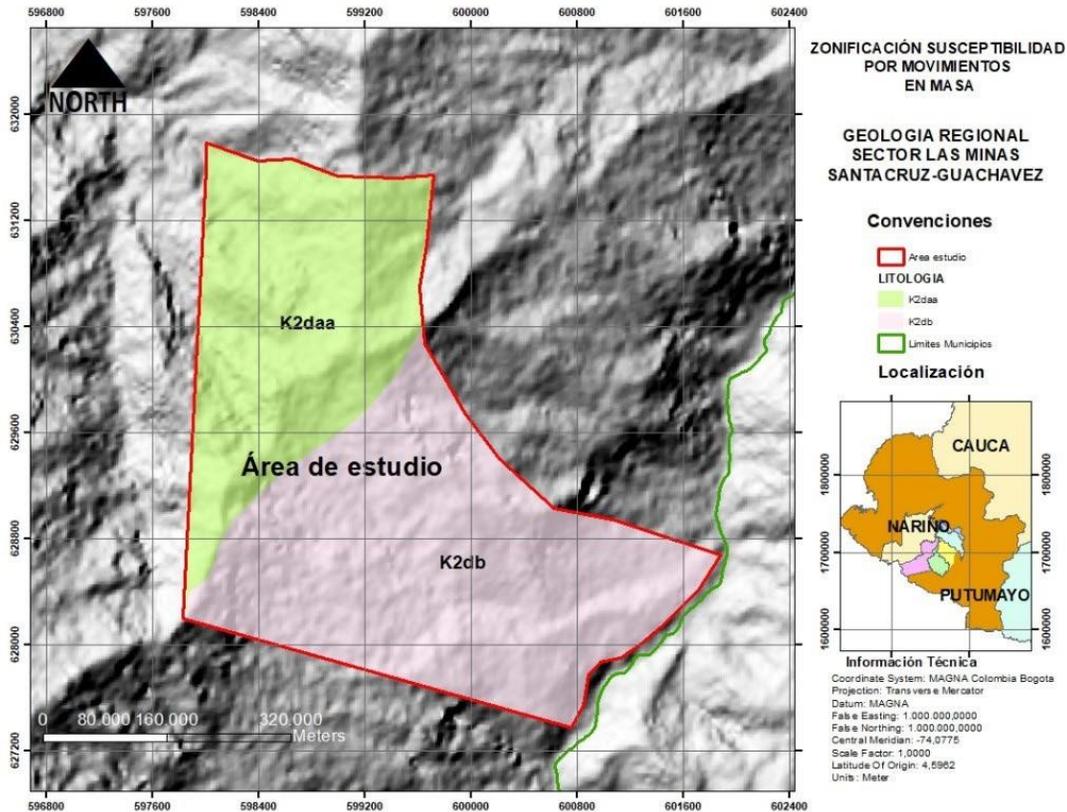


Figura 8 Unidades Litológicas Elaboración Propia a partir de Plancha 428 Tuquerres. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.

### Grupo Diabásico (K2db)

El término litoestratigráfico de “Grupo Diabásico” ha sido utilizado en el sector meridional de la Cordillera Occidental para agrupar las rocas volcánicas básicas de afinidad oceánica y edad cretácica, y que localmente se intercalan tectónicamente con sedimentitas marinas de edad similar y agrupadas en el denominado “Grupo Dagua”.

Las rocas que constituyen la unidad son masivas, afectadas por un diaclasamiento predominante ortogonal de dirección y buzamientos variables con predominio de entre N30°E y E-W con buzamientos de unos pocos grados hasta verticales; cerca a zonas de falla entre El Guabo (F8) y Piedrancha (E7) y en las cabeceras del río Vegas (F3), presentan estructuras cataclásticas, pero no se observa milonitización, lo que indica niveles corticales superiores de deformación donde predominan efectos frágiles sobre los dúctiles. Ocasionalmente se observan rocas vesiculares con vesículas de diámetro máximo 0,1 cm, rellenas con ceolitas y, ocasionalmente, epidota o sílice amorfa. (INGEOMINAS, GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DE LA PLANCHA 428 TÚQUERRES , 2002)

Las rocas predominantes microscópicamente corresponden a diabasas y basaltos con texturas holocristalinas a hialinas; en los basaltos se observan abundantes esferulitas y microamígdalas en una matriz vítrea en proceso de palagonitización y al aumentar el tamaño de los cristales se tienen texturas pilotaxíticas intersertales con microlitos de plagioclasa en una matriz hipocristalina con abundantes cristalitos de opacos y cuarzo (?). En las rocas diabásicos, la textura varía de ofídica a subofídica con material intersticial constituido por vidrio en proceso de transformación (desvitrificación) a clorita, opacos, ceolitas y cuarzo (?). Ocasionalmente se observan texturas microporfídicas con fenocristales de clinopiroxeno en una matriz esferulítica de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos. (INGEOMINAS, GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA PLANCHA 429 ESCALA 1:100000, 1990)

### **Grupo Dagua (K2daa)**

Las rocas sedimentarias marinas asociadas espacialmente a las rocas volcánicas oceánicas correlacionables o continuación del Grupo Diabásico en el área de la Plancha 428 Túquerres, por las consideraciones establecidas para esta unidad, se consideran como prolongación meridional del Grupo Dagua en el sentido empleado por Barrero (1979), ya que es posible definir por características litológicas dos unidades separables y cartografiables en sentido regional:

- Rocas siliciclásticas de composición areno arcillosa, correlacionables con la Formación Espinal (K2daa).
- Rocas silíceas y pelíticas con aporte volcánico y estructura esquistosa que serían correlacionables con la Formación Cisneros (K2das).

La edad asignada a las rocas sedimentarias marinas asociadas a vulcanitas básicas (Grupo Diabásico) es cretácica tardía con base en la correlación establecida para esta unidad con el Grupo Dagua, unidad para la cual por la fauna encontrada en el Valle del Cauca y el Cauca (Nivia, 1997) se indica un rango de deposición entre el Albiano y el Maastrichtiano y con mayor seguridad entre el Turoniano y el Maastrichtiano, edades que están de acuerdo con la información isotópica disponible para las rocas volcánicas asociadas. (INGEOMINAS, GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DE LA PLANCHA 428 TÚQUERRES , 2002)

## **GEOMORFOLOGIA**

### **○ ANALISIS MORFOMETRICO**

La geomorfometría es una ciencia multidisciplinaria que incluye la geología, la geomorfología, la topografía, la matemática y otras ramas del conocimiento. Esta ciencia se encarga de la obtención y caracterización de los elementos geomorfológicos específicos y concretos a partir de

las medidas y el análisis de las características morfológicas aplicables a cualquier superficie (Wood, 1996 citado en Gallego, 2013).

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para el parámetro morfométrico analizado como la pendiente, teniendo en cuenta su relación con las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio.

### ANÁLISIS DE PENDIENTES

El mapa de pendientes para el área de estudio se muestra en la Figura 9. Este análisis sirve como herramienta para identificar y verificar la geomorfología presente en la zona.

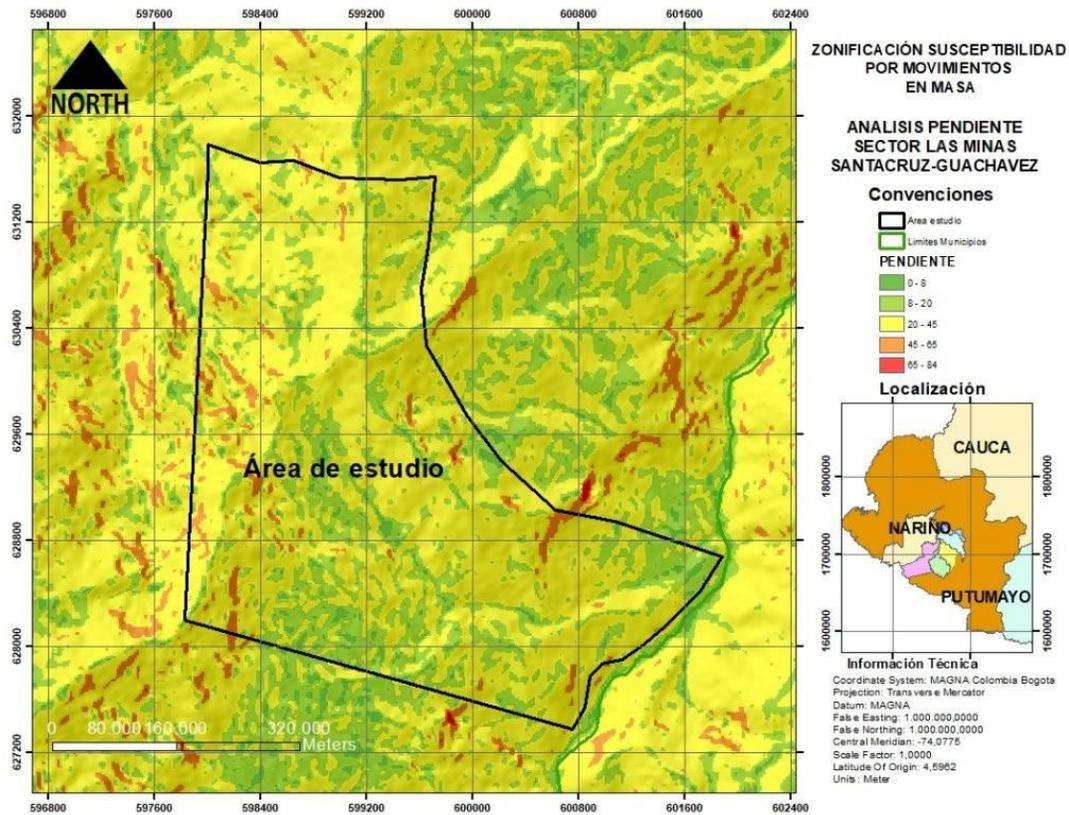


Figura 9 Mapa de pendientes para el área de estudio local. Fuente Elaboracion Propia.

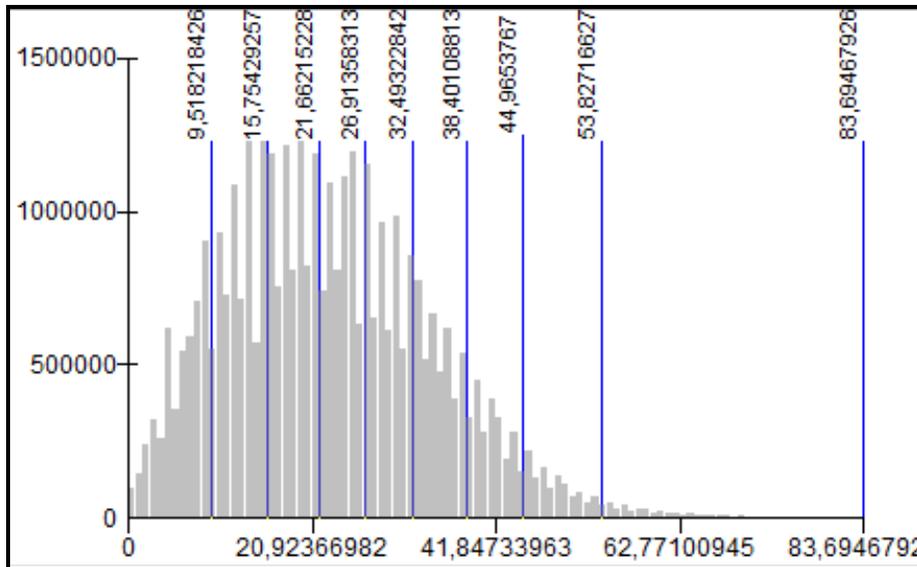


Figura 10 Histograma de frecuencia de pendientes del área local. Fuente Elaboracion Propia.

A continuación, se realiza una breve descripción de la distribución de estas pendientes en el área de estudio, en donde el mayor porcentaje de la zona se encuentra en el rango de pendientes 20-45%, seguido de las pendientes entre 8-20% y finalmente en algunas zonas más escarpadas y con menor porcentaje >65%.

### **DESCRIPCIÓN DE UNIDADES GEOMORFOLOGICAS**

En la cartografía geomorfológica obtenida mediante la Plancha 428 Tuquerres escala 1:100000, se identificaron dos unidades geomorfológicas presentes. Como se puede observar en la Figura 11. Anexo 7

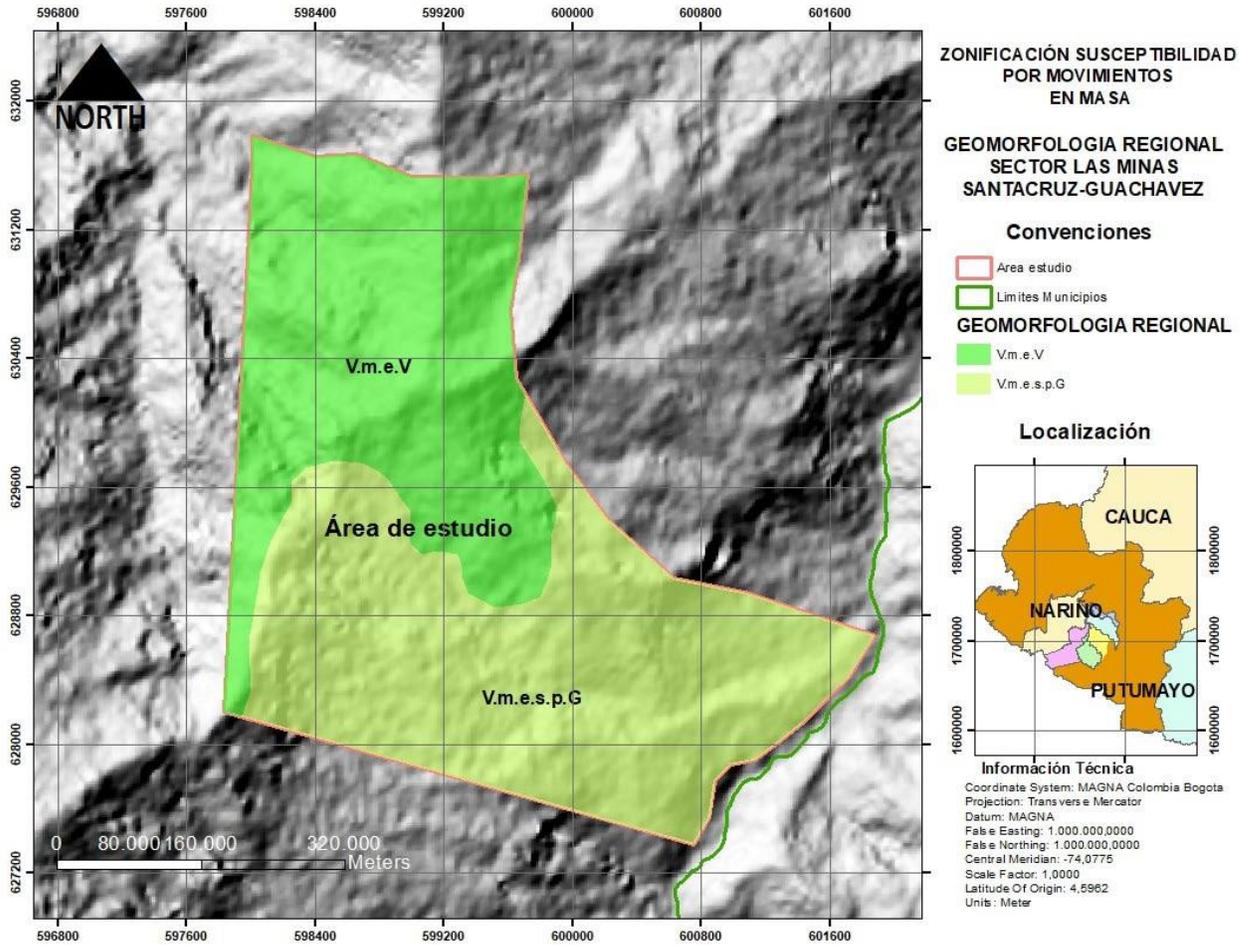


Figura 11 Mapa Geomorfológico del área local. Fuente Elaboracion Propia.

**Vertientes montañosas escarpadas de Vargas (V.m.e.V):**

Esta unidad geomorfológica presenta un área de 125 km<sup>2</sup>. Se caracteriza por tener un relieve abrupto, con alturas que varían en distancias cortas desde los 3200 m.s.n.m hasta los 1400 y con desniveles entre cima y valle de hasta 1200 m.

Los filos principales tienen longitudes de 5 a 10 km, son estrechos, rectos y cóncavos, con una tendencia N10-20°W, los filos secundarios tienen longitudes menores a 5 km y dirección N - S. Las vertientes son rectas, con escalones e inclinación alta, con ángulos de 70°.

Esta unidad geomorfológica se encuentra desarrollada sobre rocas cretácicas del Grupo Diabásico y miembro silicificado del Grupo Dagua (en el sentido de Nelson, 1957), de edad cretácica.

**Vertientes montañosas escarpadas suavizadas por depósitos piroclásticos de**

**Guachavés (V.m.e.s.p.G):**

Esta unidad geomorfológica se extiende hasta el volcán Azufra, al sur, el límite norte de la Plancha 428; ocupando un área de 150 km<sup>2</sup>, donde forma una franja con dirección NW. Las alturas, en esta unidad, varían desde los 2.800 hasta los 2.100 msnm, con un desnivel entre valles y cimas de hasta 800 m y en ella se asientan los centros rurales de Guachavés, Manchag, Yascual y Balalaica.

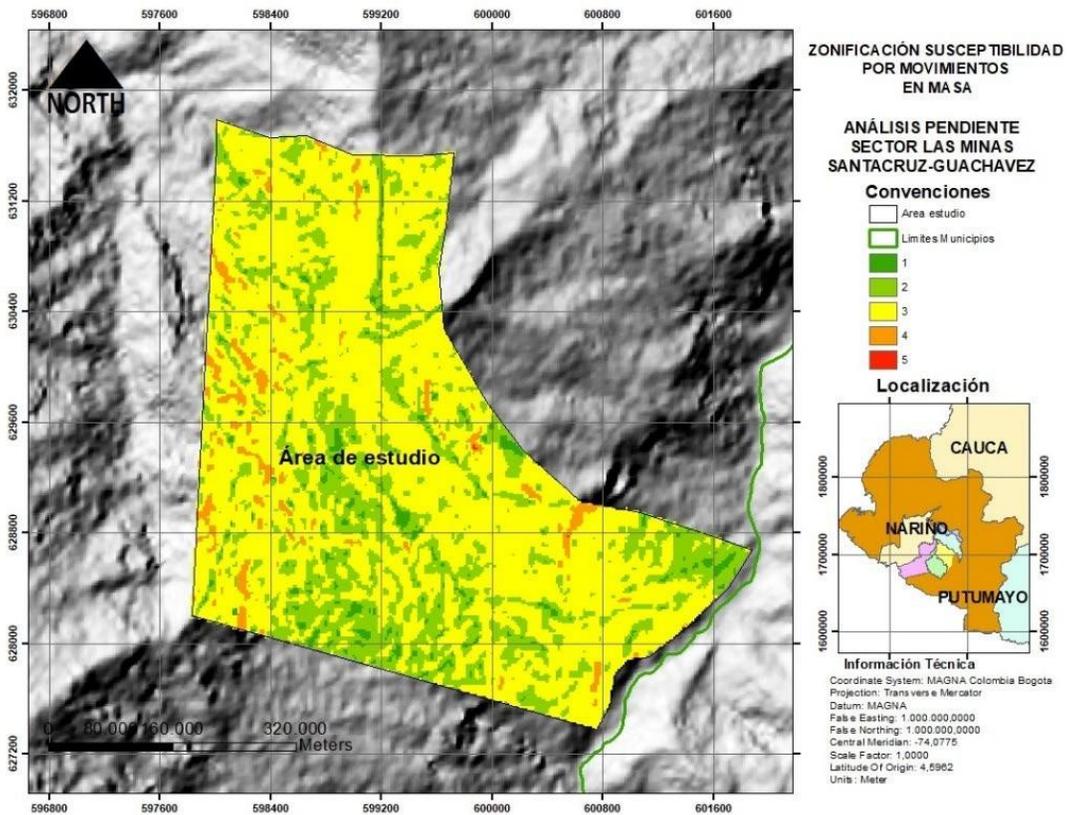
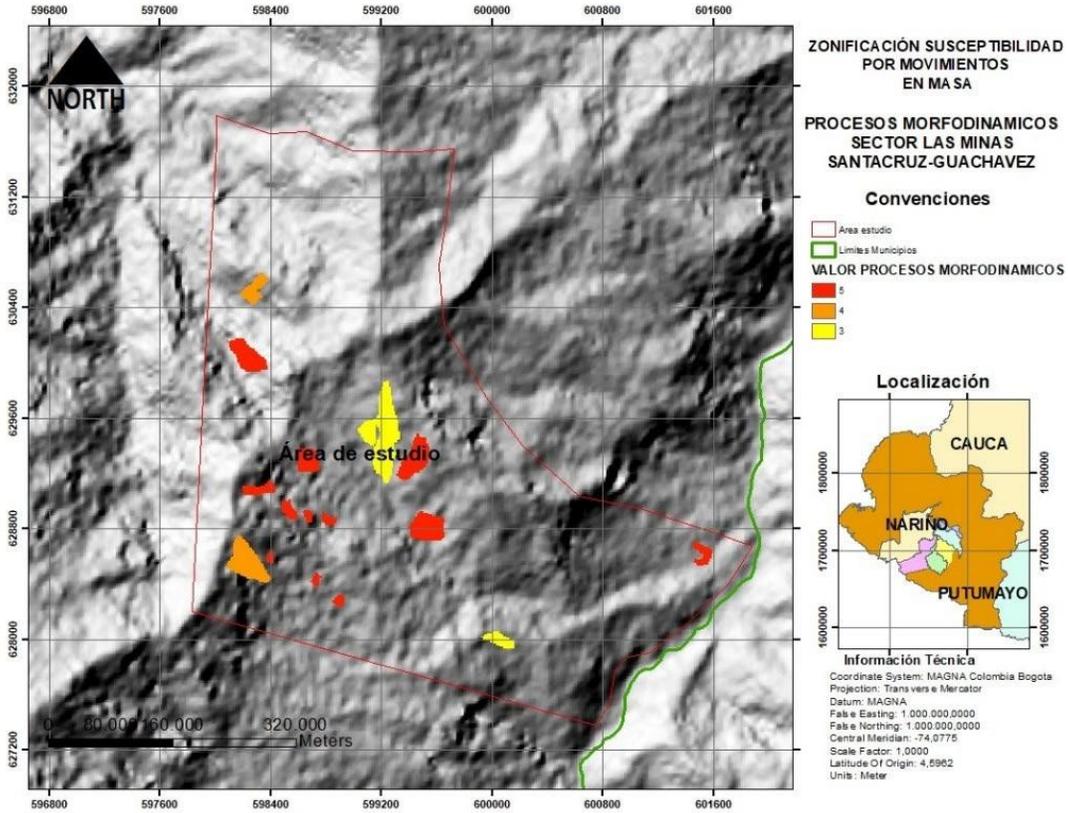
Esta unidad comprende a dos geoformas en sentido estricto, la primera formada por las vertientes sobre saprolito de rocas cristalinas y la segunda corresponde a las partes altas y antiguos valles en los que se han podido preservar los depósitos piroclásticos de diferentes edades que suavizan la topografía.

Esta unidad se desarrolló sobre depósitos piroclásticos antiguos y rocas cretácicas del Grupo Diabásico y al miembro silicificado del Grupo Dagua (en el sentido de Nelson, 1957).

### **ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD**

De acuerdo a la metodología propuesta, el análisis de susceptibilidad por movimiento en masa partió de la clasificación de 1 a 5 de los elementos para cada una de las variables.

<b>GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD</b>	
<b>MUY BAJO</b>	1
<b>BAJO</b>	2
<b>MEDIO</b>	3
<b>ALTO</b>	4
<b>MUY ALTO</b>	5



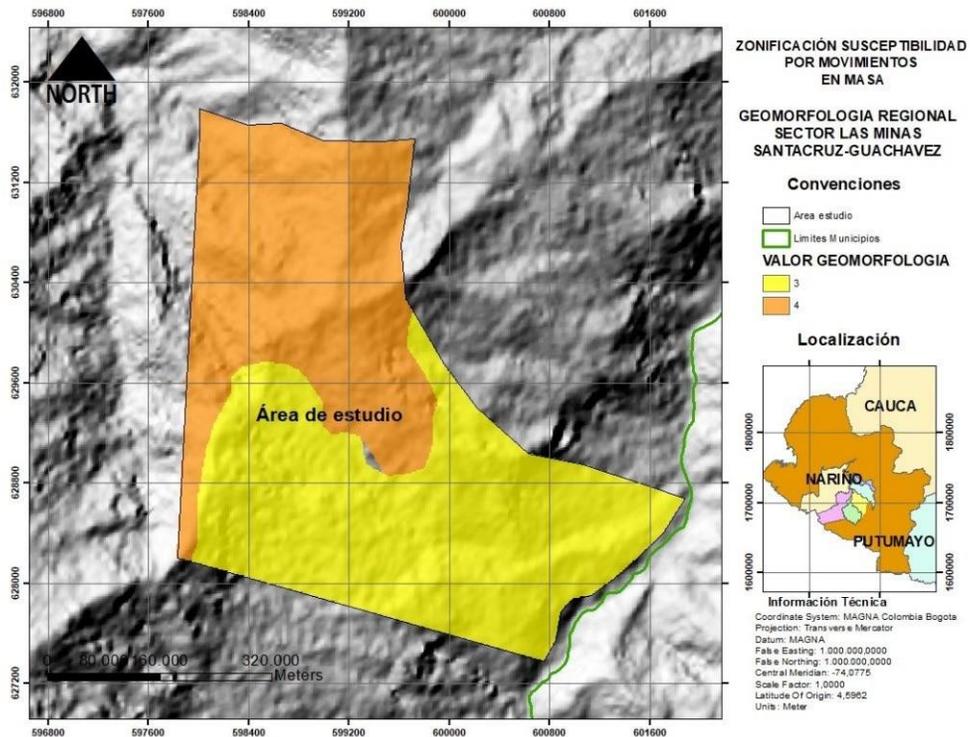
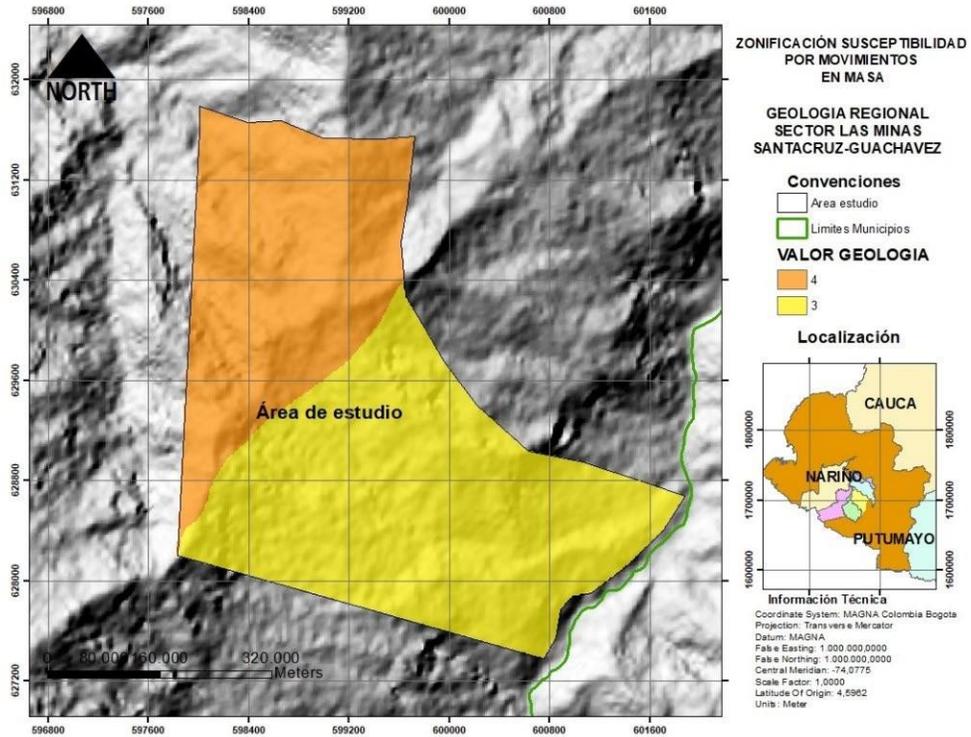


Figura 12 Mapa de elementos calificados para cada variable selecciona en el cálculo de susceptibilidad.  
 Fuente Elaboracion Propia

En la Tabla 19 se muestra la matriz de comparación realizada por la autora de la monografía, usando los valores de la escala de comparación propuesta en la metodología.

Tabla 19 Matriz de comparación de variables, Fuente: Elaboración Propia.

Matriz Saaty	Procesos Morfodinamicos	Pendiente	Geologia Superficial	Geomorfologia
Procesos Morfodinamicos	1,00	3,00	2,00	0,33
Pendiente	0,33	1,00	3,00	0,33
Geologia Superficial	0,50	0,33	1,00	0,20
Geomorfologia	3,00	3,00	5,00	1,00

Los vectores propios de esta matriz nos muestran consistencia en los datos, se concuerda en este análisis con que la variable de mayor importancia en esta zona son los procesos morfodinámicos seguida de la geomorfología y que la variable de menor peso es la geología superficial pero que tiene su importancia en este análisis.

Tabla 20 Vectores propios para la matriz de comparación, Fuente: Elaboración Propia.

MATRIZ N°1	
VARIABLE	VECTOR FINAL
Procesos Morfodinámicos	24,41%
Pendiente	16,42%
Geologia Superficial	8,67%
Geomorfología	50,50%

Tabla 21 Vectores propios para la matriz de comparación, Fuente: Elaboración Propia.

MATRIZ N°1	
$\lambda_{max}$	4,253
CI	0,084
CR	0,093
IA	0,9

Posteriormente al asignar el peso a cada variable, se realizó el cálculo de la susceptibilidad, obteniendo el mapa que muestra en la Figura 13, este mapa muestra el grado de susceptibilidad por movimiento en masa en el área de estudio sector Las Minas, municipio de Santacruz, donde en la parte norte del área de estudio predomina una susceptibilidad de media-alta y en la parte sur de baja a media. Anexo 8.

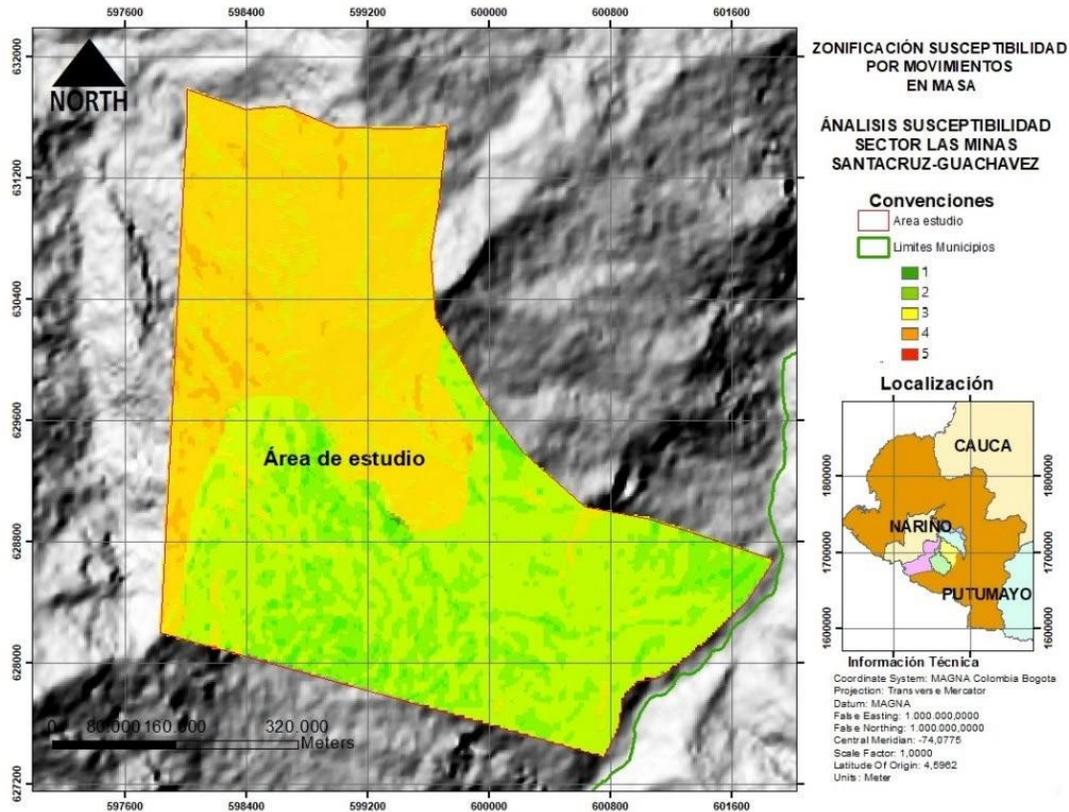


Figura 13 Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. Fuente Elaboración Propia

## Analizar los resultados obtenidos de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Las Minas.

De acuerdo a la información obtenida mediante los estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano a una escala 1:100000, en la cual aplicaron una metodología donde tiene en cuenta los siguientes aspectos.

- **Suelos Edáficos**
- **Cobertura vegetal**
- **Geología**
  - Densidad de fracturamientos
  - Fabrica/estructura
  - Resistencia
- **Geomorfología**
- **Morfometría**
  - Pendientes
  - Rugosidad

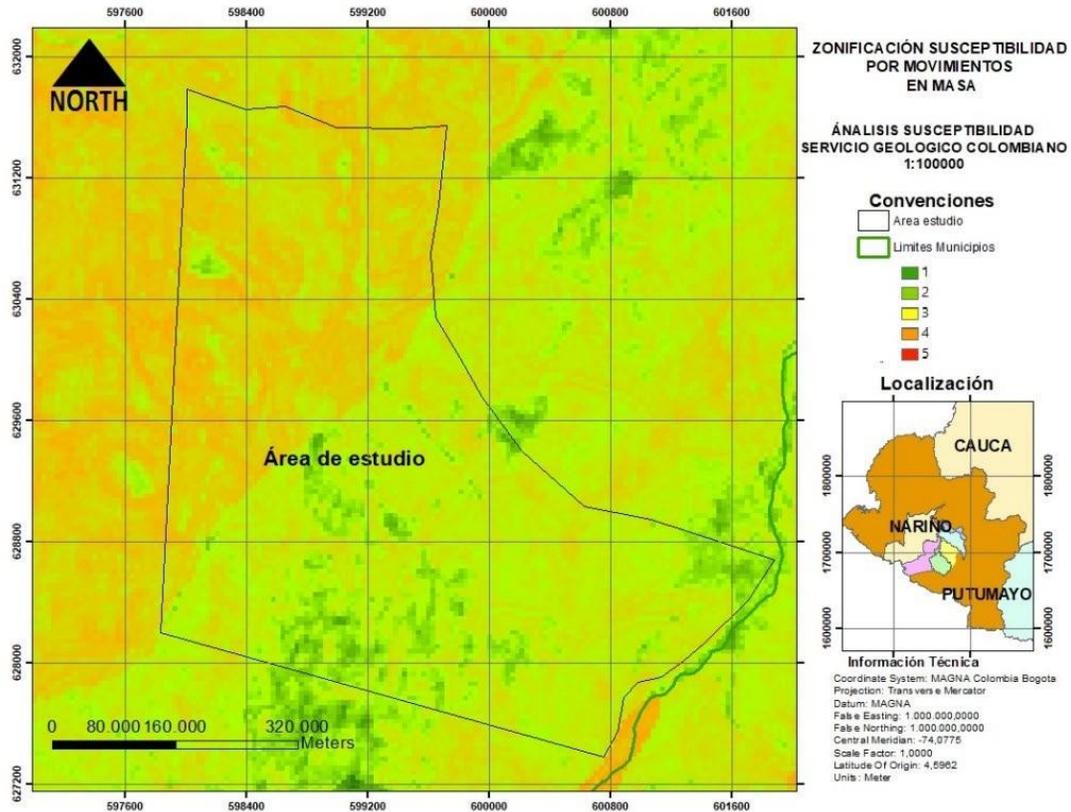


Figura 14 Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa escala 1:100000. Fuente Servicio Geológico Colombiano.

De acuerdo a la información obtenida (SGC, 2015) donde en la Figura 14 nos muestra el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en el área de estudio donde nos muestra unos rangos de susceptibilidad bajos a altos, esto teniendo en cuenta los valores que ellos en su momento de análisis le asignaron a cada una de las variables analizadas.

Donde posteriormente el análisis que se realiza en esta monografía tiene en cuenta ciertas variables tales como:

- **Procesos morfodinámicos**
- **Geología**
  - Unidades litológicas
- **Geomorfología**
- **Morfometría**
  - Pendientes

Donde mediante la matriz Saaty se realiza el respectivo análisis y la asignación de valores, los cuales son la base para la obtención de los resultados obtenidos en la Figura 13, en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Susceptibilidad muy alta: en la zona de estudio no se presentaron zonas con susceptibilidad muy alta, 0 Ha.

Susceptibilidad alta: en la zona de estudio no se presentaron zonas con susceptibilidad alta, presentando de esta manera 0 Ha.

Susceptibilidad media: en la zona de estudio se presenta una susceptibilidad media que se encuentra en un rango de 3,0171 - 3,3452 con un área de 4902 Ha, ubicándose en la parte norte del sector Las Minas.

Susceptibilidad baja: en la zona de estudio se presenta una susceptibilidad baja que se encuentra en un rango de 2,1833 - 2,6891 con un área de 6098 Ha, ubicándose en la parte sur del sector Las Minas.

Susceptibilidad muy baja: en la zona de estudio no se presentaron zonas con susceptibilidad alta, presentando de esta manera 0 Ha.

Dando, así como respuesta a la pregunta de investigación planteada ¿Cuáles son las zonas con mayor susceptibilidad y variables que inciden en su ocurrencia en el sector Las Minas, municipio Santacruz Guachavez?, siendo la zona norte presentando una susceptibilidad media, además de esto mediante el análisis con la metodología Saaty mostrando que las variables con mayor peso en este caso son: Geomorfología, Procesos morfodinámicos y pendiente.

## 9. Conclusiones

Este proyecto es de suma importancia para tanto el sector Las Minas, ubicadas en el municipio de Santacruz de Guachaves, debido a que no se evidencian estudios al detalle acerca de la Susceptibilidad por Procesos de Remoción en Masa a escalas menores a la 100.000, únicamente se evidencia un estudio de Susceptibilidad para el municipio de Santacruz por parte de Corponariño de manera general.

El presente trabajo servirá como insumo primordial para llegar a la siguiente etapa y sería la combinación de los factores detonantes lluvia, cobertura vegetal y sismo para realizar el análisis completo de Amenaza por procesos de remoción en masa.

La metodología heurística del SGC (2015) basado en el método jerárquico priorizado AHP Saaty (1980), permite realizar un modelo de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en territorios de poco acceso, permitirá obtener una aproximación a la realidad acerca del área de estudio, como también la vulnerabilidad que se presenta.

El sector Las Minas, está distribuido de la siguiente manera: inicialmente no existe susceptibilidad muy baja, es decir, su porcentaje es 0% y evidentemente el área sería de 0 Ha, hay un 55,43% de susceptibilidad baja con un área de 6098 Ha, un 44,57% de susceptibilidad media con un área de 4902,947768 Ha, susceptibilidad alta de 0 % con un área de 0 Ha y muy alta en 0 con un área de 0 Ha.

## 10. Recomendaciones

En el momento que se realizó la recopilación y análisis de la información se determina que lo obtenido hace parte de las Planchas 428 y 429 de Tuquerres y Pasto respectivamente encontrándose a una escala de 1:100000 por lo tanto la información obtenida se da de manera muy general.

Tanto el municipio de Santacruz como las personas habitantes del sector Las Minas, se verán beneficiadas en la realización de este proyecto que inicialmente se da a conocer la susceptibilidad por movimientos en masa aumentando de esta manera su conocimiento respecto a la zona que se encuentran habitando.

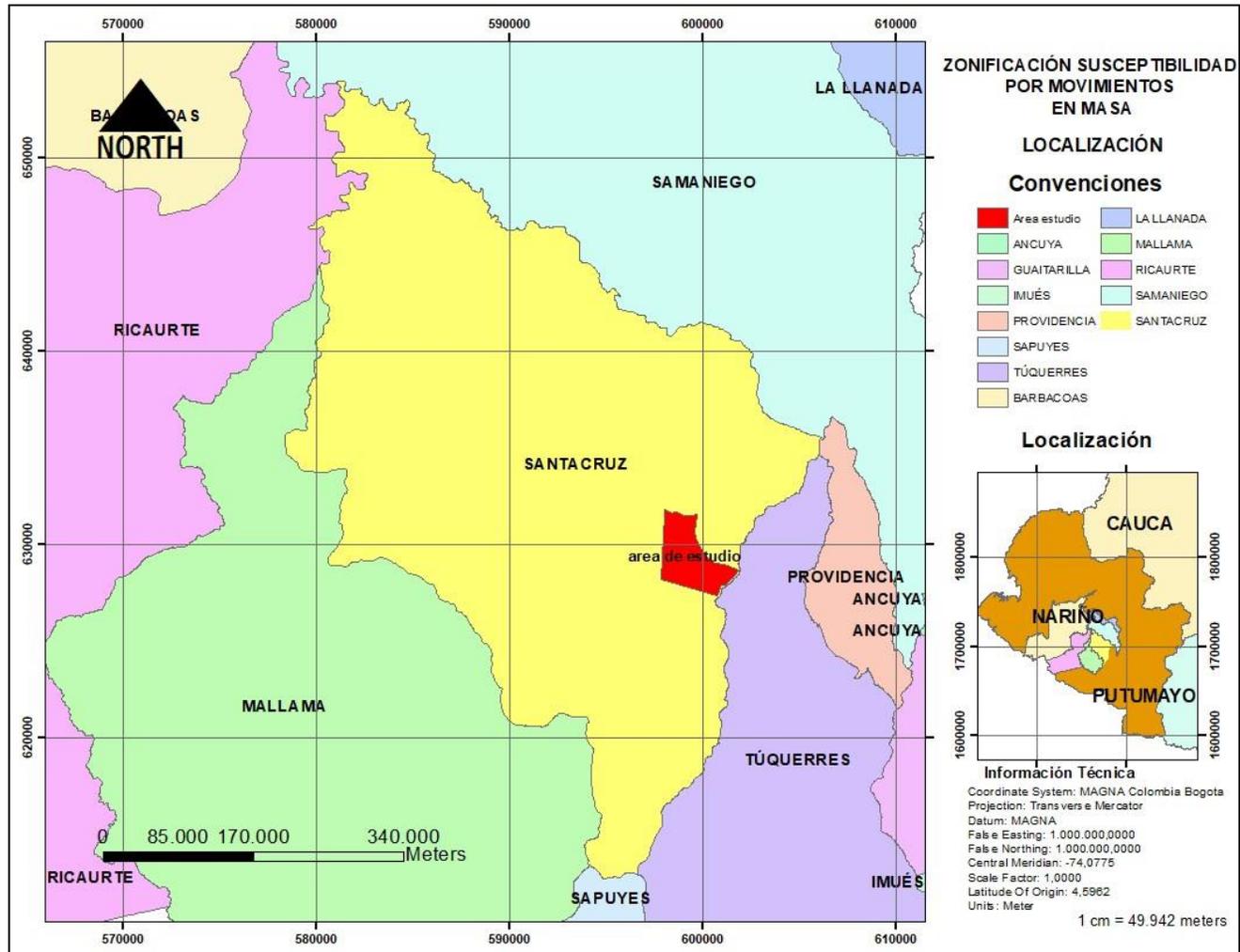
Debido a la baja y media susceptibilidad que presenta en el sector las Minas, se recomienda seguir con el proceso de la metodología para la zonificación de amenaza en el área de estudio, esto teniendo en cuenta que en el primer objetivo se abarcaron algunas variables que dan pie para la realización de esta.

## 11. Referencias

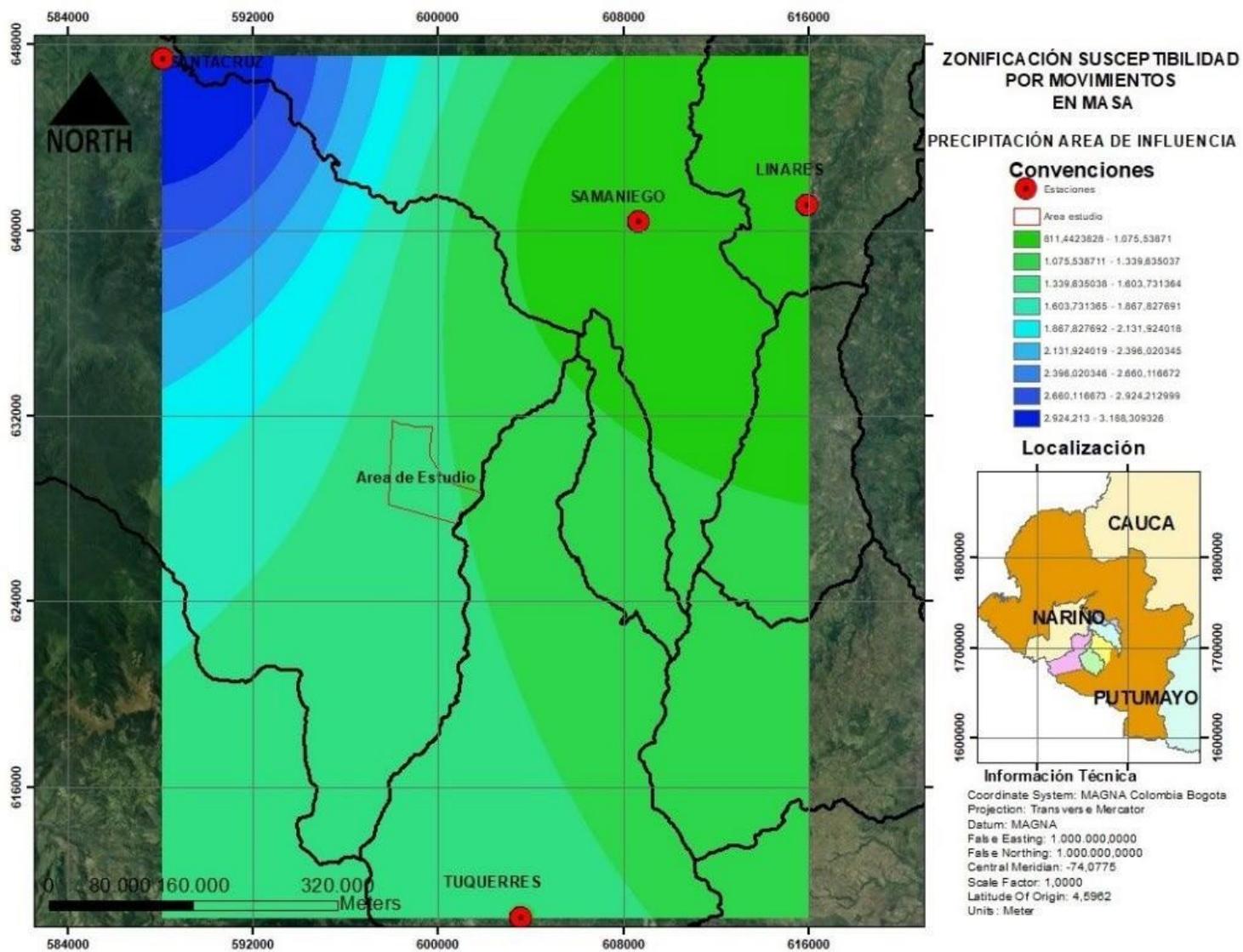
- Álzate,, M. (2021). *Analisis de la amenaza, y vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa en la microcuenca de la Quebrada Monserrate, en el municipio Santa Rosa de Cabal - Risaralda.*
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*. Australia.
- Castellanos, E. &. (2008). *Qualitative Landslide Susceptibility Assessment by Multicriteria Analysis*. Elsevier. Science Direct. *Geomorphology*.
- Chalkias, C. F. (2014). *Gis- Based Landslide Susceptibility Mapping on the Peloponnese Peninsula*. En *Geosciences Article* (pág. 15 Pág.). Greece.
- CORANTIOQUIA - EAFIT. (2015). *Convenio 1502-6. Aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de Corantioqu. Municipio de Entrerriós.*
- CORPONARIÑO. (2021). *Determinantes Ambientales para el Ordenamiento Territorial del Departamento de Nariño*.
- ERCANOGLU, C., GOKCEOGLU , T., & VAN ASCH, W. (2003). *Landslide Susceptibility Zoning North of Yenice(NW Turkey) by Multivariate Statistical TechniquesM.*
- Gallego, J., & Jaramillo, J. (2012). *Plan parcial de desarrollo de expansión El Pozo Municipio de Rionegro Antioquia. Informe final,* Rionegro.
- Gestor Normativo. (2011). *Ley 1454*. Colombia.
- Gestor Normativo. (2012). *Ley 1523*. Colombia.
- Gestor Normativo. (2014). *Decreto 1807*. Colombia.
- IDEAM. (2012b). *Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa*. Obtenido de [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)
- INGEOMINAS – CVC. (2001). *Guía Metodológica para la zonificación de amenazas por Fenómenos de Remoción en Masa – Método Univariado - y Escenarios de Riesgo por Avenidas Torrenciales, Convenio 003*. Bogotá.
- INGEOMINAS. (1990). *GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA PLANCHA 429 ESCALA 1:100000*. Obtenido de SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO.
- INGEOMINAS. (2002). *GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DE LA PLANCHA 428 TÚQUERRES*. Obtenido de SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO: <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=130100101010002753000000000>
- M. Van Den Eeckhaut, A. M. (2010). *Comparison of two Landslide Susceptibility Assessments in the Champagne–Ardenne*. En *Elsevier. Science Direct. Geomorphology* (pág. 15).

- Meryem, E., & Lahcen, A. (2021). *Mass movements susceptibility mapping by using heuristic approach. Casestudy: province of Tétouan (North of Morocco)*.
- Moreno, J. (2002). *El Proceso Análítico Jerárquico (AHP) Fundamentos, metodologías y aplicaciones*.
- Paz Molina, P. (2021). *Análisis de la susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río nuevo presidente, Corregimiento Las Mercedes - Sardinata y Municipio de Tibú en el Departamento Norte de Santander, Colombia*.
- PROYECTO MULTINACIONAL ANDINO: GEOCIENCIAS PARA LAS COMUNIDADES ANDINAS (PMA: GCA). (2007). *Movimientos en masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería, publicación Geológica Multinacional.
- Ruff, M. &. (2008). *Landslide Susceptibility Analysis with A heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria)*. En *Elsevier. Science Direct. Geomorphology*. (pág. 11).
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2015). *MEMORIA EXPLICATIVA DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000 PLANCHA 428 – TÚQUERRES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO*. Manizales.
- SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (SGC). (s.f.). *Documento Metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza relativa por Movimientos en Masa. Escala 1:100.000*. Bogotá.
- SGC. (2015). *MEMORIA EXPLICATIVA DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000*. Manizales.
- Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD). (2018). *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*. En UNGRD. Bogotá.
- Tapasco, M. A. (2021). *Análisis de susceptibilidad a movimientos de masa del tramo comprendido entre la planta de tratamiento de agua potable "Berlin" y el tanque de abastecedor "Tejares" del acueducto de Villa Maria (Caldas)*. .
- Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). *Riesgo por movimientos en masa en Colombia*. Bogotá.
- Vallejo-Borda, Jose Gutiérrez-Bucheli,, & Laura Ponz-Tienda. (2016). *Proceso analítico jerárquico como metodología de selección. Aplicación para la selección de la mejor alternativa de almacenamiento de agua*. Obtenido de <https://doi.org/10.13140/2.1.4596.3848>.
- Wieczorek, G. F. (1996). *LANDSLIDES: INVESTIGATION AND MITIGATION*. En G. F. Wieczorek.

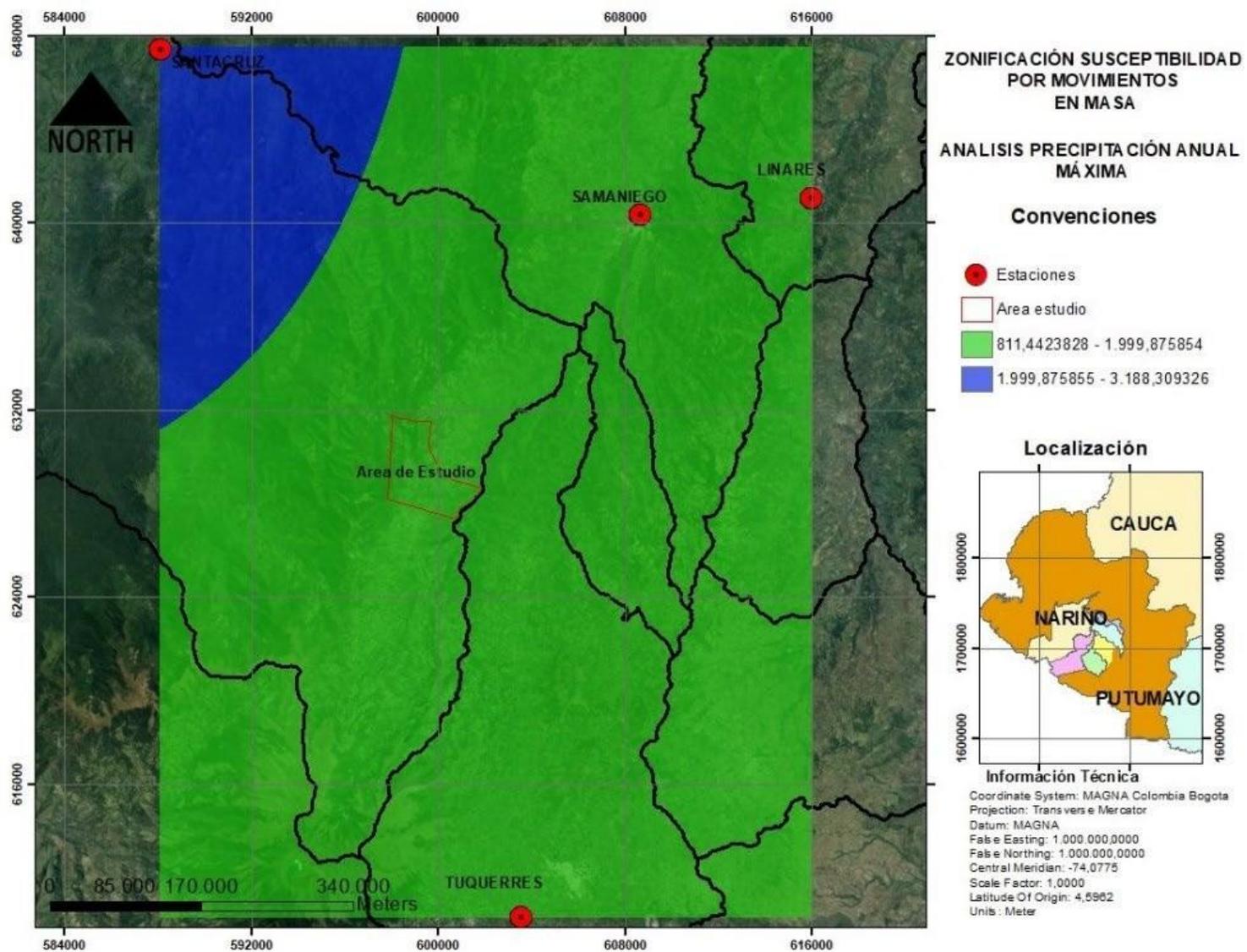
## 12. Anexos



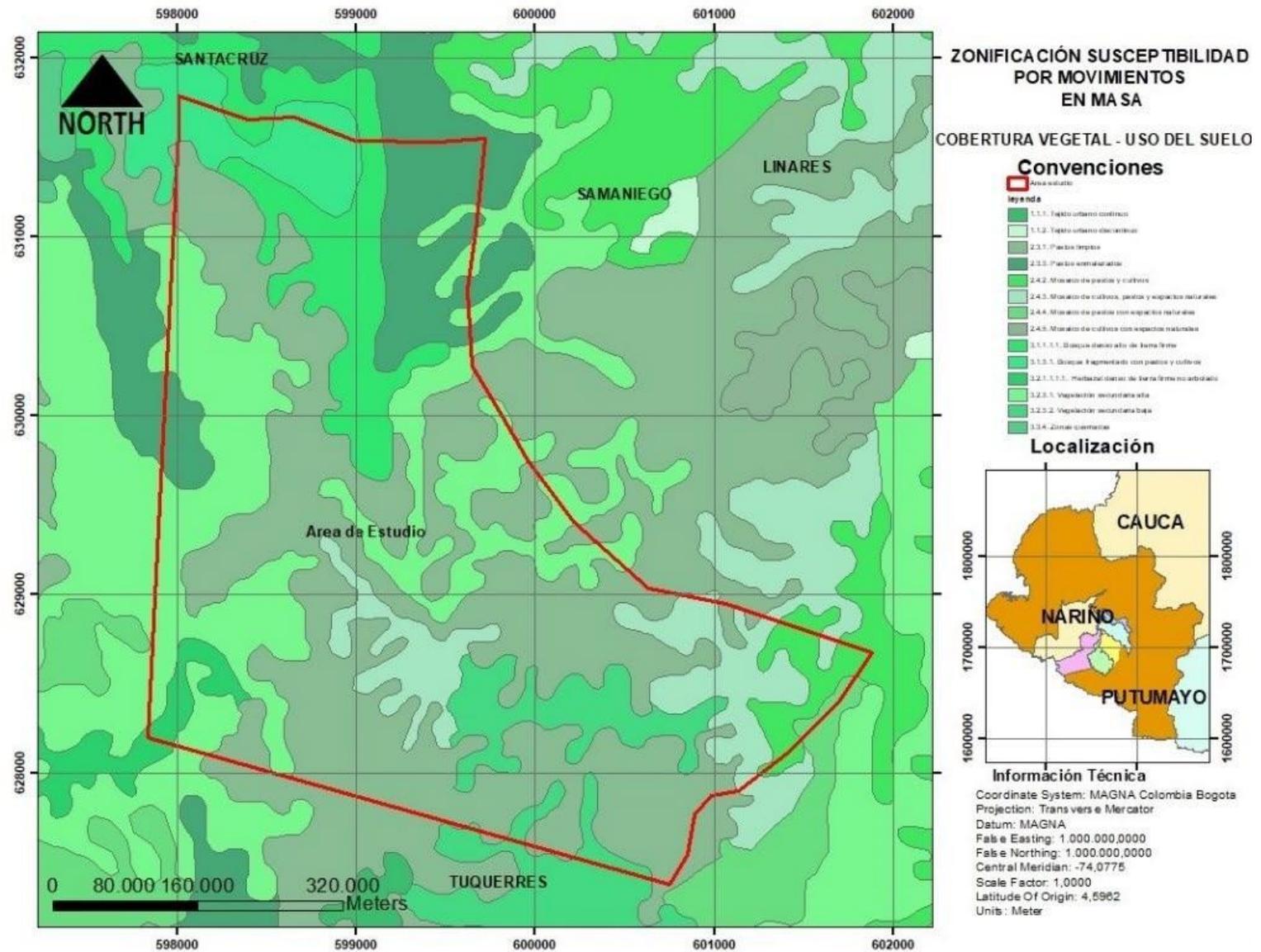
Anexo 1 Área de estudio sector Las Minas. Elaboración Propia.



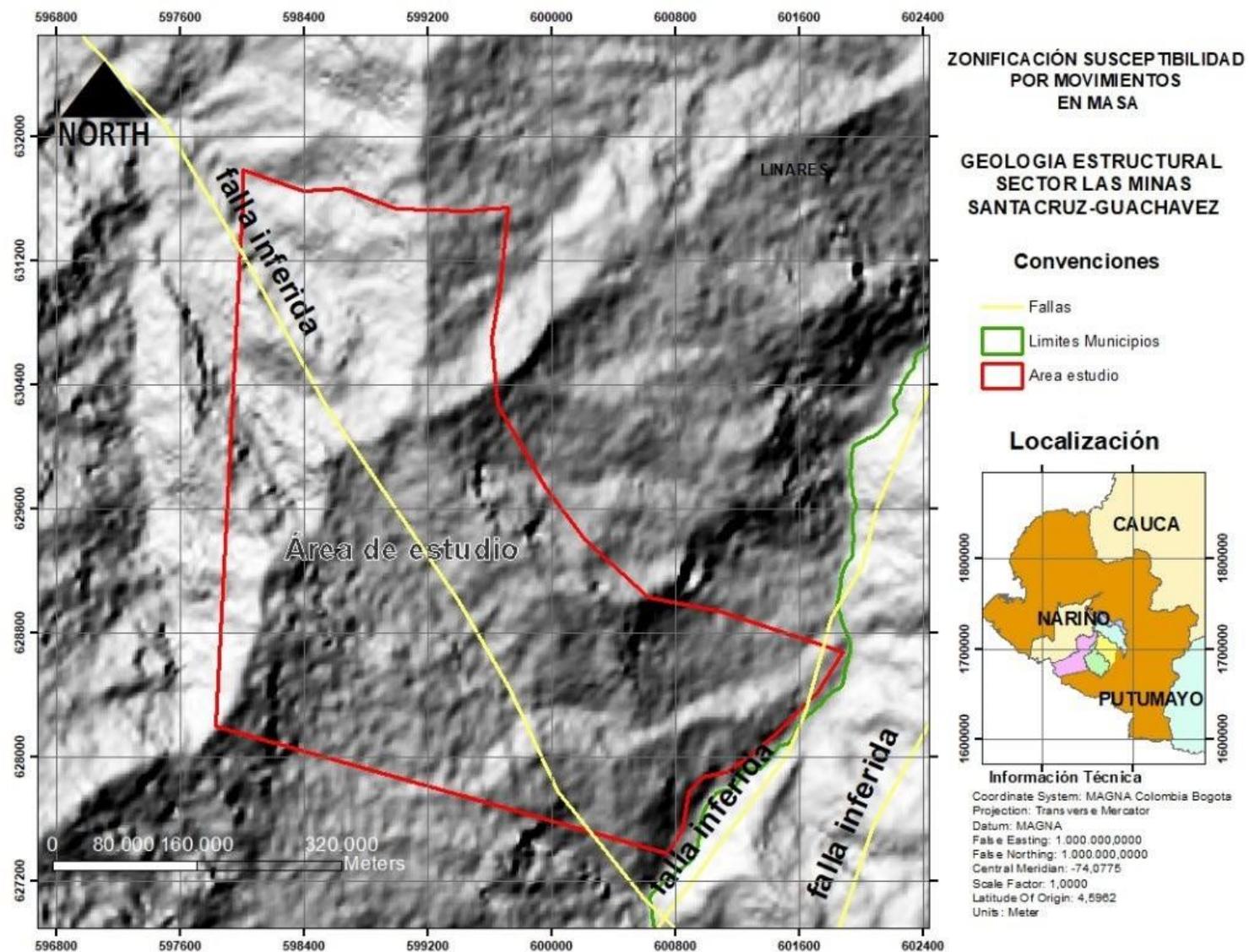
Anexo 2 Mapa de precipitación anual período 1994 - 2024. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos de pluviométricos del IDEAM.



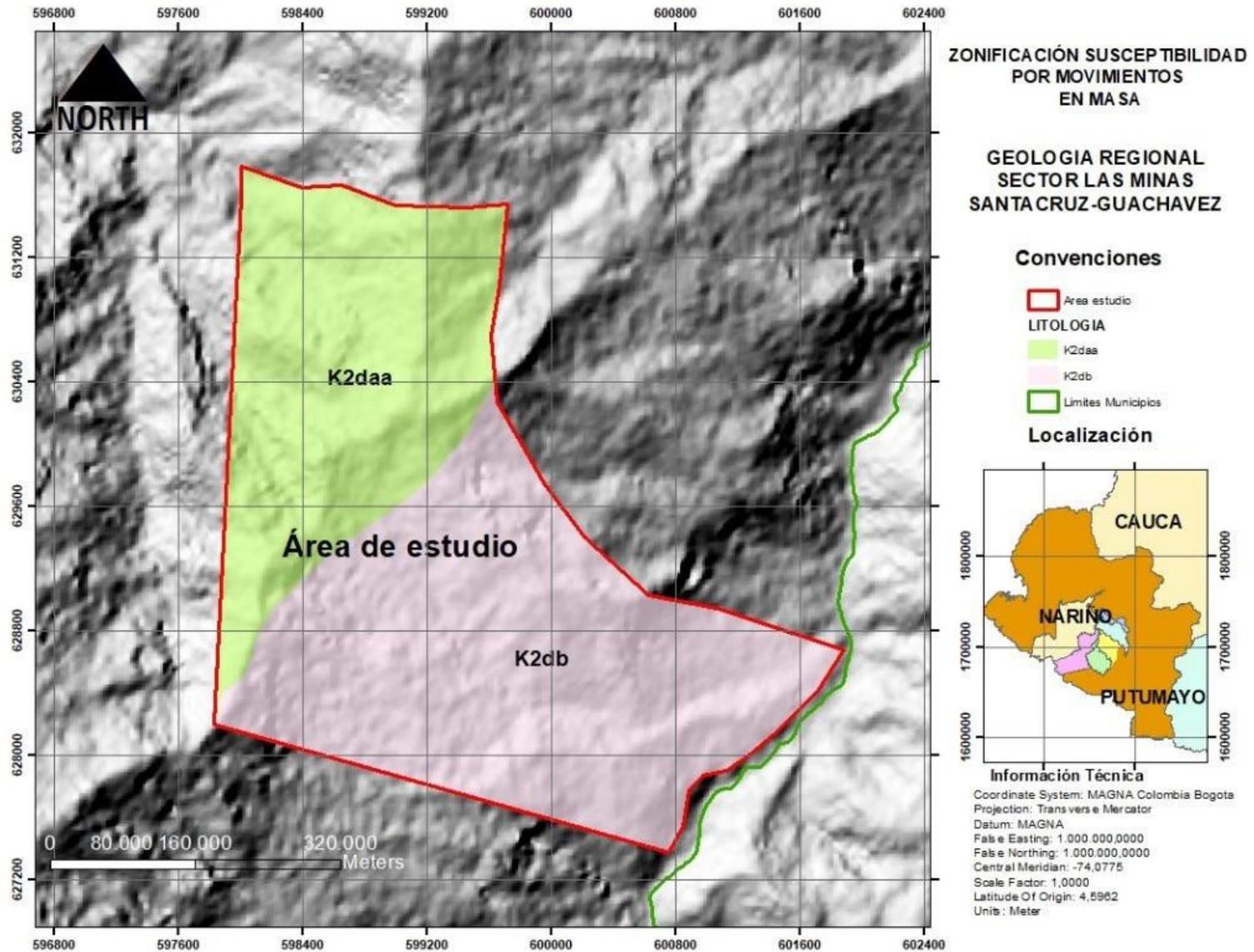
Anexo 3 Mapa de precipitación máxima anual período 1994 - 2024. Fuente: Elaboración Propia, a partir de datos de pluviométricos del IDEAM



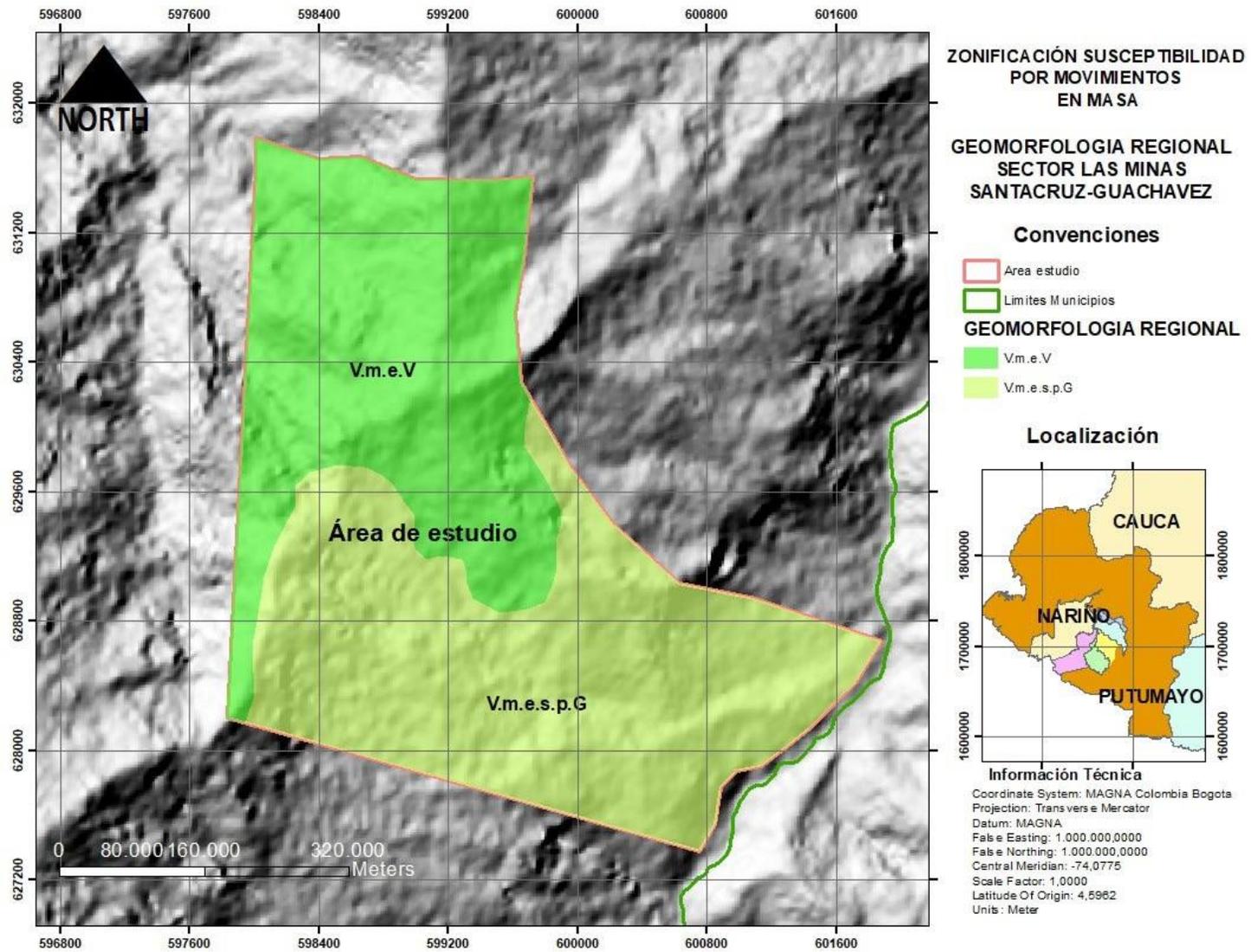
Anexo 4 Mapa de cobertura de la tierra o uso del suelo. Fuente: Adaptado de IDEAM, 2018.



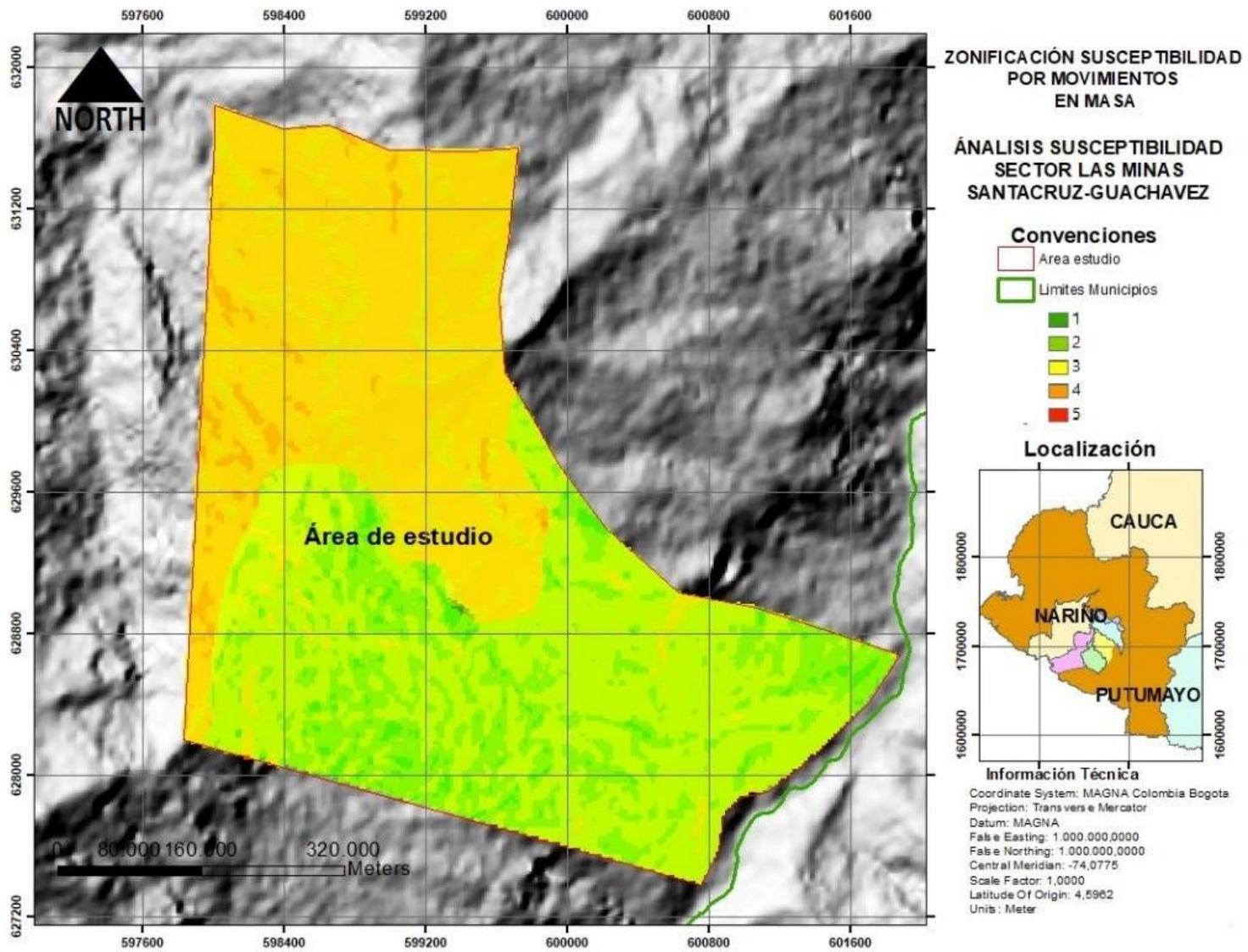
Anexo 5 Geologia Estructural Elaboración Propia a partir de Plancha 428 Tuquerres. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.



Anexo 6 Unidades Litológicas Elaboración Propia a partir de Plancha 428 Tuquerres. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.



Anexo 7 Mapa Geomorfológico del área local. Fuente Mapa geológico Plancha 428 Tuquerres.



Anexo 8 Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. Fuente Elaboracion Propia



Universidad<sup>®</sup>  
Católica  
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia  
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad  
*Dominicas de La Presentación*  
de la Santísima Virgen

*Universidad Católica de Manizales*  
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia  
PBX (6)8 93 30 50 - [www.ucm.edu.co](http://www.ucm.edu.co)