

“Análisis de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa en el corredor vial Santiago y Salazar, Departamento Norte de Santander”

**Katherin Vanessa Ortega Diaz**

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información geográfica

**Asesor:**

Geólogo\_Ms.. Carlos Marcelo Jaramillo Echeverry

Línea de Investigación

Análisis y Modelamiento Espacial

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

## Resumen

El presente documento se enfoca en el Análisis de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa en el corredor vial Santiago y Salazar, Departamento Norte de Santander. Con la implementación de este análisis se busca poder generar nuevas zonas de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, identificar focos de antecedentes ocurridos, generar nuevos insumos que pueden ser de uso de las diferentes organizaciones públicas que, ayudado a la oportuna preparación y respuesta, y prevención de riesgos y daños que esta problemática pueda ocasionar. El informe final tuvo como propósito realizar un análisis de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en el corredor vial. A través de la recopilación y procesamiento de información geoespacial relevante y un inventario detallado de eventos previos registrados en el catálogo de peligros naturales del SIMMA-SGC, se evaluaron de manera precisa las áreas de mayor nivel de susceptibilidad, Mediante la aplicación del método de Análisis Jerárquico de Proceso (AHP) y el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). La aplicación de esta metodología integró criterios como: geología, uso del suelo, pendiente, geomorfología y cobertura de la tierra, que mediante el método de comparación por pares realizó una evaluación para generar juicios de valor, con la ayuda de diferentes profesionales que participaron, generando los pesos ponderados para cada criterio. Se identificó un índice de susceptibilidad moderadamente alto, con los siguientes porcentajes: moderada (33.65%) y alta (27.55%). Finalmente, se propuso la actualización del inventario usando plataformas geoinformáticas y la aplicación de los SIG, lo que mejorará la gestión de la información y facilitará una respuesta más efectiva durante emergencias.

**Palabras clave: SIG, Análisis, Multicriterio, Mapa, Susceptibilidad, Eventos, AHP.**

## Abstract

This document focuses on the Susceptibility Analysis for mass removal phenomena in the Santiago and Salazar Road corridor, Norte de Santander Department. With the implementation of this analysis, we seek to generate new areas of susceptibility to mass removal phenomena, identify sources of antecedents that have occurred, generate new inputs that can be used by the different public organizations that, helped with the timely preparation and response, and prevention of risks and damages that this problem may cause. The purpose of the final report was to carry out an analysis of the susceptibility to mass removal phenomena in the road corridor. Through the collection and processing of relevant geospatial information and a detailed inventory of previous events recorded in the SIMMA-SGC natural hazard catalog, the areas with the highest level of susceptibility were precisely evaluated, through the application of the Analysis method. Hierarchical Process (AHP) and the use of Geographic Information Systems (GIS). The application of this methodology integrated criteria such as: geology, land use, slope, geomorphology and land cover, which through the pairwise comparison method carried out an evaluation to generate value judgments, with the help of different professionals who participated, generating the weighted weights for each criterion. A moderately high susceptibility index was identified, with the following percentages: moderate (33.65%) and high (27.55%). Finally, updating the inventory using geoinformatic platforms and the application of GIS was proposed, which will improve information management and facilitate a more effective response during emergencies.

**Keywords: GIS, Analysis, Multicriteria, Map, Susceptibility, Events, AHP.**

# Contenido

Pág.

<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN</b>	<b>13</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	14
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	16
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>3. ANTECEDENTES.....</b>	<b>19</b>
3.1. ÁFRICA.....	19
3.1.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO AHP (PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA) PARA MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD .....	19
3.1.2 MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD CON FINES DE MITIGACIÓN Y RIESGO DE DESLIZAMIENTO ....	21
3.2. ASIA .....	22
3.2.1 MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD CON FINES DE MITIGACIÓN Y RIESGO DE DESLIZAMIENTO ....	22
3.2.2 INVENTARIO PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO CONFIABLE DE SUSCEPTIBILIDAD EN MOVIMIENTOS EN MASAS.....	23
3.2.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO AHP (PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA) PARA MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD .....	25
3.3. EUROPA.....	28
3.3.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO AHP (PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA) PARA MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD .....	28
3.3.2 MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD CON FINES DE MITIGACIÓN Y RIESGO DE DESLIZAMIENTO ....	29
3.4. CENTRO AMÉRICA.....	30
3.4.1 INVENTARIO PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO CONFIABLE DE SUSCEPTIBILIDAD EN MOVIMIENTOS EN MASAS.....	30
3.5. COLOMBIA.....	31
3.5.1 ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR FENÓMENOS DE MOVIMIENTOS EN MASA EN UN CORREDOR VIAL. ....	31
3.5.2 INVENTARIO PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO CONFIABLE DE SUSCEPTIBILIDAD EN MOVIMIENTOS EN MASAS.....	32
<b>4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL .....</b>	<b>34</b>

4.1. DECRETO 4131 DEL 2011 .....	34
4.2. LEY 1523 DEL 2012.....	34
<b>4.3. DECRETO 1807 DEL 2014.....</b>	<b>35</b>
<b>5.REFERENTE TEÓRICO .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1.1 FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA .....</b>	<b>37</b>
5.1.2 MAPA DE INVENTARIO DE FENÓMENOS DE MOVIMIENTOS EN MASA .....	38
5.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM).....	38
5.2.2 PENDIENTES .....	39
5.2.3 IMÁGENES SATELITALES .....	39
5.2.4 MAPA DE COBERTURA DE LA TIERRA .....	40
5.2.5 METODOLOGÍA CORINE LAND COVER.....	40
5.2.6 GEOMORFOLOGÍA .....	40
5.2.7 GEOLOGÍA .....	41
5.3.1 ANÁLISIS MULTICRITERIO.....	41
5.3.2 PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA (AHP) .....	42
5.4.1 SUSCEPTIBILIDAD .....	43
5.4.2 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.....	43
<b>6.METODOLOGÍA .....</b>	<b>44</b>
6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO .....	44
6.2 TIPO DE ESTUDIO .....	45
<b>6.3 PROCEDIMIENTO .....</b>	<b>46</b>
6.3.1 FASE 1 .....	46
6.3.1.1 Inventario de Eventos por fenómenos de movimientos en masa.....	46
6.3.2 FASE 2 .....	47
6.3.2.1 Pendiente .....	47
6.3.2.2 Geología.....	50
6.3.2.3 Geomorfología.....	53
6.3.2.4 Uso del suelo .....	55
6.3.2.5 Cobertura de la Tierra.....	57
6.3.3 FASE 3 .....	58
6.3.3.1 Análisis de múltiples criterios .....	58
6.3.3.2 AHP (Proceso de Jerarquía Analítica).....	59
6.3.3.3 Cálculos de la metodología AHP (Proceso de jerarquía analítica).....	60
6.3.3.4 Aplicación de la Metodología AHP (Proceso de Jerarquía analítica) .....	63
6.3.4 FASE 4 .....	65
6.3.4.1 Cálculo del índice de la susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa...	66
6.3.4.2 Superposición de capas.....	67

<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
7.1 RESULTADO FASE 1 .....	68
7.1.1 Mapa de inventario y concentración de eventos por fenómenos de remoción en masa	68
7.2 RESULTADO FASE 2 .....	70
7.2.1 Pendientes .....	70
7.2.2 Geología.....	73
7.2.3 Geomorfología.....	74
7.2.4 Uso del suelo .....	76
7.2.5 Cobertura de la Tierra.....	77
7.3 RESULTADO FASE 3 .....	80
7.3.1 Resultados de Juicio de valor individual para la metodología AHP (Proceso de jerarquía Analítica) .....	80
7.3.2 Resultados consolidados de la Metodología AHP (Proceso de jerarquía Analítica)....	85
7.4 RESULTADO FASE 4.....	87
7.4.1 Análisis de susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa.....	87
<b>8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>90</b>
<b>9.CONCLUSIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>10.RECOMENDACIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>11.REFERENCIAS.....</b>	<b>94</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1:</b> <i>Desarrollo de la perspectiva teórica .....</i>	37
<b>Figura 2:</b> <i>Enfoques de la investigación .....</i>	44
<b>Figura 3:</b> <i>Tipos de estudios cuantitativos .....</i>	45
<b>Figura 4:</b> <i>Modelo digital de elevación corredor Santiago y Salazar, Departamento Norte de Santander .....</i>	48
<b>Figura 5:</b> <i>Procesamiento del mapa de pendiente Software ArcGIS.....</i>	49
<b>Figura 6:</b> <i>Proceso de reclasificación en software ArcGIS .....</i>	50
<b>Figura 7:</b> <i>Mapa de geología corredor vial Santiago y Salazar, Departamento Nore de Santander .....</i>	51
<b>Figura 8:</b> <i>Mapa de geología convertido de formato Shapefile a formato tipo ráster en software ArcGIS .....</i>	52

<b>Figura 9:</b> <i>Mapa de geomorfología del corredor vial Santiago y Salazar ,departamento Norte de Santander formato tipo shapefile .....</i>	<b>53</b>
<b>Figura 10:</b> <i>Mapa de geomorfología formato tipo raster y tabla de conteo de pixeles del corredor vial Santiago y Salazar, Departamento Norte de Santander .....</i>	<b>54</b>
<b>Figura 11:</b> <i>Mapa de uso del suelo del Corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander (Formato Tipo Shapefile ) .....</i>	<b>55</b>
<b>Figura 12:</b> <i>Mapa de uso del suelo y conteo de pixeles Formato tipo ráster del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>56</b>
<b>Figura 13:</b> <i>Imagen satelital del Corredor Vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>57</b>
<b>Figura 14:</b> <i>Proceso de la metodología AHP en el análisis de susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar, departamento, Norte de Santander .....</i>	<b>65</b>
<b>Figura 15:</b> <i>Jerarquía de proceso para la elaboración del mapa de susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa .....</i>	<b>66</b>
<b>Figura 16:</b> <i>Tipo de eventos de fenómenos de movimientos en masa encontrados dentro del corredor vial Santiago y Salazar, departamentos Norte de Santander.....</i>	<b>68</b>
<b>Figura 17:</b> <i>Gráfica de longitud de masa por fenómenos de remoción en masa encontrados dentro del corredor vial Santiago y Salazar, departamentos Norte de Santander .....</i>	<b>69</b>
<b>Figura 18:</b> <i>Mapa de inventario y concentración de eventos por fenómenos de remoción en masa identificados dentro del corredor vial Santiago y Salazar, departamentos Norte de Santander.....</i>	<b>70</b>
<b>Figura 19:</b> <i>Mapa de pendientes del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>71</b>
<b>Figura 20:</b> <i>Porcentajes de niveles de susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>72</b>
<b>Figura 21:</b> <i>Mapa de pendientes Reclasificado según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander.....</i>	<b>72</b>
<b>Figura 22:</b> <i>Mapa de geología según susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>73</b>
<b>Figura 23:</b> <i>Porcentajes de geología según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>74</b>
<b>Figura 24:</b> <i>Mapa de geomorfología según susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar departamento Norte de Santander .....</i>	<b>75</b>
<b>Figura 25:</b> <i>Porcentajes de Geomorfología Según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>75</b>
<b>Figura 26:</b> <i>Mapa de Uso del suelo según susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>76</b>
<b>Figura 27:</b> <i>Porcentajes de uso del suelo según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>77</b>
<b>Figura 28:</b> <i>Mapa de cobertura de la Tierra del Corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>78</b>
<b>Figura 29:</b> <i>Porcentajes de coberturas de la tierra en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander .....</i>	<b>78</b>

---

<b>Figura 30:</b> <i>Mapa de cobertura de la tierra según susceptibilidad corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander</i> .....	79
<b>Figura 31:</b> <i>Porcentajes de cobertura de la tierra según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander</i> .....	80
<b>Figura 32:</b> <i>Matriz de comparación por pares resultado consolidado</i> .....	86
<b>Figura 33:</b> <i>Consolidado de pesos ponderados y resumen</i> .....	86
<b>Figura 34:</b> <i>Mapa de análisis de susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa del corredor vial Santiago y Salazar, departamento, Norte de Santander</i> .....	88
<b>Figura 35:</b> <i>Porcentajes índice de susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento, Norte de Santander</i> .....	89

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1:</b> <i>Reclasificación de pendientes</i> .....	49
<b>Tabla 2:</b> <i>Reclasificación de unidades geológicas según susceptibilidad para el corredor vial Santiago y Salazar Departamento Norte de Santander</i> .....	52
<b>Tabla 3:</b> <i>Reclasificación según susceptibilidad de la geomorfología en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander</i> .....	55
<b>Tabla 4:</b> <i>Reclasificación susceptibilidad uso de suelo corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander</i> .....	57
<b>Tabla 5:</b> <i>Reclasificación por susceptibilidad variable cobertura de la Tierra</i> .....	58
<b>Tabla 6:</b> <i>Escala fundamental de comparación por pares</i> .....	59
<b>Tabla 7:</b> <i>Cálculos de la metodología AHP</i> . .....	63
<b>Tabla 8:</b> <i>Aplicación de la metodología AHP</i> .....	64
<b>Tabla 9:</b> <i>Juicios de valor individuales, metodología AHP</i> .....	85

## Lista de símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$A$	Área	$m^2$	$\iint dx dy$
$n$	Es el orden de la matriz	1	Ver (Saaty 1980 ), (Akgun, A, 2012).
$CI$	Índice de consistencia	$X$	$CI = \frac{(\lambda \text{ máximo} - \text{norte})}{(\text{norte} - 1)}$
$RI$	Promedio del índice de consistencia resultante	$\bar{x}$	$CR = \frac{CI}{IR}$

### Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\lambda$	lambda	1	Valor propio más grande o principal de la matriz
$\Psi$	<i>Psi</i>		Inconsistencia Ordinal
$\Delta$	(Delta)		Representa incremento o variación de una cantidad
$\alpha$	(Alfa)		Representa Coeficiente o probabilidad de un evento estadístico
$\beta$	(Beta)		Representa parámetros o

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
			coeficientes en ecuaciones
$\gamma$	(gamma)		Representa parámetros o coeficientes en ecuaciones
H	(Eta)		Representa el nivel de eficiencia en un proceso
$\Sigma$	(Sigma)		se utiliza comúnmente para representar la suma de una serie de números o términos

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
DEM	Modelo Digital de elevación
AHP	Proceso de jerarquía analítica
SIG o GIS	Sistemas de Información Geográfica
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIMMA	Sistema de información de movimientos en masa
CORPONORT	Corporación Autónoma Regional del Oriente Colombiano
LIDAR	Light Detection and Ranging (Detección de luz y rango).
ArcGIS	Nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los SIG.
FR	Análisis razón de frecuencia
MT-InSAR	Multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar.
LMS	Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de tierra
LULC	Land Use and Land Cover (Uso del suelo y cobertura de la tierra)
PCA	Análisis de Componentes Principales
SAR	Radar de apertura sintética
FCC	Compuesto de color falso
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Radiómetro espacial avanzado de emisión y reflexión térmica)
CV	Cálculo del vector de consistencia
CI	Índice de consistencia
RI	Índice de Consistencia Aleatoria
CR	Radio de Consistencia

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
RGMM	Método de media geométrica por filas
MRE	Error relativo medio
GCI	índice de consistencia geométrica
MCDM	modelos híbridos de toma de decisiones multicriterio
IIM	método de índice integrado
AHP-TOPSIS	Técnica de preferencia de orden por similitud con la solución ideal
AHP-VIKOR	Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso
AUROC	área bajo la curva característica operativa del receptor
GAMM	modelo de efectos mixtos lineal generalizado basado en estadísticas
TBMM	modelo de efectos mixtos potenciado por árboles basado en aprendizaje automático
Qs	índice de suma de calidad
AUC	área bajo la curva
ROC	característica operativa del receptor
FAHP	Proceso Analítico Jerárquico Difuso
FR	Relación de frecuencia
LGR	regresión logística
ML	técnicas de aprendizaje automático
SVM	máquinas de vectores de soporte
LR	regresión lineal
CVA	cambios de análisis de vectores de cambio
VW	teoría de pesos de variables
AHP-VW	Proceso de jerarquía analítica-pesos de variables
MLP-VW	perceptrón estadístico multicapa-pesos de variables

# 1.Planteamiento del problema de investigación y su justificación

Los fenómenos de remoción en masa (deslizamientos, desprendimiento de rocas, flujos no canalizados y flujos torrenciales, entre otros) son causantes de desastres naturales ya que provocan cambios drásticos en la morfología del paisaje, daños a infraestructura urbana y vial (Kavzoglu, T., Sahin, EK y Colkesen, I., 2014). En Colombia, según la Ley 1523 de 2012, el artículo 12 establece la responsabilidad de los gobernantes y alcaldes en la gestión de riesgos y desastres dentro de sus respectivas jurisdicciones. Adicionalmente, el artículo 20 dispone la creación del Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo, y el artículo 21 especifica la responsabilidad del comité en la identificación de escenarios de riesgo y sus diferentes factores.

Además de lo anterior, se suma la creación del catálogo de peligros naturales por el SIMMA- SGC, donde se incluyen reportes de eventos deslizamientos de tierra y flujos naturales, donde se ha podido recolectar alrededor de 30,730 deslizamientos que causaron 34,198 muertos y pérdidas económicas de más de US\$600 M en el período 1900-2018 (García-Delgado, H., Petley, DN, Bermúdez, MA et al., 2022). Con la ocurrencia de estos eventos se tiene como consecuencia impactos de tipo económico, social y ambiental para la región del occidente del departamento del Norte de Santander, los eventos de fenómenos de remoción en masa pueden causar muertes a vidas humanas tanto directa o indirectamente, igualmente daños a la infraestructura vial afectado la conectividad terrestre, el comercio y turismo del municipio del área de estudio y de los municipios vecinos (CEPAL, BID, 2012).

La ocurrencia de este tipo de fenómenos modifica las actividades económicas y sociales de los pobladores, ya que pueden verse afectadas las organizaciones educativas, de salud, y

umenta la cifra de desempleo en la región. En aspectos ambientales estos eventos también ocasionan pérdida de la cobertura vegetal, afectando el ecosistema de aves y otras especies animales propias del lugar, a su vez ocasionando colmatación de las fuentes hídricas (CEPAL, BID, 2012). Todos los fenómenos de remoción en masa afectan principalmente a los habitantes de los municipios presentes en el área de influencia del corredor vial Santiago, Salazar, donde intervienen las alcaldías locales de cada uno de ellos, así como CORPONORT.

### **1.1 Descripción del área problemática**

El corredor vial entre Santiago y Salazar tiene una longitud de 22 km, este tiene una gran importancia para la región en términos de conectividad vial, ya que facilita la conexión entre diferentes municipios como lo son (Gramalote, Lourdes, Cachira, Arboledas, Villa Caro y Cucutilla), promoviendo el comercio, turismo, y el transporte de bienes y servicios. Este trayecto se caracteriza por un relieve muy montañoso, presentando una gran variedad de geformas como espinazos, valles, lomas y también cuerpos de agua; encontrando un rango amplio de variabilidad en las pendientes, las cuales se encuentran entre los 19° y 66°, según los datos del Sistema de Información para la Gestión de Datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME, 2024). La región experimenta variaciones climáticas notables, con una precipitación considerablemente alta, que oscila entre 1,139 y 2,500 mm anuales. Estas condiciones pueden causar deslizamientos de tierra, flujos, caídas de rocas y afectar el tránsito vial en el corredor; la mayor parte del corredor vial se encuentra en un nivel alto de susceptibilidad geológica lo que indica que esta zona es propensa a experimentar deslizamientos de tierra, inestabilidad del suelo, erosión y otros fenómenos geológicos que pueden afectar la integridad de la carretera.

## 1.2 Formulación del problema

¿Cómo puede el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis multicriterio ayudar en la determinación de zonas de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa en la zona de estudio?

El corredor vial que conecta Santiago y Salazar, en el departamento de Norte de Santander, atraviesa una región geológicamente compleja y propensa a fenómenos de remoción en masa. La alta susceptibilidad geológica de esta área representa un riesgo significativo para la infraestructura vial, la seguridad de los usuarios y la conectividad de las comunidades locales. Se evidencia en el corredor vial antecedentes de deslizamientos en zonas que han sido muy propensas a estos, como en la ladera contigua al casco urbano del municipio de Santiago. Cerro la Cruz en el barrio Villas de Santiago, donde se presentaron eventos en el 2010 y en el 2024. Se encuentran también eventos registrados al inicio del corredor vial con incidencias de deslizamientos y flujos hacia el río Peralonso. De igual forma en áreas que hacen parte del municipio de Salazar, estos eventos se concentraron en las zonas donde existe un mayor nivel de elevaciones, pero se encuentra solo 4 eventos registrados, lo que genera preocupación, ya que, por sus características, esta zona es muy propensa a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa. De acuerdo con esto se muestra la necesidad de crear un inventario de este tipo de eventos, para prevenir su ocurrencia en el futuro y poder tomar decisiones preventivas en el corredor vial.

### **1.3 Justificación**

En el corredor vial Santiago y Salazar, ubicado en el Departamento Norte de Santander, se ha identificado la necesidad de implementar un sistema de identificación para eventos de fenómenos de remoción en masa. Actualmente, las entidades responsables de gestionar los riesgos y desastres, relacionados con este tipo de fenómenos en la zona de estudio como las alcaldías locales, no disponen de un inventario adecuado que facilite la prevención, preparación y respuesta, garantizando una visión más detallada de la zona de estudio, pudiendo generar un mejor resultado con: la respuesta rápida en el caso de emergencia, identificación de puntos críticos, gestión efectiva de la seguridad vial. La aplicación de un análisis de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa es vital importancia para todos los actores involucrados, comunidades, alcaldías, corporaciones, ya se vuelve de mucha utilidad la identificación de nuevas zonas de susceptibilidad donde pueden ocurrir nuevos eventos y poder actuar ante una emergencia. Este tipo de análisis no se ha realizado antes en este corredor vial, así que genera resultados novedosos ya que se pueden integrar datos espaciales e imágenes satelitales; utilizando un método heurístico, técnicas de análisis espacial y estadística; desde la generación de los resultados más destacados se encuentran el análisis de susceptibilidad mediante la aplicación del método AHP, y generación insumos importantes como el mapa de inventario y concentración de eventos de fenómenos de remoción en masa, y el mapa de cobertura de la tierra a una escala muy detallada.

## 2.Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Realizar un análisis de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en el corredor vial de Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander.

### 2.2 Objetivos específicos

**Realizar** un inventario de ocurrencia de eventos de fenómenos en remoción en masa con información registrada en el catálogo de peligros naturales por el SIMMA-SGC.

**Recopilar** y procesar información geoespacial necesaria para el análisis de susceptibilidad por fenómenos en remoción en masa.

**Desarrollar** un análisis de criterios múltiples aplicando método AHP utilizando los SIG para evaluar la susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa en la zona de estudio.

**Realizar** un análisis de superposición utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar un mapa detallado de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa.



## 3. Antecedentes

### 3.1. África

#### 3.1.1 Aplicación del método AHP (Proceso de jerarquía Analítica) para Mapas de susceptibilidad

Abdi, A., Bouamrane, A., Karech, T., Dahri, N. y Kaouachi, A. (2021). Realizaron un estudio relevante donde el objetivo principal fue comparar y evaluar la eficacia de dos modelos multicriterio en la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en Constantina, noreste de Argelia. Para ello, se generaron mapas de susceptibilidad utilizando el proceso de jerarquía analítica (AHP) y el AHP difuso (FAHP) a partir de doce factores condicionantes de deslizamientos de tierra, entre los que se incluyeron la pendiente, la litología, la cobertura del suelo, la proximidad a la red de drenaje, la distancia a carreteras y fallas, el índice de humedad topográfica, el índice de potencia de la corriente, la curvatura de la pendiente, el índice de vegetación de diferencia normalizada, la orientación de la pendiente y la elevación. En este estudio, se emplearon ambos modelos para determinar los valores de ponderación de los factores condicionantes. La validación de estos modelos se llevó a cabo mediante el análisis de la característica operativa del receptor (ROC) y el área bajo la curva (AUC), comparando los resultados obtenidos con un mapa de inventario de deslizamientos de tierra elaborado a partir de publicaciones científicas, informes de autoridades locales, estudios de campo y análisis de imágenes satelitales. Según los valores de AUC, el modelo FAHP obtuvo la puntuación más alta (0,908), seguido por el modelo AHP (0,777). En consecuencia, el modelo FAHP demostró ser más consistente y preciso que el AHP en este caso. Los resultados obtenidos de este estudio

---

serán de gran utilidad en la toma de decisiones para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra y la gestión del uso del suelo.

**Li, M., Guo, Y., Luo, D. y Ma, C. (2023).** Desarrollaron un estudio donde se emplearon enfoques híbrido de teoría de pesos y variables de análisis jerárquico y perceptrón multicapa para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra, el estudio realizado en el condado de Luanchuan, China, en el que se realizó la recopilación de datos relevantes a estos fenómenos de remoción en masa del área de estudio como: inventario de deslizamientos, datos climáticos, mapa geológico, mapa geomorfológico, DEM, uso del suelo, litología, distancia de la falla, distancia del río, aspecto. Posteriormente en la metodología se aplicaron la teoría de pesos de variables (VW), AHP-VW y perceptrón estadístico multicapa-pesos de variables (MLP-VW). Los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de los cuatro modelos se validaron mediante la curva ROC (característica operativa del receptor). El área bajo la curva (AUC) con valores de 0,825 para el modelo AHP, 0,879 para el modelo MLP, 0,873 para el modelo AHP-VW y 0,915 para el modelo MLP-VW. Los resultados expuestos en el mapa de susceptibilidad a deslizamientos realizado mediante MLP estadístico es mejor que el dibujado mediante AHP, lo que es coherente con muchos otros resultados de investigación actuales. consecutivamente, VW puede mejorar significativamente el rendimiento de los modelos individuales de pesos. Los mapas de susceptibilidad a deslizamientos dibujados por el modelo MLP estadístico híbrido VW tendrá una gran importancia para la toma de decisiones y la planificación del uso de la tierra regional y para fines de mitigación del riesgo de deslizamientos.

### 3.1.2 Mapas de susceptibilidad con fines de mitigación y riesgo de deslizamiento

Elmoulat, M., Brahim, L.A., Elmahsani, Año (2021), El objetivo de esta investigación fue modelar la susceptibilidad por los movimientos en masa (MMS) en la provincia de Tetuán. Primero, se identificaron y mapearon espacialmente diferentes tipos de movimientos en masa (colapsos, flujos de lodo y deslizamientos) mediante imágenes satelitales y trabajo de campo. Luego, se seleccionaron los parámetros predictivos que influyen en la ocurrencia de movimientos en masa, como la litología, uso del suelo, densidad de fallas, densidad hidrográfica, pendiente, orientación y elevación del terreno. Para modelar la susceptibilidad, se utilizó un método heurístico, elegido por permitir la intervención y juicio experto en la selección de parámetros y asignación de pesos, a diferencia de métodos automáticos como el fractal, factorial y de redes neuronales. Los resultados mostraron una validación del 70% en comparación con los datos de campo e incluyeron cinco clases de susceptibilidad: no susceptible, baja, moderada, alta y muy alta. La originalidad de este trabajo radicó en que el mapa de susceptibilidad indica áreas de carreteras, viviendas, urbanización y presas en riesgo, sirviendo como herramienta de decisión para planes de manejo y la selección de sitios para nuevos proyectos, ayudando a mitigar los efectos socioeconómicos que causarían los movimientos en masa en Tetuán.

## 3.2. Asia

### 3.2.1 Mapas de susceptibilidad con fines de mitigación y riesgo de deslizamiento

**Binh Thai Pham et al. (2022).** Desarrollaron un estudio de modelos basados en árboles de decisión alternados multiclase para el mapeo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la región del distrito de Muong Nhe de la provincia de Dien Bien, Vietnam. Este método se utilizó como clasificador base con Dagging, MultiboostAB y Random Subspace (RSS). La ubicación de los deslizamientos de tierra pasados se realizó a través de estudios de campo y la interpretación de imágenes de Google Earth, fotografías aéreas y archivos históricos del distrito de Muong Nhe. Las ubicaciones de los deslizamientos de tierra se realizaron con las comparaciones de doce factores condicionantes de deslizamientos de tierra (pendiente, aspecto, elevación, curvatura, índice de humedad topográfica (TWI), índice de potencia de corriente (SPI), geología, acumulación de flujo, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y distancia a ríos, caminos y fallas) para investigar los patrones espaciales de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en el área de estudio. Los resultados mostraron que el modelo RSS-MADT logró el mayor desempeño en términos de predicción de futuros deslizamientos de tierra (AUC = 0,878), seguido por DG-MADT (AUC = 0,857), MAB-MADT (AUC = 0,854) y el modelo MADT único (AUC = 0,828), respectivamente. Aproximadamente el 13% y el 10% del distrito de Muong Nhe fueron identificados como de susceptibilidad moderada y severa (alta/muy alta) a ocurrencias de deslizamientos de tierra. Estas áreas que se ubicaron a lo largo de los ríos, principalmente en las partes centrales del distrito de Muong Nhe, deben se

recomendó un tratamiento prioritario para lograr dar una mejor respuesta en la toma de decisiones y mitigar los impactos negativos de futuros deslizamientos de tierra.

### **3.2.2 Inventario para el desarrollo de un modelo confiable de susceptibilidad en movimientos en masas**

**He, Y., & Zhang, Y. (2022).** Realizaron un proyecto de mapas de susceptibilidad donde se realizó las comparaciones de tres modelos de efectos mixtos para el mapeo de susceptibilidad a movimientos en masa, que consistió en Generar un inventario de fenómenos de movimientos en masas, en una región de China. Ya que el aumento en estos eventos era evidente en la región, dentro de la región se encontró la necesidad de desarrollar un modelo confiable de susceptibilidad a los movimientos en masas a nivel nacional para identificar regiones propensas a movimientos de masas, en el que posteriormente se formularían estrategias adecuadas de prevención de desastres. Esta investigación comparó tres modelos de efectos mixtos para explorar el modelo de mapeo de susceptibilidad más plausible y robusto, considerando la información inherentemente heterogénea y completa sobre movimientos de masas. se realizó la selección de ocho factores críticos que influyen en los movimientos de masas como: la pendiente, el aspecto, la curvatura del perfil, la curvatura del plano, la densidad de caminos, la densidad de ríos, la humedad del suelo y la litología, el uso de la tierra, la geología. Consecutivamente se adoptaron tres modelos de efectos mixtos: el modelo de efectos mixtos lineal generalizado basado en estadísticas (GLMM), el modelo de efectos mixtos aditivos generalizados (GAMM) y el modelo de efectos mixtos potenciado por árboles basado en aprendizaje automático (TBMM). Estos modelos se utilizaron para evaluar la susceptibilidad de

tres tipos distintos de movimientos de masas los cuales contaron con los siguientes registros de eventos (es decir, 28.814 flujos de escombros, 54.586 desprendimientos de rocas y 108.432 deslizamientos de tierra), respectivamente. Se realizó una comparación con los resultados tanto desde las perspectivas cuantitativas como cualitativas. Los resultados en el que se mostró un mejor comportamiento fue en el TBMM en los tres casos con AUROC (área bajo la curva característica operativa del receptor) de validación cruzada, validación cruzada espacial y predicciones sobre inventario simulado altamente sesgado, todas superiores a 0,8. Además, los patrones de predicción espacial del TBMM estaban más en línea con el proceso geomorfológico natural subyacente, lo que indica que el TBMM, el análisis de la contribución de los factores mostró el papel clave de los factores topográficos en la predicción de la ocurrencia de movimientos en masa, seguidos de la densidad de caminos y la humedad del suelo. Este estudio contribuye a evaluar la situación general de susceptibilidad a los movimientos en masa de China y ayuda a los responsables de las políticas a planificar la mitigación de riesgos. Además, demuestra el enorme potencial del TBMM para la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos en masa.

**Aslam et al. (2022).** Desarrollaron un proyecto donde realizaron diferentes evaluaciones de modelos de susceptibilidad a deslizamientos de tierra a escala local, donde el objetivo principal fue el de realizar análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra para identificar áreas peligrosas y de alto riesgo, seguidas de acciones apropiadas para reducir los impactos negativos resultantes de los deslizamientos de tierra en el área del distrito de Chitral, norte de Pakistán y comparar tres técnicas de aprendizaje automático (ML): regresión logística LGR, regresión lineal (LR) y máquinas de vectores de soporte (SVM), además de las dos técnicas de

toma de decisiones multicriterio MCDM: proceso de jerarquía analítica AHP y orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS). Respectivamente, realizaron mapas de inventario de deslizamientos de tierra a partir de imágenes satelitales LANDSAT-8 a través del método de detección de cambios de análisis de vectores de cambio (CVA). Se identificaron cambios producidos por más de 500 puntos de deslizamiento de tierra. Después de una corrección manual de pos-procesamiento, los puntos de inventario de deslizamientos de tierra se dividieron aleatoriamente en dos conjuntos con una proporción de 70/30 para entrenar y validar el desempeño de las técnicas de ML. Dieciséis factores topográficos, hidrológicos y geológicos relacionados con deslizamientos de tierra del área de estudio se preparan como capas SIG. Se utilizan para producir mapas de susceptibilidad a deslizamientos (LSM) con técnicas de superposición ponderada que utilizaron diferentes juicios de valor a los factores relacionados con los deslizamientos. La evaluación de la precisión muestra que las técnicas ML superan a los métodos MCDM, mientras que SVM arrojó la mayor precisión del 88 % para el LSM resultante.

### **3.2.3 Aplicación del método AHP (Proceso de jerarquía Analítica) para Mapas de susceptibilidad**

**Devara, Meghanadh.Tiwari, Ashutosh, Dwivedi,Ramji. (2021)**, Realizaron un estudio ubicado en la región de Uttarakhand, India, donde el objetivo principal fue la realización de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra (LMS) teniendo en cuenta la integración de múltiples capas temáticas destacadas, incluidos los productos derivados de DEM (elevación, pendiente y aspecto) y otros parámetros como litología, geomorfología, LULC, etc. parámetros a los cuales se les puede asignaron pesos óptimos utilizando el método de proceso de jerarquía analítica (AHP), seguido de una superposición ponderada basada en SIG . La metodología

propuesta se validó inicialmente utilizando puntos de deslizamiento con zonas de deslizamiento susceptibles identificadas, Se implementó un enfoque similar en una pila de 60 imágenes Sentinel-1A para generar un LSM actualizado. La eficacia del método se realizó mediante una comparación de un mapa de deslizamientos de tierra (LSM) preparado con y sin la inclusión de los resultados de MT-InSAR, realizando una ampliación de investigaciones anteriores sobre la generación de LMA. Este estudio utilizó información de satélites SAR de múltiples constelaciones para la realización de del inventario de deslizamientos de tierra utilizando el método de análisis multicriterio.

Finalmente se tiene que Los resultados de desplazamiento de MT-InSAR son ambiguos para detectar zonas inestables, y el enfoque que se propuso y utilizó desplazamientos derivados de MT-InSAR junto con otros parámetros influyentes ha mejorado sustancialmente el mapeo de zonas susceptibles a deslizamientos de tierra. El enfoque que se propuso tubo un desempeño muy eficiente en la identificación de la actividad de las zonas de susceptibilidad a los deslizamientos de tierra durante 10 años. El total de zonas que se identificaron a partir del LSM actualizado, el 44,5 % (16,35 km cuadrados) se identificaron recientemente, el 28,5 % (28,70 km cuadrados) se estabilizaron y el 27 % (11,39 km cuadrados) siguen zonas activas.

**Panchal, S. y Shrivastava, A. (2021).** Desarrollaron un estudio donde el objetivo principal fue la comparación de los modelos de relación de frecuencia (FR), entropía de Shannon y proceso de jerarquía analítica (AHP) para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la región de Shimla capital de la provincia de Himachal Pradesh en la India, inicialmente se elaboró un inventario de deslizamientos que obtuvo más de 1500 eventos de deslizamientos, utilizando los datos históricos disponibles y un estudio de campo. De los eventos totales de deslizamientos de tierra, se utilizó el 30% de los datos para el entrenamiento y el 70%

para la prueba. Se tuvieron en cuenta factores condicionantes a los deslizamientos de tierra como fueron: pendiente, aspecto de la pendiente, aspecto, índice de la humedad topográfica, litología, densidad de drenaje, distancia de las carreteras, distancia de las fallas, cobertura de la tierra. Se implementaron los modelos de razón de frecuencia, entropía de Shannon y AHP, y se prepararon tres mapas de susceptibilidad a deslizamientos para el área de estudio. Los mapas finales de susceptibilidad a deslizamientos de tierra se validaron utilizando una curva ROC (curva característica operativa del receptor). El modelo de relación de frecuencias (FR) mostró la mayor precisión, con un área bajo la curva ROC de 0,925, mientras que el modelo de entropía de Shannon alcanzó una precisión de 0,883. El proceso analítico jerárquico (AHP) obtuvo la precisión más baja, con un área bajo la curva ROC de 0,732. Los resultados de este estudio pueden ser utilizados por ingenieros y tomadores de decisiones para mejorar la gestión y mitigación de los deslizamientos de tierra en el área de estudio.

**Jam, A., Mosaffaie, J., Sarfaraz, F., Shadfar, S. y Akhtari, R. (2021).** Realizaron un a trabajo en e l cual se destacó como objetivo evaluar el desempeño de los modelos híbridos de toma de decisiones multicriterio para producir mapas de susceptibilidad de deslizamientos en tierra utilizando los siguientes métodos: el método de índice integrado (IIM), AHP-TOPSIS(Técnica de preferencia de orden por similitud con la solución ideal), AHP-VIKOR (Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso). Este mapeo se realizó en la cuenca hidrográfica de Alamut, Irán. Donde se utilizaron diez criterios los cuales fueron: ángulo de pendiente, aspecto de pendiente, lluvia, litología, altitud, uso de la tierra y los mapas de distancia más comunes, incluyendo distancia a falla, distancia a arroyo y distancia a carretera para producir los deslizamientos de tierra. Los pesos para cada criterio se calcularon utilizando el proceso de jerarquía analítica (AHP) basándose en las opiniones de 14 expertos. En conclusión,

el índice de suma de calidad (  $Q_s$  ) así como las curvas características operativas del receptor (ROC) se utilizaron para validar el rendimiento de los modelos MCDM. Los valores de ( $Q_s$ ) para AHP-TOPSIS, IIM y AHP-VIKOR se calcularon 0,355, 0,903 y 0,703, respectivamente. Por lo tanto, los métodos IIM y AHP-VIKOR son más eficientes que AHP-TOPSIS para predecir la ocurrencia de deslizamientos de tierra. Los valores del área bajo la curva (AUC) de las curvas ROC (característica operativa del receptor) para AHP-TOPSIS, IIM y AHP-VIKOR se calcularon 0,784, 0,853 y 0,844, respectivamente. Por lo tanto, la precisión de los modelos MCDM es aceptable para TOPSIS y excelente para IIM y AHP-VIKOR. En general, se recomienda la aplicación del método AHP en combinación con otros modelos MCDM como modelo híbrido para predecir deslizamientos de tierra según los principios de toma de decisiones grupal en AHP para la planificación del uso de la tierra y la gestión del riesgo de deslizamientos.

### **3.3. Europa**

#### **3.3.1 Aplicación del método AHP (Proceso de jerarquía Analítica) para Mapas de susceptibilidad**

**Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., y Turconi, L. (2021).** Realizaron un estudio donde el objetivo principal se basa en cartografiar la susceptibilidad a los deslizamientos en el promontorio de Portofino, una zona mediterránea que periódicamente se ve afectada por intensas lluvias que provocan deslizamientos. Basándose en más de 110 años de inventarios de deslizamientos, también se tuvieron en cuenta factores detonantes de los deslizamientos de tierra como: litología, aspecto de la pendiente, inclinación de la pendiente, uso del suelo, paisajes en

terrazas, distancia a cortes y estructuras artificiales, distancias de elementos hidrográficos, Procesos gravitacionales existentes, se ha aplicado un método de proceso analítico jerárquico (AHP) que consta de el criterio de expertos para evaluar el papel de nueve factores condicionantes de los deslizamientos, que incluyen elementos tanto naturales como antropogénicos. Se ha utilizado un subconjunto separado de datos de deslizamientos para validar el mapa. Se obtuvieron hallazgos en los que se revelan que las áreas en las que pueden producir los deslizamientos futuros son más grandes que las identificadas en el mapa oficial real adoptado en la gestión del uso del suelo y de los riesgos. Se desarrollo un nuevo mapa de susceptibilidad que mostro los posibles escenarios futuros de deslizamientos de tierra. El documento proporciona una herramienta útil de apoyo a la toma de decisiones para implementar estrategias de mitigación de riesgos y aplicar mejor la planificación del uso del suelo. Al permitir modificar los factores en función de las características locales, la metodología propuesta puede adoptarse en diferentes condiciones o contextos geográficos caracterizados por el riesgo de deslizamientos inducidos por las lluvias.

### **3.3.2 Mapas de susceptibilidad con fines de mitigación y riesgo de deslizamiento**

**Jia, G., Alvioli, M., Gariano, S., Marchesini, I., Guzzetti, F. y Tang, Q. (2021).**

Realizaron un proyecto el cual tiene como objetivo seleccionar lugares en los que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos sea nula. La ventaja de este tipo de análisis es que no requiere estimar diferentes grados de probabilidad fuera de los lugares de susceptibilidad nulos. Se realizó la comprobación y validación en el modelo de no susceptibilidad existente con 18 conjuntos de datos de deslizamientos de tierra globales y regionales, como una base previa para la aplicación

global. El modelo existente se aplicó previamente en Italia y la región mediterránea, y se definió por una curva de umbral de pendiente vs. relieve no lineal, por debajo del cual la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra es insignificante. Consecutivamente se aplicó un análisis similar y en el que se propuso un mapa global, utilizando el relieve y la pendiente obtenidos a partir de datos de elevación global con una resolución de aproximadamente 90 m. El mapa global clasifica el 82,9% de los movimientos en masa a nivel mundial con susceptibilidad nula a los deslizamientos de tierra. Las áreas no susceptibles son en líneas generales consistentes con la clase de susceptibilidad “muy baja” en los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra globales y continentales contienen un mapa nacional de no susceptibilidad en los Estados Unidos limítrofes. Los análisis cuantitativos dieron como resultado que la población y los asentamientos son más densos dentro del área no susceptible que en otras partes, lo que hace que el mapa sea de potencial interés para el análisis de no exposición, y se convierta en una gran ayuda para la planificación territorial y las respuestas a desastres a escala global.

### **3.4. Centro América**

#### **3.4.1 Inventario para el desarrollo de un modelo confiable de susceptibilidad en movimientos en masas**

(Rodríguez García, et al., 2003), Realizaron un proyecto donde el objetivo central era realizar el mapa de inventario de deslizamientos en la Republica Dominicana, destacando la importancia de estos elementos en la generación de mapas de susceptibilidad, riesgo y peligro, se obtuvieron los siguientes resultados teniendo en cuenta características geográficas, litológicas, tectónicas y climáticas particulares de los lugares de Puerto Plata, Santiago de los Caballeros y

Jarabacoa. Se registraron un total de 6085 deslizamientos (56% en S, 29% en P y 15% en J), los cuales han sido clasificados según su geometría, mecanismo de propagación, material afectado, espesor y actividad. Dentro de la metodología utilizada se destacó el desarrollo de 6 mapas en el que se tuvo en cuenta las siguientes etapas 1. Revisión de documentación bibliográfica 6 mapas geomorfológicos a escala 1:50.000 en la zona de puerto plata. 2. Revisión de informes anteriores de deslizamientos en tierra. 3. Fotointerpretación de imágenes satelitales Google Earth Pro. 4. trabajo de campo a donde se utilizó un dron DJI Mini 2 para obtener un registro fotográfico de los principales deslizamientos. 5. Integración de toda la información, delimitación de deslizamientos y su almacenamiento en un Sistema de Información Geográfica (ESRI ArcGIS 10.8). finalmente se concluye que el estudio identifica que la litología, la estructura geológica, las precipitaciones y las fallas activas son factores que influyen en la distribución y tipo de deslizamientos en las regiones estudiadas, los cuales proporcionaron una base sólida para futuros estudios y estrategias de gestión del riesgo en la República Dominicana.

## **3.5. Colombia**

### **3.5.1 Zonificación de la Susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa en un corredor vial.**

**Luisa Fernanda Osorio Marín (2019)**, Desarrollaron un proyecto que tuvo como objetivo principal la zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos en el corredor vial Cano a Mojarras, el cual se ubica entre los departamentos de Cauca y Nariño, al suroccidente de Colombia. En este trabajo se introduce el concepto de corredor hidro-geomorfométrico como metodología en la cual se busco delimitar áreas de estudio enfocadas en proyectos de susceptibilidad en corredores viales. Se integraron los paisaje mediante el cálculo

de puntos de acumulación y microcuencas sobre el eje de la vía utilizando un modelo digital de elevación (DEM). El Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI), obtenido a través del método estadístico bivariado propuesto por Van Westen (2000), se basó en un inventario de deslizamientos que cubría el 80% de los registros (302 deslizamientos). Los resultados fueron validados con el 20% restante (76 deslizamientos). Se utilizaron diversos factores como pendiente, aspecto, curvatura, índice topográfico de humedad (TWI), densidad de drenajes, cobertura de la tierra, litología y número de curva de escorrentía para evaluar la susceptibilidad del terreno a deslizamientos. Estos factores geomorfométricos se calcularon mediante geoprocesamientos utilizando un DEM (Alos Palsar) con una resolución espacial de 12,5 m. La cobertura de la tierra se obtuvo mediante la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, mientras que la litología se basó en el mapa geológico nacional (1:100,000) del Servicio Geológico Colombiano. El número de curva de escorrentía se determinó aplicando la metodología del Natural Resources Conservation Service de EE.UU. (2004). De los 89 km de vía estudiados, se encontró que 45 km estuvieron ubicados en las zonas de alta o muy alta susceptibilidad a deslizamientos, mientras que los 44 km restantes se encontraron en zonas de susceptibilidad moderada, baja o muy baja. Este estudio proporcionó información crucial para la planificación y mitigación de riesgos en proyectos de infraestructura vial en la región mencionada.

### **3.5.2 Inventario para el desarrollo de un modelo confiable de susceptibilidad en movimientos en masas**

**Salazar Gutiérrez, LF, Menjivar Flores, JC & Martínez Carvajal, HE. (2021),**

Desarrollaron un estudio cuyo objetivo principal fue caracterizar los factores que afectan la

susceptibilidad a movimientos en masa en cuencas hidrográficas regionales y contribuir al conocimiento de la susceptibilidad a deslizamientos, este estudio se realizó en la Cuenca Mica del Municipio de Pacora, Colombia. La metodología de este estudio realizado en Colombia consta con la digitalización de un DEM Modelo digital de elevación, el que fue construido con datos LIDAR del área de estudio utilizando la extensión de Hidrología del programa ArcGIS® 10.3.1. También contó con la realización de un inventario de deslizamientos el cual se realizó con la interpretación visual de ortofotografías, información LIDAR a escala 1:2000 e imágenes de Google Earth® del área de estudio del año 2016, con posterior verificación en campo. El procesamiento de la información del área de deslizamientos proyectada basada en datos SIG, se realizó utilizando imágenes dibujadas en formato vectorial de lo que resulto la ubicación geográfica y el área de cada proceso, toda esta información vectorial fue transformada a un formato ráster, teniendo en cuenta los diferentes variables estudiadas para la realización de estudios de susceptibilidad de deslizamientos de tierra como lo son geología, cartografía de suelo, Angulo de pendiente, distancia de drenajes naturales, distancia de carreteras, formas del relieve, altitud, profundidad de fallas. Para la realización del análisis de la información se utilizaron dos metodologías las cuales fueron: El análisis de razón de frecuencia (FR) y análisis de regresión logística basados en sistemas de información geográfica. Finalmente, cómo conclusión se permitieron evaluar los resultados de los métodos de regresión logística y razón de frecuencias en donde determinaron los factores que predisponentes la ocurrencia de los deslizamientos en las condiciones de la región cafetera de Colombia.

## **4.Referente normativo y legal**

A continuación, se presenta la normativa que regula a las entidades que gestionan las emergencias causadas por los fenómenos en movimientos en masa como son la unidad de gestión del riesgo y desastres y el Servicio Geológico Colombiano.

### **4.1. Decreto 4131 del 2011**

Por el cual se cambia la Naturaleza Jurídica del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). Artículo 3°. Objeto. Como consecuencia del cambio de naturaleza, el Servicio Geológico Colombiano tiene como objeto realizar la investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos del subsuelo; adelantar el seguimiento y monitoreo de amenazas de origen geológico; administrar la información del subsuelo; garantizar la gestión segura de los materiales nucleares y radiactivos en el país; coordinar proyectos de investigación nuclear, con las limitaciones del artículo 81 de la Constitución Política, y el manejo y la utilización del reactor nuclear de la Nación. (Ministerio de Minas y Energía, 2011).

### **4.2. Ley 1523 del 2012**

Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Artículo 2°. De la responsabilidad. La gestión del riesgo es responsabilidad de todas las autoridades y de los habitantes del territorio colombiano. En cumplimiento de esta responsabilidad, las entidades

públicas, privadas y comunitarias desarrollarán y ejecutarán los procesos de gestión del riesgo, entendiéndose: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres, en el marco de sus competencias, su ámbito de actuación y su jurisdicción, como componentes del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (Congreso de Colombia, 2012).

### **4.3. Decreto 1807 del 2014**

Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto de 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 3°. Estudios básicos para la revisión o expedición de Planes de Ordenamiento Territorial (POT). De conformidad con lo dispuesto en el artículo anterior para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial o la expedición de nuevos planes, se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa, que contienen:

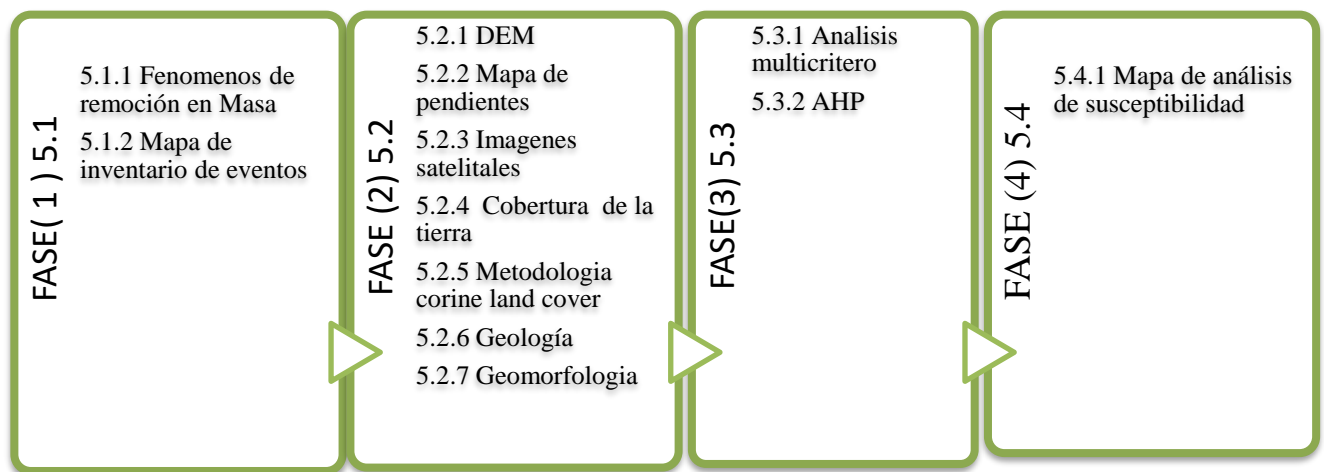
- a) La delimitación y zonificación de las áreas de amenaza;
- b) La delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza en las que se requiere adelantar los estudio& detallados a que se refiere el siguiente artículo;
- c) La delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo en las que se requiere adelantar los estudios detallados a que se refiere el siguiente

artículo; d) La determinación de las medidas de intervención, orientadas a establecer restricciones y condicionamientos mediante la determinación de normas urbanísticas.

(Ministerio de Ambiente, 2014).

## 5.Referente teórico

En este proyecto se trataron conceptos relacionados con la problemática de fenómenos en movimientos en masa y conceptos referentes a la siguiente pregunta de investigación ¿Determinar zonas de susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa a través de múltiples criterios, ayuda a que los diferentes actores involucrados tomen mejores de decisiones en la zona de estudio? posteriormente se trataran definiciones de conceptos teniendo en cuenta procedimientos técnicos del desarrollo y cumplimiento de los objetivos específicos como la generación del mapa de inventario, análisis multicriterio, mapa de susceptibilidad.



**Figura 1:** Desarrollo de la perspectiva teórica

### 5.1.1 Fenómenos de remoción en masa

Los fenómenos de remoción en masa hacen referencia a caídas, deslizamiento, propagación lateral, volcamiento, deformaciones gravitacionales, flujo, reptación (SGC,2022), estos fenómenos están catalogados como causantes de desastres naturales, la ocurrencia de estos fenómenos ha generado grandes afectaciones en pérdida de vidas humanas, igualmente pérdidas

económicas como daños a viviendas, vías, instalaciones públicas y afectaciones a los ecosistemas naturales. (Puji Hastuty, Ahmad, Roesyanto, & Ridwan Anas, 2020).

### **5.1.2 Mapa de inventario de fenómenos de movimientos en masa**

Un mapa de inventario se define como un registro de fenómenos de movimientos en masa en donde se detallan sus diferentes características incluyendo información como, código de identificación, nombre del sitio, ubicación (coordenadas, municipio, departamento, país), fecha, tipo de fenómeno de movimientos en masa (deslizamiento, flujo, caída etc.), adicional a esa información puede contener registro de impactos en víctimas humanas, y daños en valor económico. los registros en el mapa de inventario de eventos son insumo para encontrar hallazgos que tengan coincidencia con los diferentes fenómenos de movimientos en masas, y poder realizar análisis, este a su vez contribuye a la preparación de la construcción del mapa de susceptibilidad (Nedelkovska N., Peševski I., Jovanovski M., Papić J., Gorin S., Radevski I, 2020).

### **5.2.1 Modelo Digital de Elevación (DEM)**

Un DEM es una representación de tipo ráster de una superficie continua, que representa la altura de la superficie de la tierra (ESRI, 2022). El DEM o modelo Digital de elevación es el insumo principal para la generación del mapa de pendientes, se puede obtener a través de procesamiento de imágenes satelitales o con la topografía del terreno. (Idris Bello Yamusa, Mohd Suhaili Ismail, Abdulwahid Tella, 2022), (Binh Thai Pham, Abolfazl Jaafari, Presa Duc Nguyen, Mahmoud Bayatb, Hanh Bich Thi Nguyen, 2022).

### 5.2.2 Pendientes

Es un factor muy importante en la creación del mapa de susceptibilidad en donde principal objetivo es la predicción de fenómenos de movimientos en masa, estos movimientos en masa incluyen, rocas, suelo, agua, cobertura vegetal y además de muchas otras características del paisaje. El mapa de pendientes contiene características importantes como lo son, el Angulo de pendiente, elevación, longitud de la pendiente, curvatura, teniendo en cuenta esto las pendientes se clasifican de menor a mayor, donde las pendientes mayores son la que tienen un alto porcentaje de ocurrencia de estos fenómenos de movimientos en masa. (Binh Thai Pham, Abolfazl Jaafari, Presa Duc Nguyen, Mahmoud Bayatb, Hanh Bich Thi Nguyen, 2022).

### 5.2.3 Imágenes satelitales

Son las encargadas de la observación de la tierra mediante fotografías desde el espacio obtenidas por medio de satélites, estas imágenes captan la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo, que luego se transmite a estaciones ubicadas en la tierra para su visualización, procesamiento y análisis (AXESS, 2019). Las imágenes satelitales se utilizan en actividades de mapeo en apoyo a estudios de prevención y predicción de deslizamientos de tierra (Sentinels, 2022). La cadena de procesamiento de estas imágenes utiliza plataformas de código abierto como Sentinels (SNAP) y StaMPS, además de otro software. Luego estas imágenes se exportan y procesan para generar los diferentes mapas. Los pasos incluidos en el procesamiento previo de los datos son la división, la corrección orbital, el apilamiento de imágenes, el registro conjunto y la generación de una pila interferometría maestra única (Devara, Meghanadh.Tiwari, Ashutosh, Dwivedi, Ramji, 2021).

### **5.2.4 Mapa de Cobertura de la tierra**

El mapa de cobertura de la tierra consiste en la interpretación Gráfica de la cobertura (bio) física que se observa en la superficie de la tierra (Di Gregorio, 2005). Tales coberturas que podemos observar dentro de la superficie de la tierra son Cuerpos de aguas, Zonas Urbanas, Cobertura Vegetal, Zonas sin vegetación, Cultivos, Red vial entre otras. (IDEAM, 2010)

### **5.2.5 Metodología Corine Land Cover**

La metodología se establece para Colombia a través del IDEAM mediante la Leyenda Nacional de cobertura de la tierra estas se clasifican de la siguiente manera 1. Territorios artificializados (zonas urbanas , zonas industriales, zonas de extracción minera, zonas no agrícolas ), 2. Territorios agrícolas (cultivos transitorios, cultivos permanentes, pastos, áreas agrícolas heterogéneas), 3. Bosques y áreas semi naturales (bosques ,áreas con vegetación herbácea y/ o arbustiva, Áreas abiertas, sin o con poca vegetación), 4. Áreas húmedas (Áreas húmedas continentales, Áreas húmedas costeras), 5. Superficies de agua (Aguas continentales, Aguas marítimas). (IDEAM, 2010)

### **5.2.6 Geomorfología**

Se considera el estudio de la evolución del relieve de la superficie de la Tierra y sus causas. (RACEFN, 2014); teniendo en cuenta esta definición la geomorfología es una de las variables esenciales para la creación del mapa de susceptibilidad, esta información fue

---

descargada dentro de la base de datos Instituto Geográfico Agustín Codazzi donde se encuentra el Mapa geomorfológico de Colombia a escala 1:100 000.

### **5.2.7 Geología**

Ciencia que estudia la composición, estructura, morfología y edad de los materiales que componen la Tierra, en especial, a partir de la observación en las partes accesibles. Se ocupa además de la elaboración de hipótesis que permitan reconstruir la historia y la evolución de la Tierra. (RACEFN, 2014) para la creación del mapa de geología del área de estudio se trabajaron los datos del AGC (atlas geológico colombino) a escala 1:100 000, las unidades que se identificaron en el mapa se representaron en unidades cronoestratigráficas y fueron agrupadas de acuerdo con la edad y la litología de los materiales (ICS, 2023).

### **5.3.1 Análisis Multicriterio**

Son un conjunto de técnicas usadas para la solución de problemas y toma de decisiones, esta disciplina permite combinar la matemática, administración, informática, psicología, ciencias sociales, economía y diferentes ciencias de la ingeniería. A cada disciplina se le aplica un método de análisis diferente, ya que cada una tiene diferentes tipos problemáticas, la cual se adapta a su propia propuesta de solución (BRAVO AMARANTE, Edelvy et al., 2021). El análisis multicriterio es utilizado en análisis espacial para determinar la susceptibilidad de deslizamiento de tierra, ya que genera altos niveles de precisión y confiabilidad en sus resultados, eliminando la subjetividad de los expertos, esto es de gran importancia en el momento de tomar decisiones y en la elaboración y diseño de planes de gestión de desastres. Los

análisis multicriterio basados en los sistemas de información geográficas tienen un enfoque inteligente ya que convierte la información de datos espaciales y no espaciales, en información que puede ser analizada teniendo en cuenta las necesidades de acuerdo con el análisis que se debe realizar (Bakhtiar Feizizadeh, Majid Shadman Roodposhti, Piotr Jankowski, Thomas Blaschke, 2014).

### **5.3.2 Proceso de Jerarquía analítica (AHP)**

Es uno de los métodos de análisis SIG multicriterio que ha tenido éxito en su aplicación a la toma de decisiones en las problemáticas de fenómenos de movimientos en masa. Se basa en el cálculo de pesos de valor para la elaboración de la matriz de pares AHP, basada en criterios de expertos, esta matriz se utiliza para hacer juicios de comparación entre las diferentes variables evaluadas (Bakhtiar Feizizadeh, Majid Shadman Roodposhti, Piotr Jankowski, Thomas Blaschke, 2014). Los pasos para implementación de un AHP son: el cálculo del vector de consistencia (CV), cálculo del error relativo medio (MRE), índice de consistencia (CI), cálculo del Índice de Consistencia Aleatoria (RI) con respecto al número de factores, cálculo de la radio de consistencia (CR), se desarrolla una comparación de CR con el umbral de CR para concluir la idoneidad de la importancia relativa decidida entre los factores, y finalmente, la toma de decisiones. (Devara, Meghanadh.Tiwari, Ashutosh,Dwivedi, Ramji, 2021)

### **5.4.1 Susceptibilidad**

La susceptibilidad se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento dentro de un tipo específico durante una zona determinada, esto significa que la susceptibilidad se usa generalmente para predecir la ocurrencia espacial de eventos (Wubalem, 2021).

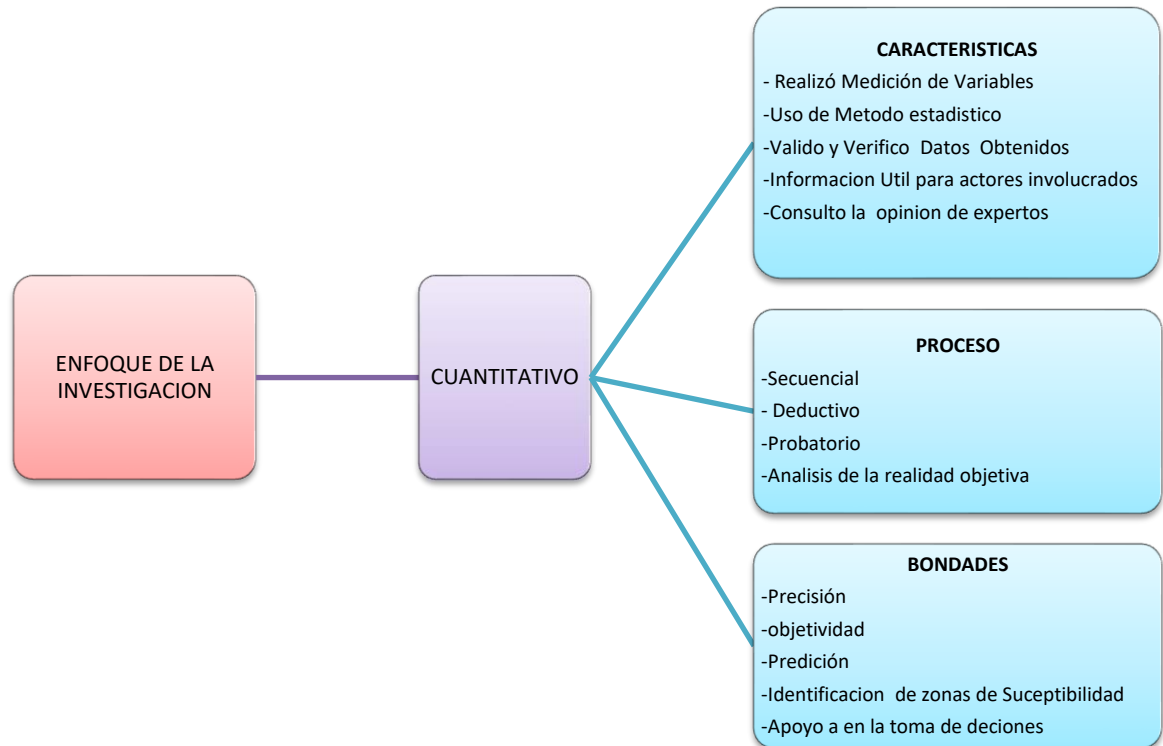
### **5.4.2 Mapa de susceptibilidad**

Los mapas de susceptibilidad se caracterizan por que en su elaboración integran múltiples capas generadas de la transformación de información espacial, donde se incluyen aspectos del mapa de pendientes (elevación, pendiente) y otros parámetros como Geología, litología, geomorfología, etc. A estos parámetros se les puede asignar pesos de valor usando el método de proceso de jerarquía analítica (AHP) posteriormente mediante usos de software SIG se hace una superposición de estas capas, para finalmente realizar el análisis de los resultados que ayudan a la generación de propuestas de solución para prevenir y mitigar los efectos de los fenómenos de movimientos en masa, un ejemplo de este análisis sería que en las pendientes altas en regiones de gran elevación se consideran más propensas a deslizamientos de tierra, todo esto de acuerdo con los pesos calculados para cada parámetro (Devara, Meghanadh.Tiwari, Ashutosh,Dwivedi, Ramji, 2021)

# 6. Metodología

## 6.1 Enfoque metodológico

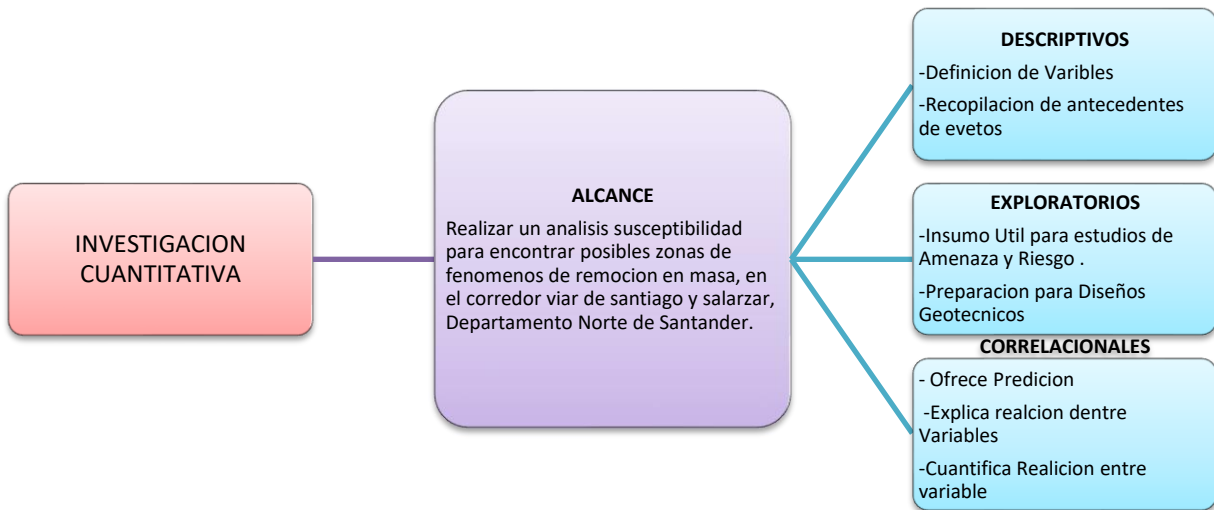
El enfoque metodológico cuantitativo en la investigación se caracterizó por la medición precisa y objetiva de variables, el uso de métodos estadísticos, y la validación y verificación de los datos obtenidos. Este enfoque proporcionó información útil para los actores involucrados y se basó en la consulta de opiniones de expertos.



**Figura 2:** *Enfoques de la investigación/* Fuente: Hernández et al. (2010)

## 6.2 Tipo de estudio

Este enfoque permitió la definición precisa de variables, el análisis de antecedentes relevantes y la medición objetiva de datos, proporcionando información útil para estudios de amenaza y riesgo, así como para la preparación de diseños geotécnicos. Además, permitió explicar y cuantificar las relaciones entre variables, ofreciendo predicciones basadas en datos objetivos y apoyando la toma de decisiones informadas.



**Figura 3:** Tipos de estudios cuantitativos/Fuente: Hernández et al. (2010)

## 6.3 Procedimiento

### 6.3.1 Fase 1

#### 6.3.1.1 Inventario de Eventos por fenómenos de movimientos en masa

Se realizó el inventario de eventos por fenómenos de movimientos en masa a lo largo del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander, para esto se usó como referencia las siguientes características de datos recopilados de los eventos por fenómenos de remoción en masa de los municipios del área de estudio (Santiago y Salazar), estos datos se encontraron en el SIMMA-SGC que cuenta con una base de datos abierta y actualizada, donde se encuentran datos importantes como magnitud de masa, ubicación geográfica del evento, categorización de la información de los eventos como mapas por zonas, fechas y tipos de movimientos ejemplo (caída, deslizamiento, propagación lateral, volcamiento, deformaciones gravitacionales, flujo, reptación), estos datos están soportados con informes de mapas y estudios que se encuentran en la base de datos del (SGC 2022). Se identificó la longitud de masa de cada uno de los eventos encontrados, y se estableció un Buffer de 500 metros para los 22 km que corresponden al corredor vial de Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander. Después de tener claros todos los parámetros se realizó el mapa de inventario y concentración de eventos por fenómenos de remoción en masa identificados dentro del corredor vial Santiago y Salazar, departamentos Norte de Santander a través de las herramientas del software ArcGIS o ArcGISPro siguiendo la siguiente ruta: **ArcToolbox (Spatial Analyst Tools, Density, Kernel Density)**.

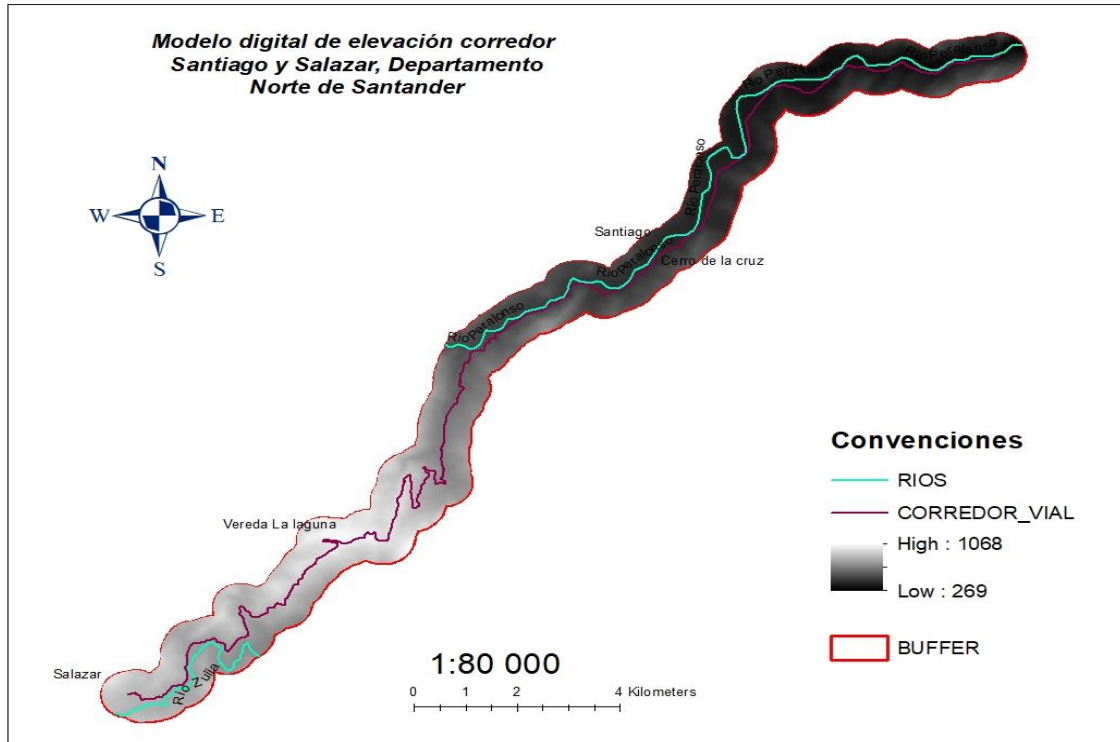
## 6.3.2 Fase 2

Se generaron mapas con la información procesada de cada una de las variables establecidas y se realizó su respectiva reclasificación y conversión a formato tipo ráster. Los criterios que se establecieron fueron los siguientes: pendiente, geología, geomorfología, uso del suelo, cobertura de la tierra.

Los mapas fueron generados a escala regional 1:100 000 con información descargada de la base de datos del Servicio geológico colombiano (SGC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) subdirección de Agrología, en el caso de la cobertura de la tierra se utilizó una imagen satelital de la plataforma SAS Planet.

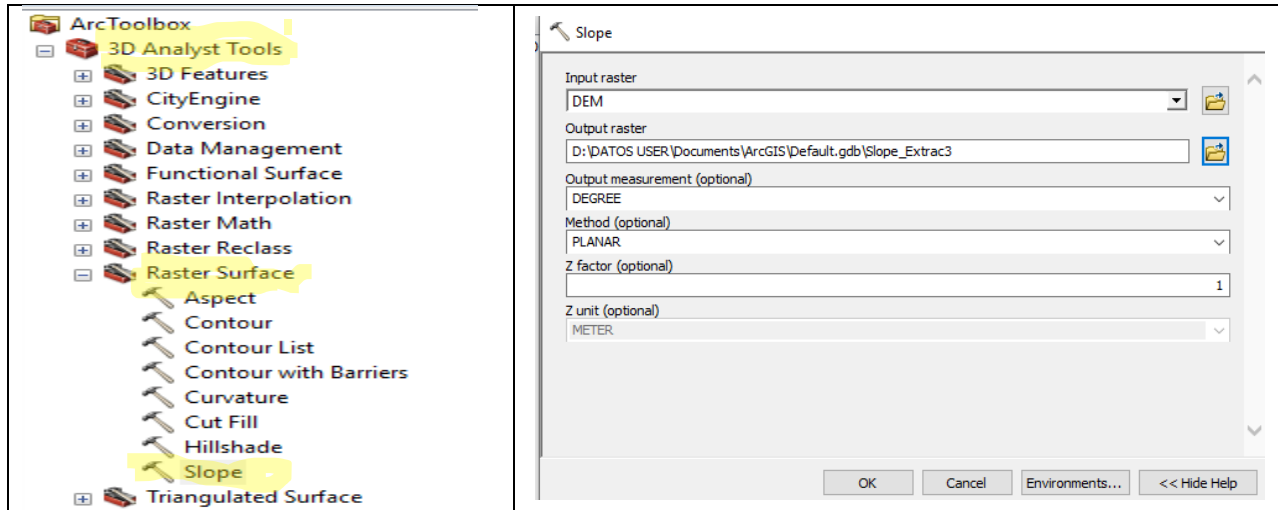
### 6.3.2.1 Pendiente

Para la generación del mapa de pendientes se utilizó el DEM que fue descargado de la página web del servicio geológico de los estados unidos (USGS, 2023) Disponible en la siguiente dirección Web: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. La resolución del DEM (Modelo digital de elevación) es de 12,5m, 16Bits, Banda máxima de 1068 y mínima de 26. A continuación podemos observar el DEM para el área del proyecto.



**Figura 4:** Modelo digital de elevación corredor Santiago y Salazar, Departamento Norte de Santander/  
Fuente Autor

Después de haber obtenido el DEM del área de estudio del corredor vial de los municipios de Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander. Se realizó el procesamiento del mapa de pendiente en el software ArcGIS con las herramientas Arc Toolbox (**3DAnalyst Tools, Ráster Surface, Slope**).



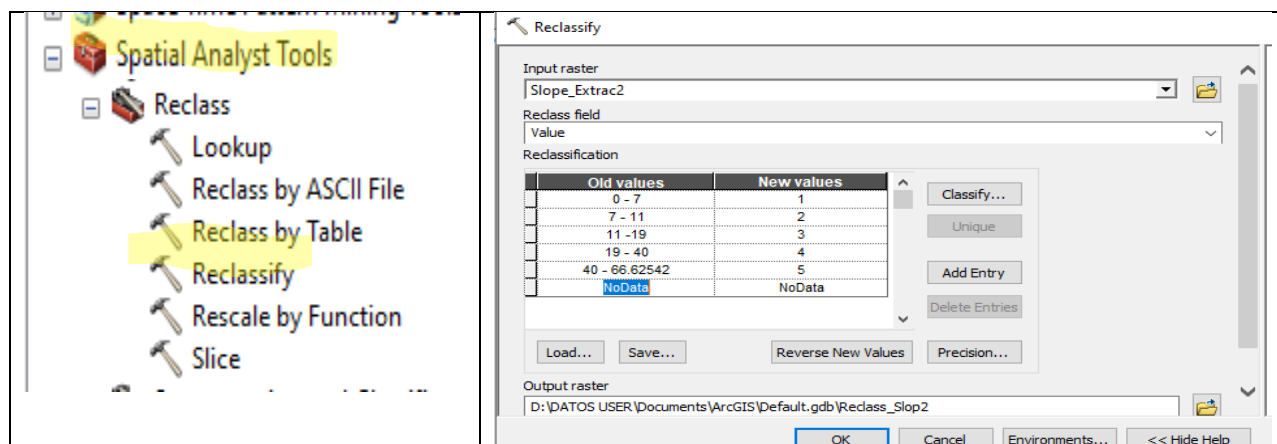
**Figura 5:** Procesamiento del mapa de pendiente Software ArcGIS /Fuente Autor

Obtenido el Mapa de pendientes se realizó la reclasificación según susceptibilidad teniendo en cuenta la tabla 1: reclasificación de pendientes.

Variable de Pendiente				
Symbol	Rangos (Grados)		Reclasificación	
	0°	▬	7°	<b>1</b>
	7°	▬	11°	<b>2</b>
	11°	▬	19°	<b>3</b>
	19°	▬	40°	<b>4</b>
	>40°	▬	66.6	<b>5</b>

**Tabla 1:** Reclasificación de pendientes/Fuente (SGC)

La reclasificación del mapa de pendientes según susceptibilidad se realizó a través del software ArcGIS con las herramientas ArcToolbox (Spatial Analyst Tools, Reclass, Reclassify) como podemos ver en la figura 6: proceso de reclasificación en el software ArcGIS.

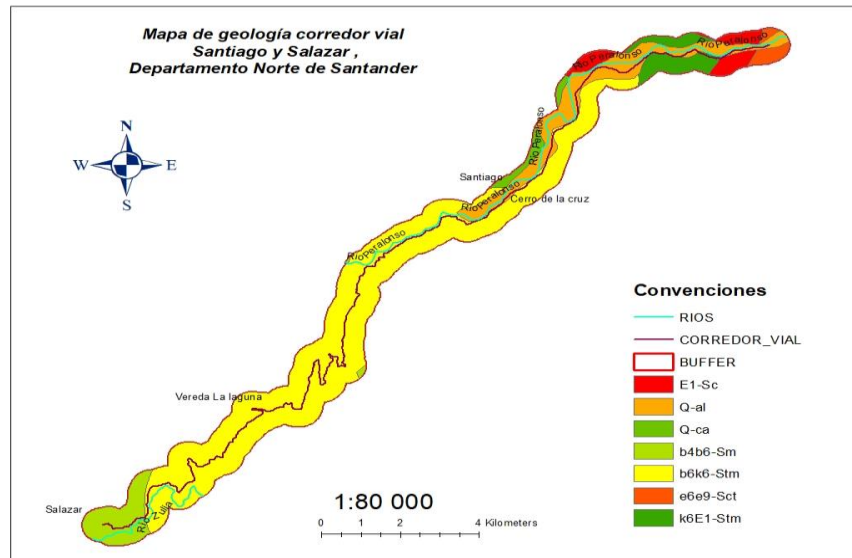


**Figura 6:** *Proceso de reclasificación en software ArcGIS /Fuente Autor*

Después de hacer el procesamiento de la recalificación del mapa de pendientes obtuvimos el mapa de pendientes reclasificado según susceptibilidad en formato Tipo Ráster (tif) como primer insumo para nuestro mapa de susceptibilidad.

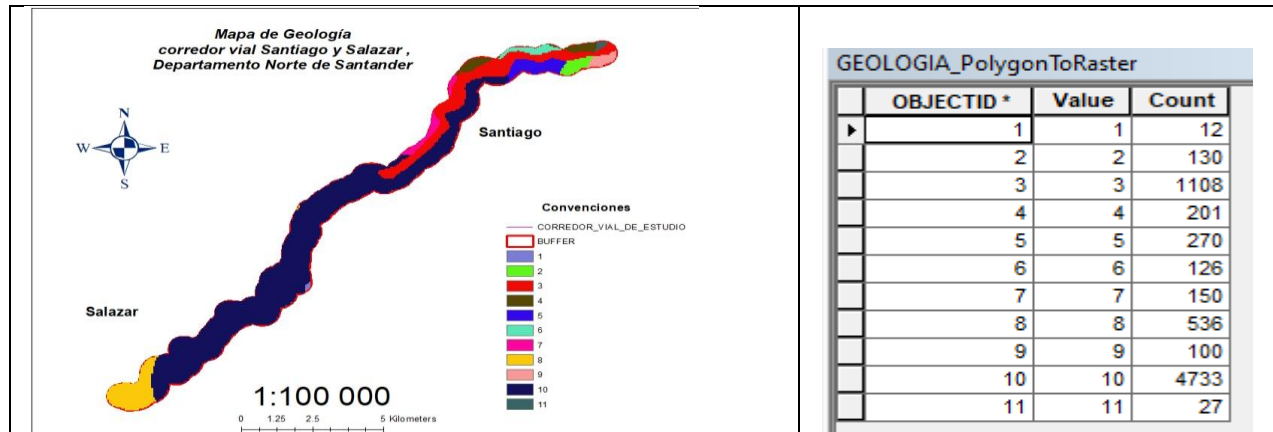
### 6.3.2.2 Geología

A continuación, se puede observar en la figura 7, la clasificación de las unidades geológicas del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander.



**Figura 7:** Mapa de geología corredor vial Santiago y Salazar, Departamento Nore de Santander/  
Fuente Autor

Para la generación de la capa de geología, se obtuvo el mapa descargado de la base de datos del Servicio Geológico Colombiano a escala regional 1:100 000 en formato Tipo Shapefile con información de cada una de las unidades geológicas del área de estudio, este mapa de geología se convirtió en formato tipo raster (tif) para después poder realizar el procesamiento de reclasificación de cada una de las unidades geológicas como se muestra en la tabla 22, la reclasificación de unidades geológicas según susceptibilidad para el área de estudio. A continuación, se puede observar el procedimiento de la conversión del mapa de formato Tipo shapefile a formato raster se realizó con el Software ArcGIS con la herramienta Conversión Tools (To Raster, Polygon to Raster) en el cual se obtuvo el siguiente mapa que vemos a continuación en la figura 8: mapa de geología convertido de formato shapefile a formato tipo raster en software ArcGIS.



**Figura 8:** Mapa de geología convertido de formato Shapefile a formato tipo ráster en software ArcGIS /Fuente Autor

En el siguiente paso se realizó el mapa de geología reclasificado según susceptibilidad esto a través de las herramientas de ArcGIS siguiendo la siguiente ruta: Arc Toolbox (**Spatial Analyst Tools,Reclass ,Reclassify**) teniendo en cuenta la tabla de reclasificación de unidades geológicas como se muestra en la tabla 2.

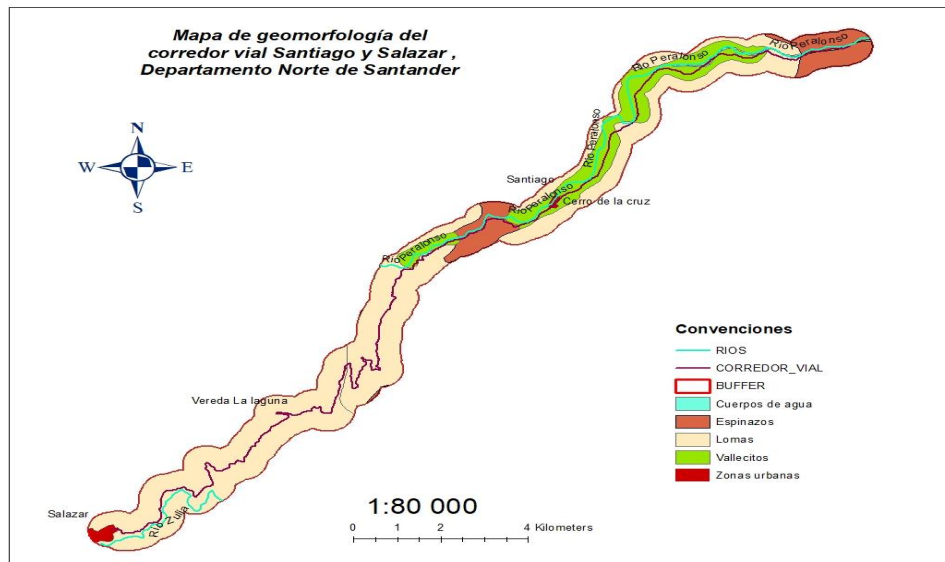
Variable de Geología				
Symbol	SimboloUC	Descripción	UGIntegrad	Calificación
	b4b6-Sm	Arenitas feldespáticas con intercalaciones de calizas, shales, margas y arenitas glauconíticas.		4
	E1-Sc	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas		4
	Q-al	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales		2
	E1-Sc	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas	Formación Barco, Formación Los Quervos	4
	k6E1-Stm	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino. Mantos de carbón a la base.	Formación Catatumbo	4
	k6E1-Stm	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino. Mantos de carbón a la base.	Formación Catatumbo	4
	Q-ca	Abanicos aluviales y depósitos coluviales		2
	b4b6-Sm	Arenitas feldespáticas con intercalaciones de calizas, shales, margas y arenitas glauconíticas.	Grupo Uribante: Formación Tibú-Mercedes, Formación Aguardiente	4
	e6e9-Sct	Arenitas de grano fino a conglomeráticas interestratificadas con arcillolitas y limolitas. Ocasionalmente, lentes de hierro oolítico y carbón.		3
	b6k6-Stm	Shales, calizas, arenitas, cherts y fosforitas		4
	e6e9-Sct	Arenitas de grano fino a conglomeráticas interestratificadas con arcillolitas y limolitas. Ocasionalmente, lentes de hierro oolítico y carbón.	Formación Mirador, Formación Carbonera	4

**Tabla 2:** Reclasificación de unidades geológicas según susceptibilidad para el corredor vial Santiago y Salazar Departamento Norte de Santander /Fuente (SGC), Jaramillo, C. M. (2020).

### 6.3.2.3 Geomorfología

Para la generación del mapa de uso del suelo, se utilizó información obtenida de la base de datos consolidada por la Subdirección de Agrología del IGAC. Esta información está a escala regional 1:100,000 en formato shapefile, e incluye las distintas vocaciones de uso del suelo en el área de estudio. Posteriormente, este mapa se convirtió al formato ráster (tif) para facilitar el procesamiento y la reclasificación según la susceptibilidad.

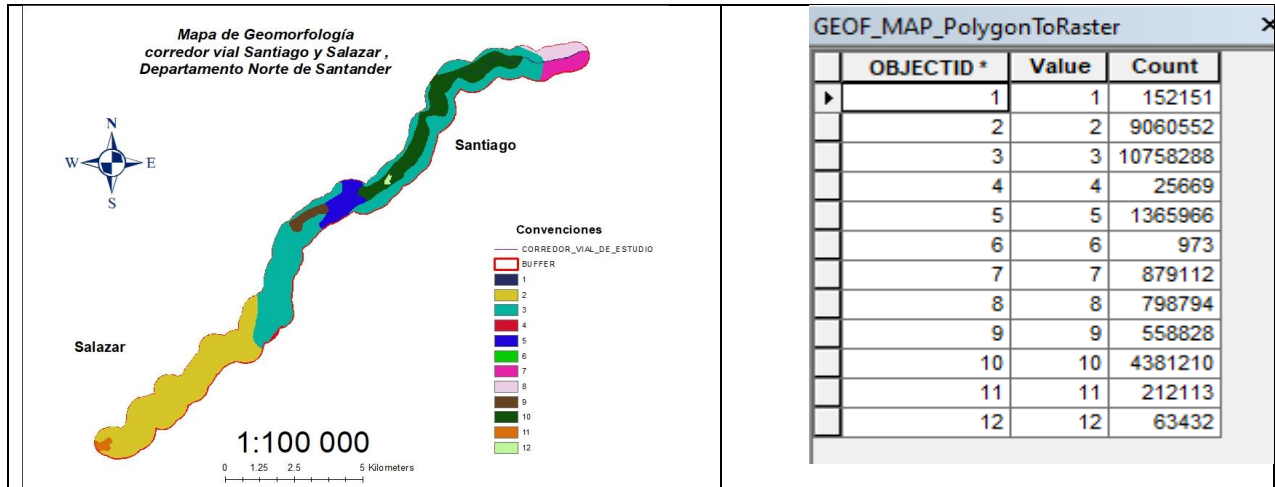
A continuación, como observamos en la figura 9 la ubicación de las áreas Geomorfológicas del corredor vial.



**Figura 9:** Mapa de geomorfología del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander formato tipo shapefile /Fuente Autor

Para poder realizar la reclasificación del mapa de geomorfología fue necesario la conversión de formato tipo shapefile a formato raster, este procedimiento se realizó con el

software ArcGIS, siguiendo la siguiente ruta: conversión Tools (**To Raster, Polygon to Raster**), como podemos observar en la figura 10.



**Figura 10:** Mapa de geomorfología formato tipo raster y tabla de conteo de pixeles del corredor vial Santiago y Salazar, Departamento Norte de Santander/Fuente Autor

Después de generado la conversión a formato raster se procedió a la creación del mapa geomorfología reclasificado según susceptibilidad esto a través de las herramientas de ArcGIS: ArcToolbox (**Spatial Analyst Tools, Reclass, Reclassify**), para esto tuvimos en cuenta la tabla 3, donde se nos indica la reclasificación según susceptibilidad de la geomorfología en la zona de estudio.

Variable de Geomorfología			
Symbol	UCSuelo	TIPO_RELIEVE	Reclasificación
	CA	Cuerpos de agua	2
	MVPe1	Lomas	4
	MWAe2	Lomas	4
	MWEg2	Espinazos	4
	MWEg2	Espinazos	4
	MWEg2	Espinazos	4
	MWEg2	Espinazos	4
	MWEg2	Espinazos	4
	MWIap	Vallecitos	2

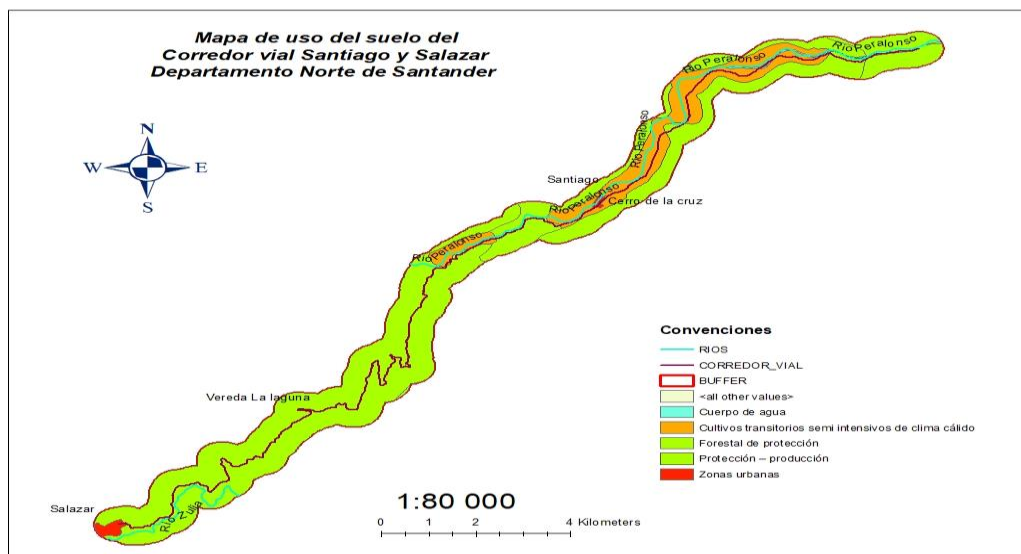
	MWIap	Vallecitos	<b>2</b>
	ZU	Zonas urbanas	<b>1</b>
	ZU	Zonas urbanas	<b>1</b>

**Tabla 3:** Reclasificación según susceptibilidad de la geomorfología en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander /Fuente (SGC, 2011).

### 6.3.2.4 Uso del suelo

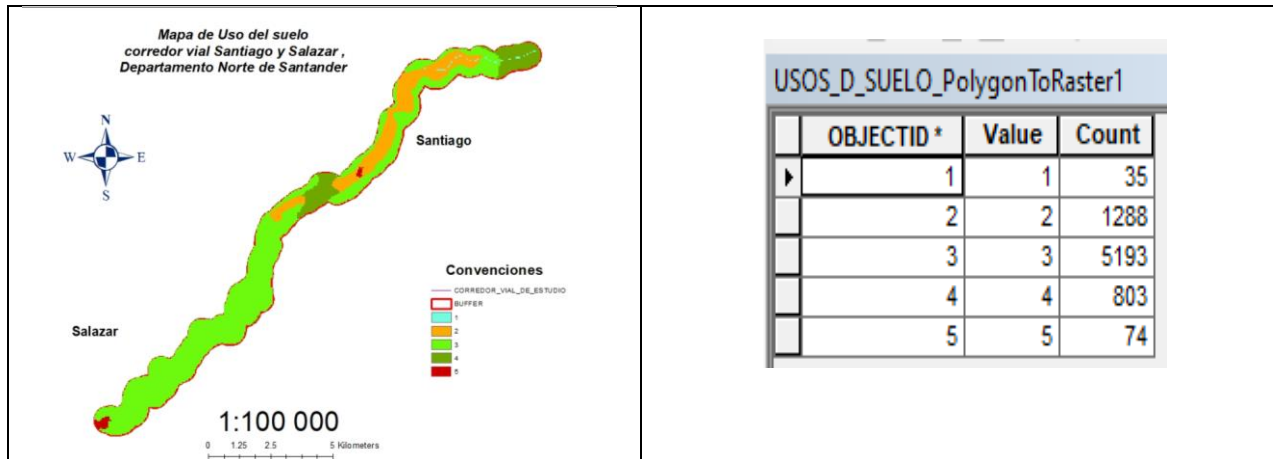
Para la generación del mapa de uso del suelo se utilizó información obtenida a partir de la base de datos consolidada por la subdirección agrología del IGAC está a escala regional 1:100 000 en formato tipo shapefile donde encontramos cada una de las vocaciones de uso de suelo del área de estudio, a este mapa se le realizó la conversión a formato tipo Ráster (tif) para después poder realizar el procesamiento de reclasificación según susceptibilidad.

A continuación, se observa en la figura 11 el mapa de uso del Suelo en Formato Tipo Shapefile).



**Figura 11:** Mapa de uso del suelo del Corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander (Formato Tipo Shapefile )/Fuente Autor

Después se obtuvo el mapa de uso del suelo en formato Tipo Shapefile procedimos a la conversión a formato Raster, este procedimiento se realizó con el Software ArcGIS con la herramienta Conversión Tools (**To Raster, Polygon to Raster**), como observamos en la figura 12.



**Figura 12:** Mapa de uso del suelo y conteo de pixeles Formato tipo ráster del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor

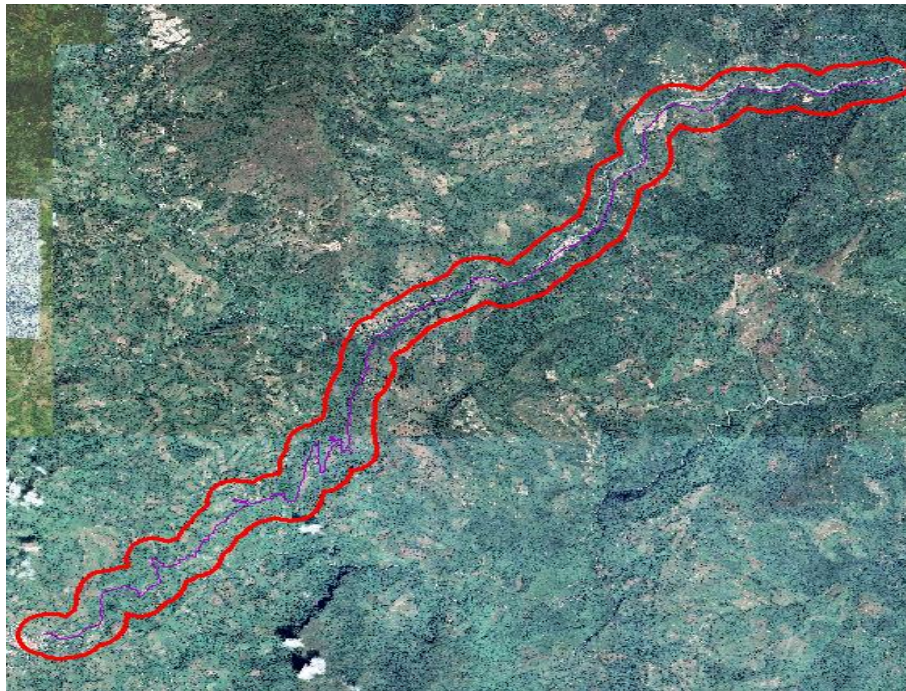
Después de generado el mapa de uso del uso a formato tipo Raster se procedió a reclasificarlo según susceptibilidad esto a través de las herramientas de ArcGIS: Arc Tool box (**Spatial Analyst Tools,Reclass ,Reclassify**) teniendo en cuenta la tabla 4 donde se identificó la reclasificación susceptibilidad uso de suelo en la zona de estudio.

Variable de Uso del Suelo		
Symbol	Uso_ Principal	Reclasificación
	Cuerpo de Agua	1
	Forestal Protección	1
	Forestal Producción -Protección	1
	agrícola	4
	Zonas Urbanas	1

**Tabla 4:** *Reclasificación susceptibilidad uso de suelo corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander /Fuente (SGC, 2011)*

### 6.3.2.5 Cobertura de la Tierra











Para realizar el mapa de cobertura de la tierra se requirió de una imagen satelital descargada de la plataforma SAS Planet ya que se requirió hacer una clasificación detallada de cada una de las coberturas que se encontraron en el corredor vial de Santiago y Salazar, el procesamiento se realizó a través de la clasificación supervisada con la creación de una firma espectral por polígonos , se reclasificaron 10 clases de coberturas (bosque (vegetación alta, cultivos ,vegetación baja o pastizales, ríos ,zonas urbanas, red vial, cuerpos de aguas artificiales, zona de extracción minera , zona sin vegetación , sombras de nube) Las sombras de nube tiene como característica que su ubicación coincide con la vegetación alta .



**Figura 13:** *Imagen satelital del Corredor Vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/Fuente (Sas Planet 2023)*

Se obtuvo una imagen reclasificada con la herramienta de clasificación supervisada en ArcGIS (**Máximo likelihood classification**) después se le realizaron unas simplificaciones a la imagen reclasificada para mejorar su calidad, estas herramientas que se aplicaron fueron: **Arc Toolbox** ( **Spatial Analyst Tools** (Generalización, Majority Filter, Region Group, Boundary Clean ,**Extraction** (Extract By Attributes) y finalmente **Nibble**)).

Se generó el mapa Cobertura de la tierra reclasificado según susceptibilidad a través de las herramientas de ArcGIS: Arc Toolbox (**Spatial Analyst Tools,Reclass ,Reclassify**), teniendo en cuenta la Tabla 4 en la cual se muestra la reclasificación por susceptibilidad.

Variable de Cobertura de la Tierra		
Symbol	Cobertura	Reclasificación
	Bosque	<b>1</b>
	Cultivos	<b>3</b>
	Vegetación baja Y pastizales	<b>2</b>
	Ríos	<b>1</b>
	Zonas Urbanas	<b>1</b>
	Red Vial	<b>1</b>
	Aguas Artificiales	<b>1</b>
	Zona de Extracción Minera	<b>5</b>
	Zona sin vegetación	<b>5</b>
	Sombra de nube	<b>1</b>

**Tabla 5:** *Reclasificación por susceptibilidad variable cobertura de la Tierra /Fuente (SGC, 2011)*

### 6.3.3 Fase 3

#### 6.3.3.1 Análisis de múltiples criterios

Para el análisis se establecieron con cinco criterios que tienen incidencia con los fenómenos de movimientos en masa como lo son (geología, uso del suelo, pendiente, geomorfología, cobertura de la tierra) en donde se consultaron nueve profesionales de áreas

relacionadas a las ciencias ambientales y forestales, geología, geografía , ingeniería civil ,geotecnia que tuvieron como finalidad la asignación de pesos para los criterios a evaluar mencionados anteriormente, para cumplir este objetivo se utilizó el método AHP (Proceso de jerarquía analítica (Saaty 1980).

### 6.3.3.2 AHP (Proceso de Jerarquía Analítica)

El proceso de jerarquía analítica se realizó con una serie de comparaciones por pares entre criterios, realizando una evaluación de importancia utilizando la escala linear de 1 a 9 como mostramos en la tabla 6: Escala Fundamental de Comparación por pares.

INTENSIDAD DE IMPORTANCIA	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	<b>IGUAL IMPORTANCIA</b>	DOS ELEMENTOS CONTRIBUYEN IGUALMENTE AL OBJETIVO CRITERIO A SOBRE CIRTERIO B
3	<b>IMPORTANCIA MODERADA</b>	LA EXPERIENCIA Y EL JUICIO FAVORECEN LIGERAMENTE AL CRITERIO A SOBRE CIRTERIO B
5	<b>FUERTE IMPORTANCIA</b>	LA EXPERIENCIA Y EL JUICIO FAVORECEN FUERTEMENTE UN AL CRITERIO A SOBRE B
7	<b>IMPORTANCIA MUY FUERTE</b>	EL CRITERIO A ES MUCHO MAS IMPORTANTE QUE EL CRITERIO B
9	<b>IMPORTANCIA EXTREMA</b>	LA EVIDENCIA QUE FAVORECE EL CRITERIO A SOBRE EL B EN EL ORDEN DE AFIRMACIÓN MÁS ALTO POSIBLE.
2,4,6,8 SE PUEDE UTILIZAR PARA EXPRESAR VALORES INTERMEDIOS		

**Tabla 6:** Escala fundamental de comparación por pares/fuente (Saaty 1980 )

### 6.3.3.3 Cálculos de la metodología AHP (Proceso de jerarquía analítica)

En la metodología de proceso de jerarquía analítica se emplearon diferentes fórmulas matemáticas que nos ayudaron a resolver la problemática de nuestro objetivo principal, con la aplicación de estas fórmulas obtuvimos los pesos de cada uno de los criterios a utilizar para el análisis de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa en el corredor vial de Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander. A continuación, se muestran las fórmulas utilizadas en la Tabla 7: Cálculos de la metodología AHP.

Pasos	Nombre	Formula	Observaciones
1	Cálculo inicial	$r_i \exp \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n \ln(a_{ij}) \right] = \left( \prod_{i=1}^n a_{ij} \right)^{1/N}$	9
2	Calculo Normalizado:	$P_i = r_i \cdot \sum_{i=1}^n r_i$	El cálculo se realiza teniendo en cuenta que $P_i$ utiliza el método de media geométrica de filas (RGMM) y matriz $N \times N$ por pares $A = a_{ij}$ .
3	Inconsistencias	$\text{Max} ( e_{ij} = a_{ij} \frac{P_j}{P_i} )$	Para encontrar la comparación más inconsistente se busca el par $ij$ .
4	índice de consistencia CI	$CI = \frac{(\lambda \text{ máx} - N)}{(N - 1)}$	Se calcularon en todas las hojas de entrada y en la hoja resumen.

5	Radio de consistencia CR	$CR = \frac{CI}{IR}$	Se calcularon en todas las hojas de entrada y en la hoja resumen.
6	ajuste lineal de Alonso/Lamata CR <i>Alonso, Lamata, (2006).</i>	$CR = \frac{(\lambda \text{ máx} - N)}{2.7699N - 4.3513 - N}$	Se calcularon en todas las hojas de entrada y en la hoja resumen.
7	índice de consistencia geométrica GCI	$CGI = \frac{2\sum_{i>j} 1n a_{ij} - 1n \frac{P_j}{P_i}}{(N-1)(N-2)}$	Se calcularon en la hoja resumen .
8	Disonancia (Inconsistencia Ordinal Psi):	$\Psi_{ij} = \frac{1}{n-2} \sum_k \text{step}(-\log(a_{ij}) \log(a_{ik} a_{jk})) > 1$	Se calcularon en la hoja resumen .
9	Función escalonada $i \neq k \neq j$	$\text{step}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{alcontrario} \end{cases}$	
10	Disonancia general	$\Psi = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{i+1}^n \Psi_{ij}$	Sajid Siraj (2011).
11	Método de vector propio (EVM)	$\Delta w_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} (\sum_{k=1}^n a_{ik} - w_k)^2}, i = 1, \dots, n$	Cálculo de errores
12	Error relativo medio	$\left(\frac{\Delta w_i}{w_i}\right)_{Mean} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\Delta w_j}{w_j}\right)^2}$	Se calcularon en la hoja

	MRE		resumen .
13	Método de media geométrica por filas (RGMM)	$\Delta w_i = c \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n 1n^2 \left( a_{ik} \frac{w_k^*}{w_i^*} \right)}$ $w_i = w_i^* \text{Cosh } \Delta_i$ $\Delta w_i = w_i^* \text{Sinh } \Delta_i$	Tomashevskii, I. L. (2014). Se calcularon en todas las hojas y en la hoja resumen
14	Agregación de juicios individuales	$c_{ij} = \text{Exp} \frac{\sum_{k=1}^n w_k 1n a_{ij(k)}}{\sum_{k=1}^n w_k}$	Participantes = “k” Matriz = “c” Media geométrica= $a_{ij(k)}$ Peso individual= $w_k$
15	AHP Indicador de consenso	$S^* = \left[ M - \text{Exp} (H_{amin}) / \text{exp} (Y_{max}) \right]$ $/ [1 - \text{Exp}(H_{amin}) / \text{exp} (Y_{max})]$ $M = 1 / \text{exp}((H_\beta))$	
16	Entropía alfa de Shannon	$H_\alpha = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k -P_{ij} 1n P_{ij}$	
17	Entropía gamma de Shannon	$H_\gamma = \sum_{j=1}^k -\bar{P}_j 1n \bar{P}_j$ $\bar{P}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \bar{P}_j$	
18	Entropía beta de Shannon	$H_\beta = H_\gamma - H_\alpha$	

19	Ajuste de puntuación máxima	$H_{amin}$ $= \frac{C_{max}}{1 + C_{max} - 1} 1n \left( \frac{C_{max}}{1 + C_{max} - 1} \right)$ $- (N$ $- 1) \frac{1}{N + C_{max} - 1} 1n \frac{1}{N + C_{max} - 1} H_{\gamma max}$ $= 1n(n)$	N= número de criterios, K = número participantes.												
20	Interpretación	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td><i>S*</i></td> <td><i>Conceso</i></td> </tr> <tr> <td>≤ 50%</td> <td><i>Muy bajo</i></td> </tr> <tr> <td>50% - 65%</td> <td><i>Bajo</i></td> </tr> <tr> <td>65% - 75%</td> <td><i>Moderado</i></td> </tr> <tr> <td>75% - 85%</td> <td><i>Alto</i></td> </tr> <tr> <td>≥85%</td> <td><i>Muy alto</i></td> </tr> </table>	<i>S*</i>	<i>Conceso</i>	≤ 50%	<i>Muy bajo</i>	50% - 65%	<i>Bajo</i>	65% - 75%	<i>Moderado</i>	75% - 85%	<i>Alto</i>	≥85%	<i>Muy alto</i>	Interpretación del indicador de consenso AHP S* Kuala Lumpur, Malasia, 2013
<i>S*</i>	<i>Conceso</i>														
≤ 50%	<i>Muy bajo</i>														
50% - 65%	<i>Bajo</i>														
65% - 75%	<i>Moderado</i>														
75% - 85%	<i>Alto</i>														
≥85%	<i>Muy alto</i>														

**Tabla 7:** Cálculos de la metodología AHP/fuentes- Lumpur, Malasia, 2013, Tomashevskii, I. L. (2014), Sajid Siraj (2011).

### 6.3.3.4 Aplicación de la Metodología AHP (Proceso de Jerarquía analítica)

Inicialmente se eligieron el número de criterios, número de participantes para el objetivo del proyecto como obsérvanos en la tabla 8: Aplicación de la metodología AHP.

**AHP Analytic Hierarchy Process (EVM multiple inputs)**  
 K. D. Goepel Version 07.07.2022 Free web based AHP software on: <https://bpmmsg.com>  
**Only input data in the light green fields and worksheets!**

n=  Number of criteria (2 to 10) Scale:  **AHP 1-9**

N=  Number of Participants (1 to 20)  $\alpha$ :  Consensus:

p=  selected Participant (0=consol.) 13 59 **Participant 9**

**Objective**

**Author**

**Date**

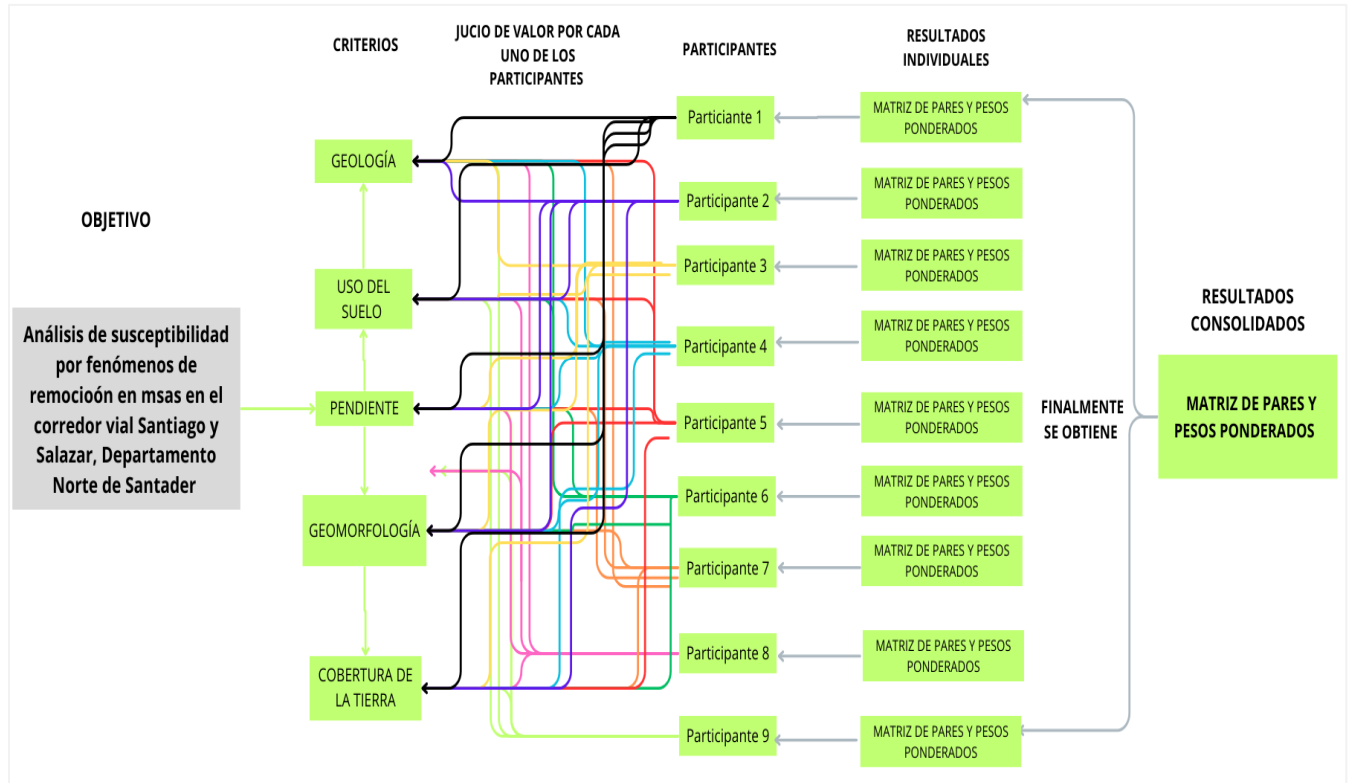
Thresh:  Iterations: 6 EVM check: 4.9E-10

Table	Criterion	Comment	Weights	+/-
1	Geología		25.1%	6.1%
2	USO Suelo		20.6%	6.5%
3	pendiente		34.9%	14.3%
4	Geomorfología		9.8%	2.1%
5	Cobertura de la tie		9.7%	1.2%

**Tabla 8:** Aplicación de la metodología AHP/ Fuente (Saaty 1980)

Se realizó la evaluación de cinco criterios: geología, uso del suelo, pendiente, geomorfología, cobertura de la tierra a su vez se consultó nueve profesionales que dieron su juicio de valor para cada uno de los criterios a través de la matriz de comparación de pares como lo veremos a continuación en la figura 14: Proceso de la metodología AHP en el análisis de susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar, departamento, Norte de Santander.

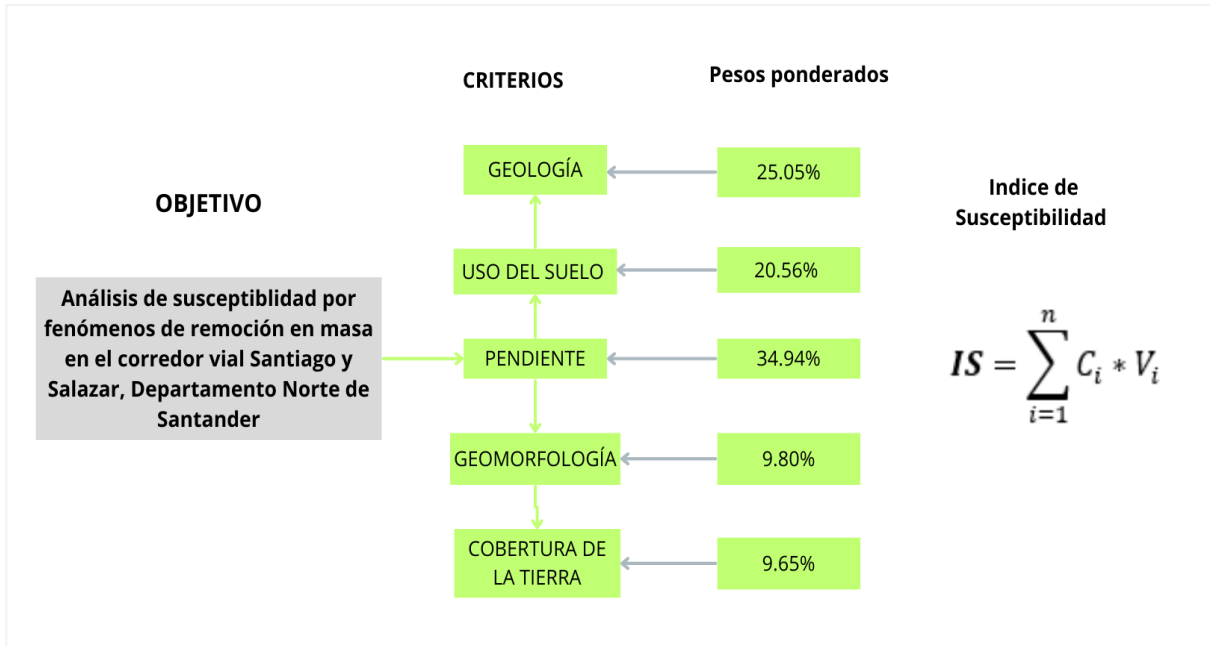
Los profesionales dieron sus juicios de valor para cada uno de los criterios , por cada profesional se generaron una matriz de comparación por pares con su respectivos pesos ponderados individuales, y índice de consistencia CR individual, una vez obtenidos estos nueve resultados, también se obtuvieron los resultados consolidados que constan de una matriz de comparación por pares con sus pesos ponderados, y resultados de indicadores como: índice de consistencia (CI), error relativo medio (MRE), Radio de consistencia (CR), índice de consistencia geométrica (GCI), Inconsistencia Ordinal (Psi).



**Figura 14:** Proceso de la metodología AHP en el análisis de susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar, departamento, Norte de Santander /Fuente (Saaty 1980)

### 6.3.4 Fase 4

Una vez se consolidados todos los pesos ponderados para los criterios evaluados se procedió a elaborar el mapa de susceptibilidad para ello se siguió el proceso como lo indica la figura 15, en la que se indicaron la jerarquía de procesos para la elaboración del mapa de susceptibilidad.



**Figura 15:** Jerarquía de proceso para la elaboración del mapa de susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa/Fuente (SGC, 2011)

### 6.3.4.1 Cálculo del índice de la susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa

Después de obtener los pesos ponderados a través de la evaluación de cada criterio obtenido de la metodología AHP (proceso de jerarquía analítica) procedimos a calcular el índice de susceptibilidad a través de la siguientes formula:

$$IS = \sum_{i=1}^n C_i * V_i$$

**Descripción:**

**IS** = Índice de Susceptibilidad

**n** = Número de variables

**c** = Criterio de evaluación

**v** = Peso de cada variable (SGC, 2011)

### 6.3.4.2 Superposición de capas

Una vez que se obtuvieron los pesos ponderados, se sustituyeron los valores en la fórmula del índice de susceptibilidad. Por medio de las herramientas de software ArcGIS: Arc Toolbox (**Spatial Analyst Tools, Map Algebra, Raster Calculator**), se efectuó la superposición de capas que generó el mapa de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa del corredor vial Santiago y Salazar, Departamento Norte de Santander. A continuación, se muestra la sustitución de valores que consta de la sumatoria de cada uno de los criterios multiplicado por su respectivo peso (obtenido de la calificación AHP) (SGC, 2011), como se puede ver a continuación:

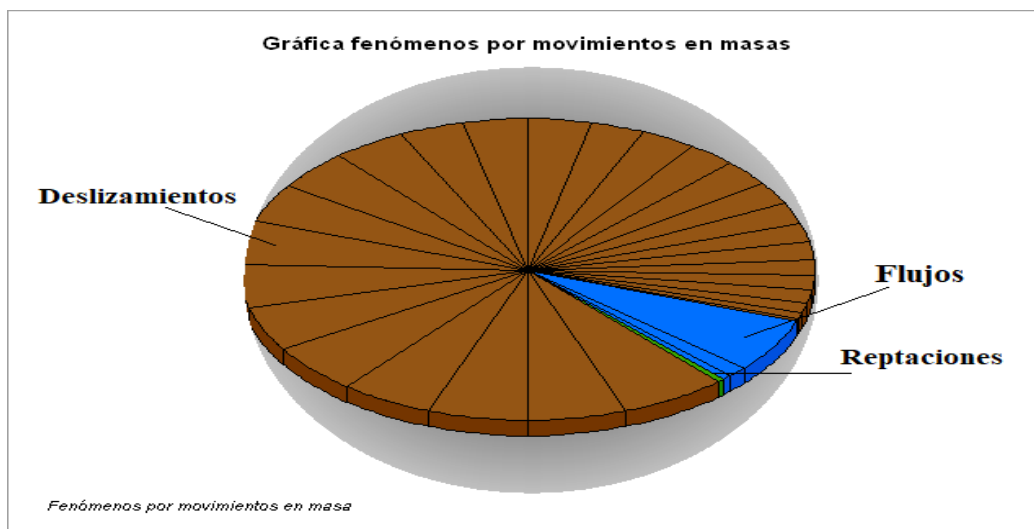
$$\text{IS} = \text{Geología} *25.05\% + \text{Uso del Suelo} *20.56\% + \text{Pendiente} *34.94\% + \text{Geomorfología} *9.80\% + \text{Cobertura de la Tierra} *9.65\% = \text{Mapa de susceptibilidad}$$

## 7. Resultados

### 7.1 Resultado Fase 1

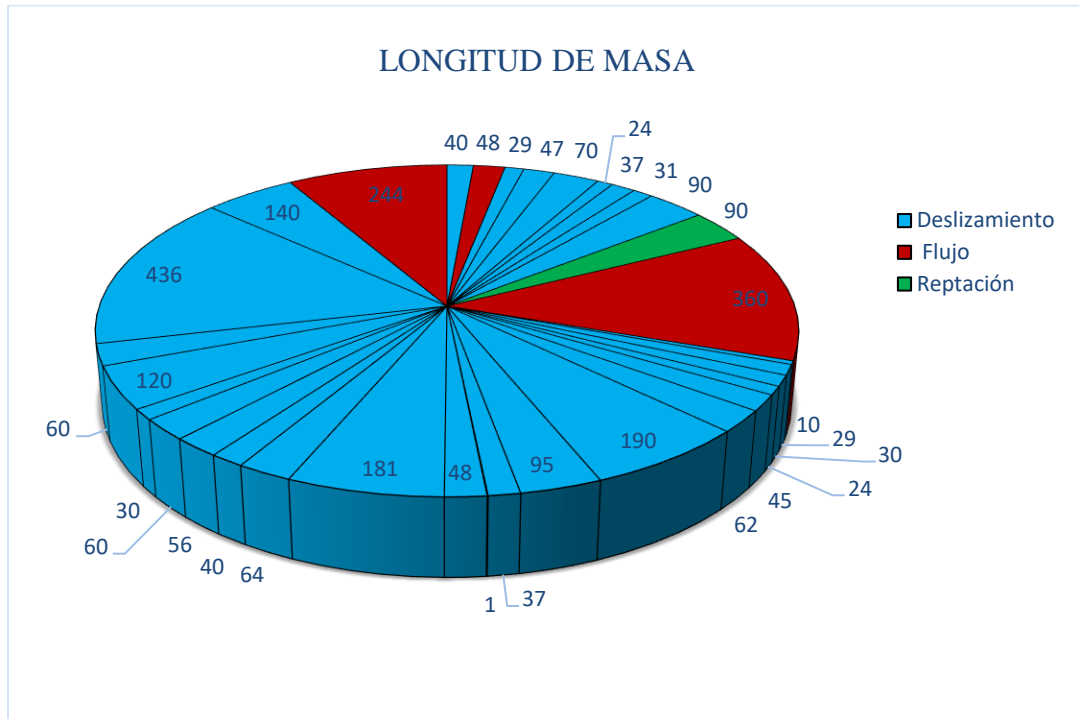
#### 7.1.1 Mapa de inventario y concentración de eventos por fenómenos de remoción en masa

Dentro del inventario, se encontraron treinta y tres (33) eventos clasificados entre deslizamientos, flujos y reptaciones, como se observa en la figura 16.



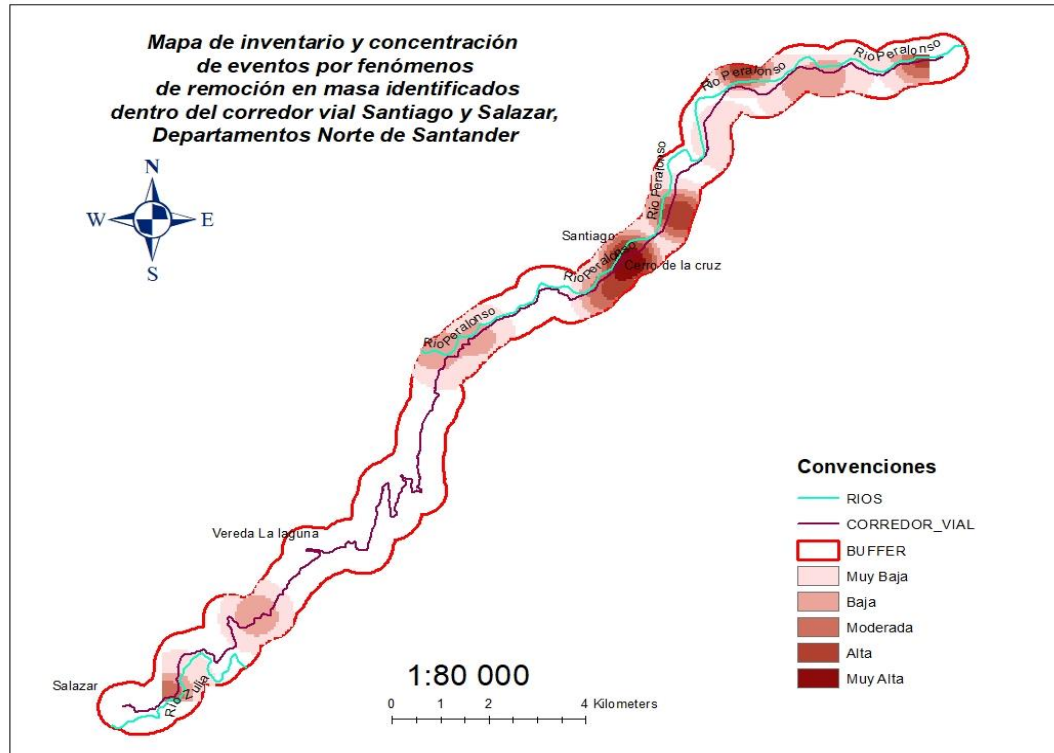
**Figura 16:** Tipo de eventos de fenómenos de movimientos en masa encontrados dentro del corredor vial Santiago y Salazar, departamentos Norte de Santander Fuente Autor

Posteriormente, se realizó un análisis de longitud de masa en el cual se identificó que la mayor longitud se encontraba en rangos de 360 metros a 436 metros. De acuerdo con esto, se estableció un buffer de 500 metros, como se observó en la figura 17, donde se mostró una gráfica de las longitudes de masa de cada evento.



**Figura 17:** Gráfica de longitud de masa por fenómenos de remoción en masa encontrados dentro del corredor vial Santiago y Salazar, departamentos Norte de Santander/ Fuente Autor

Como resultado de la construcción del mapa de inventario y concentración de eventos por fenómenos de remoción en masa, se lograron identificar los principales focos de concentración de estos eventos dentro del corredor vial. A continuación, se identificaron los diferentes puntos de concentración en la figura 18, estos se encontraron en una escala de niveles (Muy Bajo, Bajo, Moderada, Alta, Muy Alta). De acuerdo con esto, se observó que la mayoría de los focos de concentración de eventos se ubicaron en el municipio de Santiago en niveles medio y muy alto, mientras que, en el municipio de Salazar, el foco fue menos predominante, con niveles identificados entre bajo.

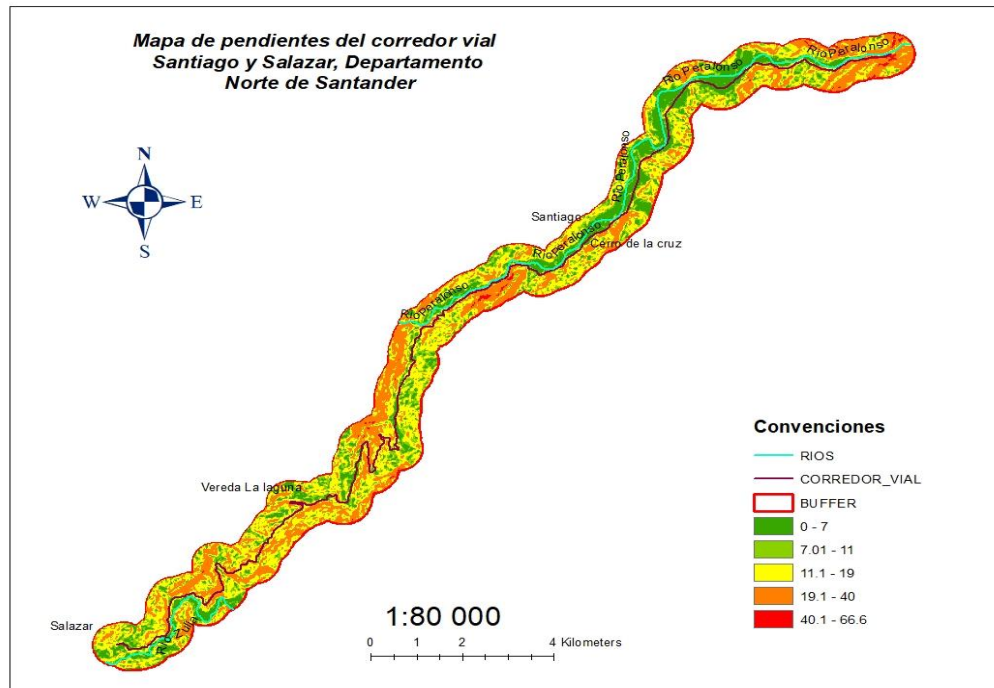


**Figura 18:** Mapa de inventario y concentración de eventos por fenómenos de remoción en masa identificados dentro del corredor vial Santiago y Salazar, departamentos Norte de Santander/ Fuente Autor

## 7.2 Resultado Fase 2

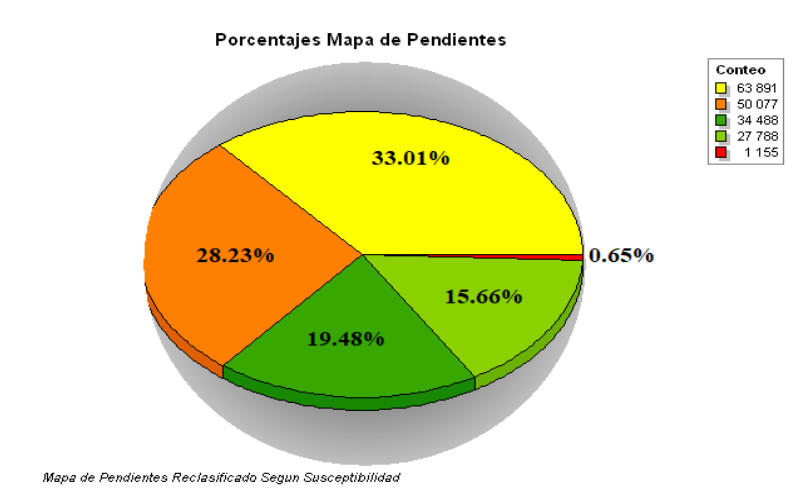
### 7.2.1 Pendientes

Como se puede observar en la figura 19, los datos de niveles de pendientes variaron desde  $0^\circ$  hasta  $66^\circ$ . Se identificó que los rangos de pendientes entre  $19^\circ$  y  $66^\circ$  coincidieron con los datos de eventos de movimientos en masa registrados en el inventario como se puede apreciar en la figura 18.

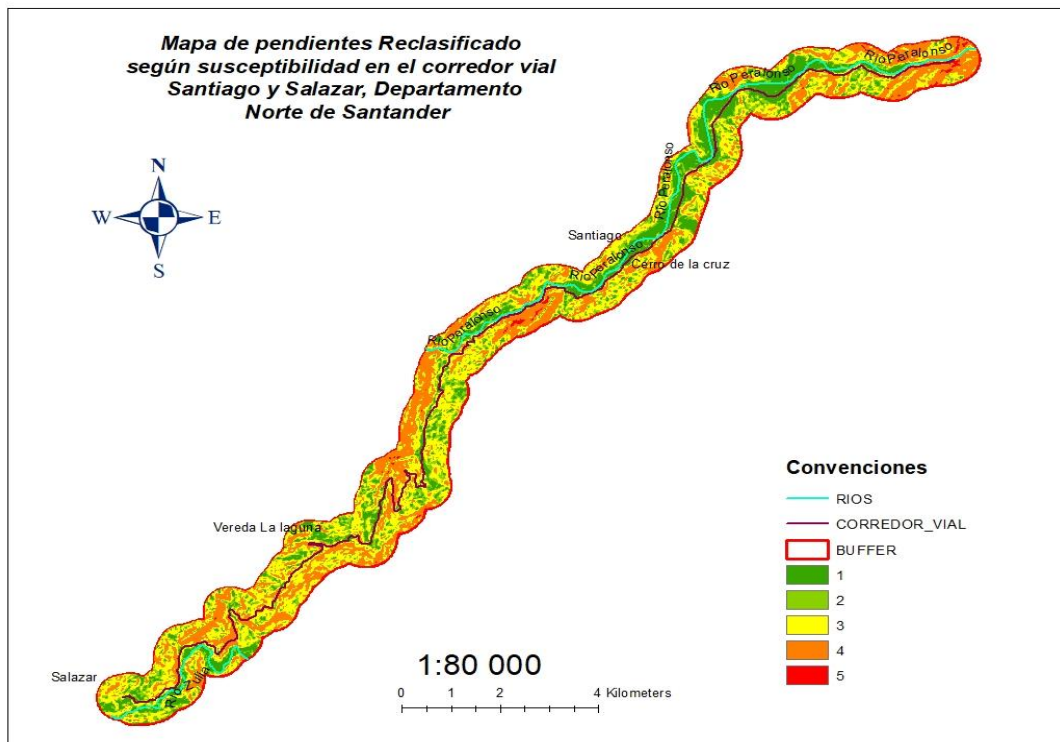


**Figura 19:** Mapa de pendientes del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/Fuente Autor

Después de obtener el mapa de pendientes, se procedió a realizar la reclasificación de las pendientes según susceptibilidad, como se indica en la tabla 5. Con el mapa de pendientes reclasificado se obtuvieron los porcentajes de susceptibilidad en el corredor vial donde se evidenció que los niveles más predominantes de susceptibilidad dentro del corredor vial fueron: susceptibilidad moderada con (33.01%) y susceptibilidad alta con un porcentaje de (28.23%), como se puede observar en la figura 20, en la que se identificó que los porcentajes de pendientes más recurrentes que se encontraron en el corredor vial fueron entre los rangos de  $11^\circ$  y  $40^\circ$ . Lo anterior nos dio como resultado que los porcentajes de pendientes estuvieron en un nivel de susceptibilidad moderadamente alto.



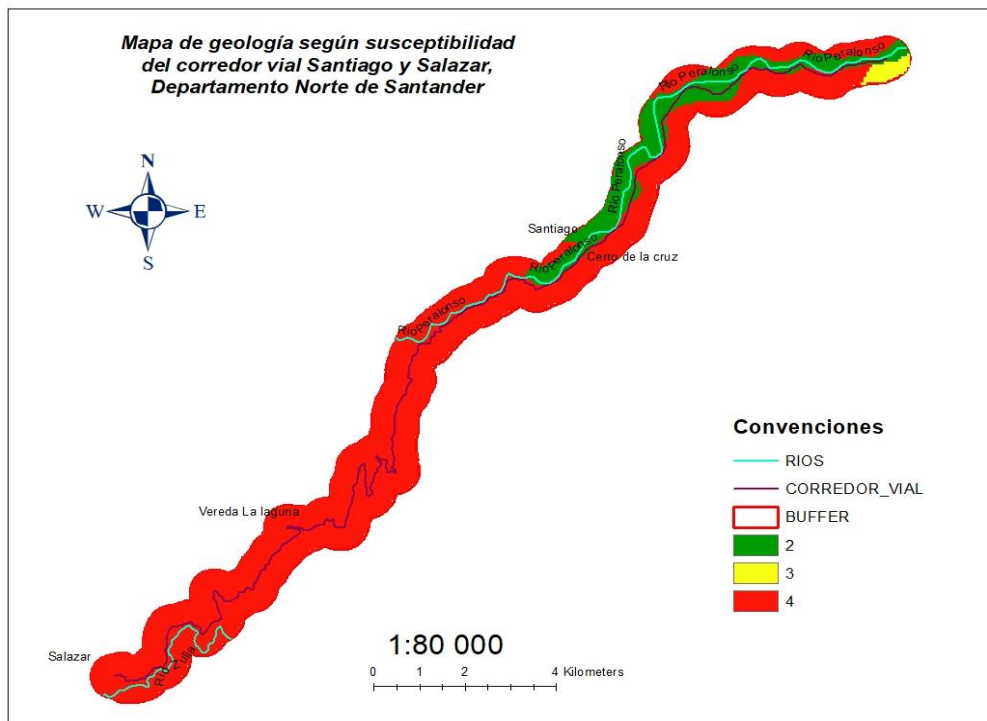
**Figura 20:** Porcentajes de niveles de susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander /Fuente Autor



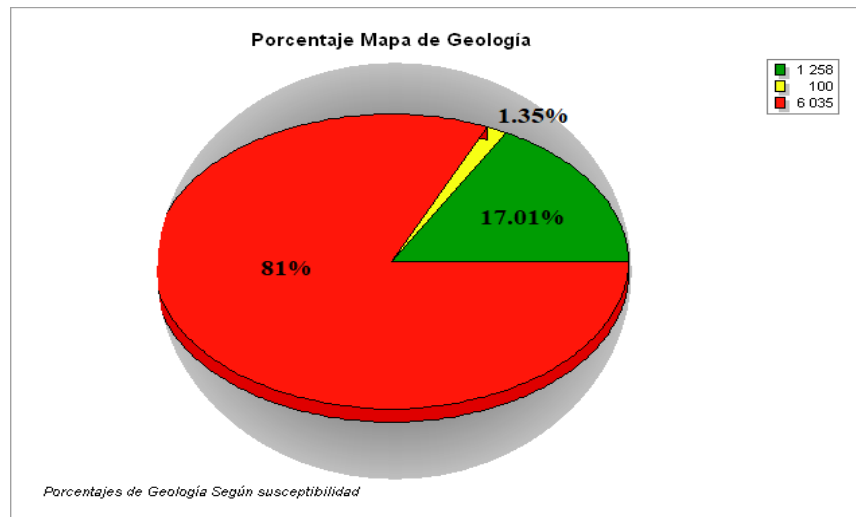
**Figura 21:** Mapa de pendientes Reclasificado según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor

### 7.2.2 Geología

Se generó el mapa de geología reclasificado según susceptibilidad, donde se identificó que los porcentajes obtenidos fueron: nivel bajo (1.35%), moderado (17.01%) y alto (81%). Con estos porcentajes de unidades geológicas, se evidenció que los niveles de susceptibilidad fueron altos. Como se identificó en la figura 23, que mostró los porcentajes de geología según susceptibilidad en la zona de estudio, este resultado fue obtenido a partir de la figura 22, donde se puede ver cómo están distribuidas las áreas de geología según susceptibilidad.



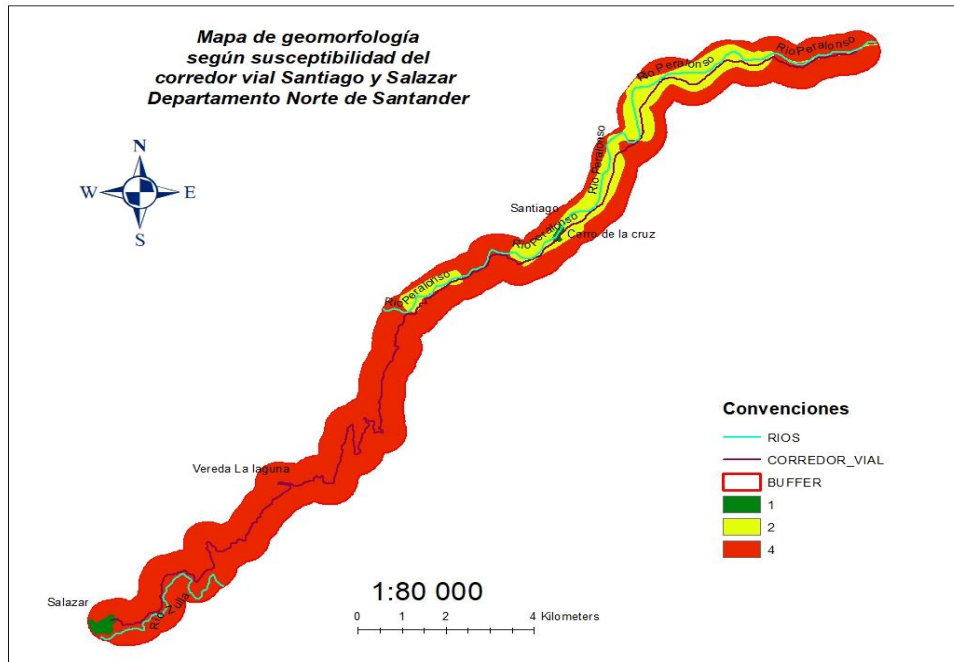
**Figura 22:** Mapa de geología según susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander /Fuente Autor



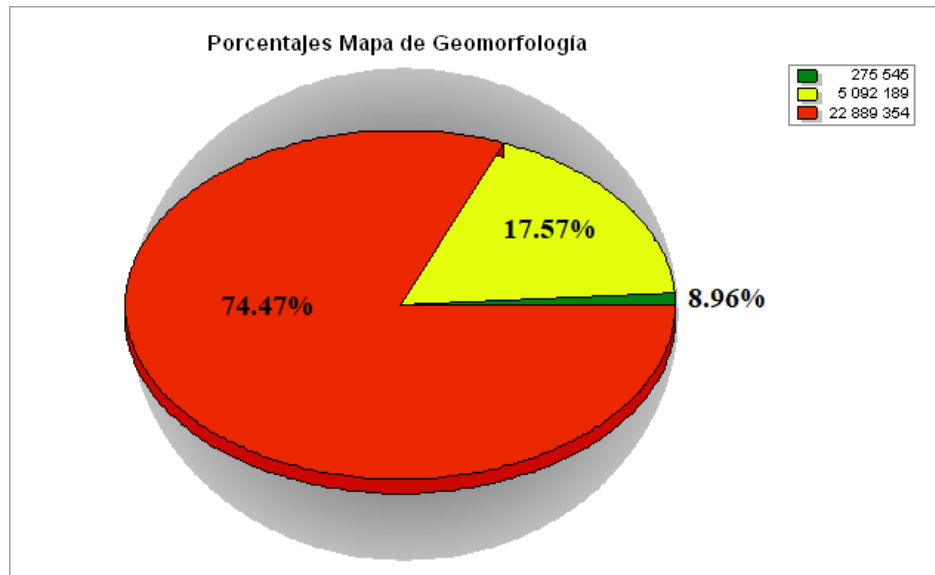
**Figura 23:** Porcentajes de geología según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor

### 7.2.3 Geomorfología

Se obtuvo el resultado del mapa de geomorfología según susceptibilidad, en el que se encontró un porcentaje alto de susceptibilidad, como se observa en la figura 24. Igualmente, se evidenciaron otros resultados de susceptibilidad más simplificados. Estos resultados fueron: nivel 1 (8.96%), nivel 3 (17.57%) y nivel 4 (74.47%), esto indicó que en el mapa de geomorfología existía un resultado con un nivel muy predominante de susceptibilidad alta. Como se observó en la figura 25, en la que se muestran los porcentajes de geomorfología según susceptibilidad en la zona de estudio.



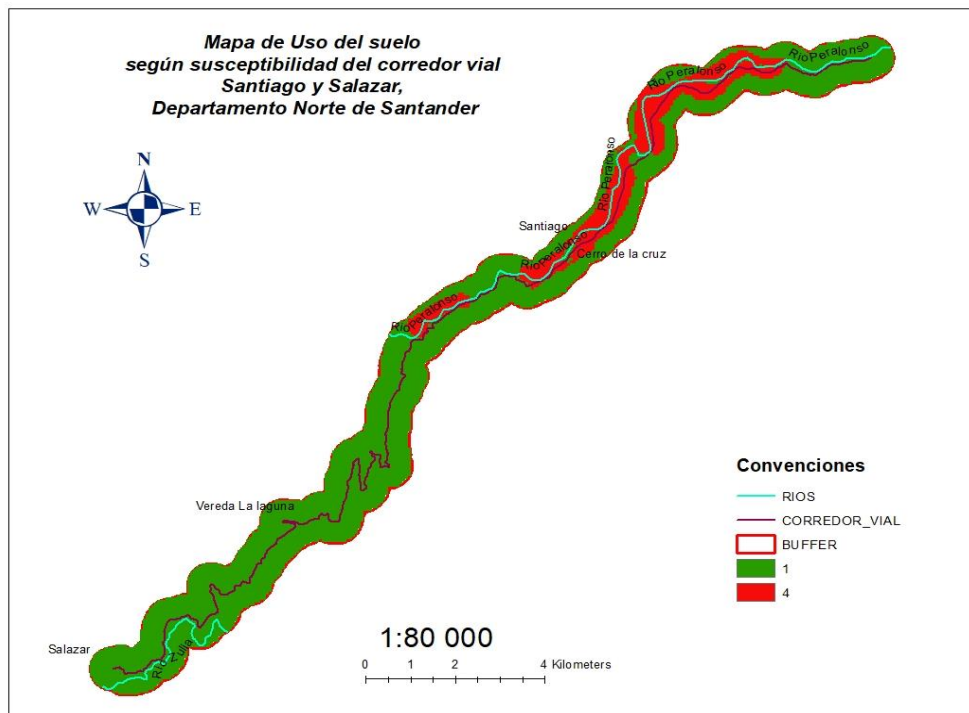
**Figura 24:** Mapa de geomorfología según susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar departamento Norte de Santander/ Fuente Autor



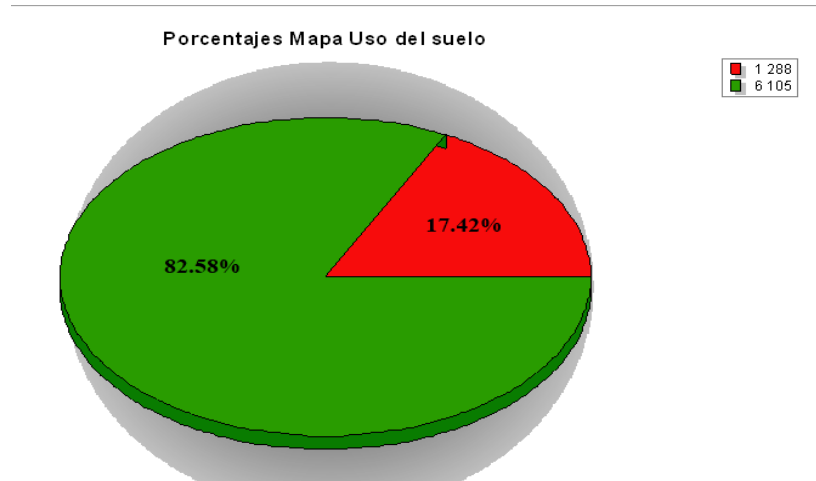
**Figura 25:** Porcentajes de Geomorfología Según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor

### 7.2.4 Uso del suelo

Se obtuvo el resultado del mapa de uso del suelo reclasificado según susceptibilidad, en el que se pudieron identificar porcentajes de susceptibilidad. El nivel 1, que corresponde al más bajo, fue el más predominante con un 82.58%, frente al nivel 4, que corresponde al nivel más alto de susceptibilidad, con un porcentaje del 17.42%, como se observa en la Figura 26, en el que se representó la susceptibilidad de los usos del suelo en el corredor vial de estudio. Con esto se concluyó que el mapa de uso del suelo tiene un resultado predominante en susceptibilidad muy baja, como se observa en la figura 27 en donde se reflejan los porcentajes de uso del suelo según susceptibilidad.



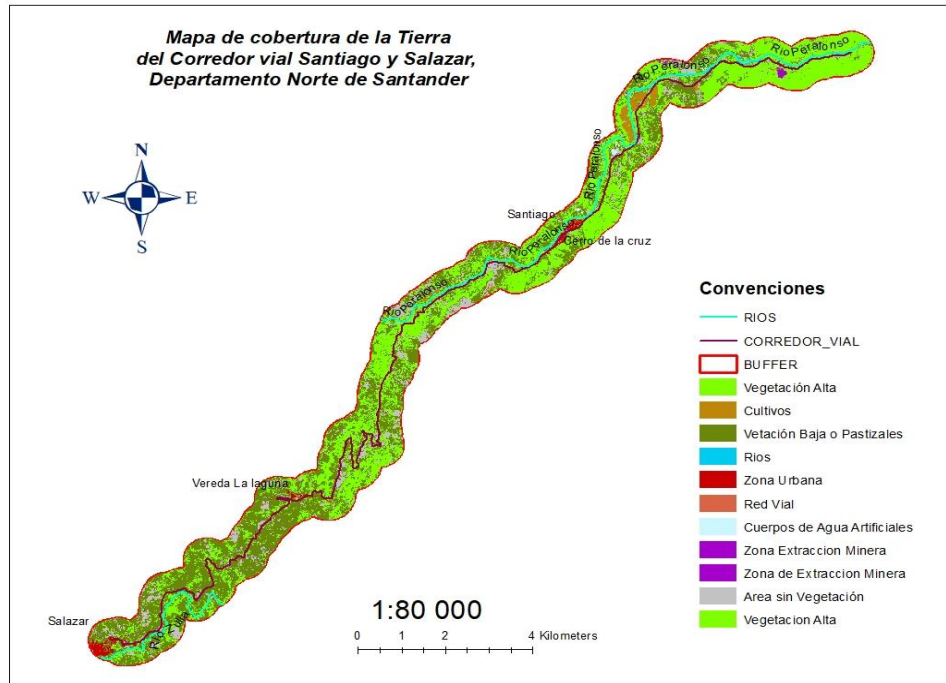
**Figura 26:** Mapa de Uso del suelo según susceptibilidad del corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor



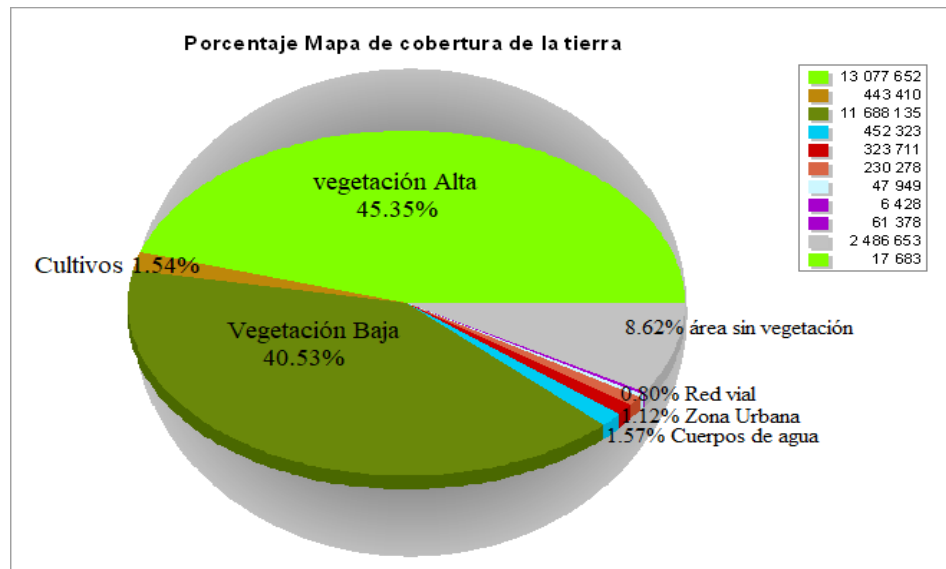
**Figura 27:** Porcentajes de uso del suelo según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor

### 7.2.5 Cobertura de la Tierra

Se elaboró el mapa de coberturas de la tierra para la zona de estudio, de la cual se obtuvieron una serie de porcentajes que permitieron mostrar cuáles fueron las coberturas más predominantes y menos predominantes en el corredor vial, como observamos en la figura 29. Los porcentajes de coberturas existentes dentro de la zona de estudio fueron los siguientes: vegetación alta (45.35%), vegetación baja o pastizales (40.53%), zonas sin vegetación (8.62%), cuerpos de agua (1.57%), cultivos (1.54%), zona urbana (1.12%), red vial (0.80%), cuerpo de aguas artificiales (0.16%), zona de extracción minera (0.24%), sombra de nube (0.06%). Con los porcentajes obtenidos se pudieron identificar que las coberturas que más se destacan dentro del corredor vial son vegetación alta y vegetación baja o pastizales.

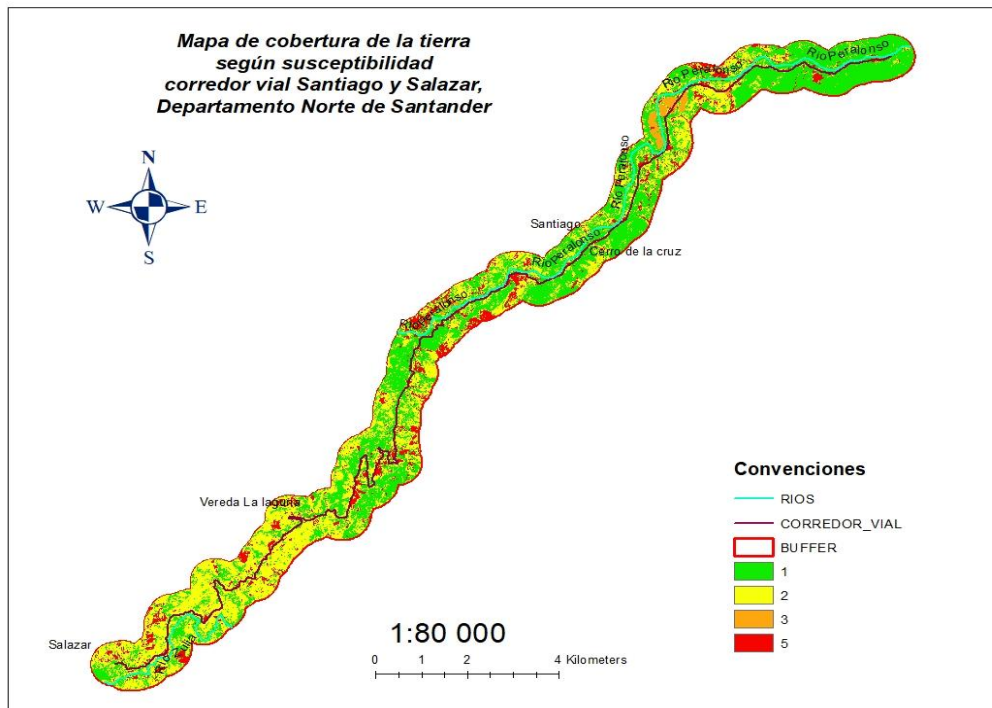


**Figura 28:** Mapa de cobertura de la Tierra del Corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor

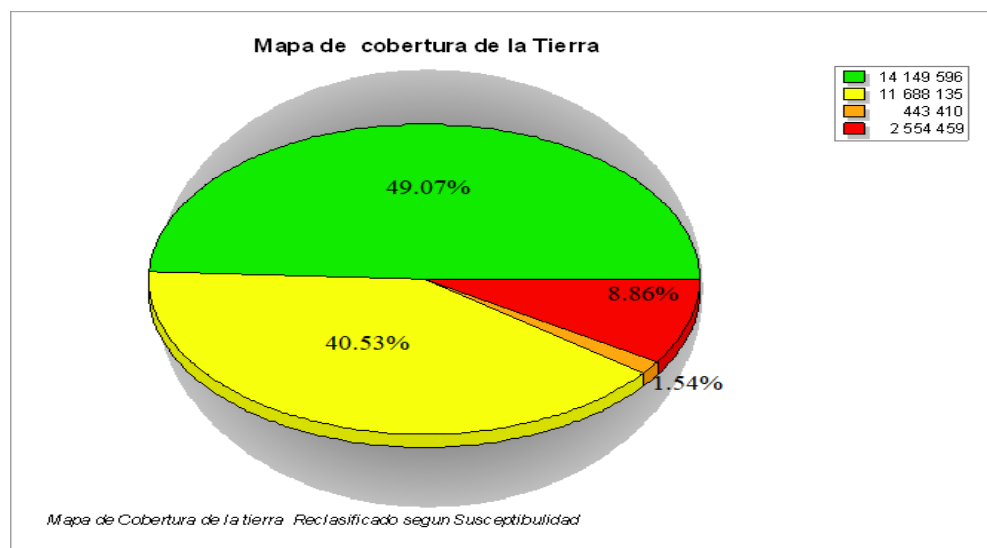


**Figura 29:** Porcentajes de coberturas de la tierra en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor

Posteriormente, se realizó la reclasificación de las coberturas de la tierra de acuerdo con la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, con los resultados de la reclasificación se obtuvieron porcentajes que permitieron realizar un análisis de los resultados del mapa de Cobertura de la Tierra. Los resultados del mapa de cobertura de la tierra reclasificado según susceptibilidad fueron los siguientes: susceptibilidad de nivel 1 (49.07%), nivel 2 (40.53%), nivel 3 (1.54 %), nivel 5 (8.86%), en él que se logró identificar un nivel predominante de susceptibilidad baja, esto como resultado del mapa de cobertura de la tierra. Como se puede observar en la figura 30 y en la figura 31.



**Figura 30:** Mapa de cobertura de la tierra según susceptibilidad corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor



**Figura 31:** Porcentajes de cobertura de la tierra según susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento Norte de Santander/ Fuente Autor

### 7.3 Resultado Fase 3

Posteriormente, de la aplicación de la metodología de proceso de jerarquía analítica se obtuvieron tanto resultados individuales como resultados consolidados con los pesos ponderados para cada uno de los cinco criterios evaluados que se utilizaron para el cálculo de la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa.

#### 7.3.1 Resultados de Juicio de valor individual para la metodología AHP (Proceso de jerarquía Analítica)

A continuación, se muestran los resultados de los juicios de valor individuales de cada uno de los nueve participantes para los cinco criterios evaluados teniendo en cuenta la escala lineal de 1 a 9 y el método de comparación por pares.

Juicio de valor participante 1		Pesos ponderados																																																																																																																																																	
<p>Participant 1   1   DIEGO ROJA   <math>\alpha</math>: 0.1   CR: 8%</p> <p>Name: _____ Weight: _____ Date: _____ Consistency Ratio: _____</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>i</th> <th>j</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>more important?</th> <th>Scale</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2</td><td>Geologia</td><td>USO Suelo</td><td>A</td><td>9</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td><td>pendiente</td><td>A</td><td>9</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>5</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>5</td></tr> <tr><td>1</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>USO Suelo</td><td>pendiente</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfologia</td><td>B</td><td>5</td></tr> <tr><td>2</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>pendiente</td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>Geomorfologia</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>3</td></tr> </tbody> </table>		i	j	A	B	more important?	Scale	1	2	Geologia	USO Suelo	A	9	1	3		pendiente	A	9	1	4		Geomorfologia	A	5	1	5		Cobertura de la tierra	A	5	1	6					1	7					1	8					2	3	USO Suelo	pendiente	B	3	2	4		Geomorfologia	B	5	2	5		Cobertura de la tierra	A	1	2	6					2	7					2	8					3	4	pendiente	Geomorfologia	A	1	3	5		Cobertura de la tierra	B	3	3	6					3	7					3	8					4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	A	3	<table border="1"> <thead> <tr> <th>n</th> <th>Criteria</th> <th>RGMM</th> <th>+/-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Geologia</td><td>57.5%</td><td>15.3%</td></tr> <tr><td>2</td><td>USO Suelo</td><td>5.1%</td><td>2.4%</td></tr> <tr><td>3</td><td>pendiente</td><td>9.6%</td><td>5.6%</td></tr> <tr><td>4</td><td>Geomorfologia</td><td>17.0%</td><td>7.9%</td></tr> <tr><td>5</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>10.8%</td><td>6.3%</td></tr> </tbody> </table>		n	Criteria	RGMM	+/-	1	Geologia	57.5%	15.3%	2	USO Suelo	5.1%	2.4%	3	pendiente	9.6%	5.6%	4	Geomorfologia	17.0%	7.9%	5	Cobertura de la tierra	10.8%	6.3%
i	j	A	B	more important?	Scale																																																																																																																																														
1	2	Geologia	USO Suelo	A	9																																																																																																																																														
1	3		pendiente	A	9																																																																																																																																														
1	4		Geomorfologia	A	5																																																																																																																																														
1	5		Cobertura de la tierra	A	5																																																																																																																																														
1	6																																																																																																																																																		
1	7																																																																																																																																																		
1	8																																																																																																																																																		
2	3	USO Suelo	pendiente	B	3																																																																																																																																														
2	4		Geomorfologia	B	5																																																																																																																																														
2	5		Cobertura de la tierra	A	1																																																																																																																																														
2	6																																																																																																																																																		
2	7																																																																																																																																																		
2	8																																																																																																																																																		
3	4	pendiente	Geomorfologia	A	1																																																																																																																																														
3	5		Cobertura de la tierra	B	3																																																																																																																																														
3	6																																																																																																																																																		
3	7																																																																																																																																																		
3	8																																																																																																																																																		
4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	A	3																																																																																																																																														
n	Criteria	RGMM	+/-																																																																																																																																																
1	Geologia	57.5%	15.3%																																																																																																																																																
2	USO Suelo	5.1%	2.4%																																																																																																																																																
3	pendiente	9.6%	5.6%																																																																																																																																																
4	Geomorfologia	17.0%	7.9%																																																																																																																																																
5	Cobertura de la tierra	10.8%	6.3%																																																																																																																																																
Juicio de valor participante 2		Pesos ponderados																																																																																																																																																	
<p>Participant 2   2   CARLOS BA   <math>\alpha</math>: 0.1   CR: 12%</p> <p>Name: _____ Weight: _____ Date: _____ Consistency Ratio: _____</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>i</th> <th>j</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>more important?</th> <th>Scale</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2</td><td>Geologia</td><td>USO Suelo</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td><td>pendiente</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>USO Suelo</td><td>pendiente</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>5</td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>pendiente</td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>Geomorfologia</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>5</td></tr> </tbody> </table>		i	j	A	B	more important?	Scale	1	2	Geologia	USO Suelo	A	1	1	3		pendiente	A	3	1	4		Geomorfologia	A	1	1	5		Cobertura de la tierra	A	3	1	6					1	7					1	8					2	3	USO Suelo	pendiente	A	1	2	4		Geomorfologia	A	3	2	5		Cobertura de la tierra	A	5	2	6					2	7					2	8					3	4	pendiente	Geomorfologia	A	3	3	5		Cobertura de la tierra	A	3	3	6					3	7					3	8					4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	A	5	<table border="1"> <thead> <tr> <th>n</th> <th>Criteria</th> <th>RGMM</th> <th>+/-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Geologia</td><td>27.8%</td><td>14.2%</td></tr> <tr><td>2</td><td>USO Suelo</td><td>27.5%</td><td>7.4%</td></tr> <tr><td>3</td><td>pendiente</td><td>22.9%</td><td>12.5%</td></tr> <tr><td>4</td><td>Geomorfologia</td><td>16.3%</td><td>8.9%</td></tr> <tr><td>5</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>5.6%</td><td>2.1%</td></tr> </tbody> </table>		n	Criteria	RGMM	+/-	1	Geologia	27.8%	14.2%	2	USO Suelo	27.5%	7.4%	3	pendiente	22.9%	12.5%	4	Geomorfologia	16.3%	8.9%	5	Cobertura de la tierra	5.6%	2.1%
i	j	A	B	more important?	Scale																																																																																																																																														
1	2	Geologia	USO Suelo	A	1																																																																																																																																														
1	3		pendiente	A	3																																																																																																																																														
1	4		Geomorfologia	A	1																																																																																																																																														
1	5		Cobertura de la tierra	A	3																																																																																																																																														
1	6																																																																																																																																																		
1	7																																																																																																																																																		
1	8																																																																																																																																																		
2	3	USO Suelo	pendiente	A	1																																																																																																																																														
2	4		Geomorfologia	A	3																																																																																																																																														
2	5		Cobertura de la tierra	A	5																																																																																																																																														
2	6																																																																																																																																																		
2	7																																																																																																																																																		
2	8																																																																																																																																																		
3	4	pendiente	Geomorfologia	A	3																																																																																																																																														
3	5		Cobertura de la tierra	A	3																																																																																																																																														
3	6																																																																																																																																																		
3	7																																																																																																																																																		
3	8																																																																																																																																																		
4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	A	5																																																																																																																																														
n	Criteria	RGMM	+/-																																																																																																																																																
1	Geologia	27.8%	14.2%																																																																																																																																																
2	USO Suelo	27.5%	7.4%																																																																																																																																																
3	pendiente	22.9%	12.5%																																																																																																																																																
4	Geomorfologia	16.3%	8.9%																																																																																																																																																
5	Cobertura de la tierra	5.6%	2.1%																																																																																																																																																
Juicio de valor participante 3		Pesos ponderados																																																																																																																																																	

<p><b>Participant 3</b>   3   <b>JUAN ALBER</b>   <math>\alpha</math>: 0.1   CR: 5%</p> <p>Name: _____ Weight: _____ Date: _____ Consistency Ratio: _____</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2">Criteria</th> <th>more important ?</th> <th>Scale</th> </tr> <tr> <th>i</th> <th>j</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>A or B</th> <th>(1-9)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2</td><td>Geología</td><td>USO Suelo</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td><td>pendiente</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfología</td><td>B</td><td>5</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>B</td><td>5</td></tr> <tr><td>1</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>USO Suelo</td><td>pendiente</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfología</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>pendiente</td><td>Geomorfología</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>Geomorfología</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>4</td></tr> <tr><td>4</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Criteria		more important ?	Scale	i	j	A	B	A or B	(1-9)	1	2	Geología	USO Suelo	A	1	1	3		pendiente	B	3	1	4		Geomorfología	B	5	1	5		Cobertura de la tierra	B	5	1	6					1	7					1	8					2	3	USO Suelo	pendiente	B	3	2	4		Geomorfología	B	3	2	5		Cobertura de la tierra	A	1	2	6					2	7					2	8					3	4	pendiente	Geomorfología	A	1	3	5		Cobertura de la tierra	A	3	3	6					3	7					3	8					4	5	Geomorfología	Cobertura de la tierra	A	4	4	6					<table border="1"> <thead> <tr> <th>n</th> <th>Criteria</th> <th>RGMM</th> <th>+/-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Geología</td><td>7.6%</td><td>3.8%</td></tr> <tr><td>2</td><td>USO Suelo</td><td>10.3%</td><td>2.7%</td></tr> <tr><td>3</td><td>pendiente</td><td>31.0%</td><td>8.0%</td></tr> <tr><td>4</td><td>Geomorfología</td><td>36.1%</td><td>8.1%</td></tr> <tr><td>5</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>14.9%</td><td>7.3%</td></tr> </tbody> </table>	n	Criteria	RGMM	+/-	1	Geología	7.6%	3.8%	2	USO Suelo	10.3%	2.7%	3	pendiente	31.0%	8.0%	4	Geomorfología	36.1%	8.1%	5	Cobertura de la tierra	14.9%	7.3%
		Criteria		more important ?	Scale																																																																																																																																																								
i	j	A	B	A or B	(1-9)																																																																																																																																																								
1	2	Geología	USO Suelo	A	1																																																																																																																																																								
1	3		pendiente	B	3																																																																																																																																																								
1	4		Geomorfología	B	5																																																																																																																																																								
1	5		Cobertura de la tierra	B	5																																																																																																																																																								
1	6																																																																																																																																																												
1	7																																																																																																																																																												
1	8																																																																																																																																																												
2	3	USO Suelo	pendiente	B	3																																																																																																																																																								
2	4		Geomorfología	B	3																																																																																																																																																								
2	5		Cobertura de la tierra	A	1																																																																																																																																																								
2	6																																																																																																																																																												
2	7																																																																																																																																																												
2	8																																																																																																																																																												
3	4	pendiente	Geomorfología	A	1																																																																																																																																																								
3	5		Cobertura de la tierra	A	3																																																																																																																																																								
3	6																																																																																																																																																												
3	7																																																																																																																																																												
3	8																																																																																																																																																												
4	5	Geomorfología	Cobertura de la tierra	A	4																																																																																																																																																								
4	6																																																																																																																																																												
n	Criteria	RGMM	+/-																																																																																																																																																										
1	Geología	7.6%	3.8%																																																																																																																																																										
2	USO Suelo	10.3%	2.7%																																																																																																																																																										
3	pendiente	31.0%	8.0%																																																																																																																																																										
4	Geomorfología	36.1%	8.1%																																																																																																																																																										
5	Cobertura de la tierra	14.9%	7.3%																																																																																																																																																										
<p>Juicio de valor participante 4</p>	<p>Pesos ponderados</p>																																																																																																																																																												
<p><b>Participant 4</b>   4   <b>CARLOS AR</b>   <math>\alpha</math>: 0.1   CR: 4%</p> <p>Name: _____ Weight: _____ Date: _____ Consistency Ratio: _____</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2">Criteria</th> <th>more important ?</th> <th>Scale</th> </tr> <tr> <th>i</th> <th>j</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>A or B</th> <th>(1-9)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2</td><td>Geología</td><td>USO Suelo</td><td>A</td><td>7</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td><td>pendiente</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfología</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>USO Suelo</td><td>pendiente</td><td>B</td><td>7</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfología</td><td>B</td><td>7</td></tr> <tr><td>2</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>pendiente</td><td>Geomorfología</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>Geomorfología</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Criteria		more important ?	Scale	i	j	A	B	A or B	(1-9)	1	2	Geología	USO Suelo	A	7	1	3		pendiente	B	3	1	4		Geomorfología	B	3	1	5		Cobertura de la tierra	A	3	1	6					1	7					1	8					2	3	USO Suelo	pendiente	B	7	2	4		Geomorfología	B	7	2	5		Cobertura de la tierra	B	3	2	6					2	7					2	8					3	4	pendiente	Geomorfología	A	1	3	5		Cobertura de la tierra	A	3	3	6					3	7					3	8					4	5	Geomorfología	Cobertura de la tierra	A	3	4	6					<table border="1"> <thead> <tr> <th>n</th> <th>Criteria</th> <th>RGMM</th> <th>+/-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Geología</td><td>18.6%</td><td>7.7%</td></tr> <tr><td>2</td><td>USO Suelo</td><td>3.7%</td><td>1.0%</td></tr> <tr><td>3</td><td>pendiente</td><td>34.0%</td><td>9.0%</td></tr> <tr><td>4</td><td>Geomorfología</td><td>34.0%</td><td>9.0%</td></tr> <tr><td>5</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>9.6%</td><td>2.6%</td></tr> </tbody> </table>	n	Criteria	RGMM	+/-	1	Geología	18.6%	7.7%	2	USO Suelo	3.7%	1.0%	3	pendiente	34.0%	9.0%	4	Geomorfología	34.0%	9.0%	5	Cobertura de la tierra	9.6%	2.6%
		Criteria		more important ?	Scale																																																																																																																																																								
i	j	A	B	A or B	(1-9)																																																																																																																																																								
1	2	Geología	USO Suelo	A	7																																																																																																																																																								
1	3		pendiente	B	3																																																																																																																																																								
1	4		Geomorfología	B	3																																																																																																																																																								
1	5		Cobertura de la tierra	A	3																																																																																																																																																								
1	6																																																																																																																																																												
1	7																																																																																																																																																												
1	8																																																																																																																																																												
2	3	USO Suelo	pendiente	B	7																																																																																																																																																								
2	4		Geomorfología	B	7																																																																																																																																																								
2	5		Cobertura de la tierra	B	3																																																																																																																																																								
2	6																																																																																																																																																												
2	7																																																																																																																																																												
2	8																																																																																																																																																												
3	4	pendiente	Geomorfología	A	1																																																																																																																																																								
3	5		Cobertura de la tierra	A	3																																																																																																																																																								
3	6																																																																																																																																																												
3	7																																																																																																																																																												
3	8																																																																																																																																																												
4	5	Geomorfología	Cobertura de la tierra	A	3																																																																																																																																																								
4	6																																																																																																																																																												
n	Criteria	RGMM	+/-																																																																																																																																																										
1	Geología	18.6%	7.7%																																																																																																																																																										
2	USO Suelo	3.7%	1.0%																																																																																																																																																										
3	pendiente	34.0%	9.0%																																																																																																																																																										
4	Geomorfología	34.0%	9.0%																																																																																																																																																										
5	Cobertura de la tierra	9.6%	2.6%																																																																																																																																																										
<p>Juicio de valor participante 5</p>	<p>Pesos ponderados</p>																																																																																																																																																												



<p><b>Participant 7</b>   7   <b>JAIRO GASP</b>   <math>\alpha</math>: 0.1   CR: 14%</p> <p>Name: _____ Weight: _____ Date: _____ Consistency Ratio: _____</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2">Criteria</th> <th>more important ?</th> <th>Scale</th> </tr> <tr> <th>i</th> <th>j</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>A or B</th> <th>(1-9)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2</td><td>Geologia</td><td>USO Suelo</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td><td>pendiente</td><td>B</td><td>5</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>USO Suelo</td><td>pendiente</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>pendiente</td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>3</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>Geomorfologia</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>4</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Criteria		more important ?	Scale	i	j	A	B	A or B	(1-9)	1	2	Geologia	USO Suelo	B	3	1	3		pendiente	B	5	1	4		Geomorfologia	A	1	1	5		Cobertura de la tierra	B	3	1	6					1	7					1	8					2	3	USO Suelo	pendiente	B	3	2	4		Geomorfologia	A	1	2	5		Cobertura de la tierra	A	1	2	6					2	7					2	8					3	4	pendiente	Geomorfologia	A	1	3	5		Cobertura de la tierra	B	3	3	6					3	7					3	8					4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	B	3	4	6					<table border="1"> <thead> <tr> <th>n</th> <th>Criteria</th> <th>RGMM</th> <th>+/-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Geologia</td><td>8.0%</td><td>3.3%</td></tr> <tr><td>2</td><td>USO Suelo</td><td>17.9%</td><td>8.9%</td></tr> <tr><td>3</td><td>pendiente</td><td>26.2%</td><td>15.2%</td></tr> <tr><td>4</td><td>Geomorfologia</td><td>13.5%</td><td>5.3%</td></tr> <tr><td>5</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>34.4%</td><td>17.0%</td></tr> </tbody> </table>	n	Criteria	RGMM	+/-	1	Geologia	8.0%	3.3%	2	USO Suelo	17.9%	8.9%	3	pendiente	26.2%	15.2%	4	Geomorfologia	13.5%	5.3%	5	Cobertura de la tierra	34.4%	17.0%
		Criteria		more important ?	Scale																																																																																																																																																								
i	j	A	B	A or B	(1-9)																																																																																																																																																								
1	2	Geologia	USO Suelo	B	3																																																																																																																																																								
1	3		pendiente	B	5																																																																																																																																																								
1	4		Geomorfologia	A	1																																																																																																																																																								
1	5		Cobertura de la tierra	B	3																																																																																																																																																								
1	6																																																																																																																																																												
1	7																																																																																																																																																												
1	8																																																																																																																																																												
2	3	USO Suelo	pendiente	B	3																																																																																																																																																								
2	4		Geomorfologia	A	1																																																																																																																																																								
2	5		Cobertura de la tierra	A	1																																																																																																																																																								
2	6																																																																																																																																																												
2	7																																																																																																																																																												
2	8																																																																																																																																																												
3	4	pendiente	Geomorfologia	A	1																																																																																																																																																								
3	5		Cobertura de la tierra	B	3																																																																																																																																																								
3	6																																																																																																																																																												
3	7																																																																																																																																																												
3	8																																																																																																																																																												
4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	B	3																																																																																																																																																								
4	6																																																																																																																																																												
n	Criteria	RGMM	+/-																																																																																																																																																										
1	Geologia	8.0%	3.3%																																																																																																																																																										
2	USO Suelo	17.9%	8.9%																																																																																																																																																										
3	pendiente	26.2%	15.2%																																																																																																																																																										
4	Geomorfologia	13.5%	5.3%																																																																																																																																																										
5	Cobertura de la tierra	34.4%	17.0%																																																																																																																																																										
<p><b>Juicio de valor participante 8</b></p>	<p><b>Pesos ponderados</b></p>																																																																																																																																																												
<p><b>Participant 8</b>   8   <b>EMILIO CART</b>   <math>\alpha</math>: 0.1   CR: 3%</p> <p>Name: _____ Weight: _____ Date: _____ Consistency Ratio: _____</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2">Criteria</th> <th>more important ?</th> <th>Scale</th> </tr> <tr> <th>i</th> <th>j</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>A or B</th> <th>(1-9)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2</td><td>Geologia</td><td>USO Suelo</td><td>B</td><td>7</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td></td><td>pendiente</td><td>B</td><td>7</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfologia</td><td>B</td><td>7</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>USO Suelo</td><td>pendiente</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td></td><td>Geomorfologia</td><td>B</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>4</td><td>pendiente</td><td>Geomorfologia</td><td>A</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td></td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>5</td></tr> <tr><td>3</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>5</td><td>Geomorfologia</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>A</td><td>7</td></tr> <tr><td>4</td><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Criteria		more important ?	Scale	i	j	A	B	A or B	(1-9)	1	2	Geologia	USO Suelo	B	7	1	3		pendiente	B	7	1	4		Geomorfologia	B	7	1	5		Cobertura de la tierra	A	1	1	6					1	7					1	8					2	3	USO Suelo	pendiente	B	3	2	4		Geomorfologia	B	3	2	5		Cobertura de la tierra	A	2	2	6					2	7					2	8					3	4	pendiente	Geomorfologia	A	1	3	5		Cobertura de la tierra	A	5	3	6					3	7					3	8					4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	A	7	4	6					<table border="1"> <thead> <tr> <th>n</th> <th>Criteria</th> <th>RGMM</th> <th>+/-</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Geologia</td><td>4.6%</td><td>1.8%</td></tr> <tr><td>2</td><td>USO Suelo</td><td>16.2%</td><td>6.2%</td></tr> <tr><td>3</td><td>pendiente</td><td>35.4%</td><td>6.1%</td></tr> <tr><td>4</td><td>Geomorfologia</td><td>37.7%</td><td>5.9%</td></tr> <tr><td>5</td><td>Cobertura de la tierra</td><td>6.0%</td><td>1.3%</td></tr> </tbody> </table>	n	Criteria	RGMM	+/-	1	Geologia	4.6%	1.8%	2	USO Suelo	16.2%	6.2%	3	pendiente	35.4%	6.1%	4	Geomorfologia	37.7%	5.9%	5	Cobertura de la tierra	6.0%	1.3%
		Criteria		more important ?	Scale																																																																																																																																																								
i	j	A	B	A or B	(1-9)																																																																																																																																																								
1	2	Geologia	USO Suelo	B	7																																																																																																																																																								
1	3		pendiente	B	7																																																																																																																																																								
1	4		Geomorfologia	B	7																																																																																																																																																								
1	5		Cobertura de la tierra	A	1																																																																																																																																																								
1	6																																																																																																																																																												
1	7																																																																																																																																																												
1	8																																																																																																																																																												
2	3	USO Suelo	pendiente	B	3																																																																																																																																																								
2	4		Geomorfologia	B	3																																																																																																																																																								
2	5		Cobertura de la tierra	A	2																																																																																																																																																								
2	6																																																																																																																																																												
2	7																																																																																																																																																												
2	8																																																																																																																																																												
3	4	pendiente	Geomorfologia	A	1																																																																																																																																																								
3	5		Cobertura de la tierra	A	5																																																																																																																																																								
3	6																																																																																																																																																												
3	7																																																																																																																																																												
3	8																																																																																																																																																												
4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	A	7																																																																																																																																																								
4	6																																																																																																																																																												
n	Criteria	RGMM	+/-																																																																																																																																																										
1	Geologia	4.6%	1.8%																																																																																																																																																										
2	USO Suelo	16.2%	6.2%																																																																																																																																																										
3	pendiente	35.4%	6.1%																																																																																																																																																										
4	Geomorfologia	37.7%	5.9%																																																																																																																																																										
5	Cobertura de la tierra	6.0%	1.3%																																																																																																																																																										
<p><b>Juicio de valor participante 9</b></p>	<p><b>Pesos ponderados</b></p>																																																																																																																																																												

Participant 9		9	ALEJANDRA	$\alpha$ : 0.1	CR: 4%
Name	Weight	Date	Criteria	more important ?	Scale
i	j	A	B	A or B	(1-9)
1	2	Geologia	USO Suelo	A	1
1	3		pendiente	A	1
1	4		Geomorfologia	A	2
1	5		Cobertura de la tierra	A	3
1	6				
1	7				
1	8				
2	3	USO Suelo	pendiente	B	3
2	4		Geomorfologia	A	3
2	5		Cobertura de la tierra	A	2
2	6				
2	7				
2	8				
3	4	pendiente	Geomorfologia	A	3
3	5		Cobertura de la tierra	A	3
3	6				
3	7				
3	8				
4	5	Geomorfologia	Cobertura de la tierra	A	1
4	6				

n	Criteria	RGMM	+/-
1	Geologia	25.0%	5.8%
2	USO Suelo	20.8%	7.3%
3	pendiente	34.8%	11.4%
4	Geomorfologia	9.8%	2.3%
5	Cobertura de la tierra	9.6%	1.0%

**Tabla 9:** Juicios de valor individuales, metodología AHP/ fuente (Saaty 1980)

### 7.3.2 Resultados consolidados de la Metodología AHP (Proceso de jerarquía Analítica)

A continuación, como se puede observar en la figura 32, donde se mostraron los resultados consolidados de los nueve participantes de la metodología AHP, estos resultados incluyeron la matriz de comparación por pares consolidada y los pesos ponderados finales de cada uno de los cinco criterios, los cuales se utilizaron en la superposición de capas, y el cálculo del índice de la susceptibilidad.

Matrix											normalized principal Eigenvector
	Geología	USO Suelo	pendiente	Geomorfología	Cobertura de la tierra	0	0	0	0	0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Geología	1	1	1	2	3	-	-	-	-	-	25.05%
USO Suelo	2	1	1/3	3	2	-	-	-	-	-	20.56%
pendiente	3	3	1	3	3	-	-	-	-	-	34.94%
Geomorfología	4	1/3	1/3	1	1	-	-	-	-	-	9.80%
Cobertura de la tierra	5	1/2	1/3	1	1	-	-	-	-	-	9.65%

**Figura 32:** Matriz de comparación por pares resultado consolidado/Fuente (Saaty 1980)

Los pesos ponderados determinados para cada criterio fueron los siguientes: geología (25.05%), uso del suelo (20.56%), pendiente (34,94%), geomorfología (9,80%), cobertura de la tierra (9.65%). Con base en estos pesos, se observó que los criterios de **pendiente y geología** fueron los que tuvieron puntuaciones más altas, y los criterios de **geomorfología y cobertura de la tierra** obtuvieron las puntuaciones más bajas.

Finalmente se observó en la figura 33 un consolidado de los pesos ponderados y resumen de cada uno de los índices, en el que se mostraron los resultados del CR obtenido en la metodología AHP como parte de los resultados consolidados. Según los resultados obtenidos, se evaluó la coherencia y estabilidad de las preferencias expresadas en las matrices de comparación por pares. Se presentó un radio de consistencia del 3.4%, establecido por la metodología AHP, la cual sugiere que el resultado ideal debe ser inferior al 10% (Saaty, 1980). Dado que el CR obtenido fue del 3.4%, indica que los resultados están muy cerca de la medida exacta y que tienen un índice de consistencia notablemente alto.

Table	Criterion	Comment	Weights	+/-
1	Geología		25.1%	6.1%
2	USO Suelo		20.6%	6.5%
3	pendiente		34.9%	14.3%
4	Geomorfología		9.8%	2.1%
5	Cobertura de la tie		9.7%	1.2%
6			0.0%	0.0%
7			0.0%	0.0%
8			0.0%	0.0%
9		for 9&10 unprotect the input sheets and expand the	0.0%	0.0%
10		question section ("+" in row 66)	0.0%	0.0%

Result	Eigenvalue	Lambda:	5.153	MRE:	27.9%
	Consistency Ratio	0.37	GCI: 0.13	Psi: 0.0%	CR: 3.4%

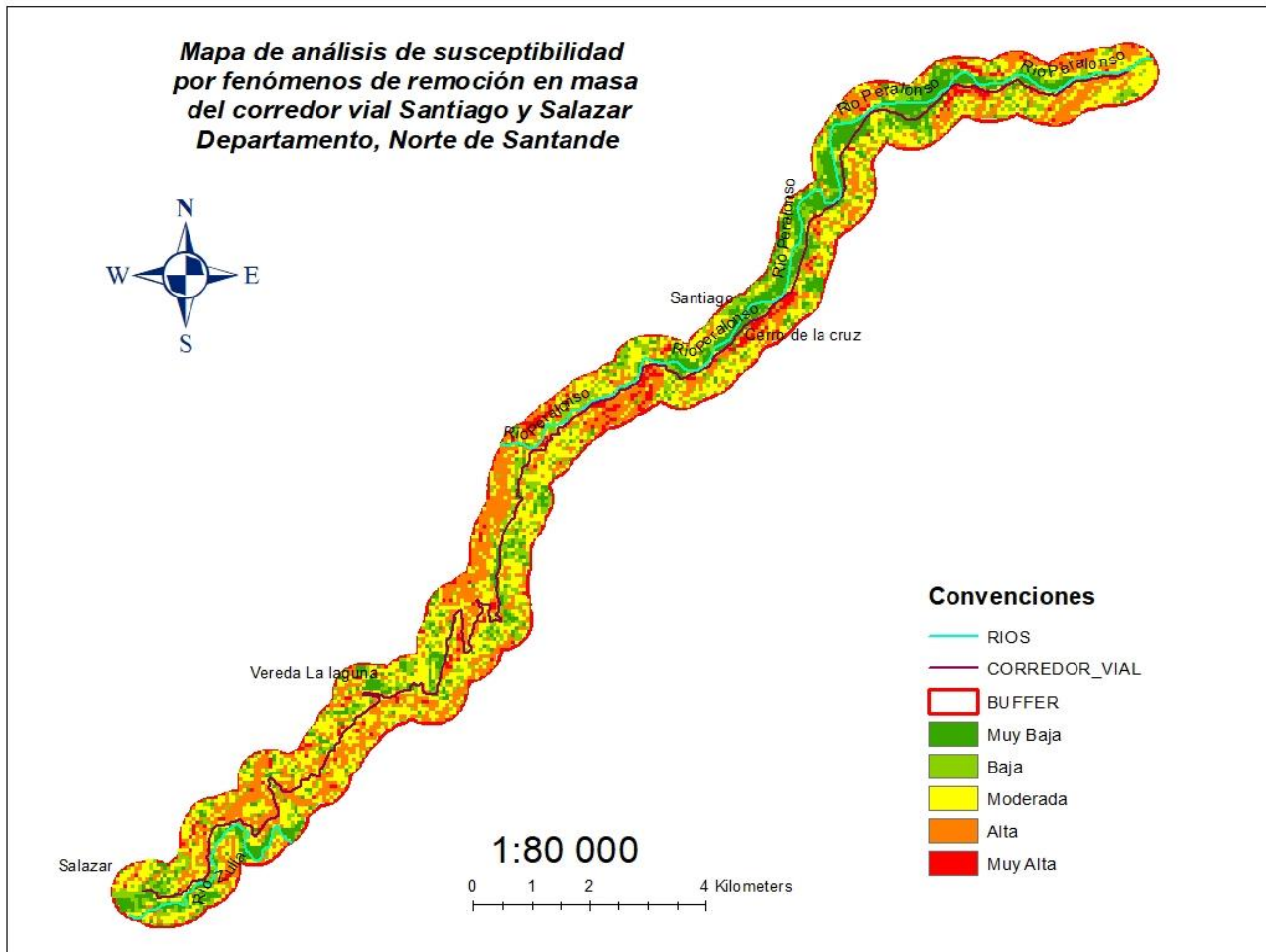
Figura 33: Consolidado de pesos ponderados y resumen/ Saaty 1980

## 7.4 Resultado Fase 4

### 7.4.1 Análisis de susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa

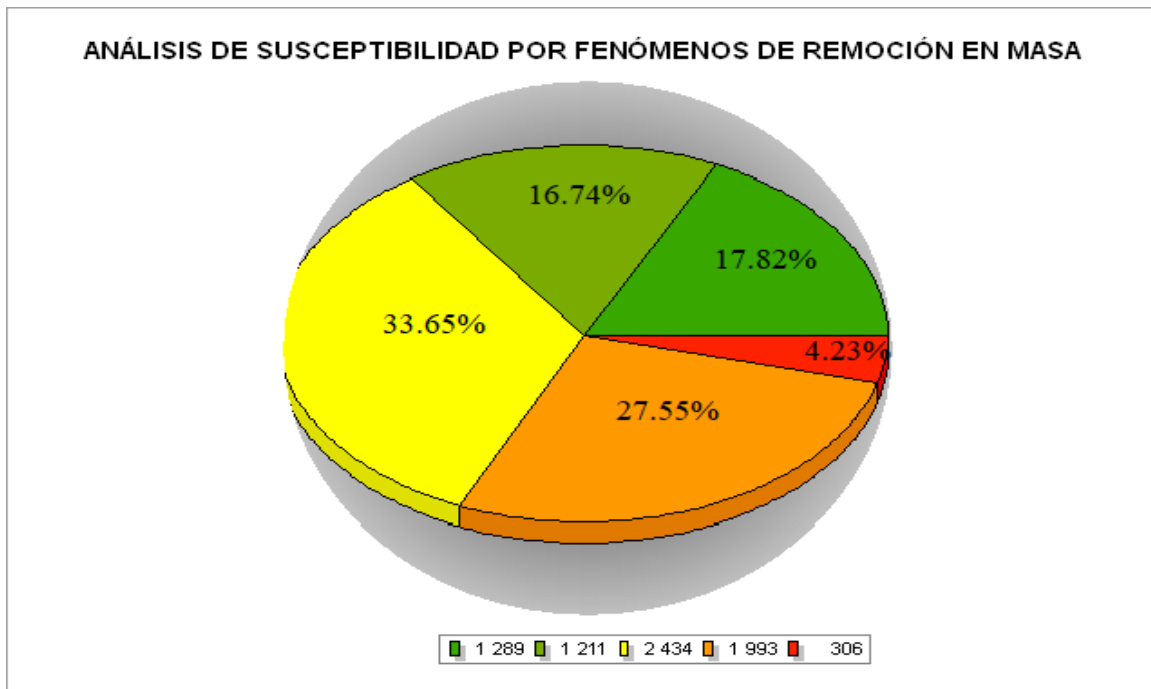
De acuerdo con el último objetivo específico, se desarrolló un análisis de superposición utilizando los SIG, lo que generó un mapa detallado de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa, como se observó en la figura 34. Este mapa utilizó una leyenda de colores que indicó los diferentes niveles de susceptibilidad, los cuales fueron: muy baja (verde), baja (verde claro), moderada (amarillo), alta (naranja) y muy alta (rojo). La mayor parte del corredor vial presentó áreas con susceptibilidad moderada a alta, como se observó en los colores predominantes (amarillo, naranja, rojo). Estas áreas arrojaron nuevas zonas de susceptibilidad en el municipio de Salazar que no estaban registradas en los focos de concentración de eventos de fenómenos de remoción en masa, y en el municipio de Santiago se confirmaron zonas en niveles altos que ya existían registradas. A su vez, se mostraron nuevas zonas en niveles moderados que

no estaban registradas dentro del inventario, tal como se observó anteriormente en el capítulo 7.1.1, en la figura 18.



**Figura 34:** Mapa de análisis de susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa del corredor vial Santiago y Salazar, departamento, Norte de Santander/ Fuente Autor

Posteriormente, se obtuvieron los siguientes porcentajes como resultado del mapa de análisis de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa: muy baja (17.82%), baja (16.74%), moderada (33.65%), alta (27.55%), muy alta (4.23%). De acuerdo con estos resultados, se identificó que el índice de susceptibilidad se encontró entre susceptibilidad moderada y susceptibilidad alta, como se observó en la figura 35.



**Figura 35:** *Porcentajes índice de susceptibilidad en el corredor vial Santiago y Salazar, departamento, Norte de Santander /fuente autor*

## 8. Discusión de resultados

Con el desarrollo del análisis de criterios múltiples mediante la aplicación del método AHP (Proceso de Jerarquía Analítica) utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), se integró la participación de diferentes profesionales en la ponderación de cada uno de los criterios. Esta metodología permitió obtener resultados significativos en la identificación de áreas de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa en el corredor vial de estudio. Este análisis es más objetivo, ya que utiliza un enfoque que elimina la subjetividad que se crea en metodologías donde los factores o pesos son definidos exclusivamente por la evaluación de un solo experto. De esta manera, se garantiza una mayor precisión en la evaluación de susceptibilidad. Entre los hallazgos destacados, se identificaron los pesos ponderados para cada uno de los criterios evaluados, donde la pendiente obtuvo un peso del 34.94% y la geología un peso del 25.05%, constituyendo los pesos más altos. Estos resultados indicaron que estas variables requerían una atención especial en la zona de estudio.

Asimismo, se generaron los pesos ponderados para los criterios de uso del suelo (20.56%), geomorfología (9.80%) y cobertura de la tierra (9.65%). Estos resultados mostraron un comportamiento moderado en el criterio de uso del suelo y un comportamiento bajo en los criterios de geomorfología y cobertura de la tierra. Esto generó la necesidad de evaluar factores como el uso del suelo en la incidencia de los fenómenos de remoción en masa en la zona de estudio, dado que este puede ser muy variable a lo largo del tiempo. Estos pesos ponderados se desarrollaron mediante una matriz de comparación por pares, la cual arrojó un índice de consistencia (CR) del 3.4%, lo que indicó que los resultados obtenidos con la metodología AHP fueron coherentes y estables. Según (Saaty,1980), un CR inferior al 10% sugiere evaluaciones confiables, lo cual respaldó la validez y confianza en las decisiones futuras basadas en estos resultados, como el análisis de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en el corredor vial de estudio.

## 9. Conclusiones

**Teniendo en cuenta** los resultados obtenidos del inventario de eventos de fenómenos de remoción en masa, se pudieron identificar los diferentes focos de concentración en el corredor vial, en niveles medio y alto en el municipio de Santiago, mientras que en Salazar predominan niveles bajos.

**La reclasificación** de niveles de susceptibilidad reveló que la geología (81%) y la geomorfología (74.47%) son variables claves en el proceso de evaluación de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa. La pendiente mostró un 33.01% en nivel moderado y un 28.23% en nivel alto, destacando su relevancia en la inestabilidad del terreno. En contraste, el uso del suelo evidenció un 82.58% de áreas con susceptibilidad baja, lo que sugiere que las prácticas actuales ayudan a mitigar estos fenómenos. La cobertura de la tierra presentó un 49.07% de susceptibilidad baja y un 40.53% de moderada, indicando su influencia en los fenómenos de remoción en masa, aunque en un nivel muy bajo.

**El desarrollo** del método AHP apoyado con el uso de los sistemas de información geográfica permitió un análisis confiable de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en el corredor vial, identificando la pendiente (34.94%) y la geología (25.05%) como factores clave en la inestabilidad del terreno. Los resultados de susceptibilidad moderada del uso del suelo y la menor influencia de la geomorfología y cobertura de la tierra ayudaron a obtener un índice de consistencia del 3.4%, los resultados son confiables y útiles para decisiones futuras.

**Finalmente**, los resultados del análisis de susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa muestran una mayor proporción de áreas con susceptibilidad moderada (33.65%) y alta (27.55%), representando el 60% del área total analizada. Esta distribución indica que una porción

considerable del corredor vial posee condiciones de susceptibilidad a estos fenómenos, aunque no en su totalidad. Las áreas de muy baja y baja susceptibilidad representan un 34.56% en total, mientras que las de susceptibilidad muy alta solo alcanzan un 4.23%, lo que implica que la susceptibilidad en general está concentrada en las categorías moderada y alta. Este análisis permitió identificar un alto porcentaje de nuevas zonas susceptibles y también nos ayudó validar la susceptibilidad en regiones con antecedentes de fenómenos de remoción en masa.

## 10.Recomendaciones

**Actualizar** el inventario de eventos de fenómenos de remoción en masa utilizando plataformas geoinformáticas como Google Maps o QGIS Cloud permitirá mejorar significativamente la gestión de la información.

**Integración** de los sistemas de información geográfica a planes de emergencia en materia de riesgos y desastres ya que permite tener una visualización clara y dinámica de la situación durante una emergencia, facilitando una respuesta más efectiva y coordinada.

**Realizar** tomas fotogramétricas en nuevas zonas de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa para obtener datos que faciliten el diseño de obras de geotecnia.

**Realizar** mapas de peligro, riesgo y amenaza teniendo en cuenta los resultados del mapa de susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa, enfocados en las zonas de susceptibilidad en niveles altos y muy altos.

**Organizar** campañas de sensibilización basadas en mapas interactivos, para prevenir los riesgos asociados a los fenómenos de remoción en masa, y cómo deben reaccionar los actores involucrados en caso de que se presente un evento de fenómenos de movientes en masa.

**Enfocar** estrategias de control de acuerdo con los resultados obtenidos en la metodología AHP en las variables pendiente (34.94%) y la geología (25.05%).

**Priorizar** estrategias de mitigación en Santiago y mantener medidas preventivas en Salazar, optimizando así los recursos de gestión de riesgos, teniendo en cuenta la identificación de los diferentes focos de fenómenos de remoción en masa en el corredor vial obtenidos en el inventario.

## 11. Referencias

- Abdi, A., Bouamrane, A., Karech, T., Dahri, N., & Kaouachi, A. (2021). Landslide Susceptibility Mapping Using GIS-based Fuzzy Logic and the Analytical Hierarchical Processes Approach: A Case Study in Constantine (North-East Algeria). *Geotechnical and Geological Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01855-3>.
- Aslam, B., Maqsoom, A., Khalil, U., Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Farooq, D., Tufail, R., Suhail, S., & Ghamisi, P. (2022). Evaluation of Different Landslide Susceptibility Models for a Local Scale in the Chitral District, Northern Pakistan. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22. <https://doi.org/10.3390/s22093107>.
- AXESS. (2019). Imágenes Satelitales. Obtenido de <https://axessnet.com/las-imagenes-satelitales-y-sus-aplicaciones-en-la-vida-cotidiana/>
- Bakhtiar Feizizadeh, Majid Shadman Roodposhti, Piotr Jankowski, Thomas Blaschke. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. (sciencedirect, Ed.) *Computers & Geosciences*, 73, 208-221. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.08.001>
- Binh Thai Pham, Abolfazl Jaafari, Presa Duc Nguyen, Mahmoud Bayatb, Hanh Bich Thi Nguyen. (Diciembre de 2022). Development of multiclass alternating decision trees based models for landslide susceptibility mapping. (sciencedirect, Ed.) *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103235>
- BRAVO AMARANTE, Edelvy et al. (2021). Análisis de decisiones multicriterio en la integración de herramientas de la economía ecológica. (U. y. Sociedad, Ed.) *scielo*, 13(4),

468-477. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2218-36202021000400468#B9](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000400468#B9)

Congreso de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012, Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 24 de Abril de 2012.

[http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1523\\_2012.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1523_2012.html)

Devara, Meghanadh.Tiwari, Ashutosh,Dwivedi, Ramji. (2021). Landslide susceptibility mapping using MT-InSAR and AHP enabled GIS-based multi-criteria decision analysis.

Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12. doi:

<https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1887939>

DHIME, Precipitación anual Santiago y Salazar, Departamento Norte de Santander. (2024).

<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

Elmoulat, M., Brahim, L.A., Elmahsani. (2021). Mapeo de susceptibilidad a movimientos en masa mediante el uso de un enfoque heurístico. Estudio de caso: provincia de Tetuán (norte de Marruecos). doi: <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00192-0>

He, Y., & Zhang, Y. (2022). Comparison of Three Mixed-Effects Models for Mass Movement Susceptibility Mapping Based on Incomplete Inventory in China. *Remote. Sens.*, 14, 6068. <https://doi.org/10.3390/rs14236068>.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación. (5ª ed.) McGrawHill.

- ICS. (2023). International Commission on Stratigraphy. Obtenido de <https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2021-05Spanish.pdf>
- IDEAM. (2010). Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/303960063\\_LEYENDA\\_NACIONAL\\_DE\\_COBERTURAS\\_DE\\_LA\\_TIERRA\\_METODOLOGIA\\_CORINE\\_LAND\\_COVER\\_ADAPTADA\\_PARA\\_COLOMBIA\\_ESCALA\\_1100000](https://www.researchgate.net/publication/303960063_LEYENDA_NACIONAL_DE_COBERTURAS_DE_LA_TIERRA_METODOLOGIA_CORINE_LAND_COVER_ADAPTADA_PARA_COLOMBIA_ESCALA_1100000)
- Jam, A., Mosaffaie, J., Sarfaraz, F., Shadfar, S., & Akhtari, R. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models. *Natural Hazards*, 108, 1025 - 1046. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04718-5>.
- Jia, G., Alvioli, M., Gariano, S., Marchesini, I., Guzzetti, F., & Tang, Q. (2021). A global landslide non-susceptibility map. *Geomorphology*, 389, 107804. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2021.107804>.
- Li, M., Guo, Y., Luo, D., & Ma, C. (2023). A Hybrid Variable Weight Theory Approach of Hierarchical Analysis and Multi-Layer Perceptron for Landslide Susceptibility Evaluation: A Case Study in Luanchuan County, China. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15031908>.
- Luisa Fernanda Osorio Marín. (2019). Zonificación de la Susceptibilidad del Terreno de los deslizamientos. Caso de estudio Nariño Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69829/1030564924.2019.pdf>
- Ministerio de Ambiente. (2014). Decreto 1807 de 2014, Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en

- los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. 19 de septiembre de 2014. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>
- Ministerio de Minas y Energía. (2011). Decreto 4131 de 2011, Por el cual se cambia la Naturaleza Jurídica del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). 3 de noviembre de 2011.  
[http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/decreto\\_4131\\_2011.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_4131_2011.html)
- Panchal, S.; Shrivastava, A.K. A Comparative Study of Frequency Ratio, Shannon's Entropy and Analytic Hierarchy Process (AHP) Models for Landslide Susceptibility Assessment. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021, 10, 603. <https://doi.org/10.3390/ijgi10090603>
- RACEFN. (2014). REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES. Obtenido de [https://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac\\_geologia/rac.htm#G](https://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm#G)
- Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., & Turconi, L. (2021). GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping for Land Use Planning and Risk Assessment. *Land*. <https://doi.org/10.3390/LAND10020162>.
- Rodríguez García, A., Suárez Rodríguez, Á., Escuder-Viruete, J., Pérez Alejandro, Y., González Menéndez, L., Rodríguez Batista, Y., & Roque Quezada, B. (2023). Inventario de deslizamientos de Puerto Plata, Santiago de los Caballeros y Jarabacoa (República Dominicana). *Revista de Mapas*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2271021>
- Salazar Gutiérrez, L.F., Menjivar Flores, J.C. & Martínez Carvajal, H.E. Factores de susceptibilidad de cuencas de drenaje a deslizamientos superficiales en zonas cafetaleras

del departamento de Caldas, Colombia. *Environ Earth Sci* 80, 145 (2021).

<https://doi.org/10.1007/s12665-021-09428-6>

Sentinels. (2022). Derrumbes. Obtenido de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/thematic-areas/emergency-management/landslides>

SGC. (2011). DOCUMENTO METODOLÓGICO DE LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000. Obtenido de Servicio Geologico Colombiano .

UNGRD. (2024). Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. Obtenido de <https://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=140>

Wubalem, A. (2021). Landslide Inventory, Susceptibility, Hazard and Risk Mapping. OPEN ACCESS PEER-REVIEWED CHAPTER. doi:10.5772/intechopen.100504

Wubalem, A. Mapeo de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra utilizando métodos estadísticos en el área de captación de Uatzau, noroeste de Etiopía. *Desastres Geoambientales* 8, 1 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00170>



