



Zonificación de amenazas por remoción en masa usando la metodología de Mora y Vahrson en La Cuenca del Río Las Ceibas: un enfoque comparativo con registros históricos

**Proyecto de grado como requisito para la obtención del título de Maestría en
Gestión de Cuencas Hidrográficas**

Elaborado por:

Elisa Mercedes Sandoval Sierra – 2431645

Rubiel Andrés Torres Tovar - 2431573

Director Proyecto de Grado:

DR. JORGE ANTONIO PAZ TENORIO.

**Profesor Titular Facultad de Ingeniería de la Maestría en Ciencias en
Desarrollo Sustentable y Gestión de Riesgos. Universidad de Ciencias y Artes de
Chiapas**

Universidad Santo Tomás

Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Facultad de Ciencias Ambientales

Bogotá, D.C.

26 de mayo del 2026

Nota de Aceptación

Contenido

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	4
2. Planteamiento del Problema	6
3. Objetivos	8
3.1 Objetivo General	8
3.2 Objetivos Específicos	8
4. Justificación	9
5. Pregunta de investigación	11
6. Marco Referencial	11
6.1. Marco Conceptual	11
6.1.1 Zonificación	11
6.1.2 Amenazas	11
6.1.3 Remoción en Masa	12
6.1.4 Inventario de Remoción en Masa	13
6.1.5 Cuenca Hidrográfica	14
6.2. Marco Legal	14
6.3. Marco Contextual	16
6.4. Marco Teórico	20
6.5. Antecedentes o estado del Arte	25
6.6 Alcance de la investigación	43
7. Marco metodológico	44
7.1 Recolección de Datos	45
7.1.2 Primera Etapa: Recolección de Datos	45
7.1.2.1 Relieve Relativo	46
7.1.2.2 Litología, Geología y Sismicidad	46
7.1.2.3 Humedad del Suelo y Precipitación	47
7.1.2.4 Datos Históricos	48
7.2 Segunda Etapa: Herramientas tecnológicas	49
7.3 Caracterización de la Amenaza	51
7.3.1 Relieve Relativo	51

7.3.2 Litología y Geología	53
7.3.3 Humedad del Suelo y Precipitación	54
7.3.4 Sismicidad	56
7.3.5 Precipitación diaria 24 horas	57
7.3.6 Zonificación	58
7.3.7 Validación Espacial de la zonificación con registros históricos.....	60
8 Análisis y resultados	61
8.1 Diagnóstico de condiciones de la cuenca.....	61
8.1.2 Pendiente.....	61
8.1.3 Geomorfología componente geológico, geomorfológico y litológico.....	64
8.1.4 Precipitación.....	70
8.1.4.1 Distribución espaciotemporal de la precipitación media mensual multianual en la cuenca 71	
8.1.4.2 Distribución espaciotemporal de la precipitación media multianual en la cuenca73	
8.1.5 Sismicidad.....	75
8.1.6 Históricos de Deslizamientos.....	83
9 Aplicación de la Metodología Mora y Vahrson en la cuenca.....	94
9.1 Factores Pasivos	94
9.1.1 Pendiente – Relieve Relativo (Sr)	94
9.1.2 Litología (Si)	97
9.1.3 Humedad del Suelo	102
9.2 Factores de Disparo	106
9.2.1 Actividad Sísmica (<i>Ds</i>) (<i>Sismos</i>)	106
9.2.2 Precipitación (DP) (Precipitación diaria)	108
9.3 Zonificación de Susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa en la cuenca producto de la metodología de Mora y Vahrson.....	113
9.3.1 Zonificación de Susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa producto de la metodología de Mora y Vahrson Vs Equipamientos e Infraestructura presente en la Cuenca.....	114
9.4 Comparación del resultado de amenazas aplicado con la metodología de Mora y Vahrson con registro de datos históricos de deslizamiento en la cuenca.....	116
Conclusiones	124
Consideraciones éticas	128
Referencias Bibliográficas.....	129

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de Localización de la cuenca de investigación.....	17
Figura 2. Isolíneas de precipitación media anual multianual POMCA Río Ceibas.....	18
Figura 3. Isolíneas de temperatura media POMCA río Ceibas.....	19
Figura 4. Distribución temporal de la magnitud de los eventos sísmicos registrados entre 1993 y 2025 en el entorno de los municipios de Neiva y Rivera	20
Figura 5 Pasos metodológicos para la obtención del DEM del área de Cuenca de estudio	52
Figura 6 Pasos metodológicos para la obtención de Slope.....	52
Figura 7 Pasos metodológicos para la obtención del relieve relativo en la cuenca	53
Figura 8. Pasos metodológicos para la obtención del factor litológico.	54
Figura 9. Procesos metodológicos para la obtención del factor de Humedad Sh.....	55
Figura 10. Procesos metodológicos para la obtención del factor de Sismicidad.	57
Figura 11. Procesos metodológicos para la obtención del factor de precipitación máxima diaria Tr 100.....	58
Figura 12. Proceso de zonificación de susceptibilidad ante amenazas por remoción en masa. ..	59
Figura 13. Validación espacial de la zonificación de susceptibilidad ante amenazas por remoción en masa y datos históricos	60
Figura 14. Mapa temático de localización de pendientes en el área de la cuenca.	62
Figura 15. Mapa temático de localización de geología en el área de la cuenca.	65
Figura 16. Mapa de Localización Estaciones IDEAM Área de Estudio.	71
Figura 17. Distribución espaciotemporal de la precipitación media mensual multianual en la cuenca I Semestre	72
Figura 18. Distribución espaciotemporal de la precipitación media mensual multianual en la cuenca II Semestre	73
Figura 19. Distribución espaciotemporal de la precipitación media anual multianual en la cuenca.	74
Figura 20. Mapa temático de localización de eventos sísmicos 1993-2025 en el área de la cuenca.	76
Figura 21. Mapa localización del área de estudio en Amenaza Sísmica NSR-10 SGC.	77
Figura 22. Mapa de Localización Valor de PGA Intensidad Sísmica Pr 475.....	78
Figura 23. Curva de amenaza uniforme – PGA.....	79
Figura 24. Curva de amenaza uniforme – Sa (0,2 s).....	80
Figura 25. Curva de amenaza uniforme – Sa (1,0 s).....	80
Figura 26. Espectros de amenaza uniforme	81
Figura 27. Intensidad sísmica máxima y Esperada.....	82
Figura 28. Mapa temático de localización de históricos de deslizamientos clasificados por tipo en el área de la cuenca.	85
Gráfico 29. Gráfico de distribución de tipos de movimientos.	86
Gráfico 30. Gráfico de principales detonantes.....	87
Figura 31. Imágenes del Desastre de Balsillas.	92
Figura 32. Imágenes del Organismos de Control.	93

Figura 33. Mapa temático de localización del relieve relativo (Factor Pasivo MyV) en la cuenca del río Las Ceibas.....	96
Figura 34. Mapa temático del factor litológico (Si) como variable pasiva en la cuenca del río Las Ceibas.....	98
Figura 35. Mapa temático del factor Humedad (Sh) como variable pasiva en la cuenca del río Las Ceibas.	104
Figura 36. Mapa de Localización de la Humedad Relativa como variable pasiva en la cuenca del río Las Ceibas.	105
Figura 37. Mapa de Factor de disparo sismicidad en la cuenca.	107
Figura 38. Mapa de precipitación diaria Tr 100 Años en la cuenca.	110
Figura 39. Mapa de Factor de disparo - precipitación diaria Tr 100 Años en la cuenca.	111
Figura 40. Mapa de zonificación de susceptibilidad ante amenazas por fenómenos de remoción en masa en la cuenca.....	113
Figura 41. Zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa Vs Equipamientos e Infraestructura Vial.	115
Figura 42. Localización de Históricos de deslizamientos Vs Zonificación.....	116
Figura 43. Casos reportados en amenaza moderada Vs Históricos	118
Figura 44. Casos reportados en amenaza Media Vs Históricos revisados en Google earth.	119
Figura 45. Casos reportados en amenaza baja y muy baja Vs Históricos revisados en Google earth.....	120

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos y subtipos de procesos y sus características más importantes	12
Tabla 2. Formaciones presentes en la cuenca.	66
Tabla 3. Valores de Intensidad Sísmica Esperada para tres ordenadas espectrales y cinco periodos de retorno.	77
Tabla 4. Evidencias de deslizamientos en la cuenca.	88
Tabla 5. Factor Pasivo Sr Relieve Relativo presente en la cuenca.	95
Tabla 6. Factor Pasivo SI Litológico presente en la cuenca.	98
Tabla 7. Unidades Litológicas y Factor de Susceptibilidad Aplicado en la cuenca del río las Ceibas.	100
Tabla 8. Clasificación del Factor de Sh por estación	103
Tabla 9. Datos de Precipitación máxima diaria TR 100	109
Tabla 10. Distribución porcentual de eventos históricos, evidenciando que las categorías	117

Resumen

La cuenca del río Las Ceibas, ubicada en el departamento del Huila, ha sido históricamente afectada por procesos de remoción en masa, con más de 800 eventos registrados en distintos sectores del territorio. Estos fenómenos, asociados a condiciones físicas como la pendiente, la litología, la humedad del suelo, la sismicidad y la precipitación, configuran un escenario de amenaza persistente para los ecosistemas de la cuenca y para la población. El objetivo principal es validar la confiabilidad del modelo de Mora y Vahrson en la zonificación de amenazas por remoción en masa en la cuenca del río Las Ceibas, mediante la comparación de los resultados obtenidos con el inventario histórico de deslizamientos.

Metodológicamente, la investigación se desarrolló con un enfoque geoespacial y comparativo, integrando factores condicionantes y detonantes establecidos en el modelo. El procesamiento y análisis de la información se realizó mediante tecnologías de sistemas de información geográfica, utilizando insumos oficiales como el Modelo de Elevación Digital Suministrado por la CAM a escala 1:25.000, la cartografía geológica del Servicio Geológico Colombiano a escala 1:100.000 y los registros hidrometeorológicos del IDEAM correspondientes a las estaciones ubicadas dentro y en el entorno inmediato de la cuenca. A estos insumos se sumaron los inventarios de históricos de remoción en masa obtenidos por el SGC y la CAM, los cuales se emplearon para la validación del modelo.

Los resultados evidenciaron relación geoespacial entre las zonas clasificadas con amenaza moderada y media y la concentración de eventos históricos, lo que permitió confirmar la capacidad del modelo para representar patrones reales de ocurrencia de remociones en masa en la cuenca. En conclusión, el modelo de Mora y Vahrson aplicado a la cuenca demostró ser una herramienta confiable como insumo diagnóstico para la gestión del riesgo y el ordenamiento

territorial a escala de cuenca, aportando criterios técnicos que pueden apoyar la toma de decisiones en territorios con condiciones geomorfológicas y climáticas complejas.

Palabras Clave: Zonificación, Amenazas, Remoción en Masa, Modelo Mora y Vahrson, Cuenca Río Las Ceibas.

Abstract

The Las Ceibas River watershed, located in the department of Huila, has historically been affected by Landslides, with more than 800 events recorded in different sectors of the territory. These phenomena, associated with physical conditions such as slope, lithology, soil moisture, seismicity, and precipitation, constitute a scenario of persistent hazard for the watershed's ecosystems and the local population. The main objective of this study is to validate the reliability of the Mora and Vahrson model for landslide hazard zoning in the Las Ceibas River watershed by comparing the results obtained with the historical landslide inventory.

Methodologically, the research was developed with a geospatial and comparative approach, integrating conditioning and triggering factors established in the model. The processing and analysis of the information were carried out through geographic information system technologies, using official inputs such as the Digital Elevation Model provided by CAM at a 1:25,000 scale, the geological cartography of the Colombian Geological Survey at a 1:100,000 scale, and the hydrometeorological records of IDEAM corresponding to the stations located within and in the immediate surroundings of the watershed. These inputs were complemented with the historical mass movement inventories obtained by the SGC and CAM, which were used for model validation.

The results demonstrated a geospatial relationship between areas classified as moderate and medium hazard and the concentration of historical events, which confirmed the model's ability to represent real patterns of landslides occurrence within the watershed. In conclusion, the Mora and Vahrson model proved to be a reliable tool as a diagnostic input for risk management and territorial planning at the watershed scale, providing technical criteria that can support decision-making in territories with complex geomorphological and climatic conditions.

Keywords: Zoning, Hazards, Landslides, Model Mora and Vahrson, Las Ceibas River watershed.

1. Introducción

La comprensión del territorio no solo se limita a su dimensión física o cartográfica, sino que también implica reconocer las dinámicas naturales y sociales que lo moldean al igual que los procesos de inestabilidad que surgen de su dinámica natural y antrópica. Los fenómenos de remoción en masa, entre los cuales se incluyen deslizamientos, caídas, flujos, y avalanchas según la clasificación propuesta por Cruden & Varnes (1996) y retomada por el SGC, se han convertido en un desafío latente para muchas regiones montañosas en el territorio nacional y global, donde factores como la geología, la precipitación y la pendiente del terreno convergen para desencadenar procesos que generan condiciones de amenaza sobre comunidades, infraestructura y los ecosistemas ahí presentes.

En Colombia, los fenómenos de remoción en masa presentan una alta recurrencia en regiones andinas debido a la interacción entre factores geológicos, geomorfológicos, climáticos e hidrológicos. Estas condiciones han motivado el desarrollo de metodologías orientadas a identificar espacialmente sectores con diferentes niveles de amenaza, mediante el uso de herramientas de análisis geoespacial y modelos de susceptibilidad aplicados a escala regional y de cuenca.

La cuenca del río Las Ceibas, localizada en jurisdicción del municipio de Neiva del departamento del Huila, constituye una unidad hidrográfica estratégica para el abastecimiento hídrico de la capital departamental. No obstante, su compleja configuración geomorfológica y la incidencia de lluvias intensas, más la incidencia antrópica en el suelo y las condiciones climáticas, han favorecido la ocurrencia de múltiples deslizamientos a lo largo del tiempo, de acuerdo con los inventarios históricos disponibles, la cuenca registra una recurrencia significativa de procesos de remoción en masa distribuidos en diferentes sectores del territorio.

Ante esta realidad, se hace necesario contar con herramientas que permitan identificar zonas de amenaza, prever escenarios de riesgo y orientar la toma de decisiones.

En respuesta a esta problemática, la presente investigación aplica la metodología de Mora y Vahrson en 1993 para la zonificación de amenazas por remoción en masa en la cuenca del río Las Ceibas, integrando variables geomorfológicas, litológicas, hidroclimáticas y sísmicas mediante herramientas SIG. El estudio incorpora un enfoque comparativo basado en registros históricos georreferenciados de deslizamientos, con el propósito de analizar la correspondencia espacial entre los niveles de amenaza obtenidos y la distribución histórica de eventos documentados en la cuenca.

En este sentido, no se limita a desarrollar un modelo de zonificación dispuesto es un mapa, sino que busca evaluar la capacidad predictiva del modelo frente a las condiciones reales que se presentan en el territorio, entendiendo que el conocimiento del pasado como son los registros históricos de deslizamientos, permite evidenciar los patrones de amenaza frente a estos fenómenos. Asimismo, la investigación pretende contribuir al fortalecimiento de procesos de planificación ambiental y gestión del riesgo a escala de cuenca, mediante una metodología aplicable en contextos con características geomorfológicas y climáticas similares.

2. Planteamiento del Problema

Los movimientos de remoción en masa son una de las amenazas más frecuentes y destructivas en zonas de montaña, especialmente en regiones como el departamento del Huila, donde convergen condiciones geológicas, topográficas, climáticas y sísmicos favorecen condiciones de inestabilidad en laderas. La cuenca del río Las Ceibas, constituye la principal fuente de abastecimiento hídrico superficial para la ciudad de Neiva y, al mismo tiempo, un territorio históricamente afectado por procesos de remoción en masa que se manifiestan en deslizamientos y pérdidas de estabilidad de laderas con impactos directos sobre la

Infraestructura vial, áreas productivas, ecosistemas estratégicos e incluso pérdidas humanas. Esta problemática adquiere importancia en un contexto de gestión territorial, intervenciones no planificadas y ocupación progresiva de zonas ambientalmente frágiles, factores que incrementan la ocurrencia de procesos de remoción en masa y las afectaciones sobre el territorio.

Aunque diferentes estudios han desarrollado cartografía de susceptibilidad y amenazas por remoción en masa en regiones montañosas, en la cuenca del Río Las Ceibas no se identifican investigaciones orientadas a validar espacialmente la confiabilidad de estos modelos frente a inventarios históricos georreferenciados. La mayoría de estas se han concentrado en la representación cartográfica de variables condicionantes, sin incorporar análisis comparativos con datos reales que permitan determinar la precisión de estas delimitaciones ante la ocurrencia histórica de fenómenos de remoción en masa.

La ausencia de esta validación con datos reales de fenómenos de remoción en masa limita el alcance práctico de los productos cartográficos generados, pues dificulta valorar su confiabilidad como insumo para la evaluación de amenazas, gestión del riesgo y el ordenamiento

territorial. Sin un respaldo cuantitativo o espacialmente contrastado, las zonificaciones pueden inducir interpretaciones imprecisas en procesos de planificación, priorización de medidas de mitigación, definición de restricciones de uso del suelo o formulación de instrumentos de ordenamiento ambiental. En este sentido, la falta de evaluación del desempeño del modelo no solo representa una brecha académica, sino también una debilidad técnica que incide directamente en la toma de decisiones públicas en un territorio estratégico para la seguridad hídrica y ambiental del municipio de Neiva.

Es por ello que, el problema de investigación se centra en determinar en qué medida el modelo de Mora y Vahrson, aplicado en la cuenca del Río Las Ceibas, permite identificar espacialmente las áreas con diferentes niveles de amenaza y susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa, a partir de la comparación entre la zonificación obtenida y el inventario histórico de eventos georreferenciados suministrados por el SGC y la CAM. La investigación busca evaluar dicha correspondencia espacial mediante indicadores concentración relativa de eventos por categoría de amenaza, con el fin de analizar el alcance metodológico y la aplicabilidad territorial del modelo como herramienta de apoyo a la gestión del riesgo y al ordenamiento territorial en la cuenca.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Zonificar amenazas por remoción en masa con el método Mora & Vahrson en la cuenca del Río Las Ceibas, validando su eficiencia a través de la comparación de registros históricos con los resultados obtenidos.

3.2 Objetivos Específicos

1. Diagnosticar y caracterizar las condiciones geomorfológicas, hidroclimáticas y geológicas del área de la cuenca.
2. Aplicar la metodología de zonificación de amenazas por remoción en masa propuesta por Mora y Vahrson en el área de estudio.
3. Contrastar los resultados del modelo de zonificación de amenazas por remoción en masa con datos históricos georreferenciados registrados en la cuenca.

4. Justificación

Los fenómenos de remoción en masa representan una amenaza significativa para las comunidades y la infraestructura en todo el mundo. Estos eventos, que incluyen deslizamientos de tierra, flujos de detritos y avalanchas, pueden generar afectaciones sobre infraestructura, ecosistemas y actividades desarrolladas en zonas de ladera. Tal como señalan Paz Tenorio et al. (2017), las laderas de las montañas no corresponden a sistemas estáticos, sino a unidades dinámicas en permanente cambio, cuyo comportamiento puede manifestarse mediante desplazamientos lentos o rápidos, puede provocar desplazamientos de tierra y rocas, lo que se conoce como movimientos en masa. Estos eventos representan condiciones de amenaza cuando existen elementos expuestos en zonas susceptibles ante estos fenómenos, como se ha evidenciado en casos presentes en la cuenca que ha llevado a pérdidas de vidas humanas sobre infraestructura vial.

La cuenca del río Las Ceibas constituye un territorio con condiciones geomorfológicas, climáticas y geológicas que favorecen la ocurrencia de procesos de remoción en masa, lo que hace necesaria la implementación de herramientas técnicas orientadas a la evaluación espacial de amenazas. En este contexto, la generación de escenarios de susceptibilidad mediante metodologías geoespaciales permite fortalecer los procesos de análisis territorial y apoyar la toma de decisiones relacionadas con planificación ambiental y gestión del riesgo.

En América Latina, se han empleado ampliamente técnicas morfométricas para analizar fenómenos de remoción en masa. En ese sentido, en este trabajo se empleará la metodología de Mora y Vahrson, esta fue desarrollada en Costa Rica por Sergio Mora y Wilhelm Guenther Vahrson, en el año 1993, con el propósito de clasificar la amenaza por deslizamientos, utilizando indicadores morfodinámicos del terreno. Esta metodología ha sido adoptada en numerosos

estudios por su capacidad para integrar variables como la pendiente, la litología y la humedad del suelo, junto con detonantes como la precipitación y la sismicidad. A pesar de su amplia aplicación en estudios regionales, en muchos contextos su aplicación se ha limitado a la generación cartográfica, sin procesos comparativos orientados a analizar su correlación espacial frente a inventarios históricos de eventos.

En este contexto, aplicar la metodología de Mora y Vahrson se justifica por la necesidad de evaluar la confiabilidad de esta, en un contexto local específico, utilizando como referencia los más de 800 registros históricos de remoción en masa documentados en un periodo de 25 años (1999 y 2024) en distintos sectores de la cuenca por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC) desde el 1999, con una mayor concentración de eventos a partir del 2008 hasta el 2024. Esta validación no es solo un ejercicio metodológico, sino un insumo técnico para apoyar procesos de planificación y evaluación territorial.

Finalmente, parte de la justificación se sustenta en el desarrollo del modelo de zonificación de amenazas por procesos de remoción en masa en la Cuenca del Río Las Ceibas usando la metodología Mora y Vahrson: un enfoque comparativo con registros históricos, representa una investigación de utilidad para la gestión del riesgo de por remoción en masa en la región, puesto que los resultados de zonificar en mapas áreas críticas con alto potencial de deslizamientos, brinda información valiosa para la toma de decisiones y la planificación del territorio en términos de gestión del riesgo. La comparación de este resultado con datos históricos puede resultar útil como una herramienta de diagnóstico para fortalecer la implementación de medidas de prevención y mitigación en las áreas de amenazas alta por

fenómenos de remoción en masa en la cuenca. Asimismo, se debe mantener actualizado el inventario de registros históricos para futuros estudios y validaciones más precisas y certeras.

5. Pregunta de investigación

¿En qué medida el modelo de zonificación de amenazas por remoción en masa propuesto por Mora y Vahrson permite identificar con confiabilidad las áreas de amenaza alta por remoción en masa en la cuenca del río Las Ceibas, al ser contrastado con los registros históricos de deslizamientos?

6. Marco Referencial

6.1. Marco Conceptual

6.1.1 Zonificación

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (2013), la zonificación consiste en un proceso mediante el cual se clasifica un territorio según el nivel de amenaza existente o potencial asociada a deslizamientos u otros procesos de remoción en masa que puedan afectar las laderas, siguiendo el enfoque de Cruden & Varnes (1984), permite establecer una base técnica para la gestión del riesgo en territorios expuestos a fenómenos geodinámicos.

6.1.2 Amenazas

El Congreso de Colombia (2012), en la Ley 1523 de 2012 indica que es la posibilidad latente de que ocurra un fenómeno físico, ya sea de origen natural o antrópica, cuya intensidad puede ser tal que provoque impactos significativos. Estos impactos pueden manifestarse en forma de pérdida de vidas humanas, afectaciones a la salud, destrucción de bienes materiales,

deterioro de la infraestructura, interrupción de servicios básicos, daños a los recursos naturales y al entorno ambiental.

6.1.3 Remoción en Masa

Según la definición propuesta por Cruden & Varnes (1991) citado por el SGC (2013), los movimientos en masa hacen referencia al desplazamiento descendente de materiales sobre una ladera, los cuales pueden estar constituidos por rocas, detritos o suelos. Este tipo de procesos geodinámicos son el resultado de la acción gravitacional sobre materiales inestables, y su ocurrencia depende de factores como la pendiente, la composición del terreno y las condiciones hidrológicas.

El Servicio Geológico Colombiano en conjunto con Olarte (2017) han desarrollado y consolidado una clasificación de los principales tipos y subtipos de procesos de remoción en masa que se presentan en los terrenos geológicos de Colombia presentes en la tabla 1, que fue creada tomando en cuenta las definiciones de diferentes autores como son *Cruden & Varnes 1996, Hutchinson 1988; Hungr et al. 2001*, a partir del análisis de sus mecanismos de ocurrencia, el tipo de material involucrado y la dinámica del desplazamiento. Esta recopilación permite reconocer fenómenos como caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y procesos de deformación lenta, los cuales responden a condiciones geomorfológicas, geológicas e hidrometeorológicas propias de las diferentes regiones de Colombia.

Tabla 1. Tipos y subtipos de procesos y sus características más importantes

Tipo	Mecanismo	Material desplazado	Subtipo
Caídas	Desprendimiento de material que se des-plaza por el aire, brinca o rueda	Rocas, Suelos	Caída de rocas y suelos; Rodamiento de bloques; Torrentes de bloques

Tipo	Mecanismo	Material desplazado	Subtipo
Volcamientos	Masas que rotan en un punto sin desprenderse	Rocas, detritos	Único o múltiple de conjunto de bloques de roca; De bloques individuales liberados por tensión; De detritos
Deslizamientos	La masa se desplaza sobre una superficie de falla por cortante sin desintegrarse apreciablemente	Rocas, Suelos	Rotacional (hundimiento); Rotacional retrogresivo múltiple; Traslacional planar; Traslacional en cuña; Compuesto
Flujos, avalanchas y deslizamientos por flujo	La masa se mueve grandes distancias la mayor parte del trayecto en forma viscosa	Rocas, detritos, tierras, lodos, turba	Flujos de detritos (lahares y avenidas torrenciales); Flujos de tierras; Flujos de lodo; Avalanchas de detritos; Deslizamiento por flujos de material granular-licuación (Flow slide); Deslizamiento por flujo de arcilla sensitiva (Clay-flow slide)
Creep (Reptación)	La masa se deforma muy lentamente sin fallar	Rocas, suelos, talus	Creep superficial; Creep profundo; Solifluxión y Gelifluxión (flujo)

Fuente: *Tomada de Olarte (2017)*

6.1.4 Inventario de Remoción en Masa

El Servicio Geológico Colombiano (2013), retomando el enfoque propuesto por Fell et al. (2008), señala que el inventario y catálogo de movimientos en masa corresponde a un sistema de registro técnico que compila datos esenciales sobre este tipo de eventos geodinámicos. Dicha base de información incluye elementos como la ubicación exacta de los deslizamientos, su tipología, volumen aproximado, nivel de actividad, momento de ocurrencia y demás atributos relevantes que permitan su análisis y seguimiento dentro de un área específica.

El mapa de inventario muestra una relación ordenada de la ocurrencia y características de los procesos gravitacionales (PG) en una zona y un periodo determinados (Alcántara y Murillo, 2008). Su vigencia dependerá de la actualización permanente. Guzzetti et al., (2000) mencionan que el inventario es la forma más elemental de la cartografía relacionada con PG.

6.1.5 Cuenca Hidrográfica

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2012), define como un territorio delimitado naturalmente, en el cual las aguas tanto superficiales como subterráneas, convergen hacia una red hídrica conformada por uno o varios cauces, que pueden presentar caudal. Estos cauces se integran progresivamente hasta desembocar en un cuerpo hídrico de mayor jerarquía, como un río principal, un lago, un humedal o directamente en el mar.

6.2. Marco Legal

El análisis de amenazas por remoción en masa en la cuenca del río Las Ceibas requiere un sustento normativo claro que permita articular los componentes ambientales, territoriales y de gestión del riesgo. En Colombia, la planificación del territorio y la gestión ambiental están reguladas por instrumentos clave como el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), los cuales orientan las decisiones sobre el uso del suelo, la conservación de ecosistemas estratégicos y la mitigación de amenazas naturales.

El POMCA del río Las Ceibas adoptado por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena a través de la resolución 1096 del 2 de mayo del 2023, constituye el principal instrumento de planificación ambiental a escala 1:25.000 de la cuenca. Este plan, desarrollado

bajo lo dispuesto en el Decreto 1076 de 2015, identifica áreas críticas en términos de degradación, riesgo y conflicto de usos, y establece lineamientos para el manejo integral del recurso hídrico y de los ecosistemas asociados. En el contexto de este proyecto, el POMCA elaborado por la CAM (2023¹) aporta información esencial para delimitar zonas susceptibles a fenómenos de remoción en masa, considerando factores como la pendiente y la geodinámica del territorio.

Por otro lado, el acuerdo 026 del 2009 corresponde al POT del municipio de Neiva, que se encuentra en concordancia con la Ley 388 de 1997, este se constituye como una herramienta de planificación que define el modelo de ocupación territorial, incorporando determinantes ambientales y criterios de prevención de riesgos, este instrumento de planificación territorial incluye componentes asociados a riesgos, sin embargo al ser un acuerdo anterior al último POMCA, no tiene la articulación de lo que establece el POMCA en su componente de amenazas, que son muy importantes para el desarrollo territorial.

La articulación entre el POMCA y el POT es indispensable para garantizar una visión del territorio, donde los procesos naturales y los sistemas humanos sean abordados de manera conjunta. En el caso específico de la cuenca del río Las Ceibas, esta coordinación resulta aún más relevante debido a las condiciones topográficas, climáticas y geológicas que aumentan la exposición a movimientos en masa. Por tanto, el presente proyecto se fundamenta en este marco legal para proponer una zonificación comparativa de amenazas, que pueda servir como insumo técnico y normativo para la toma de decisiones en materia de planificación territorial y gestión del riesgo.

6.3. Marco Contextual

La cuenca “Río Las Ceibas” donde se desarrolló la presente investigación se localiza en el norte del departamento del Huila, en el municipio de Neiva, situado sobre la vertiente occidental de la cordillera oriental (Ver figura 1). Según el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Río Loro, Ceibas y otros Directos al Magdalena, MD CAM (2023) donde se desarrolló la presente investigación, es una cuenca que representa una de las principales fuentes de abastecimiento hídrico para la capital del departamento del Huila y se encuentra codificada a través del número 2111-024 según CAM (2023).

El documento de aprestamiento del POMCA la CAM (2016), indica que el territorio de la cuenca se encuentra claramente definido por hitos geográficos que se extienden desde las montañas limítrofes con el departamento del Caquetá hasta su desembocadura en el río Magdalena. Esta unidad hidrográfica abarca una superficie cercana a las 29.841 hectáreas.

En cuanto a su altimetría, CAM (2016) menciona que la cuenca presenta un rango altitudinal considerable: alcanza su punto más elevado en los ecosistemas estratégicos del cerro Santa Rosalía y La Siberia, situados en la zona nororiental, con una altitud de hasta 3.150 metros sobre el nivel del mar; mientras que su cota mínima se encuentra en los 430 m.s.n.m, correspondiente al sector urbano de Neiva donde desemboca en el Río Magdalena.

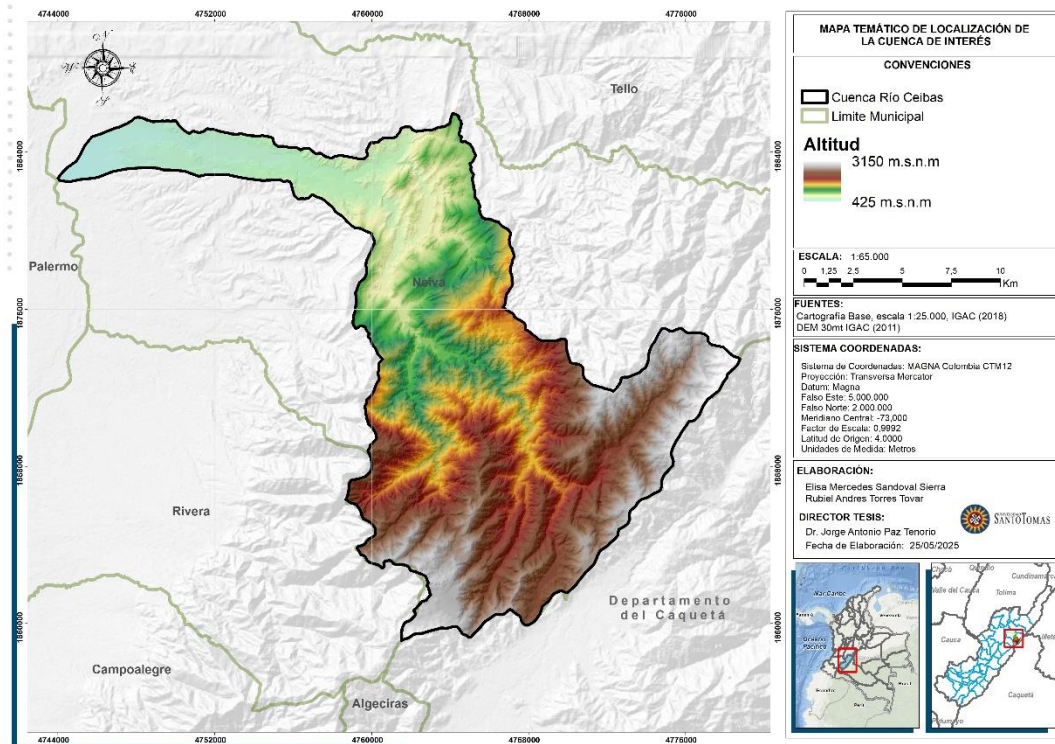


Figura 1 Mapa de Localización de la cuenca de investigación.

Según el documento de aprestamiento del POMCA, la CAM (2016) menciona que, en relación con las pendientes, la cuenca presenta una marcada variabilidad topográfica que permite distinguir características significativas a lo largo de su extensión. En las zonas altas predominan pendientes muy pronunciadas y escarpadas, lo que imposibilita el desarrollo de actividades agropecuarias y aumenta la susceptibilidad a procesos erosivos. En la parte media, aunque las pendientes son menos abruptas, el riesgo de erosión persiste debido a la inclinación del terreno. Finalmente, en el sector bajo de la cuenca, las pendientes son suaves y se localizan sobre terrazas planas.

Según la CAM (2023¹) en fase de diagnóstico del POMCA de la cuenca objeto de estudio, en el componente “Clima”, determina que este factor se ve afectado principalmente por la ubicación en la zona tropical. En este contexto, se identifica un régimen climático bimodal

tetraestacional, caracterizado por dos periodos húmedos y dos periodos relativamente secos durante el año. Las precipitaciones anuales registradas en la cuenca oscilan entre 1.200 y 2.265 mm/año, presentándose los mayores acumulados en el sector suroriental. Los máximos de precipitación se concentran entre los meses de enero - abril y octubre - diciembre, mientras que los valores mínimos ocurren entre mayo y septiembre.

En la Figura 2 se muestran las isolíneas correspondientes a la precipitación media multianual, donde se observa que los valores de p varían aproximadamente entre 1.284 mm y 2.265 mm. Asimismo, se evidencia un gradiente espacial decreciente de precipitación desde el suroriente hacia el noroccidente de la cuenca.

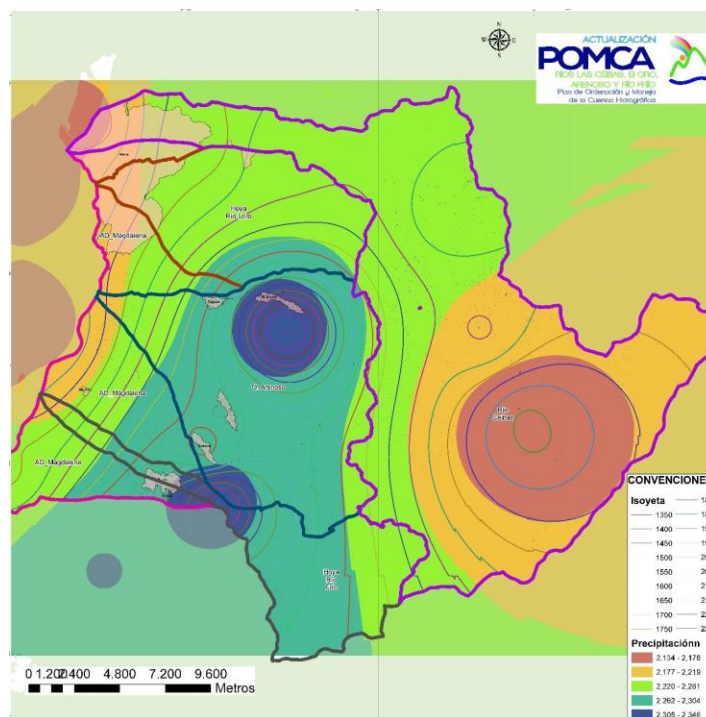


Figura 2. *Isolíneas de precipitación media anual multianual POMCA Río Ceibas*

Fuente: Tomado del POMCA Río Ceibas, CAM (2023)

Por otra parte, la temperatura media en la zona de estudio presenta un máximo de 27.5 °C por la zona noroccidental de la cuenca cerca de la ciudad de Neiva. A continuación, en la Figura 3 se presenta las isolíneas de temperatura promedio establecidas en la etapa del diagnóstico del

POMCA Río Ceibas, donde se identifica que los valores más altos de temperatura se ubican al noroccidente de la zona de la cuenca, con registros que varían de los 25.1 °C hasta los 27.5 °C.

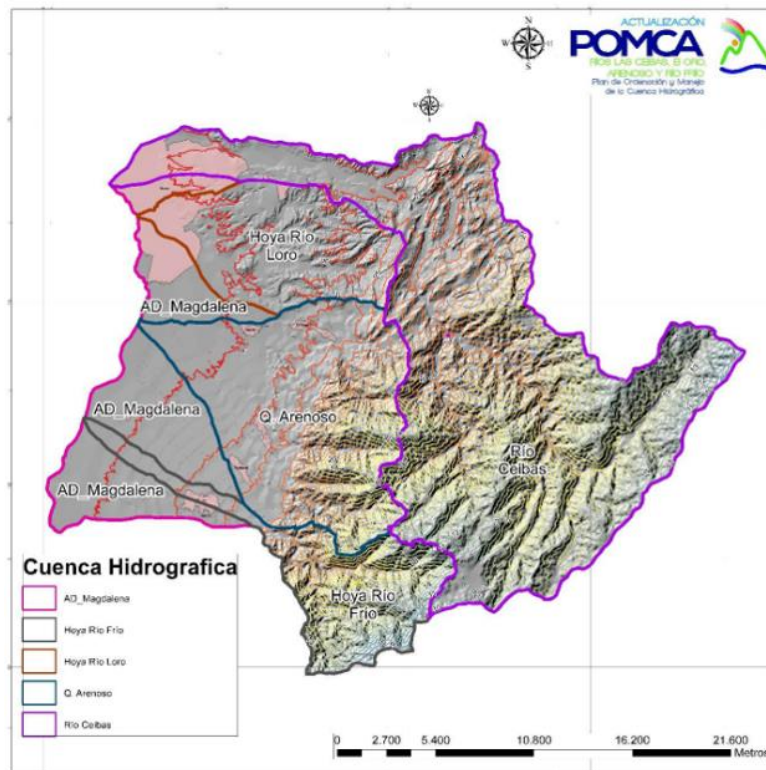


Figura 3. *Isolas de temperatura media POMCA río Ceibas*

Fuente: Tomado del POMCA Río Ceibas, CAM (2023)

De acuerdo con la información oficial suministrada por el SGC en el año 2025, para el desarrollo de la presente investigación, indican que al consultar el catálogo sísmico identificaron 1.532 eventos sísmicos registrados entre el 1 de junio de 1993 y el 31 de marzo de 2025, ocurridos dentro de un radio aproximado de 40 km alrededor de los municipios de Neiva y Rivera como se evidencia en la figura 4, los cuales constituyen el entorno regional inmediato del área de estudio. Las magnitudes reportadas para estos eventos oscilan entre 0,7 y 4,8 (SGC,2025), lo que evidencia una sismicidad predominantemente de baja a moderada magnitud, pero persistente en el tiempo.

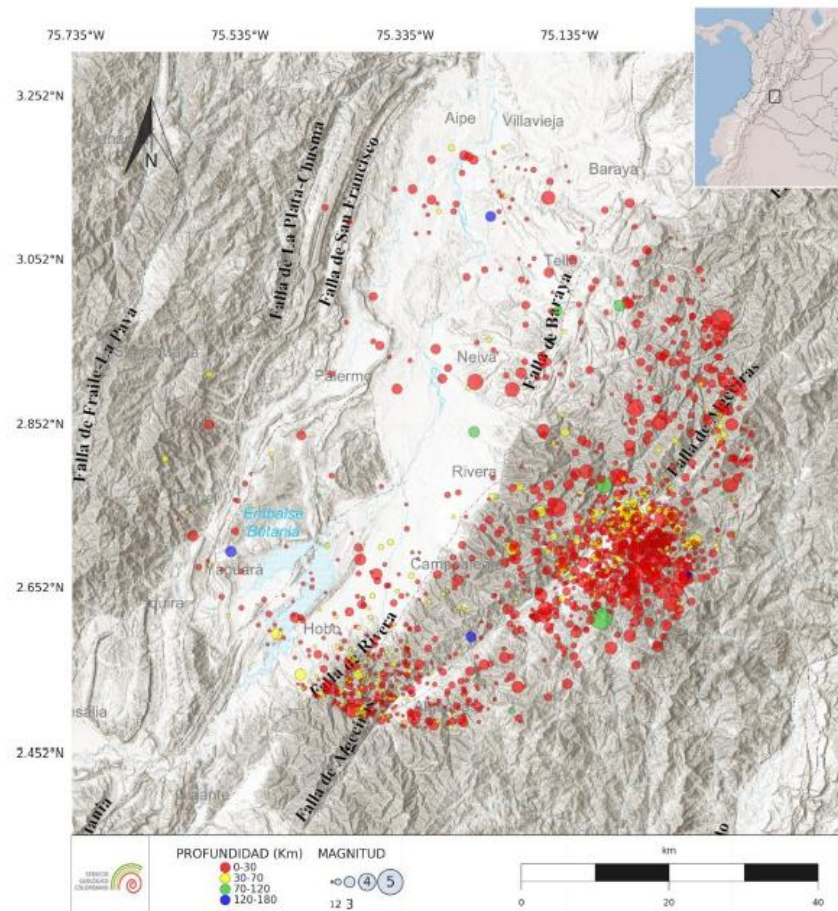


Figura 4. Distribución temporal de la magnitud de los eventos sísmicos registrados entre 1993 y 2025 en el entorno de los municipios de Neiva y Rivera

Fuente: tomado de SGC, (2025)

6.4. Marco Teórico

La remoción en masa es una de las amenazas más relevantes en la configuración y transformación del relieve terrestre, especialmente en regiones de montaña donde convergen pendientes pronunciadas, materiales geológicos pocos cohesionados y regímenes climáticos intensos. Estos fenómenos, que comprenden deslizamientos, flujos de lodo y caídas de rocas, pueden originarse por causas naturales como a intervenciones antrópicas, que alteran la estabilidad del territorio. Investigaciones han demostrado que su ocurrencia se relaciona con la interacción de factores condicionantes (litología, pendiente, humedad del suelo) y factores

detonantes (entre ellos la precipitación, sismicidad), lo cual ha motivado el desarrollo de modelos predictivos para la evaluación del riesgo (Marin et al., 2020).

El análisis de amenazas por remoción en masa requiere un conocimiento de las interacciones entre los factores geomorfológicos, climáticos, geológicos e hidrodinámicos que inciden en la estabilidad de un territorio. En zonas montañosas como la cuenca del río Las Ceibas, estos fenómenos son frecuentes y han dejado una huella significativa en los registros históricos, justificando el interés por modelar los patrones de ocurrencia de este fenómeno. Desde la perspectiva de la gestión del riesgo, comprender estos procesos no solo permite actuar en función del diagnóstico, sino también formular medidas efectivas de prevención y ordenamiento territorial.

Uno de los modelos más citados en América Latina para la zonificación de amenazas es el desarrollado por Mora y Vahrson (1993), que propone una clasificación basada en la combinación de factores pasivos e intrínsecos del territorio (como pendiente, litología y humedad del suelo), con factores detonantes o externos (precipitación y sismicidad). Este enfoque, se adapta a contextos donde los recursos técnicos y de monitoreo continuo pueden ser limitados, permitiendo establecer escenarios de amenaza con base en datos geográficos accesibles (Mora & Vahrson, 1993).

A pesar de su amplia aplicación al aplicar este tipo de modelos u otros de susceptibilidad también se presentan limitaciones metodológicas asociadas a la generación de variables, la dependencia de escalas cartográficas y la calidad de la información base y su respectiva resolución espacial empleada y la disponibilidad de datos históricos confiables. En este sentido, Lee et al. (2025) indican que la variación en la profundidad del suelo y la resolución del modelo digital de elevación influyen significativamente en la representación espacial y temporal de los

deslizamientos. De igual manera, Gómez-Miranda et al. (2025) señalan que los métodos heurísticos y estadísticos tradicionales continúan siendo ampliamente utilizados en evaluaciones regionales; sin embargo, advierten que muchos modelos de inteligencia artificial requieren procesos de entrenamiento complejos, grandes volúmenes de datos y procedimientos rigurosos de calibración y validación. Los autores resaltan que, aunque modelos como Support Vector Machine y Random Forest alcanzan altos niveles de precisión, estos funcionan frecuentemente como “cajas negras”, limitando la interpretación física de los resultados.

En la misma línea, Ait Omar et al. (2025) plantean que los enfoques basados en aprendizaje automático y deep learning presentan resultados prometedores para la modelación de susceptibilidad; no obstante, su implementación depende de bases de datos extensas y de alta calidad, condición que suele ser limitada en regiones con escasa información geotécnica e inventarios históricos insuficientes.

Asimismo, Rani et al. (2026) evidencian que los modelos de aprendizaje profundo aplicados a la predicción espacio-temporal de deslizamientos requieren grandes series de datos pluviométricos, inventarios multitemporales la complejidad metodológica y la necesidad de información continua representan una limitante importante para su aplicación en territorios con capacidades técnicas reducidas.

El modelo de Mora y Vahrson tiene parte del principio de que la amenaza por movimientos en masa puede estimarse a partir de la interacción entre las condiciones propias del terreno, y los factores que actúan como desencadenantes de estos fenómenos. En su planteamiento, la evaluación se sustenta en la relación entre los factores de susceptibilidad que agrupan variables morfodinámicas y los factores de disparo. Esta interacción permite establecer

las zonas con diferente grado de amenaza, reflejando el comportamiento potencial del territorio frente a eventos de remoción en masa.

Mora y Vahrson expresan la relación entre los factores mencionados mediante la siguiente ecuación:

$$H=SUSC*DISP=EP*D$$

Teniendo en cuenta que H representa la amenaza o el nivel de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, EP corresponde al producto de los elementos pasivos, y D al producto de los elementos de disparo.

En términos más específicos, los elementos pasivos están determinados por la combinación del relieve relativo (Sr), la litología (Sl) y la humedad del suelo (Sh), mientras que los factores de disparo incluyen la sismicidad (Ds) y la precipitación (Dp). De esta manera, la ecuación puede expresarse como:

$$H=(Sr \times Sl \times Sh) * (Ds + Dp)$$

Este modelo permite estimar el nivel de amenaza integrando tanto las condiciones físicas que predisponen el territorio a sufrir deslizamientos como los factores externos que pueden detonar el fenómeno. Su aplicación se apoya en el uso de herramientas de análisis espacial, particularmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales facilitan la superposición, ponderación y representación cartográfica de los diferentes parámetros. La metodología de Mora y Vahrson, además de su simplicidad operativa, ofrece una aproximación práctica y replicable para la zonificación de amenazas en cuencas donde se requiere establecer escenarios comparativos entre la modelación teórica y los registros históricos de eventos.

La fortaleza del modelo radica en su carácter integrador. Estudios como el de Quesada y Feoli (2018) han demostrado que la combinación ponderada de los cinco componentes de la ecuación permite identificar zonas de alta susceptibilidad a remociones en masa con un alto

grado de precisión, especialmente cuando se valida con registros empíricos. En esta línea, Marin et al. (2020¹) recalcan la importancia de considerar variables morfométricas como la pendiente y el relieve relativo, y la sismicidad al establecer umbrales de intensidad y duración de precipitaciones para predecir deslizamientos en cuencas andinas.

Por otro lado, Barrantes et al. (2011) evaluaron la efectividad de una versión modificada de la metodología de Mora y Vahrson en el contexto del terremoto de Cinchona, Costa Rica. El sismo de magnitud 6.2 generó numerosos deslizamientos, proporcionando un escenario propicio para validar el modelo. Los resultados mostraron una alta correlación entre las zonas identificadas como de alta susceptibilidad y la ocurrencia real de deslizamientos, lo que respalda la aplicabilidad del método en contextos sísmicos. Además, el estudio subrayó la importancia de adaptar y validar los modelos según las características específicas de cada región.

Adicionalmente, validando investigaciones recientes como la de Tsedal et al. (2024) en Etiopía, y la de Shou y Lin (2020) en Taiwán, coinciden en que los modelos que integran datos geoespaciales con resoluciones espaciales de 10 y 30 m, variables climáticas e históricos de eventos reales son más efectivos para formular políticas de mitigación del riesgo. En el contexto colombiano, estudios aplicados en el municipio de Manaure han utilizado la metodología Mora-Vahrson con información a escalas de trabajo 1:25.000, así como en el corregimiento de Chemesquemena – Cesar desarrollado a escala 1:100.000 con resultados exitosos en la identificación de áreas críticas (Lopez et al., 2020; Maestre et al., 2023), lo que demuestra su adaptabilidad a diversas escalas y condiciones regionales.

La utilidad del modelo también se extiende a regiones donde no existen inventarios exhaustivos, como plantea Gómez et al. (2023), al sugerir que el uso de modelos físicos combinados con inteligencia artificial y datos satelitales puede complementar y fortalecer

metodologías tradicionales. No obstante, para garantizar su aplicabilidad y mejorar su precisión, es fundamental validar estos modelos con datos históricos georreferenciados, como lo exige el presente trabajo. Solo así es posible establecer un nivel de confiabilidad adecuado que permita a las entidades responsables tomar decisiones fundamentadas sobre el uso del suelo, la ubicación de infraestructura y la gestión ambiental de las cuencas hidrográficas vulnerables.

En este contexto, la aplicación del modelo Mora y Vahrson en la cuenca del Río Las Ceibas no se orienta únicamente a la obtención de un mapa de amenaza, sino al análisis de su comportamiento frente a registros históricos documentados en el territorio. Este enfoque comparativo permite valorar la aplicabilidad territorial del modelo y reconocer sus alcances y limitaciones como herramienta de evaluación espacial de amenazas en cuencas andinas con disponibilidad limitada de información detallada.

En resumen, el modelo de Mora y Vahrson ofrece una base metodológica útil y replicable para la zonificación de amenazas por remoción en masa, especialmente cuando se adapta a las condiciones locales del territorio y se contrasta con datos históricos. Su implementación en la cuenca del río Las Ceibas buscó solo aportar un diagnóstico técnico, sino que también fortalece en futuros escenarios en la gestión del riesgo desde un enfoque territorial y ambiental, orientado a la planificación y a una reducción de la vulnerabilidad ante este tipo de fenómenos.

6.5. Antecedentes o estado del Arte

El análisis de la amenaza por procesos de remoción en masa ha sido abordado ampliamente en la literatura científica mediante una diversidad de enfoques metodológicos, que incluyen diferentes modelos elaborados con sistemas de información geográfica. En este contexto, el estado del arte permitió identificar las principales tendencias, avances y limitaciones

en la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza, así como los criterios empleados para evaluar la confiabilidad de los modelos a partir de inventarios históricos de eventos.

La revisión de antecedentes que se presenta a continuación reúne investigaciones desarrolladas en distintos contextos geomorfológicos y climáticos, tanto a escala internacional como regional y nacional, con especial énfasis en estudios que integran factores condicionantes y detonantes de la remoción en masa, y que incorporan procesos de validación empírica mediante datos históricos georreferenciados. Se incluyen trabajos basados en modelos físicos, metodologías como el modelo de Mora y Vahrson, enfoques morfométricos, análisis multicriterio, técnicas estadísticas, lo que permite establecer un panorama comparativo amplio sobre las estrategias empleadas para la evaluación de amenazas en terrenos montañosos.

A partir de la revisión se identificaron vacíos, particularmente en lo referente a la evaluación de la confiabilidad de modelos en contextos locales, aspecto que resultó central para la investigación desarrollada en la cuenca del río Las Ceibas. De este modo, los antecedentes revisados que se listan a continuación proporcionaron el sustento teórico y metodológico necesario para contextualizar la propuesta, justificar su pertinencia ante la zonificación de amenazas por remoción en masa y su aplicación en la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial.

Lan et al. (2004). desarrollaron la investigación *Análisis espacial y predicción del riesgo de deslizamientos de tierra mediante SIG en la cuenca hidrográfica de Xiaojiang, Yunnan, China*. El estudio se enfoca en la cuenca de Xiaojiang en el suroeste de China, conocida por su alto riesgo de deslizamientos de tierra, siendo catalogada como el “*Museo de riesgos geológicos en China*”. La investigación se concentra en las consecuencias del calentamiento global, con especial énfasis en el cambio climático y sus efectos perjudiciales, como las lluvias excesivas

que aumentan el riesgo de deslizamientos de tierra y flujos de escombros. Utilizando datos de precipitación y análisis de frecuencia a través de modelos de reducción de escala. A partir de los datos generaron mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en diferentes condiciones climáticas con salidas gráficas a escala 1:100.000. La investigación de Lan et al. (2004) con la presente propuesta destaca la obtención de un mapa de zonificación de procesos de movimientos en masa.

Rapolla et al. (2010), desarrollaron la investigación *Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra inducidos sísmicamente: aplicación de un nuevo procedimiento en la isla de Ischia, región de Campania, sur de Italia* un estudio en donde plantearon un enfoque para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos inducidos por sismos, basado en un procedimiento implementado en un sistema de información geográfica (SIG) que consideró tres factores principales: tipo de roca/suelo aflorante, ángulo de pendiente e intensidad sísmica; los autores utilizaron información base a varias escalas desde 1:10.000 hasta 1:100.000. Los resultados mostraron una alta correspondencia entre las zonas clasificadas como altamente susceptibles y la distribución histórica de deslizamientos. Este enfoque resaltó el valor de modelos prácticos y eficaces en contextos tectónicamente activos, lo cual puede ser de interés para la propuesta de investigación en la cuenca del río Las Ceibas, debido que la metodología de Mora y Vahrson integra factores geodinámicos como los sismos en la zonificación de amenazas por remoción en masa.

Özşahin & Kaymaz, (2014), realizaron un *Análisis de riesgo y susceptibilidad a avalanchas en la región de Anatolia Oriental mediante SIG*. En el área de estudio se realizó un análisis de susceptibilidad y riesgo de avalanchas empleando Sistemas de Información Geográfica con base en las metodologías de Mora y Vahrson y del Coordinador de las Naciones

Unidas para el Socorro en Desastres. Utilizando datos del Modelo Digital Global de Elevación (GDEM) y estadísticas oficiales, se determinó que factores como pendiente, temperatura y precipitación inciden directamente en la ocurrencia de avalanchas. Los resultados mostraron que las zonas con alta susceptibilidad coinciden con la frecuencia histórica del fenómeno. Este estudio resalta la efectividad del modelo de Mora y Vahrson en la caracterización espacial de amenazas naturales por deslizamientos, representado sus salidas cartográficas a una escala 0 – 75 km, lo cual respalda su aplicación en la cuenca del río Las Ceibas y valida su uso como herramienta en la zonificación comparativa de amenazas por remoción en masa en contextos montañosos.

Shou & Yang. (2015), llevaron a cabo la investigación *Análisis predictivo de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en condiciones de cambio climático: un estudio en la cuenca del río Chingshui de Taiwán* utilizando información cartográfica a escala 1:50.000 a 1:100.000. El estudio resalta la importancia de los mapas para la mitigación y prevención de riesgos ante eventos de deslizamientos de tierra, así como también resalta la necesidad de adaptar las políticas de gestión del agua y la tierra para adaptarse a los cambios climáticos observables, ofreciendo consejos prácticos para la gestión sostenible y protegiendo a las comunidades vulnerables de eventos climáticos extremos en Taiwán. Con el presente proyecto de investigación se relaciona el estudio de la frecuencia de lluvias extremas. En la metodología de Mora-Vahrson se analiza como factor detonante dicho parámetro.

Vuillez et al. (2018), llevaron a cabo la investigación denominada *Cambios en el uso del suelo, deslizamientos de tierra y carreteras en la cuenca del río Phewa, en el oeste de Nepal, de 1979 a 2016*, los autores usaron información cartográfica a escala de detalle de 1:10.00 a 1:20.000 para el área de estudio y a 1:100.000 para las áreas de la cuenca completa. Este estudio

se enfocó en documentar los cambios en el uso y la cobertura del suelo ocurridos entre 1979 y 2016 en la cuenca hidrográfica del lago Phewa, en el oeste de Nepal. En donde establecieron que estos cambios están relacionados con una mayor erosión, que se vio intensificada por fuertes lluvias como la de julio de 2015, que provocó un aumento significativo de los deslizamientos de tierra. El impacto de los deslizamientos de tierra en las carreteras fue significativo. Los autores recomiendan continuar con este tipo de investigaciones para relacionar la construcción de infraestructura vial no planificada con los deslizamientos de tierra. Con la presente propuesta de investigación se podría determinar las vías con amenaza por eventos de remoción en masa en la cuenca de estudio.

Marin et al. (2020), en su investigación *Efecto de los parámetros morfométricos de la cuenca sobre los umbrales de precipitación basados en la física para deslizamientos superficiales*. Fue aplicado a 93 cuencas pequeñas de los Andes colombianos, se utilizó el modelo físico TRIGRS para establecer umbrales de intensidad y duración de lluvias asociados a deslizamientos superficiales, considerando parámetros morfométricos como pendiente promedio, relieve y Coeficiente de Melton. Los resultados a escalas 1:2.000 a 1:10.000 acorde con el tamaño de las microcuencas analizadas por los autores, mostraron una alta variabilidad de umbrales incluso entre cuencas cercanas, y se identificó que los parámetros relacionados con la pendiente influyen en la posición del umbral. Frente a la investigación en la cuenca del río Las Ceibas, este antecedente aporta criterios para incorporar elementos morfométricos como variables complementarias en la zonificación de amenazas por remoción en masa, lo que puede fortalecer la validación de los resultados obtenidos mediante el modelo de Mora y Vahrson.

Chong et al. (2023), llevaron a cabo la investigación denominada *Mecanismo de formación y análisis cuantitativo del riesgo de la cadena de peligro inducida por deslizamientos*

de tierra mediante un enfoque integrado para la gestión de emergencias: Un estudio de caso en la cuenca del río Bailong, China. El objetivo fue desarrollar un enfoque integrado para investigar y predecir rápidamente estos riesgos múltiples, utilizando teledetección, tecnología geofísica, simulaciones numéricas y fórmulas empíricas; con el uso de imágenes satelitales ópticas, fotogrametría UAV, INSAR, LIDAR, opero con cartografía entre los 1:10.000 a 1:50.000. El enfoque propuesto por los investigadores demostró ser útil para una evaluación cuantitativa en contextos de emergencia, facilitando la toma de decisiones en mitigación de desastres multirriesgo. Frente a la investigación sobre zonificación de amenazas por remoción en masa en la cuenca del río Las Ceibas, este antecedente aporta una visión sobre la integración de metodologías diversas para abordar riesgos encadenados, así como la importancia de considerar impactos económicos y escenarios extremos en la planificación territorial y la gestión del riesgo.

Zhang et al. (2024), desarrollaron la investigación denominada *Predicción espacial casi en tiempo real de deslizamientos de tierra provocados por terremotos basada en inventarios globales de 2008 a 2022*. Los investigadores propusieron un modelo de aprendizaje profundo difuso (FuDL) para la predicción espacial casi en tiempo real de deslizamientos de tierra provocados por terremotos. Los resultados elaborados a partir de escalares multiescalares identificaron como factores críticos la dinámica del movimiento del terreno, la topografía empinada y elevada, y la intensidad sísmica, además de revelar patrones espaciales globales en la distribución de estos deslizamientos. Este estudio resulta relevante para la zonificación de amenazas por deslizamientos en la cuenca del río Las Ceibas, pues, aunque el enfoque principal es la remoción en masa inducida por factores como la lluvia, la inclusión de eventos sísmicos y la mejora en técnicas predictivas, como el aprendizaje profundo, puede complementar y

enriquecer el análisis comparativo con el modelo de Mora y Vahrson, especialmente en regiones con actividad sísmica como lo es la cuenca objeto del presente estudio.

Xiao et al. (2024), realizaron una investigación denominada *Amenazas de represas por deslizamientos de tierra a lo largo del río Jinsha, China*. Uno de los objetivos principales del estudio se basó en identificar los puntos críticos de represamiento por deslizamientos de tierra a lo largo del río Jinsha. Los resultados cartográficos multiescalar indican que el tramo superior del río es el más vulnerable, concentrando los niveles más altos de amenaza, lo cual también afecta la viabilidad de futuros proyectos de infraestructura hidroeléctrica en esa zona.

Aproximadamente el 30 % del río presenta niveles altos a muy altos de amenaza. Este enfoque destaca la utilidad de los análisis espaciales a escala de cuenca para apoyar la planificación de infraestructuras resilientes y la gestión de riesgos, lo que resulta relevante para el estudio en la cuenca del río Las Ceibas, al ofrecer una metodología adaptable para evaluar amenazas relacionadas con represamientos por movimientos en masa.

Chand Rai et al. (2024), realizaron una investigación denominada *Análisis de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca de Bhilangana (India) mediante métodos de aprendizaje automático basados en SIG*. En este estudio se evaluaron siete técnicas de aprendizaje automático aplicadas a SIG para mapear a escala 1:10.000 la susceptibilidad a deslizamientos de tierra utilizando un inventario de 423 eventos registrados entre 2000 y 2022. Los investigadores demostraron la eficacia de los modelos basados en aprendizaje automático para la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos en áreas montañosas, lo cual es relevante para aplicar enfoques comparativos en la cuenca del río Las Ceibas y podría convertirse en un punto de partida para mejorar la precisión de modelos como el de Mora y Vahrson en la predicción de amenazas por remoción en masa.

Mulugeta et al. (2024), desarrollaron un estudio denominado *Modelado de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca del río Kulfo, valle del Rift, Etiopía: un análisis geoespacial y estadístico integrado*. La investigación se centró en evaluar la probabilidad de deslizamientos de tierra en la cuenca del Río Kulfo, Etiopía, mediante la utilización de una metodología sistemática y el análisis de imágenes satelitales, datos geológicos y registros históricos. Al utilizar la técnica del índice de frecuencia, los autores tuvieron en cuenta factores importantes, incluidos el uso del suelo, la pendiente y la litología. Los resultados los incorporaron a un mapa de inventario de deslizamientos de tierra a escala 1:100.000, clasificando la susceptibilidad del área de leve a media, lo que permitió tomar decisiones efectivas sobre mitigación y preparación ante eventos de desastres por eventos de remoción en masa. De la investigación de Mulugeta et al. (2024) y de la presente propuesta de investigación se destaca la determinación de áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos de tierra.

Abdollahi et al. (2024), realizaron el *Modelado hidromecánico de la evolución de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra a escala regional tras incendios forestales*; en su investigación desarrollaron un marco basado en un modelo hidrodinámico para generar mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra superficiales provocados por la lluvia en zonas afectadas por incendios forestales, mediante este modelo que considera el flujo no saturado y el refuerzo de raíces, integrado en un modelo de estabilidad de taludes infinitos. Aplicado en el sur de California, el modelo predijo con éxito la ubicación de deslizamientos ocurridos tras una tormenta extrema con el uso de un DEM de 10 m, revelando una mayor probabilidad de falla en áreas quemadas con severidades moderadas a altas. Aunque este estudio se enfoca en contextos post-incendio, destaca la utilidad de integrar modelos físicos con herramientas SIG para la zonificación de amenazas por remoción en masa, lo cual puede aportar enfoques

complementarios y comparativos en investigaciones como la propuesta para la cuenca del río Las Ceibas.

Qian et al. (2025), llevaron a cabo la investigación denominada *Optimización de la aplicación de modelos de aprendizaje automático para predecir la susceptibilidad a deslizamientos de tierra utilizando el modelo de valor de la información en el condado de Junlian de la cuenca de Sichuan*. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar y validar un modelo de evaluación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra para el condado de Yunnan para mejorar la precisión de las predicciones de deslizamientos de tierra con base en registros históricos y trabajo de campo, y se identificaron ocho factores ambientales relevantes mediante análisis de correlación. A partir de estos, se entrenaron modelos como IV-RF, IV-LR, IV-SVM e IV-BP con diferentes proporciones de puntos sin deslizamientos, encontrándose que una proporción 1:1 ofrece los mejores resultados. El modelo IV-RF obtuvo la mayor precisión (AUC = 0,994), destacando como variables más influyentes la litología estratigráfica y la proximidad a los ríos. Este estudio podría aportar elementos clave para la aplicación de técnicas de aprendizaje automático en la zonificación de susceptibilidad, útiles en regiones montañosas como la cuenca del río Las Ceibas, donde la precisión en la identificación de zonas críticas es fundamental para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

Al-kordi et al. (2025), desarrollaron la investigación denominada *Mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra mediante técnicas geoespaciales, de proceso analítico jerárquico (AHP) y de regresión logística binaria (BLR): un estudio de la cuenca de Wadi Habban, Shabwah, Yemen*. Este estudio evalúa la susceptibilidad a deslizamientos mediante la integración de teledetección, SIG y modelos de análisis multicriterio y estadísticos. Los resultados a escala 1:100.000 muestran que el modelo BLR ofrece un mayor rendimiento

predictivo, clasificando un 49 % del área como de alta o muy alta susceptibilidad (frente al 26 % del AHP). Esto evidencia que el enfoque estadístico BLR proporciona una mejor delimitación espacial de las zonas de riesgo y mayor confiabilidad para la gestión del riesgo de deslizamientos. El estudio demuestra cómo la combinación de datos geoespaciales y modelos cuantitativos puede apoyar la planificación del uso del suelo, la mitigación del riesgo y la toma de decisiones informadas en territorios vulnerables.

Mondini et al. (2025), realizaron una investigación denominada *Un método de evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra de conjunto heterogéneo basado en InSAR y un inventario de deslizamientos de tierra extendido por similitud geográfica*. Los investigadores desarrollaron un marco de modelado probabilístico para predecir deslizamientos de tierra inducidos por lluvia a escala espaciotemporal (2002 - 2022), tanto a corto como a largo plazo. Los resultados demostraron que la lluvia, principal desencadenante natural, proporciona suficiente información para predecir ubicación y momento de los eventos sin necesidad de umbrales específicos, generando una representación detallada de la probabilidad de ocurrencia a largo plazo. Este estudio es relevante para la presente investigación, ya que destaca la influencia de las precipitaciones en los procesos de remoción en masa y plantea un enfoque predictivo que, aunque distinto al modelo determinístico de Mora y Vahrson que se empleará en la cuenca del río Las Ceibas, respalda la importancia de validar los resultados con datos históricos y abre posibilidades para futuras comparaciones metodológicas.

Khan et al. (2025), llevaron a cabo la investigación denominada *Desentrañando el impacto del inventario de deslizamientos de tierra en la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra en el Himalaya indio*. En este estudio se analizó el efecto de los tipos de inventario de deslizamientos (puntos y polígonos) y de tres resoluciones ráster (12.5 m, 30 m y 90 m) en la

zonificación de susceptibilidad a deslizamientos. Se encontró que el uso del suelo, las carreteras y la litología son variables clave en todas las resoluciones, mientras que variables como la pendiente y la geomorfología presentan influencias moderadas. Se observó que el muestreo puntual presenta valores de área bajo la curva más altos, pero el muestreo poligonal ofrece una representación más precisa de la distribución espacial de los deslizamientos. Este estudio resulta útil como antecedente para la presente investigación en la cuenca del río Las Ceibas, ya que subraya la importancia de elegir adecuadamente la resolución espacial y el tipo de inventario en los procesos de zonificación, aspectos que podrían incidir en la precisión del modelo de Mora y Vahrson y en la comparación con registros históricos locales.

Berber et al. (2025), realizaron una investigación denominada *Evaluación integral del riesgo de deslizamientos de tierra mediante probabilidades espaciales, temporales y de tamaño, combinadas con análisis de densidad de deslizamientos en Çanakkale (noroeste de Turquía)*. El objetivo del estudio fue predecir áreas donde es probable que ocurran deslizamientos de tierra en el futuro basándose en datos históricos de deslizamientos de tierra. Los resultados permitieron construir un mapa de peligro de densidad que identifica zonas y niveles de amenaza en distintos escenarios temporales. Este estudio es relevante para la propuesta de esta investigación, ya que destaca la utilidad de integrar modelos de susceptibilidad con enfoques probabilísticos de tamaño y frecuencia de eventos, lo que podría complementar el enfoque comparativo propuesto con el modelo de Mora y Vahrson, mejorando la planificación del uso del suelo y la gestión del riesgo en áreas propensas a remociones en masa.

Chauhan et al. (2025), llevaron a cabo la investigación denominada *Modelado de riesgos multirriesgo basado en aprendizaje automático y SIG para Uttarakhand: integración de la susceptibilidad sísmica, a deslizamientos de tierra e inundaciones con la vulnerabilidad*

socioeconómica. El objetivo fue generar un índice de riesgo multirriesgo (MHRI) mediante la integración de mapas de susceptibilidad elaborados con algoritmos de aprendizaje automático y un índice de vulnerabilidad calculado con un proceso de jerarquía analítica a partir de un DEM de 30 m e inventarios geoespaciales digitales. Los resultados mostraron que el 21,01 % del territorio enfrenta riesgos simultáneos de terremotos y deslizamientos, y que un 22,36 % corresponde a zonas de MHR alto a muy alto. Este estudio destaca la importancia de abordar los riesgos de forma conjunta, superando las limitaciones de las evaluaciones unidimensionales. Su aporte es relevante para la investigación en la cuenca del río Las Ceibas al sugerir la incorporación de enfoques integrados que consideren múltiples amenazas y vulnerabilidades, lo que puede fortalecer los procesos de zonificación y gestión del riesgo por remoción en masa.

Alam et al. (2025), desarrollaron una investigación denominada *Inteligencia geoespacial para el análisis de riesgos y susceptibilidad a deslizamientos de tierra: perspectivas de NH31A y asentamientos del Himalaya del este de Sikkim*. El estudio tuvo como objetivo evaluar el riesgo de deslizamientos y generar mapas de zonificación a partir de un DEM de 30 m con una salida gráfica de 0 – 3 km. Los autores identificaron 153 eventos de remoción en masa y considerando trece factores condicionantes, como pendiente, elevación, precipitación y uso del suelo. Los resultados mostraron una alta precisión predictiva y señalaron áreas de alto riesgo en la infraestructura vial y zonas densamente pobladas. Este trabajo representa un análisis que destaca la importancia de integrar diversos factores geoambientales y herramientas SIG para mejorar la planificación del uso del suelo. Frente a la investigación propuesta, este antecedente es relevante como referencia metodológica comparativa y refuerza la necesidad de validar los modelos de zonificación con datos históricos de deslizamientos.

Pollock & Wartman (2025), realizaron una investigación denominada *MM : Marco multimodal para el análisis cuantitativo del riesgo de deslizamientos de tierra a escala regional*. Su objetivo fue crear un sistema que permita cuantificar las consecuencias de los deslizamientos de tierra en el espacio y el tiempo, con el fin de apoyar decisiones racionales sobre el uso del suelo, planificación territorial, obras de mitigación y educación pública. Se destaca el uso de datos de teledetección de cobertura casi global y un enfoque probabilístico mediante simulaciones Monte Carlo. En relación con la investigación propuesta en la cuenca del río Las Ceibas, este antecedente ofrece una perspectiva metodológica avanzada para la estimación del riesgo de remoción en masa, subrayando la importancia de integrar marcos flexibles, escalables y basados en información geoespacial para el análisis comparativo de amenazas.

Apu et al. (2025), en la investigación denominada *Mapeo de susceptibilidad a deslizamientos basado en teledetección y SIG en un distrito montañoso de Bangladesh: una comparación de diferentes modelos geoespaciales*, generaron mapas de susceptibilidad a deslizamientos utilizando 12 parámetros ambientales con un DEM SRTM de 30 m, e imagen satelital Landsat 8 de 30 m para determinar uso y cobertura. Este estudio refuerza la utilidad del modelado geoespacial para la gestión del riesgo y la planificación territorial, y resulta relevante para la investigación en la cuenca del río Las Ceibas, ya que permite comparar enfoques metodológicos como el de la Razón de frecuencia modificada con el modelo de Mora y Vahrson, así como valorar la integración de múltiples factores y herramientas SIG para una zonificación precisa de amenazas por remoción en masa.

Kang et al. (2025), realizaron una investigación denominada *Estudio sobre el riesgo de amenaza por deslizamientos de tierra en Wenzhou basado en unidades de pendiente y enfoques de aprendizaje automático*. Este estudio aplicado en la ciudad de Wenzhou con un DEM de 30 m

propuso un enfoque basado en unidades de pendiente, utilizando datos históricos de deslizamientos y modelos de aprendizaje automático (Random Forest). El modelo Random Forest mostró el mejor rendimiento con una precisión del 77,94%. Este enfoque permite una gestión más localizada y eficiente del riesgo. En relación con la investigación en la cuenca del río Las Ceibas, este antecedente aporta una metodología novedosa al considerar unidades geomorfológicas más detalladas y el uso de algoritmos de aprendizaje automático para mejorar la precisión de la zonificación de amenazas por remoción en masa.

Peifeng Ma et al. (2025), desarrollaron una investigación denominada *Mapeo dinámico de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra durante las últimas tres décadas para descubrir variaciones en la causalidad de los deslizamientos de tierra en áreas montañosas urbanas subtropicales*. Ante la necesidad de capturar la variabilidad temporal en zonas propensas a remoción en masa, los investigadores desarrollaron un enfoque dinámico de evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos mediante metaaprendizaje, descomponiendo la evaluación en subtarefas anuales entre 1992 y 2019 a escalas de 1:10.000 a 1:25.000. Se determinó que la pendiente y los días anuales de lluvia extrema fueron los factores más influyentes, cuyo impacto ha variado significativamente debido al cambio climático y a políticas de mitigación. El enfoque de esta investigación resulta relevante para estudios como el de la presente propuesta, al resaltar la importancia de incorporar componentes temporales y adaptativos en los análisis de susceptibilidad a deslizamientos.

Hao Ma y Fawu Wang. (2025), llevaron a cabo la investigación denominada *Factores que controlan la formación y el movimiento de deslizamientos de tierra superficiales agrupados provocados por la tormenta de lluvia extrema de julio de 2023 en Beijing, China*. Los investigadores analizaron los deslizamientos de tierra provocados por una tormenta extrema en

Beijing en 2023, identificando 15174 eventos principalmente pequeños y superficiales que se expandieron por movimientos fluidizados. Los deslizamientos observados fueron traslacionales y rotacionales, vinculados a la fragmentación de la roca por actividad tectónica, los autores trabajaron una escala de 1:10.000. Este estudio destaca la importancia de integrar múltiples métodos para entender los factores que controlan las remociones en masa, apoyando el uso de modelos predictivos como el de Mora y Vahrson, lo que resulta pertinente para la zonificación de amenazas en la cuenca del río Las Ceibas y la comparación con datos históricos de deslizamientos.

Los antecedentes internacionales presentados anteriormente, evidencian un avance progresivo en las diversas metodologías empleadas para la evaluación de amenazas por remoción en masa. Mientras investigaciones desarrolladas entre 2004 y 2015 se enfocaron principalmente en modelos físicos y análisis multicriterio soportados en SIG, los estudios más recientes incorporan técnicas de aprendizaje automático, modelos probabilísticos y procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución. No obstante, aunque estas metodologías presentan altos niveles de precisión, también requieren bases de datos extensas, procesos de calibración complejos y disponibilidad de información detallada, condiciones que no siempre están presentes en cuencas de escala regional.

Quesada y Feoli, (2018), llevaron a cabo la investigación denominada *Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para determinar Áreas Susceptibles a deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica*. En este estudio comparativo se analizaron las metodologías Mora-Vahrson y el método morfométrico para evaluar su eficacia en la zonificación de áreas susceptibles a deslizamientos con insumos cartográficos multiescalar. El análisis identificó que ambas metodologías son útiles como línea base para delimitar zonas de

amenaza, siendo su aplicabilidad dependiente de la disponibilidad de datos de entrada. Esta comparación permitió evidenciar fortalezas y debilidades específicas de cada método, destacando su potencial para la gestión del riesgo por procesos de remoción en masa y para el ordenamiento territorial. Este antecedente es especialmente relevante para la investigación propuesta en la cuenca del río Las Ceibas, debido a que respalda el uso del modelo de Mora-Vahrson como una herramienta válida y adaptable a distintos contextos geográficos, además de permitir su comparación con otros enfoques de zonificación.

Lopez et al. (2020), realizaron una investigación denominada *Aplicación del Método Mora-Vahrson para Evaluar la Susceptibilidad a Deslizamiento en el Municipio de Manaure, Cesar, Colombia*. En este estudio se aplicó el modelo de Mora-Vahrson para caracterizar el grado de susceptibilidad a movimientos de remoción en masa de las unidades geológicas ubicadas al oriente del municipio a escala 1:25.000. El estudio contempló dos escenarios: uno con la falla Manaure en su estado actual y otro con su reactivación. En el primer escenario, más del 70% del área mostró una susceptibilidad media, y las zonas montañosas del oeste presentaron niveles altos de susceptibilidad. En el segundo escenario, la susceptibilidad aumentó significativamente, alcanzando grados altos en el 90% del área. Este análisis permitió identificar escenarios de riesgo geológico relacionados con procesos morfodinámicos activos. En cuanto a la presente propuesta de investigación en la cuenca del río Las Ceibas, este antecedente es relevante ya que demuestra la utilidad del modelo de Mora-Vahrson para analizar variaciones en la susceptibilidad ante condiciones geodinámicas distintas.

Marín & Velásquez. (2020), llevaron a cabo la investigación denominada *Influencia de las propiedades hidráulicas en el modelado físico de la estabilidad de taludes y la definición de umbrales de pluviosidad para deslizamientos superficiales*. El estudio analizó la variación del

nivel piezométrico y el factor de seguridad en celdas específicas bajo diferentes condiciones hidráulicas e intensidades de precipitación a partir de un DEM de 30 m. Se observó que, aunque todas las celdas alcanzan un estado estable con un nivel máximo de presión, el tiempo requerido para llegar a esta condición depende de la pendiente y la conductividad hidráulica, siendo más corto en laderas más inclinadas. Este antecedente aporta elementos importantes para la presente propuesta de investigación, al evidenciar cómo las propiedades hidráulicas del suelo y la morfología del terreno afectan la susceptibilidad a remociones en masa.

Maestre et al. (2023), desarrollaron la investigación denominada *Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa implementando el método Mora-Vahrson modificado para el corregimiento de Chemesquemena (Cesar, Colombia)*. Se analizó la susceptibilidad de las laderas a movimientos en masa mediante la aplicación de la metodología de Mora-Vahrson modificada. Los resultados a escalas 1:100.000 mostraron que el 70 % del territorio presenta alta susceptibilidad, especialmente en el noroeste, debido a factores como pendientes pronunciadas, lluvias intensas, litología alterada, tipo de suelo, coberturas vegetales (gramíneas y cultivos permanentes) y unidades geomorfológicas específicas. El 30 % restante tuvo susceptibilidad baja a muy baja. Esta investigación como antecedente resulta relevante para la presente propuesta, ya que confirma la aplicabilidad del modelo Mora-Vahrson en regiones con condiciones topográficas y geológicas complejas.

En el contexto colombiano, los estudios revisados demuestran que la metodología de Mora y Vahrson continúa siendo ampliamente utilizada debido a su aplicabilidad en territorios con información geográfica disponible a escalas intermedias y limitada instrumentación de monitoreo. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se han concentrado en la generación cartográfica de escenarios de amenaza o susceptibilidad, sin incorporar procesos de validación

espacial mediante registros históricos georreferenciados. Esta situación evidencia la necesidad de fortalecer ejercicios comparativos que permitan analizar la correspondencia entre las zonificaciones obtenidas y la ocurrencia real de eventos en el territorio.

Gómez et al. (2023), desarrollaron la investigación denominada *Pronóstico de deslizamientos mediante estimaciones de lluvia satelital y aprendizaje automático en la región Andina colombiana*. En este estudio la evaluación del desempeño de la estimación de precipitación por satélite mediante el índice modificado de eficiencia Kling-Gupta (KGE') mostró buena correlación con los datos en tierra, especialmente en escalas mensuales y anuales. Además, el modelo de Grupo de Riesgos Climáticos Precipitación Infrarroja con Estaciones destacó como la estimación de precipitación por satélite más efectiva para predecir deslizamientos. Frente a la investigación que se pretende desarrollar en la cuenca del río Las Ceibas, este antecedente aporta una perspectiva sobre el uso de modelos predictivos y datos satelitales para fortalecer el análisis espacial de amenazas por remoción en masa, especialmente en áreas con limitada cobertura de datos históricos o instrumentales.

Miranda et al. (2025), llevaron a cabo la investigación denominada *Técnicas avanzadas de IA para el mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos y la predicción espacial: un estudio de caso en Medellín, Colombia*. En este estudio se desarrolló un modelo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra a partir de un DEM de celdas de 30 m que integró dependencias espaciales y temporales, incluyendo la recurrencia de eventos, con el fin de mejorar la precisión en la identificación de áreas de riesgo. Los resultados destacaron que la pendiente, la distancia al cauce, la geología, la geomorfología y la precipitación media anual son factores determinantes en la susceptibilidad, y el modelo obtuvo una precisión del 85%. Este estudio es pertinente para la presente investigación en la cuenca del río Las Ceibas, ya que resalta la relevancia de incorporar

la dimensión temporal y múltiples factores predisponentes en los análisis de remoción en masa, lo cual podría complementar el enfoque comparativo basado en el modelo de Mora y Vahrson al integrar variables dinámicas que mejoran la representación del riesgo.

En conjunto, los antecedentes revisados evidencian avances significativos en la modelación espacial de amenazas por remoción en masa mediante herramientas SIG, modelos físicos, estadísticos y enfoques de aprendizaje automático. Sin embargo, persisten limitaciones relacionadas con la validación espacial de los resultados obtenidos, especialmente en estudios aplicados a escala de cuenca en territorios andinos. En este sentido, la presente investigación busca aportar un enfoque comparativo basado en registros históricos georreferenciados, orientado a analizar la aplicabilidad territorial del modelo Mora y Vahrson en la cuenca del río Las Ceibas.

6.6 Alcance de la investigación.

La presente investigación se centra al análisis de la amenaza por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Las Ceibas, a partir de la aplicación de la metodología de Mora y Vahrson y su evaluación mediante contraste con el inventario histórico de eventos georreferenciados disponibles para el área de estudio. El alcance espacial del trabajo corresponde exclusivamente a los límites hidrográficos de la cuenca del Río Las Ceibas de aproximadamente 29.841 ha, considerando una escala de análisis compatible con la información topográfica, geológica, climática y sísmica empleada.

Desde el punto de vista metodológico, el estudio aborda la zonificación de la amenaza mediante la integración de factores condicionantes pendiente, geología y humedad del suelo y factores detonantes como precipitación y sismicidad, conforme a la estructura conceptual del modelo de Mora y Vahrson. El análisis se orienta a evaluar la confiabilidad espacial de la

zonificación obtenida, entendida como el grado de correspondencia entre las clases de amenaza definidas y la distribución de los eventos históricos registrados, sin pretender desarrollar un modelo predictivo probabilístico ni estimar la frecuencia futura de ocurrencia de los fenómenos.

El alcance fue determinado por la disponibilidad y calidad de los datos secundarios utilizados y recolectados desde las instituciones oficiales, particularmente el inventario histórico de remociones en masa y las series de precipitación y sismicidad consideradas para la caracterización de los factores detonantes.

Finalmente, los productos derivados de esta investigación se considerarán como un insumo técnico de carácter diagnóstico y orientador, útil para apoyar procesos de gestión del riesgo y ordenamiento territorial a escala de cuenca. No obstante, el alcance del estudio no incluye la formulación de medidas estructurales específicas, diseños de obras de mitigación ni evaluaciones detalladas de riesgo, los cuales requerirían análisis a escalas más detalladas acompañados de estudios complementarios. De este modo, la investigación establece una base metodológica para futuras investigaciones académicas, delimitando claramente los alcances y límites de la información generada.

7. Marco metodológico

El marco metodológico de la presente investigación se estructuró a partir de un enfoque geoespacial y comparativo, orientado a zonificar amenazas por remoción en masa con el método Mora & Vahrson en la cuenca del río las Ceibas, validando su eficiencia a través de la comparación de registros con los resultados obtenidos. Es por lo que la metodología adoptada se basó en recolectar, procesar y analizar información temática relacionada con los factores condicionantes y detonantes del fenómeno en el área de la cuenca. El procesamiento de la información se llevó a cabo mediante el uso de los sistemas de información geográfica (SIG),

empleando el software de *Arcmap 10.8* y las distintas herramientas de geoprocesamiento empleadas en el desarrollo de la investigación presentes en *ArcToolbox*. Este análisis se complementó con el manejo de bases de datos recolectadas (precipitación, sismicidad, históricos deslizamientos), las cuales, fueron organizadas y analizadas mediante hojas de cálculo del software *Excel de Microsoft 365*. Finalmente, se realizó el contraste entre los resultados del modelo y el inventario histórico de eventos registrados en el área de estudio.

7.1 Recolección de Datos

Para iniciar con esta investigación se consideraron conceptos y términos relacionados a la línea de estudio es decir primeramente una revisión bibliográfica, con el fin de conceptualizar la amenaza por remoción en masa a través de diversos documentos y estudios presentes en bases de datos reconocidas, los cuales se tuvieron como base para entender los conceptos asociados a las amenazas.

Después de la parte teórica, para determinar la zonificación de áreas con amenazas por fenómenos de remoción en masa en la cuenca del Río las Ceibas, se realizó un proceso práctico dentro de la cuenca el cual consistió en tres etapas:

7.1.2 Primera Etapa: Recolección de Datos

Se enfocó en las variables específicas de la cuenca de estudio, tales como el relieve relativo, la litología, la humedad del suelo, la actividad sísmica y la precipitación. complementadas con registros históricos de deslizamientos para la fase de validación. Se tomó información de capas geográficas, y datos necesarios en formato shapefile, ráster, bases de datos, para su posterior proceso a través del uso de los sistemas de información geográfico. La información provino de fuentes oficiales y repositorios públicos de entidades nacionales como el

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM).

7.1.2.1 Relieve Relativo

La información topográfica fue obtenida a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) con una resolución espacial de 8 x 8 m suministrado por la autoridad ambiental Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena. Con base en este insumo se generaron los mapas de pendiente y relieve relativo, los cuales fueron reclasificados conforme a los intervalos definidos por la metodología. Este insumo fue la base topográfica de la aplicación de la metodología.

7.1.2.2 Litología, Geología y Sismicidad

Para la obtención de la información geológica, litológica y sísmica correspondiente al área de estudio, se realizó una solicitud formal de datos al Servicio Geológico Colombiano (SGC) mediante oficio radicado ante dicha entidad. Esta gestión permitió acceder a insumos oficiales, los cuales incluyen mapas temáticos a escalas 1:25.000, bases de datos y estudios asociados a la caracterización geológica, litológica y a la actividad sísmica a escala espaciotemporal (1993 - 2025).

La información suministrada fue empleada como base para la delimitación de unidades litológicas, la identificación de estructuras geológicas relevantes y la caracterización de información sísmica disponible por el SGC. En este contexto, con información adicional del POMCA (2023) se identificaron fallas geológicas denominadas Falla de Baraya, Falla de Poterillo Rivera, y Falla de Algeciras; las dos primeras localizadas en la parte media de la cuenca y la última en la parte alta es pertinente indicar que estas fallas según el POMCA, (2023), son

identificadas como *Falla inversa o de cabalgamiento definida*. En el caso de la cuenca esta información, garantiza la coherencia y precisión de los insumos utilizados en la evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

Además de la información suministrada directamente por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) mediante oficio, se consultaron fuentes oficiales disponibles en sus plataformas institucionales, como libros, geovisores y servicios WMS.

7.1.2.3 Humedad del Suelo y Precipitación

Como fuente oficial de información hidrometeorológica, se emplearon los registros capturados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), con el fin de obtener las series históricas de precipitación correspondientes a las estaciones localizadas dentro y en sus alrededores de la cuenca de estudio.

Para garantizar la representatividad temporal y la calidad de los análisis, se seleccionó un rango de 16 años, comprendido entre los años 2009 y 2024, periodo que garantizó la cantidad de datos suficiente para identificar tendencias, variabilidad interanual y eventos extremos relevantes en el régimen de lluvias. La elección de este intervalo de tiempo se basó en la disponibilidad y continuidad de datos reportados por las estaciones pluviométricas e hidrometeorológicas activas.

Una vez establecida las bases de los datos de precipitación diaria recolectadas del portal DHIME del IDEAM, se identificaron los datos faltantes; por lo que se procedió a calcular los mencionados datos haciendo uso de la metodología U.S National Weather Service o cuadrado inverso de la distancia con la siguiente ecuación:

$$P_X = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad W_i = \frac{1}{D_i^2}$$

Donde:

P_x : Dato perdido para el día, mes o año en la estación X .

P_i : Dato existente en la estación i , para el mismo día, mes o año

D_i : Distancia entre cada estación i y la estación del dato perdido

n : Es el número total de estaciones vecinas utilizadas (mínimo 2).

Posteriormente, consolidada la base de datos de precipitación diaria correspondiente al periodo 2009 - 2024, se procedió a determinar la variable de humedad del suelo; esta fue estimada con los registros de precipitación media mensual aplicando un modelo de interpolación con técnicas de Kriging y reclasificados por rangos de humedad relativa a través del uso de los SIG.

Seguidamente, se incorporaron los factores detonantes. Para el caso específico del factor denominado precipitación, se utilizó información diaria histórica de lluvias intensas en el periodo establecido en este estudio, determinando los eventos extremos de precipitación diaria en un periodo de retorno de 100 años con el fin de caracterizar los eventos de lluvias críticas capaces de inducir deslizamientos.

7.1.2.4 Datos Históricos

La información del inventario histórico de deslizamientos fue obtenida a partir de diferentes fuentes oficiales con el fin de garantizar su confiabilidad y actualidad. En primer lugar, se emplearon los registros suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) que tienen en sus archivos correspondiente al POMCA y a las visitas que se realizan como seguimiento por parte de la entidad. Igualmente, información del Servicio Geológico Colombiano (SGC), estos mediante la solicitud formal de información a través de oficios institucionales.

Adicionalmente, se consultaron bases de datos y plataformas oficiales como el SIMMA (Sistema de Información de Movimientos en Masa) <https://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/> y

portales como Colombia en Mapas <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>, los cuales proporcionan información georreferenciada y validada sobre la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa a nivel nacional.

Para el componente de datos georreferenciados históricos, se consideraron todos los registros geográficos dentro de los límites de la cuenca en estudio, teniendo en cuenta como elementos mínimos de cada registro incluyera la coordenada plana (X, Y) o geográfica (Latitud, Longitud), el tipo de fenómeno de remoción en masa, y fecha del evento. Esta información nos permitió identificar el comportamiento espacial del fenómeno de remoción en masa en la cuenca para su posterior contraste con la zonificación.

7.2 Segunda Etapa: Herramientas tecnológicas

La incorporación de herramientas tecnológicas constituye un componente fundamental en los procesos de análisis territorial y en la evaluación de amenazas asociadas a fenómenos naturales. Estas herramientas permiten no sólo sistematizar y organizar la información, sino también realizar análisis espaciales detallados que facilitan la interpretación de las dinámicas del territorio.

Investigadores como Pengju et al. (2023) establecen que en la actualidad la aplicación de la tecnología SIG (Sistema de Información Geográfica) se expande cada vez más, permitiendo analizar y visualizar datos espaciales de manera intuitiva y fácil de comprender mediante la visualización en mapas. A su vez, Quanpeng Ji (2024) ratifica que un Sistema de información geográfica (SIG) es un sistema que almacena, gestiona y recopila datos geoespaciales; agregando que su uso se ha extendido en los campos de la teledetección, geofísica e incluso en

investigaciones que correlacionan factores geomorfológicos con la distribución de deslizamientos mediante el software *ArcMap 10.8*.

En este estudio, se empleó el software *ArcMap 10,8* desarrollado por Esri, como plataforma principal para el procesamiento, análisis y representación cartográfica de la información geoespacial obtenida en la fase de recolección de datos. Este programa es ampliamente reconocido en el campo de los SIG, permitió generar los mapas temáticos de las diferentes variables espaciales presentes en la cuenca, optimizando la generación de productos cartográficos y el análisis espacial requerido para la aplicación del modelo de zonificación de amenazas por remoción en masa propuesto por Mora y Vahrson (1993).

El desarrollo de los procedimientos técnicos se llevó a cabo mediante el uso de las herramientas disponibles en el componente *ArcToolbox*, particularmente *Data Management Tools*, *Raster Processing*, *Spatial Analyst Tools* y *3D Analyst Tools*. Estas herramientas facilitaron la construcción y el tratamiento de las capas temáticas necesarias para la evaluación de los factores pasivos, detonantes y de validación contemplados, garantizando coherencia, reproducibilidad y consistencia en los resultados obtenidos.

Adicionalmente, se empleó el uso del Software de *Excel*, como herramienta de apoyo para el procesamiento y gestión de información alfanumérica. Este software fue utilizado para la organización, depuración y análisis preliminar de las bases de datos asociadas a variables como precipitación, sismicidad e inventarios históricos de deslizamientos para finalmente integrar la información en los geoprocesos requeridos en la zonificación desarrollados en el aplicativo de *ArcMap 10.8*.

7.3 Caracterización de la Amenaza

En esta etapa se desarrolló la fase de integración de la información recolectada, mediante la aplicación de las ecuaciones propuestas por los autores Mora y Vahrson para el cálculo de las variables morfodinámicas y detonantes. A partir de este proceso se elaboraron los siguientes diagramas que representan espacialmente el proceso realizado para la obtención de los elementos pasivos (relieve relativo, litología y humedad del suelo) y los factores de disparo (actividad sísmica y precipitación). Estos fueron fundamentales para zonificar la cuenca ante el fenómeno de remoción en masa.

Con el propósito de facilitar la comprensión del procedimiento técnico y la secuencia metodológica aplicada, se presentan a continuación los diagramas de flujo elaborados para cada una de las variables que conforman el modelo. Es importante señalar que se emplearon los parámetros establecidos por la Metodología de Mora y Vahrson para la clasificación de cada una de las variables.

Los criterios de clasificación y ponderación utilizados para cada variable fueron definidos con base en los rangos establecidos originalmente por Mora y Vahrson (1993). A continuación, se presentan los diagramas que componen el marco metodológico y describen el flujo de trabajo para cada factor pasivo y detonante empleado en el modelo:

7.3.1 Relieve Relativo

Esta variable fue determinante en la identificación de zonas susceptibles, dado que la pendiente condiciona directamente la estabilidad del terreno. En la figura 5 resumen el proceso para determinar el relieve relativo se desarrolló a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) con resolución espacial de 8 metros, suministrado por la Corporación Autónoma Regional del

Alto Magdalena (CAM). Inicialmente, se delimitó el área de estudio mediante la herramienta *Clip* del entorno *ArcMap 10.8*, recortando el DEM a los límites de la cuenca.

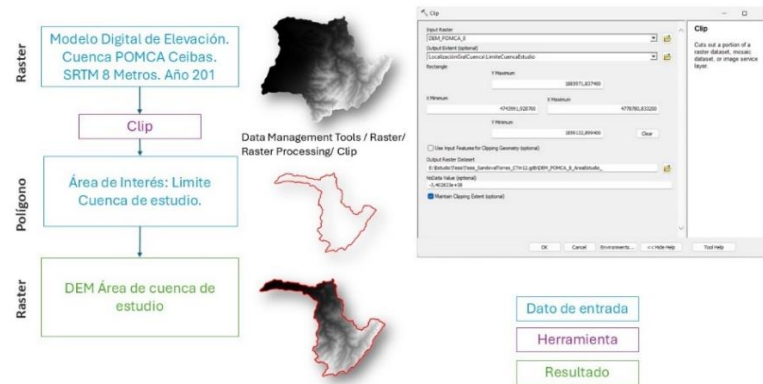


Figura 5 Pasos metodológicos para la obtención del DEM del área de Cuenca de estudio

Posteriormente, y como se evidencia en la figura 6 se aplicó la herramienta *Slope* del módulo *Spatial Analyst Tools*, la cual permitió calcular el gradiente de pendientes expresado en grados. El resultado obtenido constituye la base para el análisis morfométrico del relieve, al reflejar la variación altitudinal y la distribución espacial de las zonas de mayor inestabilidad potencial.

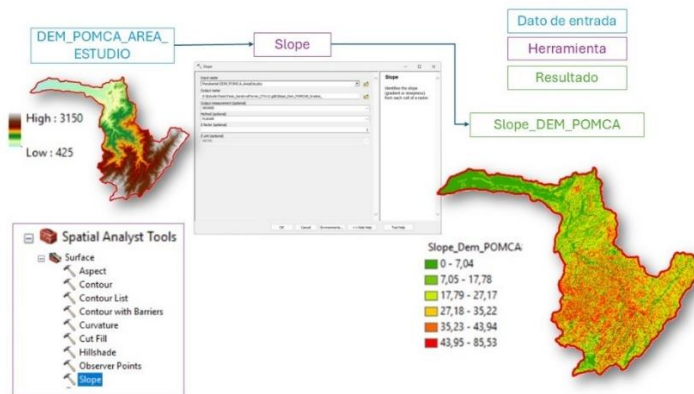


Figura 6 Pasos metodológicos para la obtención de Slope

Posterior al cálculo de la pendiente, y como se evidencia en la figura 7 se procedió a realizar la reclasificación de los valores obtenidos, de acuerdo con los intervalos definidos por la

metodología de Mora y Vahrson (1993). Este procedimiento se efectuó mediante la herramienta *Reclassify* del módulo *Spatial Analyst Tools* en *ArcMap10.8*, asignando valores jerárquicos de 0 a 6, correspondientes a las categorías de muy bajo, bajo, medio, moderado, alto, muy alto y extremo.

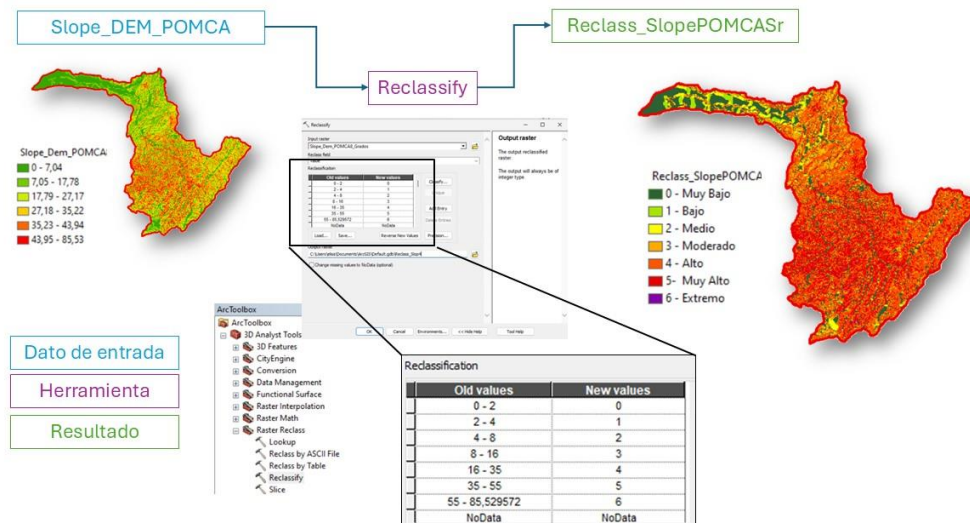


Figura 7 Pasos metodológicos para la obtención del relieve relativo en la cuenca

El resultado final generó un modelo reclasificado del relieve relativo de la cuenca del río Las Ceibas, el cual constituye uno de los factores pasivos fundamentales en la determinación de la estabilidad morfodinámica para ser aplicada en la zonificación final.

7.3.2 Litología y Geología

El componente litológico constituye otro de los factores en la zonificación por fenómenos de remoción en masa, dado que las propiedades físicas y mecánicas de los materiales del subsuelo influyen directamente en la estabilidad de las laderas. En esta fase, se empleó la información geológica y geomorfológica disponible del Servicio Geológico Colombiano (SGC),

la cual fue procesada y transformada a formato ráster mediante la herramienta *Polygon to Raster* de *ArcMap10,8* del conjunto de herramientas *Conversion Tools*.

Posteriormente, como se evidencia en la figura 8 se aplicó un proceso de reclasificación (*Reclassify*) con base en los criterios establecidos por Mora y Vahrson (1993), asignando a cada unidad litológica un valor de factor de susceptibilidad de acuerdo con su resistencia, grado de consolidación y susceptibilidad a la meteorización. De esta manera, se obtuvo el mapa litológico, que refleja la distribución espacial de los niveles de susceptibilidad litológica dentro de la cuenca. El resultado final, corresponde al mapa de factor litológico categorizado a valores entre 1 (baja) y 5 (muy alta) según la categorización establecida en la metodología de los autores.

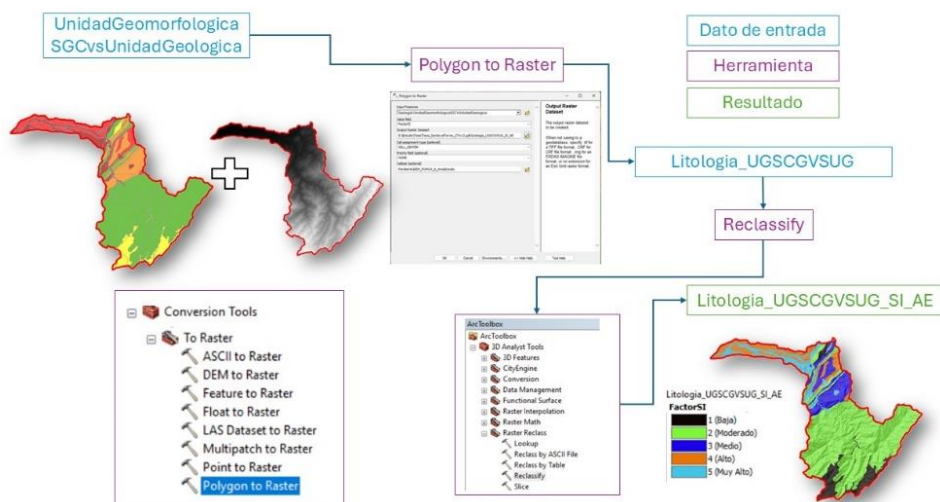


Figura 8. Pasos metodológicos para la obtención del factor litológico.

7.3.3 Humedad del Suelo y Precipitación

La variable de humedad del suelo representa un componente esencial dentro del análisis morfodinámico de la cuenca, dado que actúa como un indicador indirecto del grado de saturación y, por ende, de la estabilidad de los materiales superficiales. La figura 9 presenta el proceso

elaborado para la estimación de la humedad del suelo. En primer lugar, se realizó a partir de los registros de precipitación media mensual correspondientes a los 16 años, obtenidos de las 14 estaciones meteorológicas del IDEAM ubicadas dentro y en los alrededores de la cuenca.

Posteriormente, se aplicó el método de interpolación Kriging, disponible en la extensión *Spatial Analyst Tools*, lo que permitió modelar la variabilidad espacial de la precipitación y generar superficies continuas de distribución. Posteriormente, los 12 mapas interpolados fueron reclasificados con base en los intervalos establecidos por la metodología de Mora y Vahrson (1993), asignando valores de susceptibilidad establecidos en la metodología, en función del grado de humedad relativa.



Figura 9. Procesos metodológicos para la obtención del factor de Humedad Sh

De este proceso se obtiene una capa que fue reclasificada mediante la herramienta de *Reclassify*, asignando valores de susceptibilidad de acuerdo con los intervalos establecidos en la metodología de Mora y Vahrson (1993). La aplicación de esta metodología permitió obtener una

representación continua del comportamiento de la humedad de la cuenca clasificándose como bajo acorde a la metodología.

7.3.4 Sismicidad

La figura 10 muestra el procedimiento desarrollado para la obtención del mapa de sismicidad dentro de la cuenca del río Las Ceibas. El proceso inició con la recopilación de datos sísmicos oficiales proporcionados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el cual contiene registros de aceleración pico del suelo (PGA) y eventos sísmicos relevantes con su respectiva localización geográfica en áreas de la cuenca.

Con esta información se elaboró una base de datos espacial que fue sometida al proceso de interpolación Kriging, mediante la extensión *Spatial Analyst Tools*. Esto permitió generar una superficie continua de distribución de intensidades sísmicas (PGA), expresando los valores de aceleración esperada en función de la magnitud y proximidad de los eventos registrados. El resultado del Kriging evidenció una gradación espacial de la amenaza sísmica, con mayores intensidades proyectadas hacia los sectores norte y centro de la cuenca.

Posteriormente, la capa resultante fue reclasificada utilizando la herramienta *Reclassify*, con el fin de asignar valores conforme a los rangos definidos en la metodología de Mora y Vahrson (1993). De esta manera, se generó el mapa final de sismicidad reclasificada, el cual fue incorporado como factor detonante dentro del modelo de zonificación de amenaza por remoción en masa.

Este proceso permitió representar de forma espacial la influencia de la actividad sísmica sobre la estabilidad de las laderas, constituyéndose en un insumo para el mapa de zonificación en la cuenca.

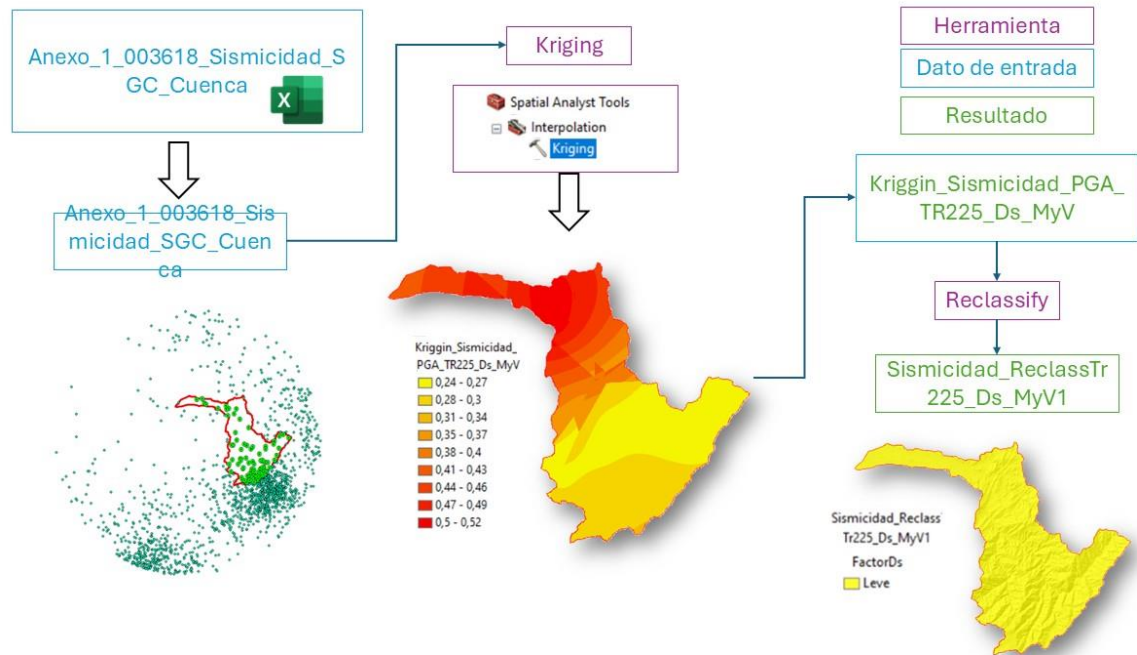


Figura 10. Procesos metodológicos para la obtención del factor de Sismicidad.

7.3.5 Precipitación diaria 24 horas

La figura 11 muestra el procedimiento metodológico para obtener el mapa de precipitación máxima diaria en el área de la cuenca del río Las Ceibas. Para ello, se obtuvieron los datos de precipitación diaria correspondiente al periodo 2009 – 2024 de las estaciones meteorológicas del IDEAM en el área de la cuenca y sus alrededores. Posteriormente, se estimaron los valores de precipitación máxima en 24 horas en un tiempo de retorno (Tr) de 100 años para cada una de las catorce estaciones meteorológicas.

Con los resultados de los eventos de lluvias estimados en periodos de retorno de 100 años se elaboró la data geoespacial de precipitación máxima diaria en la cuenca, seguidamente, se aplicó el modelo estadístico de interpolación “Kriging”, mediante la extensión *Spatial Analyst*

Tools a fin de estimar y representar los valores espaciales de lluvias máximas en el área de la cuenca.

Finalmente, la capa rasterizada producto de los procesos anteriores fue reclasificada mediante el uso de la herramienta Reclassify, con el fin de asignar los valores conforme a los rangos definidos en la metodología de Mora y Vahrson (1993). Obteniendo el mapa final de precipitación máxima diaria en un tiempo de retorno de 100 años reclasificado, el cual fue integrado como uno de los factores detonantes en el modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa

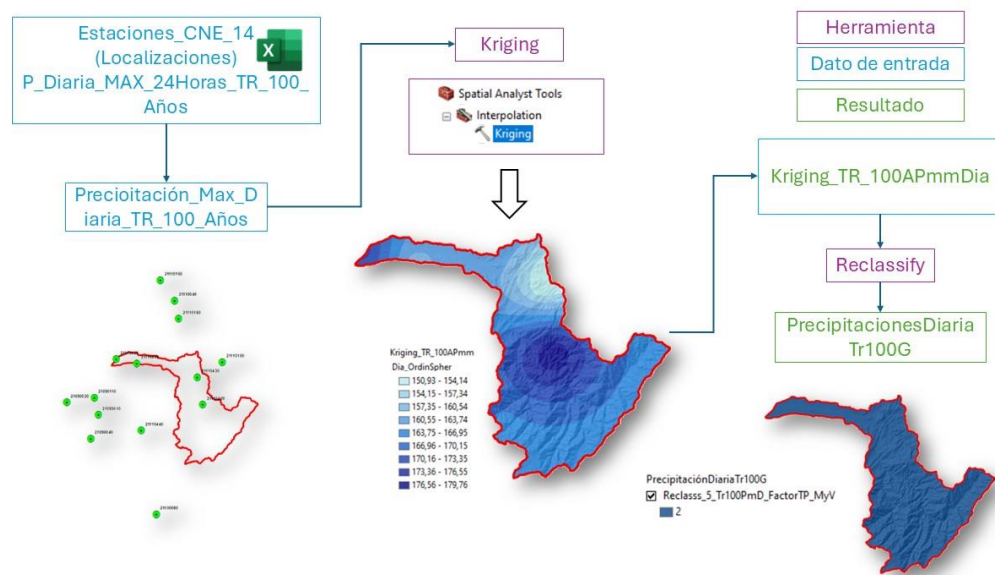


Figura 11. Procesos metodológicos para la obtención del factor de precipitación máxima diaria Tr 100

7.3.6 Zonificación

La figura 12 presenta la fase de integración de los resultados obtenidos en los componentes pasivos y detonantes, proceso mediante el cual se generó la zonificación final de susceptibilidad por movimientos en masa en la cuenca del río Las Ceibas.

En esta etapa, los factores pasivos (relieve relativo, litología y humedad del suelo) fueron combinados con los factores de disparo (sismicidad y precipitación diaria en 24 horas) a través de operaciones de álgebra de mapas, utilizando la herramienta *Raster Calculator* del módulo *Spatial Analyst Tools* del software *ArcMap 10.8*.

Cada una de las variables fue previamente reclasificada y ponderada conforme a los criterios establecidos en la metodología de Mora y Vahrson (1993), con el fin de garantizar que su contribución al modelo refleje su nivel de incidencia. Mediante esta operación algebraica se obtuvo un mapa síntesis, en el que se integran los diferentes niveles de susceptibilidad derivados de la interacción de las variables morfodinámicas y de disparo.

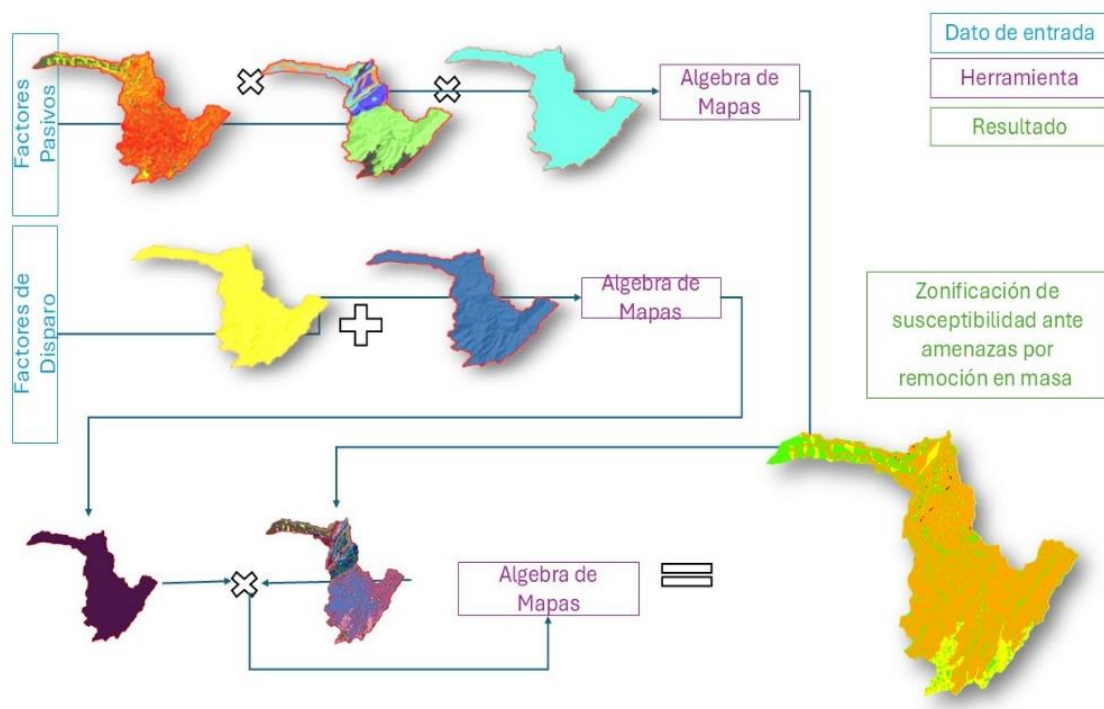


Figura 12. *Proceso de zonificación de susceptibilidad ante amenazas por remoción en masa.*

El resultado final corresponde al mapa de zonificación de susceptibilidad ante amenazas por remoción en masa, el cual permite identificar las áreas más propensas a la ocurrencia de

fenómenos de remoción en masa dentro de la cuenca. Este producto constituye un insumo fundamental para validar posteriormente con los registros de datos históricos en la cuenca.

7.3.7 Validación Espacial de la zonificación con registros históricos.

Con el propósito de evaluar la correspondencia espacial del modelo de Mora y Vahrson en la cuenca del Río Las Ceibas, se realizó un proceso comparativo entre la zonificación de amenaza obtenida y el inventario histórico georreferenciado de fenómenos de remoción en masa suministrado por la CAM y el Servicio Geológico Colombiano.

La validación se desarrolló mediante un análisis de superposición espacial utilizando la herramienta *intersect* a través del software *ArcMap 10,8*, como se evidencia en la figura 13, entre la distribución de los eventos históricos dentro de cada categoría de susceptibilidad de amenazas identificado en la cuenca. Posteriormente, se efectuó un análisis de concentración de eventos por categoría, con el fin de validar la correspondencia espacial entre las zonas clasificadas y la ocurrencia histórica de procesos de remoción en masa en la cuenca.

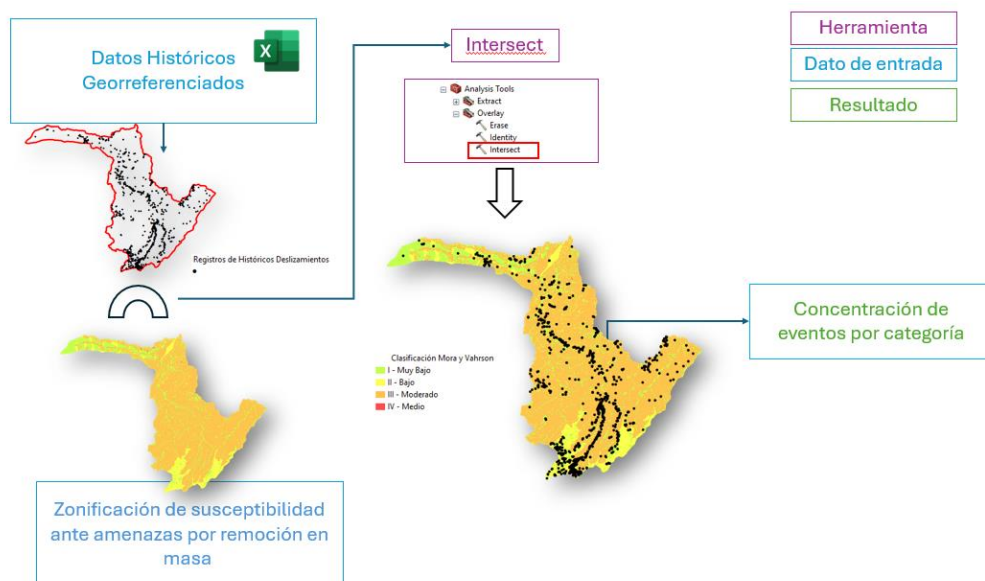


Figura 13. Validación espacial de la zonificación de susceptibilidad ante amenazas por remoción en masa y datos históricos

8 Análisis y resultados

8.1 Diagnóstico de condiciones de la cuenca.

El diagnóstico de las condiciones de la cuenca permitió identificar las principales características físicas de la cuenca que hacen parte de los parámetros pasivos y de disparo para la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa en el área de estudio.

8.1.2 Pendiente

La caracterización morfométrica de la cuenca incluyó la elaboración de un mapa temático de pendientes, con el propósito de identificar la distribución espacial de la inclinación del terreno en la cuenca como insumo de elemento pasivo para la aplicación de la metodología. Para ello, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución espacial de 8x8 metros, suministrado por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), y procesado mediante el software *ArcMap* 10.8.

El resultado del análisis permitió clasificar las pendientes en seis rangos expresados en grados (Ver figura 14), los cuales fueron representados cartográficamente mediante una escala de colores que facilita la interpretación visual del relieve.

El mapa de la figura 14 permitió establecer la distribución espacial de las pendientes, un factor clave para comprender la dinámica de inestabilidad de las laderas en la cuenca. A partir del modelo digital de elevación y su clasificación en intervalos de 0–7°, 7–17°, 17–27°, 27–35°, 35–44° y superiores a 44°, se observa que el relieve predominante corresponde a terrenos fuertemente inclinados, un ejemplo representativo es la Reserva La Siberia y Santa Rosalia, localizadas en la parte alta de la cuenca a aproximadamente 3.192 m s. n. m. sobre la cordillera

Oriental, donde predominan pendientes elevadas asociadas a ambientes de montaña de alta energía geomorfológica.

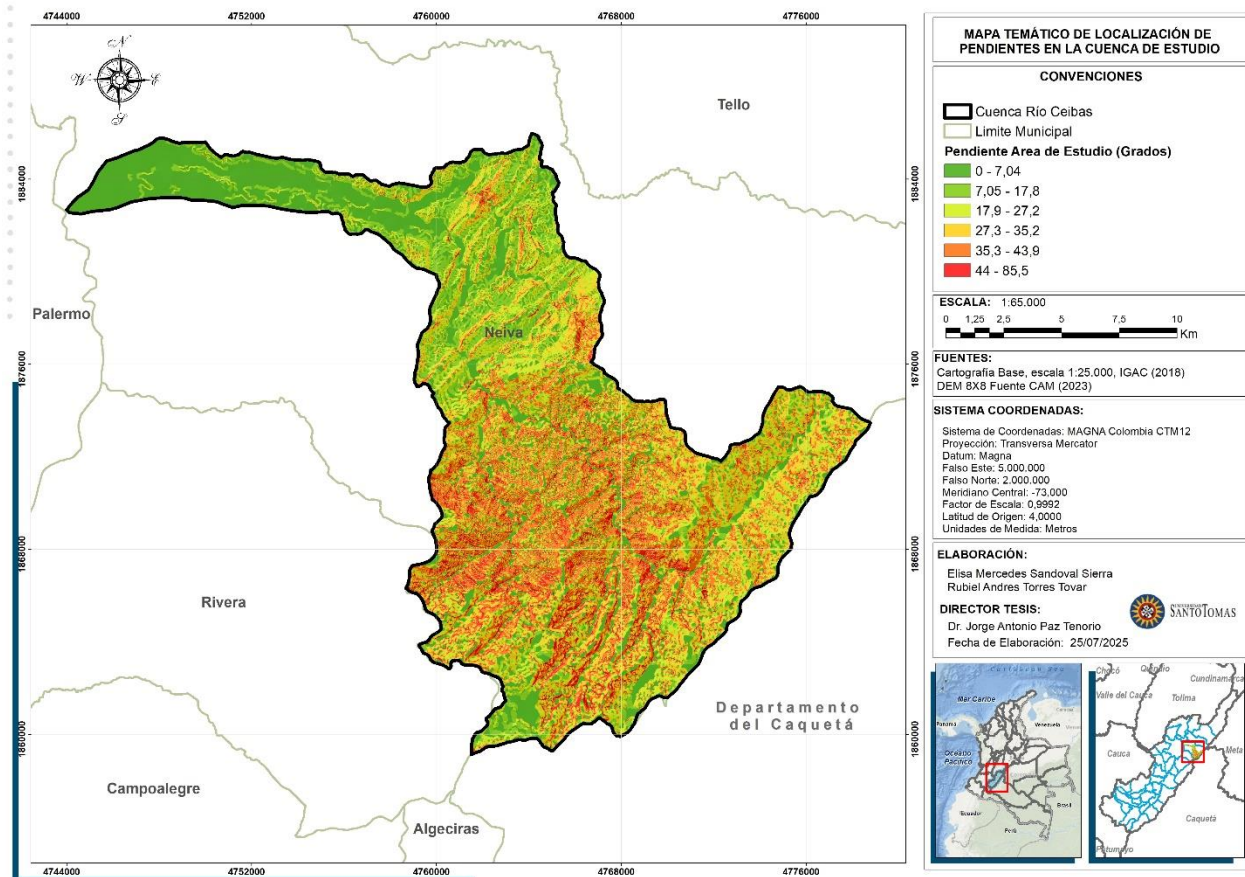


Figura 14. Mapa temático de localización de pendientes en el área de la cuenca.

La mayor extensión de la cuenca se encuentra en rangos superiores a 27°, lo que refleja un paisaje abrupto y de alta energía. En particular, las pendientes entre 27° y 44° representados en tonalidades anaranjadas y rojas, predominan en la parte central, suroeste y oriental de la cuenca cubren una parte significativa de las zonas medias y altas, donde se combinan laderas alargadas y sistemas de drenaje encajados. Estos sectores presentan condiciones favorables para la generación de movimientos en masa debido a la escasa estabilidad que ofrecen los materiales frente a la gravedad y a la infiltración de agua.

Según Paz Tenorio et al. (2011), en contextos de laderas urbanizadas de Chiapas (México), cuando las pendientes superan los $\sim 30^\circ$ se incrementa de modo notable la probabilidad de inestabilidad, debido a la pérdida de cubierta vegetal, armados inadecuados y excavaciones en talud.

Las áreas con pendientes mayores a 44° se concentran en la parte alta de la cuenca, asociadas a cañones y escarpes montañosos. En estas zonas, la fuerte inclinación, sumada a la presencia de fracturas y procesos de meteorización avanzada, aumenta notablemente la probabilidad de deslizamientos de gran magnitud.

Por el contrario, en los rangos inferiores a 17° , ubicados principalmente en el sector bajo de la cuenca, predominan terrazas y planicies aluviales que ofrecen condiciones de mayor estabilidad. No obstante, en estas áreas también pueden ocurrir procesos superficiales como reptación o deslizamientos pequeños cuando los suelos alcanzan altos niveles de saturación durante la temporada de lluvias. Las zonas planas o de suave inclinación (0° a 7°), identificadas en color verde, se localizan mayoritariamente en el norte y en sectores puntuales del sureste de la cuenca, y en general no presentan eventos de remoción en masa.

A partir de estos resultados, se estima que más del 60% del área de la cuenca presenta pendientes que superan los 27° , lo cual convierte a la topografía en uno de los factores más determinantes en la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa. Este diagnóstico confirma que la inclinación del terreno es un condicionante fundamental para la zonificación de amenazas y constituye un insumo esencial para la aplicación de la metodología de Mora y Vahrson (1993).

8.1.3 Geomorfología componente geológico, geomorfológico y litológico

Analizar conjuntamente la geología y la geomorfología de la cuenca del río Las Ceibas permitió identificar las principales unidades que condicionan la estabilidad del terreno y su susceptibilidad frente a fenómenos de remoción en masa. Teniendo en cuenta información del Servicio Geológico Colombiano y de la CAM (2023), el área de estudio se encuentra dominada por un contexto estructural cordillerano correspondiente a la cordillera Oriental, caracterizado por un régimen tectónico compresivo activo y la presencia de sistemas de fallas inversas o de cabalgamiento. *En este dominio afloran rocas metamórficas del Grupo Garzón (pEgg), que constituyen el núcleo cordillerano, así como cuerpos ígneos intrusivos, representados principalmente por el Monzogranito de Algeciras (Ja), cuya cristalización plutónica en profundidad les confiere una textura fanerítica y una alta competencia mecánica en estado intacto.* Adicionalmente, se reconocen unidades volcánicas y volcano-sedimentarias del Jurásico, como la Formación Saldaña (Js), asociadas a materiales ígneos extrusivos, cuyo enfriamiento superficial genera estructuras más fracturadas y, por tanto, mayor susceptibilidad a procesos de alteración y meteorización.

Así mismo, en la cuenca existen depósitos coluviales, los cuales, según el POMCA (2023), corresponden a acumulaciones de sedimentos generados por procesos gravitacionales asociados al desprendimiento y transporte de derrubios de ladera, así como y por depósitos aluviales de origen más reciente.

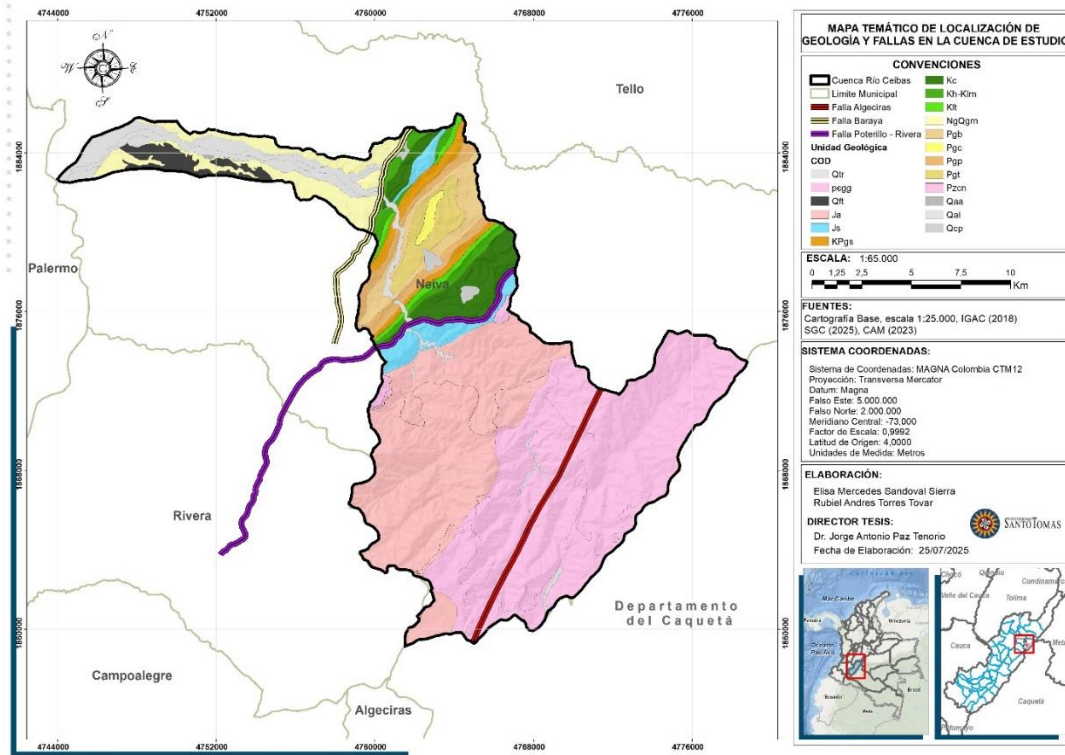


Figura 15. Mapa temático de localización de geología en el área de la cuenca.

Fuente: Elaboración Propia, (2025) Con cartografía SGC

El análisis geológico y geomorfológico permitió reconocer la diversidad de unidades litológicas presentes en la cuenca, las cuales determinan en gran medida el comportamiento de las laderas frente a los procesos de inestabilidad.

El mapa geológico de la cuenca del río Las Ceibas presente en la figura 15, representa la distribución espacial de las principales unidades litológicas y estructurales que conforman el territorio. En él se identifican contrastes marcados entre los sectores montañosos del norte y occidente, dominados por materiales ígneos y metamórficos, y las zonas bajas del sur y oriente, donde predominan depósitos sedimentarios y cuaternarios. Se identifican las siguientes formaciones:

Tabla 2. *Formaciones presentes en la cuenca.*

Unidad / Formación	Nomenclatura	Condición estructural	Geomorfo-estructura	Observaciones	Área ha	%
Macizo de Garzón (ígneas y metamórficas)	pcgg	Falla de Algeciras (Falla inversa o de cabalgamiento o definida)	Cordillera / Laderas	Rocas ígneas/metamórficas competentes; alta resistencia mecánica en estado intacto.	11.358,7	37,95
Formación Saldaña	Js	Falla Poterillo – Rivera (Falla inversa o de cabalgamiento o definida)	Cordillera / Laderas	Litologías más compactas y de baja alteración; baja susceptibilidad relativa.	901,7	3,01
Formación Hondita–Loma Gorda	Kh-Klm	Falla de Baraya (Falla inversa o de cabalgamiento o definida)	Laderas	Materiales finos, alta alterabilidad y susceptibilidad a saturación.	631,0	2,11
Formación Seca	KPgs		Laderas	Material con planos de debilidad y mayor tendencia a la meteorización.	629,3	2,10
Depósitos coluviales y aluviales recientes	Qal, Qtr, Qft, Qcp	Falla de Baraya (Falla inversa o de cabalgamiento o definida)	Valles / Terrazas	Materia no consolidada, elevada porosidad y rápida saturación; alta inestabilidad en transiciones.	2.548,2	8,51
Ja (unidad volcánica/afloramientos según mapa)	Ja	Falla Poterillo – Rivera (Falla inversa o de cabalgamiento o definida)	Laderas / Aflojamientos	Rocas volcánicas relativamente competentes, pero con fracturamiento y alteración localizada que puede disminuir estabilidad.	7.812,0	26,10
Kc (unidad carbonática/competente)	Kc	Falla Poterillo – Rivera (Falla inversa o de cabalgamiento o definida)	Laderas / Relieve estructural	Rocas más competentes; la presencia de fracturas y diaclasas determina la susceptibilidad puntual.	1.382,5	4,62
Klt (unidad litológica de transición)	Klt	Falla Poterillo – Rivera (Falla inversa o de	Laderas / Terrazas	Litologías mixtas con niveles de menor cohesión en intercalaciones,	325,7	1,09

Unidad / Formación	Nomenclatura	Condición estructural	Geomorfo-estructura	Observaciones	Área ha	%
NgQgm (depósitos recientes / gravas y materiales mal ordenados)	NgQgm	cabalgamiento o definida) Falla de Baraya (Falla inversa o de cabalgamiento o definida) Sin presencia de Falla	Fondos de valle / abanicos	favoreciendo inestabilidad localizada. Materiales con pobre consolidación y granulometría suelta; alta propensión a flujos y movimientos superficiales. Depende de la litología específica; en general presenta mayor competencia que los depósitos cuaternarios pero puede fracturarse.	1.765,3	5,90
Pgb (unidad paleógena: basamento o depósitos)	Pgb		Laderas / Mesetas	Areniscas/carbonatos con mejor cohesión; la meteorización local y fracturación elevan la susceptibilidad.	882,3	2,95
Pgc (unidad paleógena: carbonatada/arenisca)	Pgc	Sin presencia de Falla	Laderas	Niveles arcillosos o poco consolidados que aumentan su plasticidad y sensibilidad a la saturación.	128,4	0,43
Pgp (unidad paleógena: arcillosa/puestas blandas)	Pgp	Sin presencia de Falla	Laderas / Zonas de transición	Materiales volcánicos alterables; la alteración química incrementa la propensión al colapso superficial.	713,2	2,38
Pgt (unidad paleógena: tobas / depósitos volcánicos alterados)	Pgt	Sin presencia de Falla	Laderas	Litologías antiguas con fracturamiento y orientación de estratos que favorecen desprendimientos dirigidos.	676,0	2,26
Pzcn (unidad paleozoica con planos de debilidad)	Pzcn	Sin presencia de Falla	Laderas / Estratos inclinados	Depósitos fanales y abanicos con granulometría suelta, pobre cimentación y alta susceptibilidad a flujos y colapsos.	170,2	0,57
Qaa (abanico aluvial / depósitos fangosos y gravas mal ordenadas)	Qaa	Falla Poterillo – Rivera (Falla inversa o de cabalgamiento o definida)	Abanicos / Terrazas		8,5	0,03

Fuente: *Elaboración Propia, (2025) Con cartografía SGC.*

Las unidades ígneas y metamórficas, asociadas al Macizo de Garzón (pegg), ocupan gran parte del sector suroriental de la cuenca aproximadamente el 37,95% del total de la cuenca. Estas rocas, aunque resistentes en su estado intacto, presentan un alto grado de fracturamiento y meteorización, condiciones que las hacen vulnerables a deslizamientos profundos cuando se combinan con fuertes pendientes y saturación hídrica.

En el sector central y noroccidental aparecen las formaciones sedimentarias (Jurásico y Cretácico), como Saldaña (Js), Hondita–Loma Gorda (Kh-Klm) y Seca (KPgs) correspondiente al 7,22% de la cuenca. Estas litologías, conformadas por lutitas, areniscas y limolitas, poseen una cohesión relativamente baja y son propensas a la infiltración de agua, lo que las ubica en categorías de susceptibilidad media.

Por otra parte, los depósitos cuaternarios (Qal, Qtr, Qft, Qcp) se localizan principalmente en la desembocadura de la cuenca, en el fondo de valle, y en el área de los abanicos aluviales ocupando un 8,51% de la cuenca. Estos materiales, de carácter poco consolidado y alta porosidad, presentan la mayor susceptibilidad a la inestabilidad, especialmente en las zonas de transición de las laderas empinadas. Así mismo, este tipo de materiales pueden presentar fenómenos de reptación y erosión lateral durante crecientes súbitas sobre todo al costado del río Las Ceibas.

Desde el punto de vista estructural, como se evidenció en la figura 15 y en la tabla 2, la cuenca del río Las Ceibas se encuentra influenciada por un conjunto de tres fallas geológicas de carácter invertidas o de cabalgamiento, las cuales evidencian un papel en la configuración del relieve, en la fracturación de los materiales ahí presentes, estas fallas también desempeñan un papel en los procesos de inestabilidad. Según el POMCA (2023), estas fallas denominadas Falla

de Baraya, Falla de Poterillo Rivera y Falla de Algeciras; las dos primeras localizadas en la parte media de la cuenca y la última en la parte alta.

En el Diagnóstico del POMCA (2023), identifican una *“relación espacial significativa entre los corredores de estas fallas y la concentración de discontinuidades superficiales (familias de diaclasas) y la densidad de movimientos en masa”*. Adicionalmente, dentro de este componente indican que estas fallas y las condiciones estructurales favorecen la alteración mecánica de las rocas, incrementando su grado de debilidad y su susceptibilidad frente a los procesos de remoción en masa.

Adicionalmente, la CAM (2023) en el mismo diagnóstico señala una clara coincidencia entre las zonas de influencia de los sistemas de fallas y la mayor densidad de movimientos en masa registrados en la cuenca, lo que permite inferir que dichas estructuras actúan como factores condicionantes de la inestabilidad del terreno. En este sentido, las fallas no solo controlan la fragmentación y el comportamiento geomecánico de los materiales, sino que también funcionan como elementos contribuyentes a la sismicidad regional y a la activación de procesos de inestabilidad, especialmente en sectores con pendientes pronunciadas y litologías altamente fracturadas.

La distribución espacial de estas unidades refleja la interacción entre procesos tectónicos, sedimentarios y denudacionales que han modelado la cuenca, configurando un paisaje de alta heterogeneidad litológica, geomorfológica y estructural. Estas características geológicas de la cuenca constituyen una determinante clave para conocer la distribución de los elementos y su incidencia al aplicar la metodología ante fenómenos de remoción en masa.

En conclusión, la geología de la cuenca evidencia una combinación de materiales duros fracturados en la parte alta y depósitos no consolidados en los sectores medios y bajos. Esta

configuración geológica constituye un escenario altamente susceptible a la inestabilidad, sobre todo en las transiciones entre unidades litológicas contrastantes.

8.1.4 Precipitación

El análisis del comportamiento de la precipitación en la cuenca del Río Las Ceibas constituye un elemento esencial para la comprensión de las dinámicas hidrometeorológicas que inciden en la susceptibilidad a movimientos en masa. Dada la marcada variabilidad morfológica de la cuenca caracterizada por gradientes altitudinales que van desde zonas montañosas con elevaciones hasta los 3150 m.s.n.m a elevaciones más bajas en donde se presentan valores de 425 m.s.n.m, las condiciones topográficas juegan un papel determinante en la distribución espaciotemporal de la precipitación.

En particular, las zonas de mayor altitud tienden a registrar un incremento en los volúmenes de precipitación debido a efectos orográficos, lo cual repercute directamente en los regímenes de escorrentía y en la generación de condiciones propicias para inestabilidades del terreno. Por lo anterior, y para entender el comportamiento de la precipitación en el área de estudio, se consideraron los datos correspondientes a las 14 estaciones seleccionadas en el área de que cumplieron los criterios estudio (Ver figura 16) realizando un análisis mensual multianual por estación.

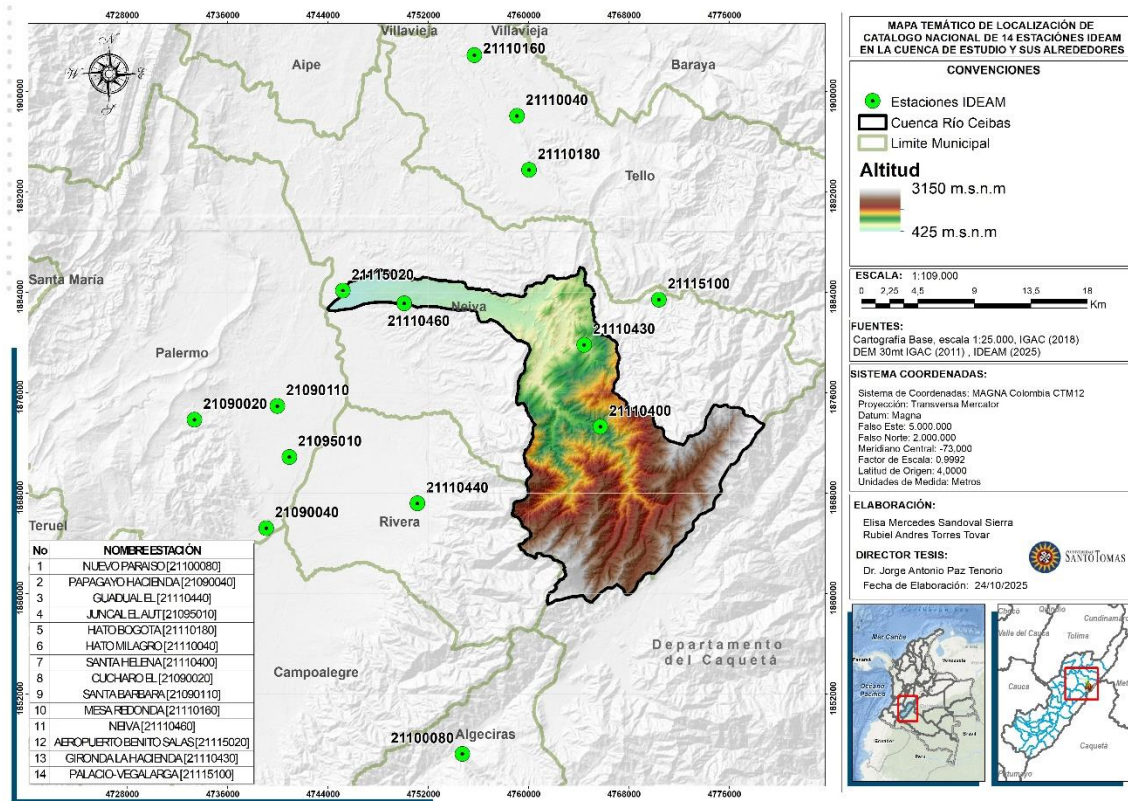


Figura 16. Mapa de Localización Estaciones IDEAM Área de Estudio.

8.1.4.1 Distribución espaciotemporal de la precipitación media mensual multianual en la cuenca

El análisis de la precipitación mensual multianual realizado a las catorce estaciones hidrometeorológicas del IDEAM ubicadas en la Cuenca del Río Las Ceibas y su zona de influencia, correspondiente al periodo 2009 - 2024; fue una herramienta para comprender la dinámica hidro climática de la cuenca hidrográfica del Río Las Ceibas, al permitir identificar los patrones de variabilidad temporal y espacial que regulan el ciclo hidrológico.

El tratamiento estadístico de las series permitió identificar la estructura mensual en los 16 años de análisis de los registros de la precipitación, evidenciando los patrones típicos del régimen bimodal característico del piedemonte andino. Los datos de precipitación media mensual multianual de las 14 estaciones seleccionadas en el presente estudio sirvieron como

insumo base para establecer los valores de precipitación espaciotemporal en la cuenca de interés a través de la aplicación del modelo geoestadístico Kriging; obteniendo la representación gráfica media del comportamiento geoespacial y temporal de las lluvias en los 12 meses de cada año en el periodo de los 16 años seleccionados. En las figuras 17 y 18 se muestra un comportamiento variable en magnitud y distribución espacial - temporal, condicionado por la altitud y la dinámica orográfica de la cuenca, con máximos de precipitación entre abril - mayo y octubre - noviembre, y mínimos en los meses de junio a agosto, periodo caracterizado por condiciones secas. En conjunto, los mapas reflejan el comportamiento pluviométrico del sistema andino del río Las Ceibas, donde los sectores altos y medios presentan los mayores volúmenes de lluvia y los sectores bajos evidencian condiciones más secas e irregulares a lo largo del tiempo de observación.

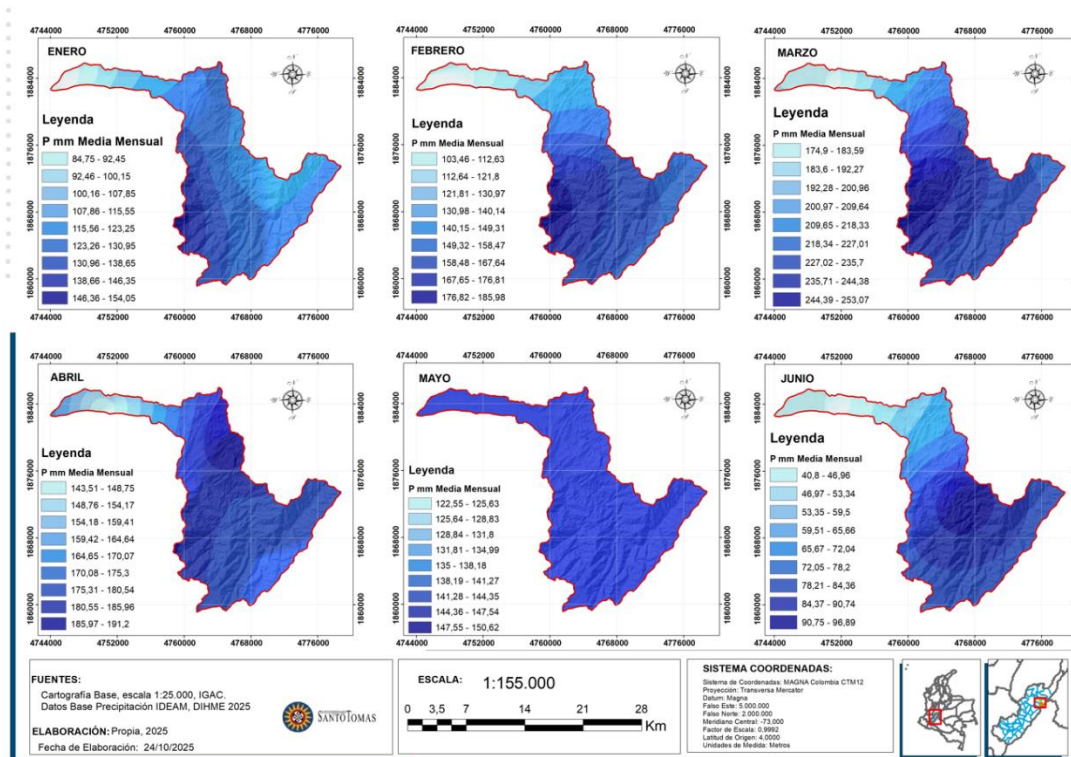


Figura 17. Distribución espaciotemporal de la precipitación media mensual multianual en la cuenca I Semestre

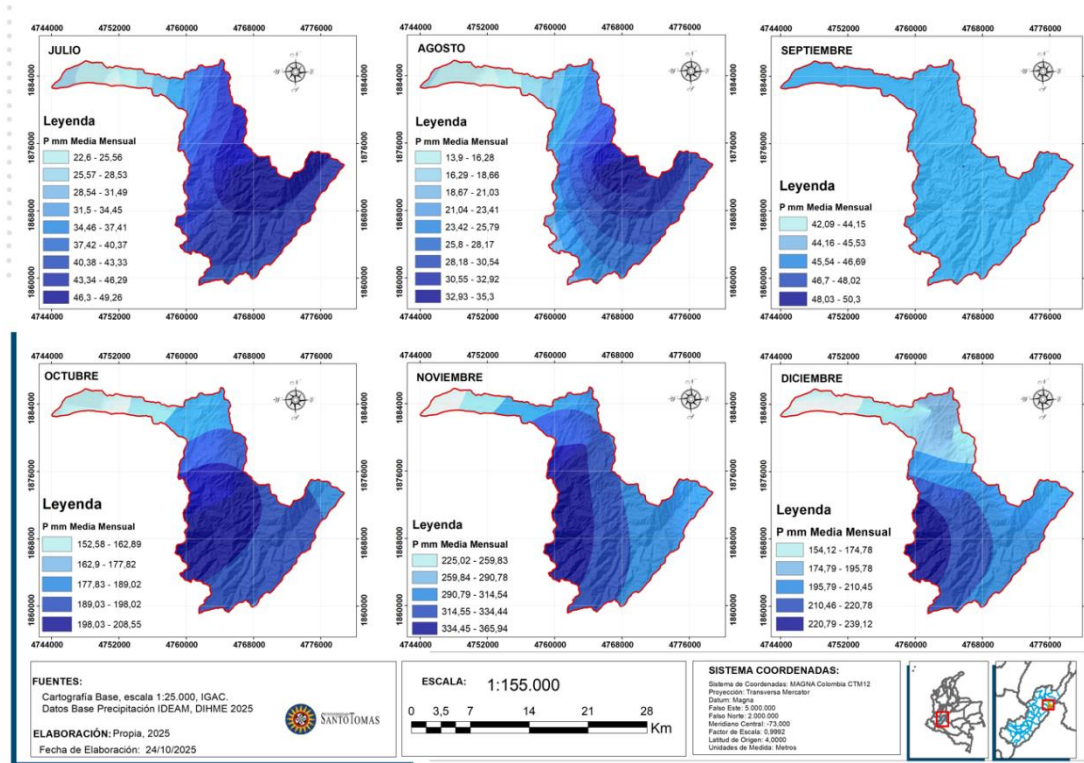


Figura 18. Distribución espaciotemporal de la precipitación media mensual multianual en la cuenca II Semestre

8.1.4.2 Distribución espaciotemporal de la precipitación media multianual en la cuenca

Los registros de la precipitación anual multianual en las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, correspondiente al periodo 2009 - 2024 sirvieron como insumo para determinar la distribución y variabilidad espaciotemporal del régimen de lluvias anual del ciclo hidrológico en el área de estudio mediante la aplicación del modelo estadístico espacial Kriging; evidenciando que la serie multianual en la cuenca presenta alternancia de periodos con altos registros de aguas lluvia y otros periodos secos, con máximos concentrados principalmente en los años 2010 y 2011, coincidentes con el evento La Niña, y mínimos recurrentes durante los años 2015 y 2016, en correspondencia con el evento El Niño. Estos contrastes se expresan con distinta magnitud en

toda la cuenca, reflejando tanto las diferencias orográficas y altitudinales del sistema de montaña como la respuesta local a los patrones de circulación atmosférica.

En la figura 19 muestra la magnitud media de la precipitación anual multianual, la cual oscila entre 1.200 y 2.000 mm/año, con valores extremos superiores a los 3.000 mm/año durante los picos húmedos de 2011, particularmente en la parte alta de la cuenca alta. En síntesis, los patrones espaciales permiten afirmar que, aunque la precipitación en la Cuenca del Río Las Ceibas no presenta tendencias estadísticamente significativas de incremento o disminución sostenida, sí manifiesta una dinámica interna de alta sensibilidad al ENSO y a la topografía.

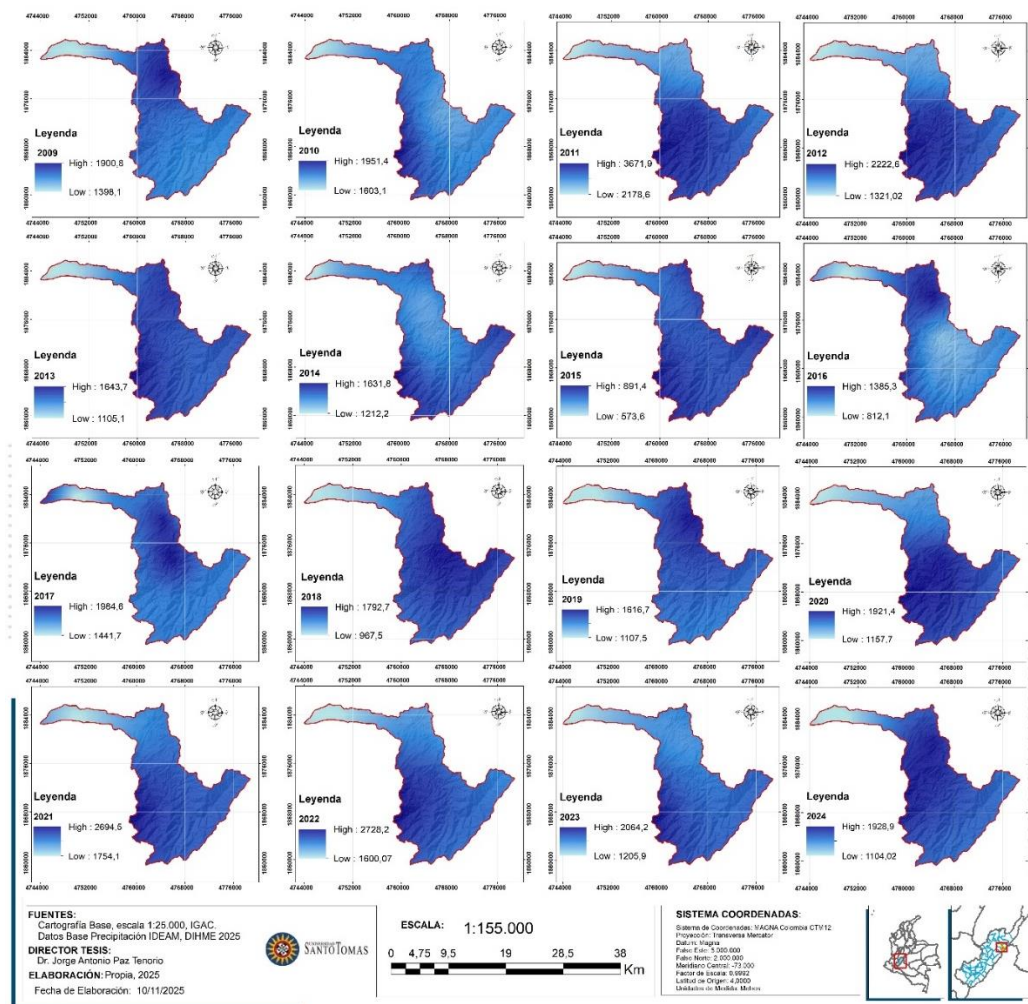


Figura 19. Distribución espaciotemporal de la precipitación media anual multianual en la cuenca.

Al integrar estos patrones de precipitación con los datos recolectados de históricos de deslizamientos disponible para el mismo periodo, se identificó que dichos contrastes de registros de precipitación se reflejaron directamente en la frecuencia anual de procesos de remoción en masa en la cuenca. Durante los años de mayor precipitación (2010 y 2011), se registraron 93 y 77 deslizamientos, respectivamente, constituyéndose en los valores más altos del periodo analizado y confirmando la fuerte sensibilidad de las zonas montañosas a niveles elevados de precipitación. Por el contrario, en los años con menores acumulados de lluvia (2015 y 2016) se presentaron 42 y 35 deslizamientos, respectivamente, lo que representa actividad mínima registrada de movimientos en masa, la cual coincide con las condiciones de menos precipitación asociadas a El Niño.

8.1.5 Sismicidad

La cuenca del río Las Ceibas se encuentra en una zona de influencia sísmica relevante dentro del contexto andino colombiano, caracterizada por la interacción de sistemas tectónicos activos que generan esfuerzos capaces de incidir en fenómenos como los movimientos en masa. De acuerdo con los registros históricos del Servicio Geológico Colombiano entre 1993 y 2025 plasmados en la figura 20, se han identificado eventos con magnitudes locales comprendidas principalmente entre 2,0 y 4,1, y profundidades que varían desde los 0,2 km hasta los 84,3 km. Aunque se trata de sismos de baja a moderada magnitud, la recurrencia y la presencia de focos superficiales algunos menores a 5 km de profundidad constituyen un factor detonante de especial atención en la dinámica de inestabilidad de laderas, dada su capacidad para generar aceleraciones locales significativas.

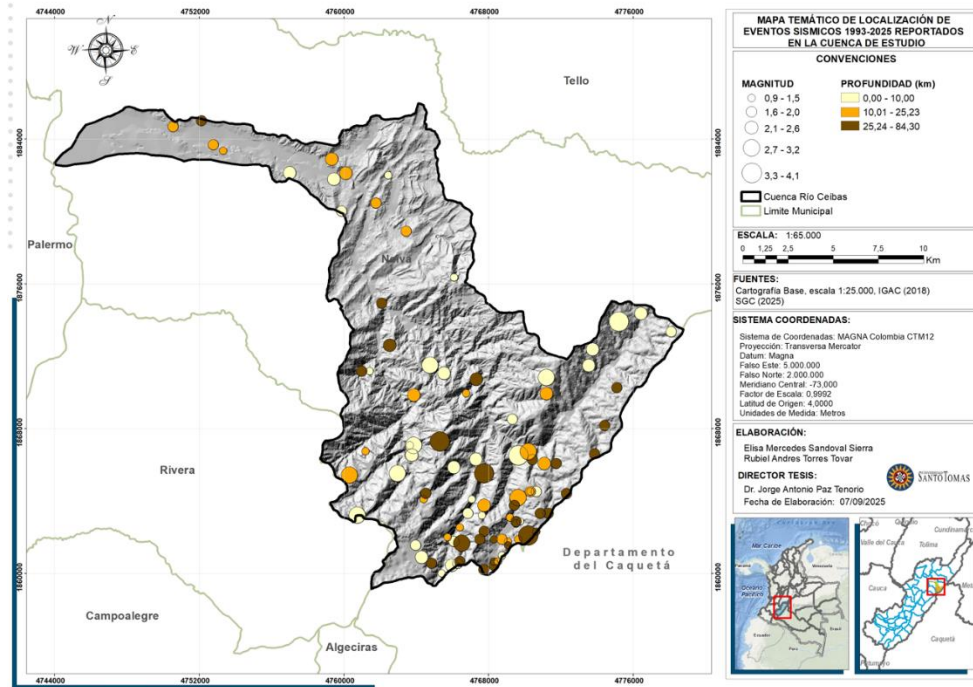


Figura 20. Mapa temático de localización de eventos sísmicos 1993-2025 en el área de la cuenca.

El Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia, establece que el municipio de Neiva y, por ende, la cuenca del río Las Ceibas se localizan dentro de una zona clasificada con amenaza sísmica alta. En este sentido, y de acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano, la normativa aplicable para el diseño sísmo resistente se encuentra establecida en el Reglamento NSR-10.

Este reglamento corresponde al marco legal en Colombia que define los criterios y requisitos técnicos que deben cumplir las edificaciones, con el propósito de garantizar un desempeño estructural adecuado frente a la ocurrencia de un sismo. Su objetivo principal es minimizar el riesgo de colapsos o daños significativos en las construcciones, protegiendo tanto la seguridad de las personas como la conservación de sus bienes materiales. De acuerdo con este mapa de Zonas de amenaza NSR-10 el área de estudio hace parte de una zona de amenaza sísmica alta como se evidencia en la figura 21.

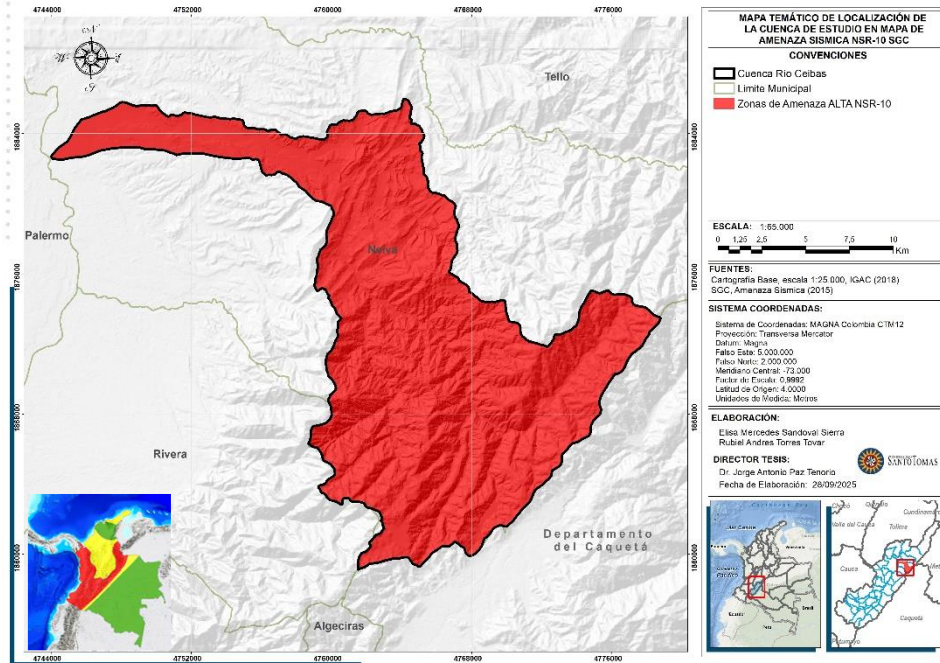


Figura 21. Mapa localización del área de estudio en Amenaza Sísmica NSR-10 SGC.

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (2025), los valores de aceleración pico del terreno (PGA) y aceleraciones espectrales presentan variaciones significativas dependiendo del periodo de retorno. En la Tabla 3 se ilustran los valores medios reportados para Neiva, cabecera más cercana al área de estudio, donde se observa un incremento progresivo de la intensidad sísmica en función de la recurrencia de los eventos.

Tabla 3. Valores de Intensidad Sísmica Esperada para tres ordenadas espectrales y cinco periodos de retorno.

<i>Tr (años)</i>	<i>PGA [g]</i>	<i>Sa máx. [g]</i>	<i>Sa (0,2 s) [g]</i>	<i>Sa (1,0 s) [g]</i>
31	0.04	0.09	0.08	0.02
225	0.12	0.29	0.26	0.06
475	0.17	0.4	0.37	0.09
975	0.23	0.54	0.49	0.12
2475	0.32	0.76	0.69	0.17

Fuente: SGC, (2025). Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia

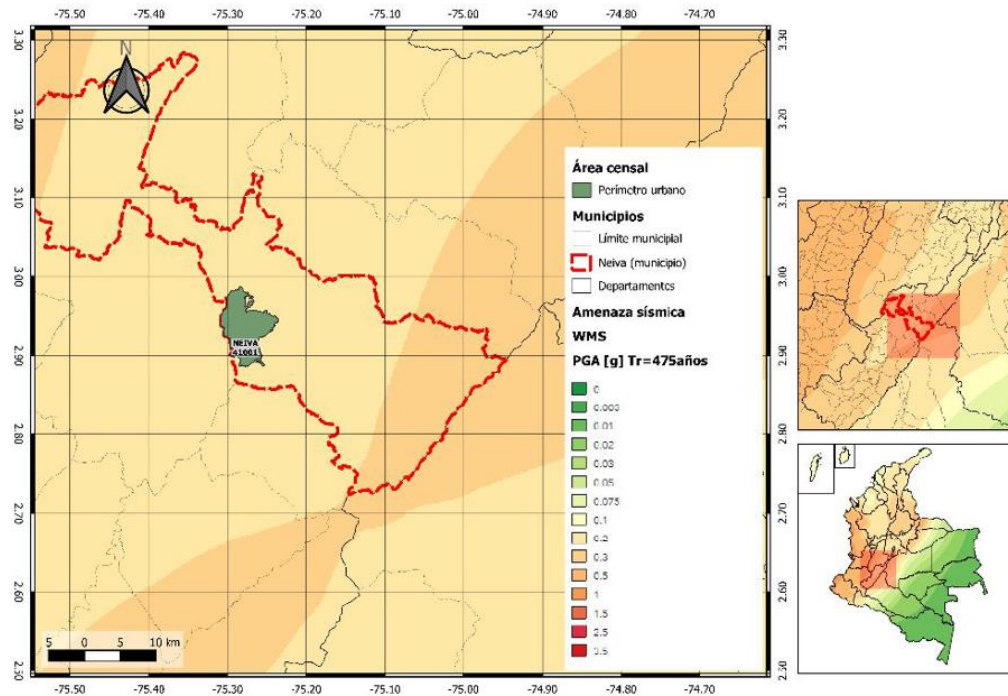


Figura 22. Mapa de Localización Valor de PGA Intensidad Sísmica Pr 475

Fuente: SGC (2025, Radicado No. 2025-600-010838-2).

Asimismo, en la figura 22 se presenta la distribución espacial de la PGA para un periodo de retorno de 475 años, donde se evidencia que la cuenca del río Las Ceibas se encuentra bajo condiciones de amenaza sísmica alta, con valores que oscilan entre 0,17 g y 0,40 g. Este nivel de intensidad tiene la capacidad de generar daños significativos en edificaciones y, especialmente, de actuar como detonante de procesos de remoción en masa en áreas con pendientes pronunciadas y suelos susceptibles.

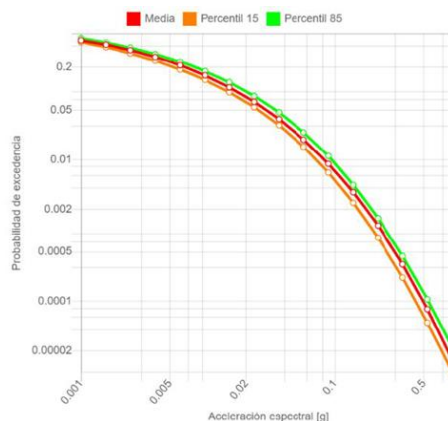


Figura 23. Curva de amenaza uniforme – PGA

Fuente: SGC (2025, Radicado No. 2025-600-010838-2).

Las curvas de amenaza uniforme complementan el análisis probabilístico, mostrando la probabilidad anual de excedencia de ciertos valores de aceleración. La figura 23 ilustra la curva para PGA, en la cual se observa que, aunque los eventos extremos son poco frecuentes, su probabilidad no es insignificante y debe considerarse en la planificación territorial y la gestión del riesgo.

La figura 24 presenta la curva de amenaza uniforme para aceleraciones espectrales a un periodo de vibración de 0,2 segundos. Este parámetro es especialmente sensible a edificaciones bajas y estructuras rígidas. Los valores registrados evidencian que, bajo ciertos escenarios, pueden alcanzarse aceleraciones considerables, lo cual incrementa la vulnerabilidad de infraestructuras y contribuye al disparo de inestabilidades en suelos poco consolidados.

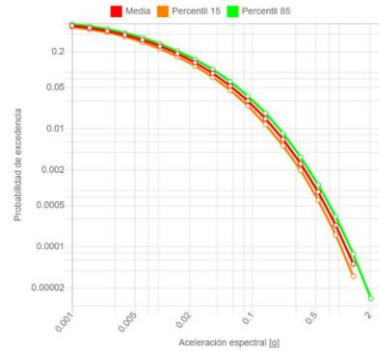


Figura 24. Curva de amenaza uniforme – S_a (0,2 s)

Fuente: SGC (2025). Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia

La figura 25 presenta la curva de amenaza uniforme para un periodo de vibración de 1,0 segundo. Este resultado es relevante para edificaciones más altas o estructuras de mayor flexibilidad. Aunque los valores se mantienen en un rango moderado, son suficientes para comprometer la estabilidad en zonas de ladera, donde la vibración prolongada puede inducir fenómenos de remoción en masa.

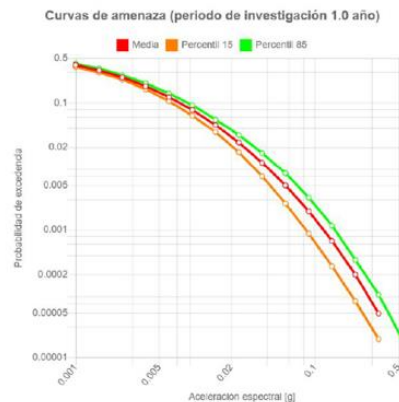


Figura 25. Curva de amenaza uniforme – S_a (1,0 s)

Fuente: SGC (2025). Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia

Finalmente, la figura 26 presenta el espectro de amenaza uniforme, este sintetiza los valores de aceleración espectral esperados para distintos periodos de retorno y diferentes frecuencias de vibración.

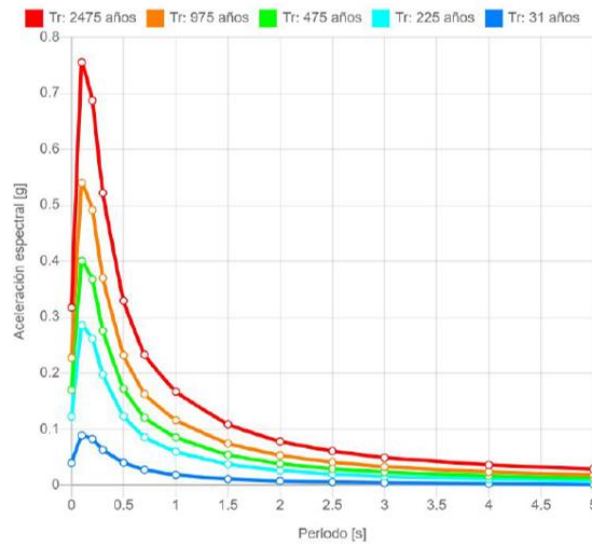


Figura 26. Espectros de amenaza uniforme

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2025). *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia.*

Así mismo, la figura 26 muestra que, para periodos largos de retorno, los valores de aceleración se incrementan de manera significativa, lo que refuerza la necesidad de integrar la amenaza sísmica en los estudios de zonificación de amenazas por remoción en masa.

El análisis de la sismicidad en la cuenca del río Las Ceibas permite reconocer que, aunque la mayoría de los eventos registrados corresponden a magnitudes bajas o moderadas, la recurrencia de sismos superficiales y la condición de amenaza sísmica alta definida por el SGC convierten este factor en un elemento detonante que no puede pasarse por alto. Los valores de aceleración pico del terreno (PGA) obtenidos para distintos periodos de retorno, junto con las curvas y espectros de amenaza uniforme del Servicio Geológico Colombiano, evidencian que el territorio está expuesto a escenarios de vibración capaces de afectar tanto la infraestructura como la estabilidad de las laderas.

Intensidad Máxima Observada es Severo

Intensidad Sísmica esperada es muy fuerte

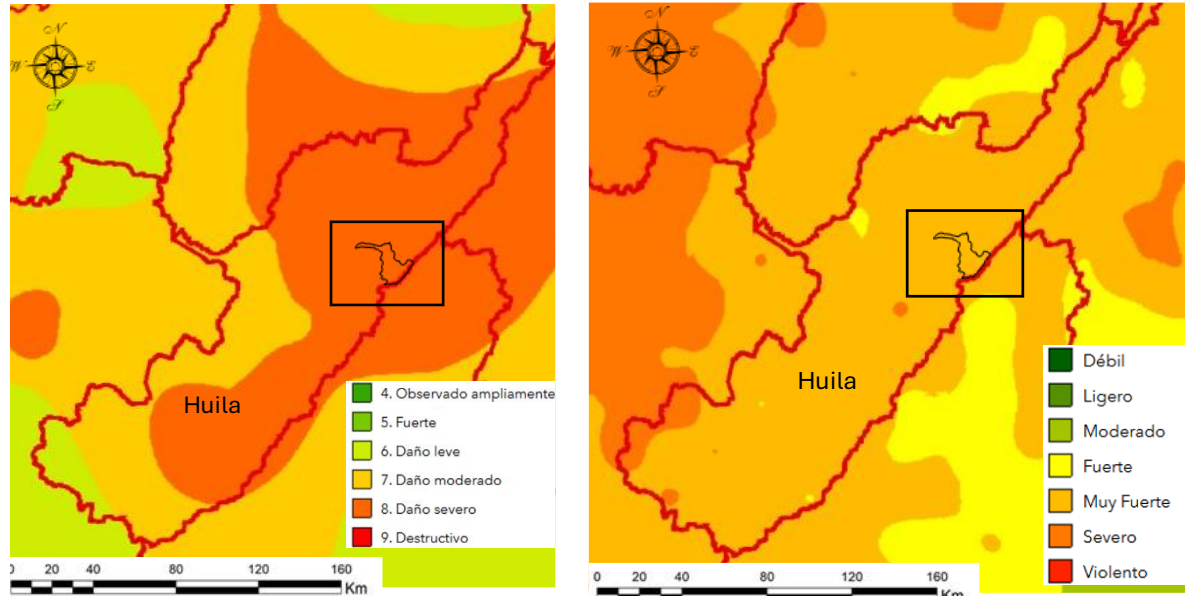


Figura 27. Intensidad sísmica máxima y Esperada.

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2020). Estudio de Amenaza Sísmica de Colombia. https://srvags.sgc.gov.co/jsviewer/Amenaza_Sismica_2020/#

Adicionalmente, según lo evidenciado en la figura 27, tomada del Estudio de Amenaza Sísmica de Colombia elaborado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2020), la cuenca objeto de estudio se encuentra clasificada dentro de una zona con intensidad sísmica máxima observada de nivel severo, presentando además una percepción muy fuerte frente a las intensidades sísmicas esperadas en el área.

En este sentido, la integración del componente sísmico al diagnóstico sumada a las pendientes pronunciadas y a la litología de alta susceptibilidad en ciertos sectores refuerza la necesidad de integrar el componente como amenazas del territorio.

Se puede inferir que la sismicidad no solo aporta una visión más completa de los riesgos naturales que enfrenta la cuenca, sino que también refuerza la necesidad de articular las medidas de ordenamiento territorial, planificación de obras y estrategias de gestión comunitaria con

criterios de reducción de vulnerabilidad sísmica. Incluyendo aspectos como la incorporación de criterios de construcción sismorresistente en áreas urbanas y rurales, la formulación y actualización de planes de contingencia a nivel municipal, así como el fortalecimiento de los procesos de preparación comunitaria frente a eventos sísmicos, adquieren importancia como medidas complementarias para la mitigación del riesgo. De este modo, se establece una base técnica que sustenta la inclusión de la sismicidad como determinante en la zonificación de amenazas por remoción en masa, contribuyendo al fortalecimiento de la gestión del riesgo en el área de estudio.

8.1.6 Históricos de Deslizamientos.

La integración de los factores analizados anteriormente como son pendientes, geología y litología, precipitaciones y sismicidad, permiten comprender el comportamiento de los elementos detonantes o de disparo que configuran la cuenca ante elementos susceptibles a fenómenos de movimientos en masa. Sin embargo, para validar los escenarios de amenaza derivados del análisis físico, es importante contrastar con la incidencia real de los eventos históricos en el territorio.

En este sentido, el inventario histórico de deslizamientos constituye un insumo esencial para validar los escenarios de amenaza identificados y reconocer patrones de recurrencia y distribución espacial. Esta información no solo fortalece el diagnóstico, sino que también aporta elementos clave para evaluar la capacidad predictiva de la metodología de Mora y Vahrson, al relacionar los factores condicionantes con la realidad documentada en el terreno.

Teniendo en cuenta datos recolectados por entidades como el Servicio Geológico Colombiano, y por La Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena del POMCA como

de registros que lleva la entidad, se identificaron en el área de interés un total de 880 registros de deslizamientos como se evidencia en la figura 28.

Según información presente en la información recopilada, para el desarrollo de registros el SGC consolidó sus registros mediante diferentes mecanismos de levantamiento y verificación de información, entre ellos información recolectada en campo, reportada por terceros, consultada en páginas como INVIAS.

Para el caso del proyecto Ceibas, la recolección de datos que realiza el proyecto corresponde a través de visitas en campo, y visualización de imágenes satelitales en la plataforma Google Earth. Por su parte, los registros asociados al POMCA CAM (2023) fueron obtenidos a través de la interpretación de fotografías aéreas a diferentes escalas, correspondientes a vuelos multitemporales, ortofotos de 2008, mosaicos de imágenes Spot 6-7 (1999 y 2015), y material disponible en la plataforma Google Earth. Adicionalmente, con el fin de garantizar la trazabilidad de la información recopilada, se estructuró una base de datos plasmados en el mapa de inventario de movimientos en masa presente en la figura número 27. Dicha base integra, para cada evento un número consecutivo de ID, la fecha de reporte, el tipo de deslizamiento, el factor detonante, así como la fuente de información que respalda el registro, ya sea trabajo de campo, interpretación de imágenes o información secundaria, en algunos casos observaciones. Es pertinente indicar que esta información no siempre en toda la base de datos se encontró disponible. Esta estructura permitió consolidar y complementar la información proveniente de las diferentes fuentes.

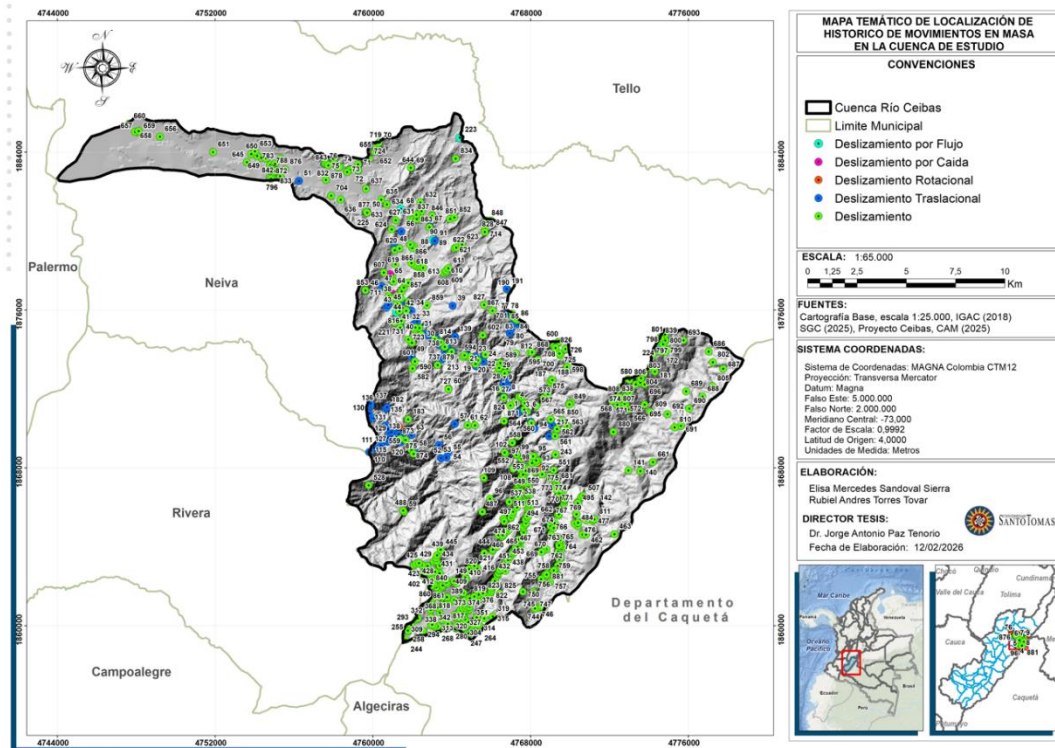


Figura 28. Mapa temático de localización de históricos de deslizamientos clasificados por tipo en el área de la cuenca.

El inventario recopilado corresponde a la integración y depuración de la información proveniente de tres fuentes principales: el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA), el Proyecto Ceibas de la CAM y los registros oficiales del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Como se evidencia en la grafico de la figura 29, el mencionado inventario muestra una gran participación de movimientos en masa de tipo deslizamiento traslacional donde ocurre en perfiles de saprolito, producto de efectos de la meteorización. Por lo general, estos materiales, al presentar una menor resistencia al corte y una estructura más desagregada, favorecen el desarrollo de superficies de deslizamiento aproximadamente paralelas a la topografía. Este tipo de deslizamientos en la cuenca representan cerca del 60 % de los eventos registrados. Seguido de ello, en menor proporción se identifican deslizamientos rotacionales y otros deslizamientos no clasificados, que en conjunto alcanzan aproximadamente el 33 % del total. Asimismo, se

observan procesos de flujo de detritos, caídas de roca y de detritos, y avalanchas de detritos, cada uno con participaciones inferiores, lo que indica una ocurrencia puntual y localizada de estos fenómenos.

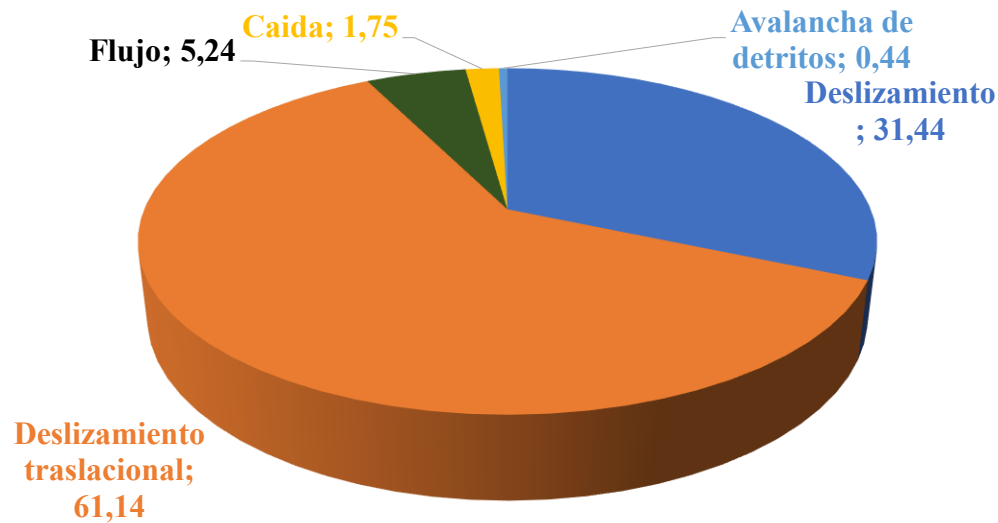


Gráfico 29. Gráfico de distribución de tipos de movimientos.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Cruden y Varnes (1996), los deslizamientos traslacionales corresponden a movimientos de masas de suelo o roca que se desplazan a lo largo de planos de ruptura bien definidos, generalmente asociados a discontinuidades estructurales o contactos litológicos. Este comportamiento concuerda con las características observadas en la cuenca, donde la presencia de materiales altamente meteorizados y zonas de pendiente media a alta favorecen la generación de este tipo de procesos.

Por su parte, la menor frecuencia de eventos tipo flujo o caída sugiere que las condiciones geomorfológicas y de cobertura vegetal contribuyen a limitar la ocurrencia de fenómenos más rápidos y destructivos. En este sentido, los resultados obtenidos permiten identificar que la dinámica de inestabilidad en la zona de estudio está controlada principalmente por factores litológicos y estructurales, en coherencia con lo señalado por Mora y Vahrson (1993) respecto a

la influencia combinada de las condiciones geológicas, la pendiente y la saturación del suelo en la generación de movimientos en masa.

En conjunto, la distribución de las figuras 29 y 30 evidencian que los procesos de deslizamiento constituyen el mecanismo predominante de inestabilidad en la cuenca, información clave para la delimitación de zonas de amenaza y la formulación de estrategias de gestión del riesgo.

En cuanto a principales detonantes recolectados en el inventario, evidenciados en el gráfico 30 se observa que las lluvias constituyen el factor desencadenante dominante en la cuenca, seguido en menor medida por eventos asociados a actividad antrópica y por registros que mencionan sismicidad como condicionante. La identificación de detonantes antrópicos tales como intervenciones en taludes, cortes de vía o vertidos de material, resulta importante para orientar acciones de gestión territorial en la cuenca.

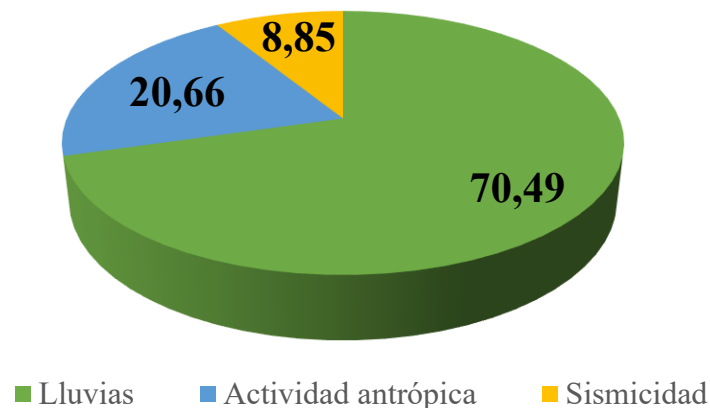


Gráfico 30. *Gráfico de principales detonantes*

Adicionalmente, a la clasificación anteriormente mencionada, y teniendo en cuenta evidencias recolectadas en la Tabla 4, se realizó una clasificación técnica de algunas imágenes de los deslizamientos registrados en la cuenca del río Las Ceibas. Esta clasificación se fundamenta

en los criterios establecidos por Cruden y Varnes (1996), así como en las tipologías adoptadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC). La tipificación considera el tipo de movimiento, el material involucrado, la morfología y el contexto geomorfológico asociado a los eventos que se relacionan a continuación:

Tabla 4. Evidencias de deslizamientos en la cuenca.

Registro (Proyecto Ceibas)	Material predominante	Tipo de movimiento	Clasificación según Cruden & Varnes (1996)	Características morfodinámicas y observaciones
 N 2°49'44.04" W 75° 5'21.08" 70m Alto (6 Ancho)	Roca meteorizada	Deslizamiento traslacional	Deslizamiento o rotacional a traslacional en roca alterada	Ocurre sobre planos de debilidad definidos; material rocoso meteorizado con pérdida de cohesión. Posible mecanismo mixto entre tracción y traslación.
 N 2°53'7.80" W 75° 5'55.70" Saprolito	Saprolito	Deslizamiento traslacional	Deslizamiento o plano en suelo residual	Movimiento superficial en saprolito saturado; pendiente alta y estructura coluvial poco cohesionada.

Registro (Proyecto Ceibas)	Material predominante	Tipo de movimiento	Clasificación según Cruden & Varnes (1996)	Características morfológicas y observaciones
 N 2°51'46.50" W 75° 7'57.70"	Tracción roca-suelo	Deslizamiento traslacional	Deslizamiento o complejo (roca-suelo)	Interacción entre masas rocosas y suelos meteorizados; inicio rotacional con desplazamiento traslacional.
 N 2°46'21.54" W 75°12'56.74" 50m (20Ancho)	Saprolito	Deslizamiento traslacional	Deslizamiento o superficial en saprolito	Movimiento delgado inducido por lluvias intensas y pérdida de cohesión superficial.
 Afectación a escuela N 2°49'30.89" W 75° 4'42.97"	Saprolito	Deslizamiento con afectación antrópica	Deslizamiento o local inducido por actividad humana	Asociado a cortes de taludes y modificación de escorrentía superficial; afectación a infraestructura escolar. El Proyecto ceibas lo caracterizo de 8m y (3ancho)

Registro (Proyecto Ceibas)	Material predominante	Tipo de movimiento	Clasificación según Cruden & Varnes (1996)	Características morfodinámicas y observaciones
 N 2°56'34.50" W 75°10'51.81" 220 m (32 M)	Suelo heterogéneo	Deslizamientos Rotacional	Deslizamiento o profundo rotacional	Gran volumen, plano de ruptura curvo; correlacionado con pendientes mayores a 35° y alta saturación hídrica.
 N 2°42'28.81" W 75° 9'42.37"	Material coluvial no consolidado	Deslizamientos de Flujos	Flujo de detritos (debris flow)	Alta plasticidad y contenido de agua; típico de cauces secundarios con acumulación coluvial.
 N 2°42'26.12" W 75°10'6.93"	Material coluvial no consolidado	Deslizamientos de Flujos	Flujo de detritos (debris flow)	Alta plasticidad y contenido de agua; típico de cauces secundarios con acumulación coluvial.

Registro (Proyecto Ceibas)	Material predominante	Tipo de movimiento	Clasificación según Cruden & Varnes (1996)	Características morfodinámicas y observaciones
 	Material heterogéneo (suelo, roca, vegetación)	Deslizamiento hacia cauce	Deslizamiento o complejo con componente de flujo	Movimiento combinado de masa sólida y flujo lodoso; asociado a saturación extrema o vibración sísmica.

Fuente: Elaboración propia con datos proyecto Ceibas - CAM y Google Earth.

Los eventos registrados anteriormente permiten evidenciar que los deslizamientos en la cuenca del río Las Ceibas presentan una variabilidad en su tipología y magnitud, condicionada por la litología, el grado de meteorización de los materiales y la intervención antrópica en las laderas. Los movimientos traslacionales y rotacionales dominan el inventario, principalmente sobre suelos residuales y saprolitos con alta susceptibilidad a la saturación.

Asimismo, la ocurrencia de flujos de detritos en sectores coluviales refleja la respuesta dinámica del terreno ante lluvias intensas y modificaciones en el drenaje natural. Dentro del registro de deslizamientos, y acorde a datos suministrados por el proyecto Ceibas y validado en imágenes satelitales, se identifica que los deslizamientos en su mayoría presentan afectaciones a las vías que conduce por ejemplo a Balsillas, Vegalarga, San miguel, Cerro Neiva, San Bartolo entre otros. Otros generan pérdida de cobertura boscosa en área alta de la cuenca, creando

posibles represamientos en el cauce del río las Ceibas principal cuenca abastecedora de la capital del departamento del Huila.

Así mismo se evidencia afectación a fincas, predios privados y escuelas. Esto reafirma la necesidad de incorporar la variable de amenaza por movimientos en masa dentro de los instrumentos de ordenamiento territorial y los planes de gestión del riesgo a escala local.

Un caso representativo dentro del inventario es el denominado Desastre de Balsillas, ocurrido el 29 de diciembre de 2012 en la vereda La Plata del municipio de Neiva. Según el POMCA, se trató de un alud de tierra que se originó en la margen izquierda de la vía Neiva–San Vicente del Caguán, afectando gravemente la movilidad y causando pérdidas humanas y materiales, que al analizar la imagen y clasificarlo según SGC corresponde a un deslizamiento rotacional. En el POMCA la CAM (2023) indica que *...una retroexcavadora estaba trabajando para quitar rocas, suelo y vegetación en la base de la ladera de la margen izquierda, mientras cuatro vehículos y una “chiva” estaban esperando en sus flancos, siendo luego todos aplastados (la retro cayó al fondo, hasta el cauce de la quebrada la Plata) por el movimiento en masa.*

Como se evidencia a continuación:



Figura 29. Vehículos sepultados parcialmente, con organismos operativos durante la fase de atención de la emergencia. Fuente: Lanacion.com.co (30-12-2012).



Figura 30. Acumulación detrítica en la vía afectada, con vista hacia Neiva. La comunidad del sector prestó ayuda inmediata, a pesar de los riesgos y su inexperiencia. Fuente: Lafm.com.co (30-12-2012).



Figura 31. Vista panorámica, hacia Balsillas (al fondo), de la ladera potrerizada que se desestabilizó (MM-563), y sepulchro a los vehículos que allí esperaban paso por las labores de mantenimiento vial, de la parte inferior. Fuente: Lapatria.com (31-12-2012).

Figura 31. Imágenes del Desastre de Balsillas.

Fuente: Tomado del POMCA, (2023).

La particularidad del deslizamiento anterior presentado en la figura 28 radica en la ausencia de precipitaciones previas significativas, lo que evidencia la existencia de condiciones de inestabilidad vinculada a la acción antrópica directa en la ladera. La magnitud del evento motivó la declaratoria de calamidad pública y movilizó un amplio operativo de respuesta por parte de los organismos de socorro. Ver figuras 31 y 32 el POMCA (2023) señala que aproximadamente 300 integrantes del Cuerpo Oficial de Bomberos de Neiva, la Defensa Civil, la Cruz Roja y la fuerza pública fueron movilizados hacia el área, junto con equipos especializados, maquinaria y caninos entrenados para la búsqueda y localización de sobrevivientes.



Figura 32. Imágenes del Organismos de Control.

Fuente: Tomado del POMCA, (2023).

En conjunto, la información histórica permite no solo validar los resultados del modelo de zonificación de amenazas que se aplicará en el siguiente capítulo, sino también fortalecer la comprensión del comportamiento espacial y temporal de los movimientos en masa. Estos datos constituyen un punto de referencia fundamental para contrastar la metodología de Mora y Vahrson (1993) con la realidad identificada en la cuenca, orientando futuras estrategias de prevención, mitigación y planificación territorial.

9 Aplicación de la Metodología Mora y Vahrson en la cuenca

En este apartado se desarrolla el uso de los Sistemas de Información Geográfica para la aplicación de la metodología de Mora y Vahrson (1993). Con el fin de obtener la zonificación de la amenaza por remoción en masa dentro del ámbito de la cuenca de estudio. El procedimiento se desarrolló a partir de la integración de los factores pasivos y de disparo definidos por los autores, los cuales fueron analizados con base en la información cartográfica, geológica, geomorfológica y climática disponible como se relaciona a continuación; a través del cual se consolidaron los resultados obtenidos para cada variable que interviene en la zonificación de la amenaza, permitiendo representar de forma conjunta las condiciones intrínsecas del terreno y los agentes externos que pueden detonar la inestabilidad.

9.1 Factores Pasivos

9.1.1 Pendiente – Relieve Relativo (Sr)

El análisis espacial del relieve relativo en la cuenca del río Las Ceibas permitió identificar una variabilidad morfoestructural, reflejada en la distribución de las clases de pendiente obtenida mediante la aplicación de la metodología de Mora y Vahrson (1993). Como se evidencia los resultados de la Tabla 5, muestran que las categorías “Alto” y “Muy Alto” representan el 39,04 % y 25,74 % del área total, respectivamente, lo que evidencia que más del 64 % del territorio presenta condiciones topográficas potencialmente favorables para la ocurrencia de movimientos en masa. Las zonas clasificadas como “Extremo”, aunque ocupan sólo el 0,54 % del área, corresponden a sectores con pendientes abruptas y altos contrastes altitudinales, donde la energía gravitacional actúa como principal agente predisponente de inestabilidad. Adicionalmente, se evidenció que algunas áreas de esta categoría se localizan en

cercanías a las vías estructurantes definidas en el instrumento de planificación municipal de Neiva, particularmente hacia el sector de Balsillas. Esta condición también se observa en tramos cercanos a la corriente principal del río Las Ceibas, donde las pendientes pronunciadas y la configuración del relieve podrían, en escenarios críticos, favorecer procesos de represamiento, incrementos en la torrencialidad de las crecientes y afectaciones directas sobre la población y los cultivos ubicados aguas abajo dentro de la cuenca.

De igual manera, se llevó a cabo una validación específica sobre el área donde ocurrió el evento de Balsillas en el año 2012 mencionado en apartados anteriores. Al contrastar esta zona con el mapa de pendientes derivado del factor de relieve relativo, se evidenció que dicho sector se encuentra clasificado dentro de las categorías de amenaza “Extrema”, “Muy Alta” y “Alta”, lo que confirma para este caso puntual la relación entre la condición de pendiente y la ocurrencia de los deslizamientos.

Tabla 5. *Factor Pasivo Sr Relieve Relativo presente en la cuenca.*

Factor Sr Relieve Relativo Factor Pasivo MyV	Área (ha)	%
0_Muy Bajo	4.829,33	16,18
1_Bajo	875,23	2,93
2_Medio	3.172,61	10,63
3_Moderado	1.471,89	4,93
4_Alto	11.651,22	39,04
5_Muy Alto	7.680,13	25,74
6_Extremo	160,67	0,54
Total	29.841,09	100

En la figura 33, se presenta el mapa temático de relieve relativo generado a partir del modelo digital de elevación (MDE) y procesado conforme al factor pasivo propuesto en la metodología de Mora y Vahrson. Se aprecia una concentración de valores altos en los sectores oriental y suroccidental de la cuenca, los cuales coinciden con formaciones montañosas y laderas

de fuerte gradiente, mientras que los valores bajos se localizan en la parte noroccidental, asociada a zonas de piedemonte y de la zona plana.

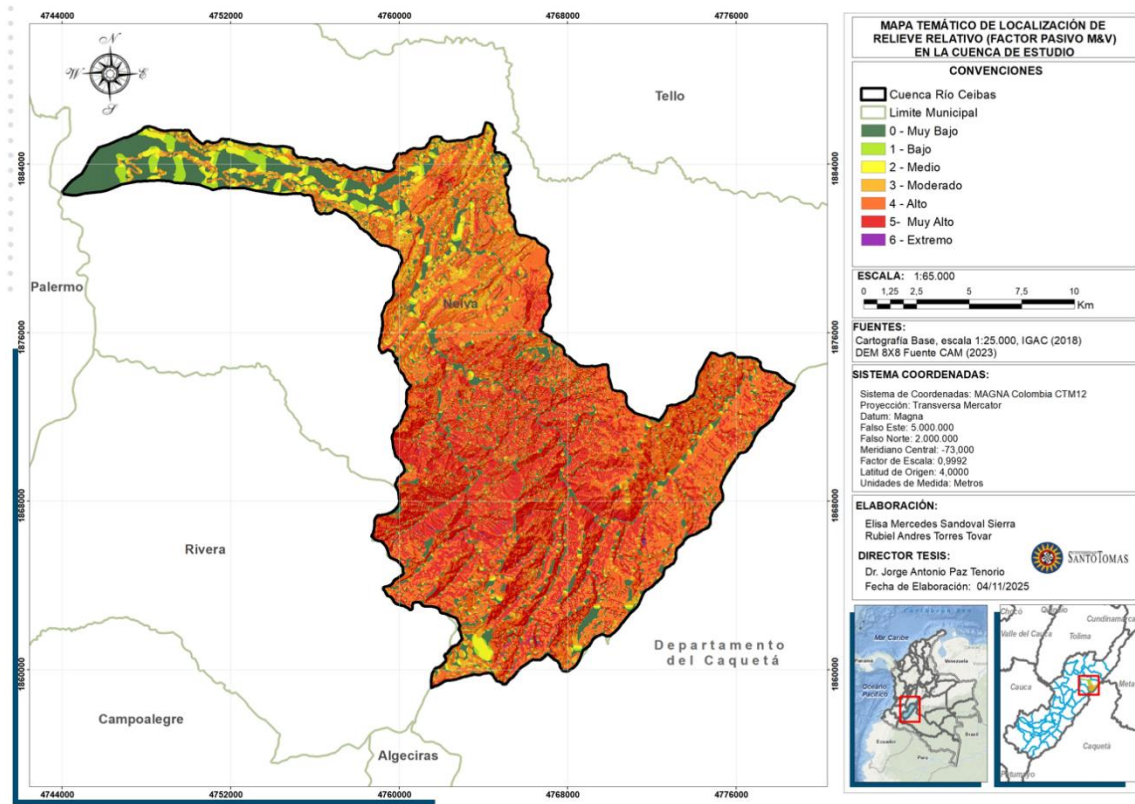


Figura 33. Mapa temático de localización del relieve relativo (Factor Pasivo MyV) en la cuenca del río Las Ceibas

Estos resultados son coherentes con investigaciones recientes que reconocen el relieve relativo como uno de los principales condicionantes geomorfológicos de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa. Autores como Li et al. (2023) y Pradhan et al. (2022) señalan que la variabilidad altitudinal y fuertes laderas incrementan la tensión interna de los materiales del terreno lo que favorece la inestabilidad en los terrenos, especialmente cuando se presentan precipitaciones intensas o sismicidad moderada.

De manera complementaria, Chung et al. (2021) destacan que el relieve relativo es más representativo que la pendiente individual, ya que integra la morfología del terreno a una escala local, permitiendo una mejor interpretación de los procesos gravitacionales.

Por su parte, Paz Tenorio et al. (2017), documenta que en la ladera sur de la meseta de Copoya (Chiapas) las pendientes medidas varían entre 30° y 70° , lo que indica una predisposición geomorfológica para procesos de movimientos en masa. Asimismo, el mismo autor advierte que en las áreas donde las pendientes superan los 30° , el equilibrio natural puede romperse con facilidad ante la eliminación de la cubierta vegetal o al modificar con cortes para obra civil.

La distribución espacial de este factor pasivo obtenido para la cuenca del río Las Ceibas presenta una susceptibilidad intrínseca elevada en buena parte de su superficie. En conjunto, las categorías “Alto”, “Muy Alto” y “Extremo” abarcan 19.492,02 hectáreas, lo que corresponden al 65,32% del área total de la cuenca. Esta condición respalda la pertinencia del factor de pendiente - Sr dentro del modelo de zonificación de amenazas por remoción en masa de Mora y Vahrson, en el cual el relieve relativo se incorpora como variable clave para la estimación de la amenaza combinada con los demás factores pasivos y de disparo propuestos por la metodología.

9.1.2 Litología (Si)

El componente litológico constituye una variable clave en la zonificación de amenazas por remoción en masa, ya que la composición y estructura de las rocas y sedimentos determinan la estabilidad de las laderas. Por ejemplo, autores como Henriques et al., (2015) y Pourghasemi & Rahmati, (2018) concluyen que las propiedades físicas, mecánicas y estructurales de las rocas y los sedimentos definen la resistencia al corte, la cohesión y la permeabilidad, aspectos

directamente vinculados al comportamiento de las laderas ante la acción de agentes desencadenantes como la lluvia o la sismicidad.

De acuerdo con la aplicación de la metodología de Mora y Vahrson (1993) en la cuenca del río Las Ceibas, el factor litológico (Si) presenta una distribución espacial dominada por las clases “Moderado” (60,83 %) y “Medio” (11,42 %), seguidas por las categorías “Alto” (10,93 %), “Bajo” (8,43 %) y “Muy Alto” (8,39 %). En conjunto, estas cinco clases abarcan lo presentado en la figura 34.

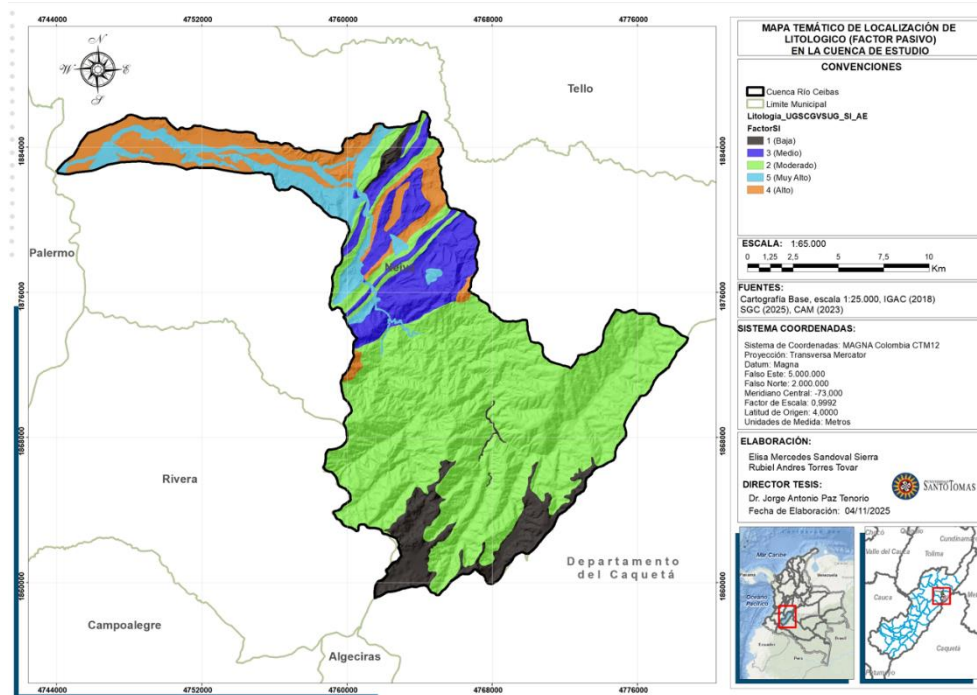


Figura 34. Mapa temático del factor litológico (Si) como variable pasiva en la cuenca del río Las Ceibas.

Tabla 6. Factor Pasivo SI Litológico presente en la cuenca.

Factor SI Litológico (Factor Pasivo MyV)	Área (Ha)	%
1 (Baja)	2.523,92	8,43
2 (Moderado)	18.209,55	60,83
3 (Medio)	3.418,55	11,42
4 (Alto)	3.270,40	10,93
5 (Muy Alto)	2.511,42	8,39
Total	29.933,85	100

La mayor parte del territorio se desarrolla sobre litologías de competencia mecánica intermedia, asociada a unidades volcánicas y sedimentarias, que pese a conservar cierta estabilidad, presentan fracturamiento, intercalaciones de materiales finos y evidencias de meteorización. Lo que explica que más del 60 % de la cuenca se ubica en la categoría de “Moderado”, representando áreas que pueden experimentar deslizamientos superficiales cuando se combinan condiciones de saturación prolongada o alteración estructural.

En cuanto a las categorías “Alta” y “Muy Alta”, que representan el 19,32 % de la cuenca, se localizan principalmente en depósitos coluviales y aluviales recientes (Qal, Qtr, Qft), caracterizados por materiales no consolidados, granulometría heterogénea y elevada porosidad. Estas unidades, asociadas a fondos de valle y zonas de transición topográfica, muestran alta susceptibilidad a movimientos gravitacionales debido a su rápida pérdida de cohesión al saturarse con agua (Henriques et al., 2015).

Por el contrario, las áreas clasificadas con baja susceptibilidad (8,43 %) corresponden a formaciones ígneas y metamórficas del Macizo de Garzón y la Formación Saldaña, cuyos materiales competentes y alta densidad estructural ofrecen una notable resistencia frente a la meteorización y la acción de la gravedad.

Es pertinente indicar que según la CAM (2023), en el caso del Macizo de Garzón, estas rocas corresponden a unidades metamórficas de edad precámbrica lo que las convierte en los materiales más antiguos aflorantes en la cuenca. De acuerdo con el diagnóstico de la CAM, estas litologías, por su alto grado metamórfico, textura cristalina y elevada dureza, presentan generalmente una alta resistencia al corte y baja deformabilidad. No obstante, aunque su competencia mecánica favorece condiciones de estabilidad relativa, su comportamiento frente a la remoción en masa no es completamente homogéneo. La intensa historia tectónica regional,

asociada a la Falla de Algeciras y otros lineamientos estructurales, ha generado sistemas de fracturamiento que condicionan procesos de meteorización diferencial. En laderas de alta pendiente, esta combinación entre roca dura y fracturamiento estructural favorece principalmente procesos de caída y desprendimiento de bloques, más que deslizamientos rotacionales o flujos, lo cual es coherente con su clasificación dentro de la categoría “Baja” del factor Si en la metodología de Mora y Vahrson (1993), donde se reconoce que la litología controla el tipo y la magnitud del movimiento esperado.

Los resultados obtenidos son coherentes con la literatura científica reciente. Henriques et al. (2015) demostraron que la configuración litológica y la naturaleza del sustrato constituyen variables clave en la distribución espacial de deslizamientos, mientras que Pourghasemi y Rahmati (2018), identificaron la litología como un factor con mayor peso predictivo en modelos de deslizamientos basados en modelos estadísticos y de aprendizaje automático.

La Tabla 7 resume las unidades litológicas presentes en la cuenca, su factor de susceptibilidad y justificación técnica sobre las cuales se construyó el mapa de la figura 34 las cuales se relacionan a continuación.

Tabla 7. Unidades Litológicas y Factor de Susceptibilidad Aplicado en la cuenca del río las Ceibas.

Unidad / Formación	Geomorf oestructura	Factor de susceptibilidad (SI)	Justificación técnica	Área ha	%
Macizo de Garzón (ígneas y metamórficas)	Cordillera / Laderas	1 (Baja)	Rocas ígneas/metamórficas competentes; alta resistencia mecánica en estado intacto.	11.358,70	37,95
Formación Saldaña	Cordillera / Laderas	1 (Baja)	Litologías más compactas y de baja alteración; baja susceptibilidad relativa.	901,74	3,01
Formación Hondita– Loma Gorda	Laderas	3 (Media)	Materiales finos, alta alterabilidad y susceptibilidad a saturación.	631,02	2,11

Unidad / Formación	Geomorf oestructu ra	Factor de susceptibili dad (SI)	Justificación técnica	Área ha	%
Formación Seca	Laderas	3 (Media)	Material con planos de debilidad y mayor tendencia a la meteorización.	629,33	2,10
Depósitos coluviales y aluviales recientes	Valles / Terrazas	4–5 (Alta– Muy alta)	Materia no consolidada, elevada porosidad y rápida saturación; alta inestabilidad en transiciones.	2.548,26	8,51
Ja (unidad volcánica/afl oramientos según mapa)	Laderas / Aflojamie ntos	2–3 (Baja– Moderada)	Rocas volcánicas relativamente competentes, pero con fracturamiento y alteración localizada que puede disminuir estabilidad.	7.812,05	26,10
Kc (unidad carbonática/ competente)	Laderas / Relieve estructura l	2 (Baja– Moderada)	Rocas más competentes; la presencia de fracturas y diaclasas determina la susceptibilidad puntual.	1.382,53	4,62
Klt (unidad litológica de transición)	Laderas / Terrazas	2–3 (Baja– Moderada)	Litologías mixtas con niveles de menor cohesión en intercalaciones, favoreciendo inestabilidad localizada.	325,77	1,09
NgQgm (depósitos recientes / gravas y materiales mal ordenados)	Fondos de valle / abanicos	4 (Alta)	Materiales con pobre consolidación y granulometría suelta; alta propensión a flujos y movimientos superficiales.	1.765,33	5,90
Pgb (unidad paleógena: basamento o depósitos)	Laderas / Mesetas	2–3 (Baja– Moderada)	Depende de la litología específica; en general presenta mayor competencia que los depósitos cuaternarios pero puede fracturarse.	882,38	2,95
Pgc (unidad paleógena: carbonatada/ arenisca)	Laderas	2–3 (Baja– Moderada)	Areniscas/carbonatos con mejor cohesión; la meteorización local y fracturación elevan la susceptibilidad.	128,40	0,43
Pgp (unidad paleógena: arcillosa/pue stas blandas)	Laderas / Zonas de transición	3–4 (Media– Alta)	Niveles arcillosos o poco consolidados que aumentan su plasticidad y sensibilidad a la saturación.	713,22	2,38
Pgt (unidad paleógena:	Laderas	3 (Media)	Materiales volcánicos alterables; la alteración	676,08	2,26

Unidad / Formación	Geomorf oestructu ra	Factor de susceptibili dad (SI)	Justificación técnica	Área ha	%
tobas / depósitos volcánicos alterados)			química incrementa la propensión al colapso superficial.		
Pzcn (unidad paleozoica con planos de debilidad)	Laderas / Estratos inclinados	3 (Media)	Litologías antiguas con fracturamiento y orientación de estratos que favorecen desprendimientos dirigidos.	170,22	0,57
Qaa (abanico aluvial / depósitos fangosos y gravas mal ordenadas)	Abanicos / Terrazas	5 (Muy alta)	Depósitos fanales y abanicos con granulometría suelta, pobre cimentación y alta susceptibilidad a flujos y colapsos.	8,59	0,03

La clasificación aplicada en la cuenca del río Las Ceibas coincide con los planteamientos de Mora y Vahrson (1993), al considerar el componente litológico como un factor pasivo de primer orden que refleja la predisposición natural del terreno a la inestabilidad. La representación cartográfica obtenida permitió identificar las zonas de mayor vulnerabilidad, principalmente en depósitos cuaternarios.

9.1.3 Humedad del Suelo

La humedad del suelo constituye un factor pasivo crítico en la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos, dado que la presencia de agua influye directamente en la cohesión, la fricción interna y la estabilidad de las laderas (Mora & Vahrson, 1993). La saturación prolongada de los materiales incrementa la presión de poros, favorece la fluidez de sedimentos poco consolidados, pérdida de la resistencia de los materiales y puede inducir la movilización de masas superficiales o profundas.

Para la cuenca del río Las Ceibas, el factor de humedad del suelo se obtuvo siguiendo la metodología de Mora y Vahrson (1993), utilizando como base la precipitación media mensual multianual registrada durante 16 años en un conjunto de 14 estaciones pluviométricas distribuidas en la cuenca y sus alrededores. Se consideró la precipitación acumulada y su distribución espacial para asignar valores de susceptibilidad a cada sector de la cuenca, de acuerdo con la clasificación de humedad del suelo propuesta por Mora y Vahrson (1993), teniendo como resultado 11 estaciones clasificadas con “Bajo” una estación en “Medio” y dos estaciones en “Muy Bajo” como se relaciona en la tabla 8.

Tabla 8. *Clasificación del Factor de Sh por estación*

Nombre Estación IDEAM	Mes												Valor Sh	Sh	Valor Factor Sh
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Aeropuerto Benito Salas	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	6	Bajo	2
Cucharó El	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	2	1	9	Bajo	2
Gironda La Hacienda	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	2	1	9	Bajo	2
Guadual El	1	1	2	1	1	0	0	0	0	1	2	2	11	Medio	3
Hato Bogota	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	5	Bajo	2
Hato Milagro	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	2	0	6	Bajo	2
Juncal El Aut	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	6	Bajo	2
Mesa Redonda	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	3	Muy Bajo	1
Neiva	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	2	1	6	Bajo	2
Nuevo Paraíso	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	4	Muy Bajo	1
Palacio-Vegalarga	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	2	1	8	Bajo	2
Papagayo Hacienda	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	5	Bajo	2
Santa Barbara	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	2	1	7	Bajo	2
Santa Helena	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	2	1	8	Bajo	2

Con la información de precipitación acumulada mensual tomada de las estaciones del IDEAM y clasificada metodológicamente, se procedió a aplicar el modelo geoestadístico de interpolación “Kriging” en el área de la cuenca usando los valores Sh clasificados de la tabla 8 obteniendo como producto el mapa temático representado en la figura 35.

Los resultados de la aplicación del modelo de interpolación “Kriging”, presentes en la figura 35 evidenciaron menores niveles de humedad en los sectores bajos de la cuenca, mientras que los valores aumentaron progresivamente hacia las zonas más altas donde los factores como la cobertura boscosa, la geomorfología y las condiciones de precipitación favorecen la tendencia de aumento del agua en el suelo.

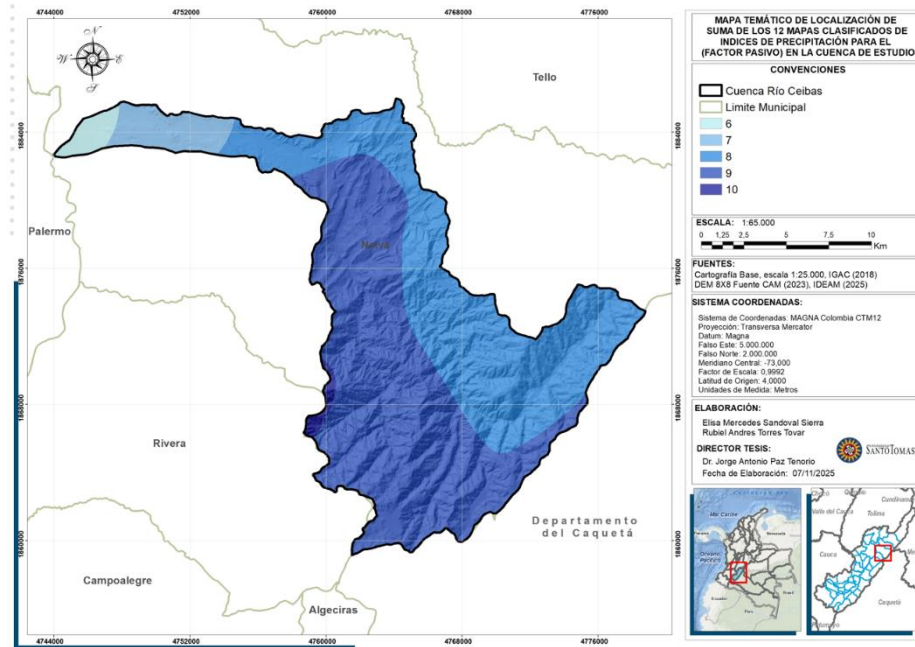


Figura 35. Mapa temático del factor Humedad (Sh) como variable pasiva en la cuenca del río Las Ceibas.

El modelo espaciotemporal de la humedad del suelo en la cuenca se determinó a través del procesamiento geoestadístico con herramientas SIG de los registros de precipitación mensual multianual y su posterior clasificación según la metodología propuesta por Mora y Vahrson (1993).

De la aplicación de los procesos anteriores, se obtiene como resultado el mapa obtenido en la figura 36 este indica que el 100 % del área de la cuenca se clasifica dentro de la categoría 2, es decir, presenta baja humedad relativa según la metodología aplicada. Esta condición sugiere

que este factor en la cuenca de estudio, bajo condiciones normales de precipitación, no constituye un factor de predisposición por sí solo, sino que actúa principalmente como un elemento desencadenante, cuya incidencia aumenta cuando interactúa con otros factores, como pendientes, litologías, precipitación o actividad sísmica.

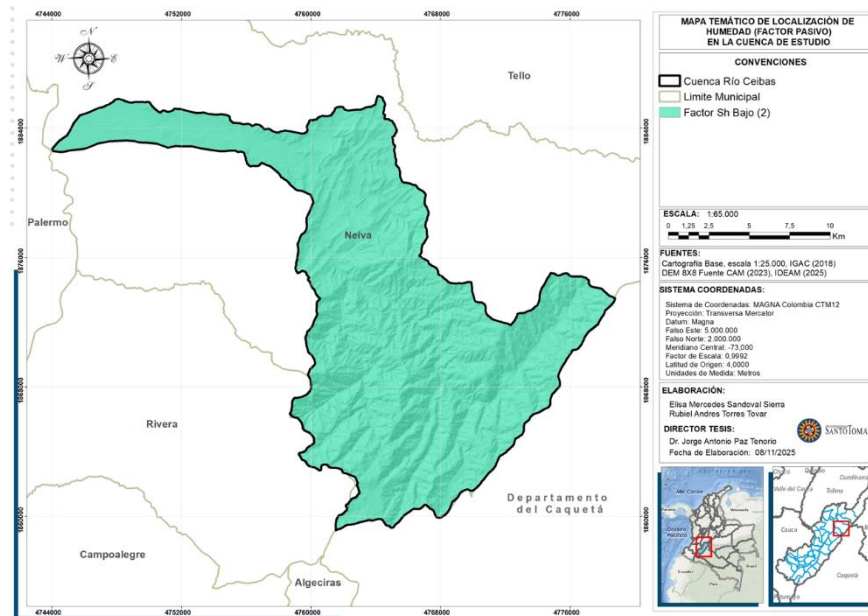


Figura 36. Mapa de Localización de la Humedad Relativa como variable pasiva en la cuenca del río Las Ceibas.

El resultado obtenido refleja que la cuenca del río Las Ceibas presenta una predisposición estructural limitada por humedad del suelo, permitiendo que la evaluación de susceptibilidad se enfoque principalmente en los factores litológicos, geomorfológicos y sísmicos. No obstante, eventos de lluvia extrema podrían incrementar localmente la humedad del suelo, modificando temporalmente la estabilidad y favoreciendo movimientos de masa en sectores ya susceptibles por otras condiciones geotécnicas.

A su vez, Feng Lu et al. (2025) en su trabajo investigativo en donde monitorearon las variaciones espaciotemporales de la humedad del suelo y los factores climáticos en la cuenca de

Reshuihe en el suroeste de China; observaron que los gradientes espaciales y temporales son influenciados por la topografía de la cuenca; de igual manera, determinaron que la humedad del suelo incrementaba con la altitud, aunque la dinámica de aumento se modificaba en función de los gradientes altitudinales y de profundidad, además, la orientación y la posición geomorfológica de la pendiente, ejercieron una influencia determinante sobre la distribución espacial de la humedad del suelo.

De igual manera, Zhao et al. (2019) estimaron la humedad del suelo mediante simulaciones hidrológicas para determinar la probabilidad de deslizamientos de tierra en dos cuencas hidrográficas en la subregión de Emilia-Romaña, en el norte de Italia, encontrando que la distribución de la humedad del suelo está influenciada por múltiples factores, como la topografía, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, las condiciones meteorológicas y los procesos de circulación del agua.

9.2 Factores de Disparo

9.2.1 Actividad Sísmica (*Ds*) (*Sismos*)

Los resultados obtenidos evidencian valores de PGA entre 0,098 y 1,226, lo que corresponde a una intensidad sísmica III (leve) dentro de la clasificación propuesta por los autores. Este rango indica que las aceleraciones esperadas son relativamente bajas y no alcanzan niveles críticos capaces de detonar procesos de remoción en masa de forma directa.

La representación espacial de la sismicidad presente en la figura 37 evidencia una distribución homogénea de los eventos dentro del área de estudio, sin concentraciones críticas que indiquen zonas de amplificación local o focos recurrentes de actividad sísmica. No obstante, se registran epicentros dispersos en la cuenca con magnitudes entre 0,9 y 4,1 Mw, los cuales según el Servicio Geológico Colombiano (2025) reflejan la dinámica tectónica propia de la

región andina central, dominada por la interacción de fallas activas como la Falla Algeciras y la Falla de Garzón, que influyen en la estabilidad estructural del relieve.

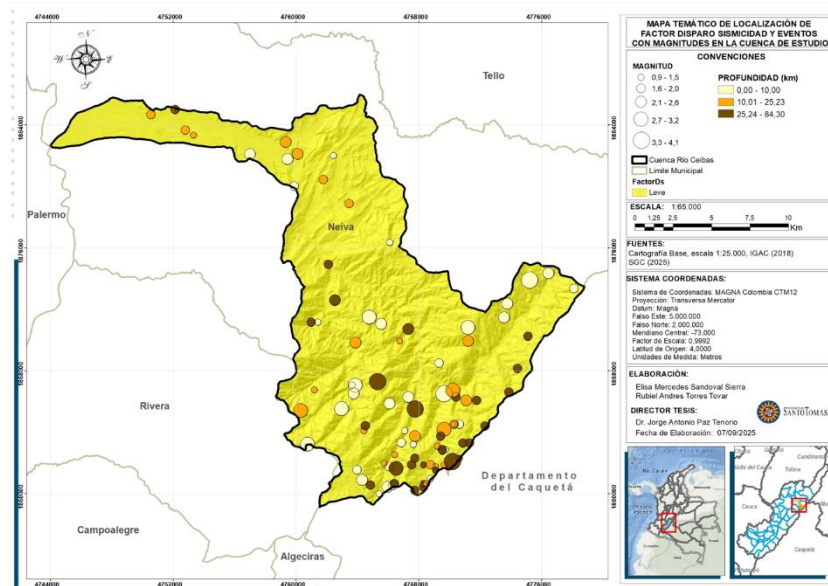


Figura 37. Mapa de Factor de disparo sísmico en la cuenca.

Aunque los resultados obtenidos muestran una condición sísmica clasificada como leve dentro del modelo de Mora y Vahrson, es importante destacar que, según el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia (SGC, 2020), la cuenca del río Las Ceibas se localiza en una zona de amenaza sísmica alta. Esto se explica principalmente por la diferencia en la escala de análisis: mientras el modelo nacional considera escenarios de largo plazo y probabilidades de excedencia a nivel regional, el enfoque metodológico aplicado en este estudio se orienta a evaluar la respuesta puntual del terreno frente a aceleraciones máximas derivadas de registros históricos como el PGA.

En este contexto, la magnitud moderada de los eventos y la baja frecuencia de sismos superficiales recientes en el área contribuyen a que la sísmica actúe como un factor de disparo secundario en la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Sin embargo, su inclusión en el modelo de zonificación es esencial, ya que permite integrar la respuesta potencial del terreno

ante escenarios de mayor energía sísmica, coherentes con las condiciones de amenaza alta reportadas para la región por el SGC (2025).

En general, la actividad sísmica registrada en la cuenca según el parámetro de PGA analizado representa un factor de disparo de baja incidencia, lo que sugiere que su contribución al desencadenamiento de movimientos en masa no es significativa frente a los otros factores ya abordados. No obstante, su consideración resulta relevante dentro del modelo de susceptibilidad, dado que permite integrar la posible respuesta y dinámica del terreno ante eventos sísmicos de mayor PGA que pudieran presentarse en un futuro.

Por tanto, y para fines de esta investigación, el factor sísmico en la cuenca se clasifica dentro del nivel “Leve”, lo que implica que su influencia directa sobre la generación de deslizamientos es limitada, pero no desapercibida. La presencia de focos sísmicos superficiales (<10 km) y la alta susceptibilidad litológica de sectores medios y altos de la cuenca refuerzan la necesidad de mantener la vigilancia de este parámetro.

9.2.2 Precipitación (DP) (Precipitación diaria)

El factor de precipitación en el desarrollo de la metodología de zonificación susceptible a deslizamientos de tierra de Mora y Vahrson es un factor desencadenante directo o también conocido como factor de disparo. Manopkawee y Mankhemthong (2025) mencionan que, desde una perspectiva científica, un deslizamiento corresponde al desplazamiento descendente y acelerado de un volumen de material terrestre que se manifiesta cuando las fuerzas que inducen la inestabilidad superan la capacidad resistente del suelo y de los materiales que lo conforman, de igual manera, afirman que los deslizamientos de tierra son frecuentes en zonas tropicales, donde

las fuertes lluvias elevan la presión de poros en el suelo, reducen su resistencia al corte y favorecen el desplazamiento de los materiales sobre áreas con pendientes inclinadas.

En el presente trabajo de investigación, el factor de precipitación se desarrolló considerando el marco metodológico propuesto por Mora y Vahrson (1993), teniendo en cuenta los datos de precipitación máxima diaria recolectados de las 14 estaciones meteorológicas del IDEAM durante 16 años (2009 - 2024) en el área de la cuenca del Río Las Ceibas y su zona de influencia; obteniendo valores de precipitación máxima diaria en un periodo de retorno de 100 años desde 131,94 a 183,82 mm/día como se evidencia en la siguiente tabla 9:

Tabla 9. Datos de Precipitación máxima diaria TR 100

Estación IDEAM	Altitud (m.s.n.m)	Latitud	Longitud	Precipitación Tr 100 años (mm/día)
Nuevo Paraíso	1525	2,615278	-75,206694	131,94
Papagayo Hacienda	460	2,777583	-75,347528	136,67
Guadual El	735	2,795667	-75,239278	180,95
Juncal El Aut	460	2,828806	-75,331167	161,75
Hato Bogotá	591	3,036028	-75,159722	142,25
Hato Milagro	548	3,074889	-75,168417	178,14
Santa Helena	1160	2,851139	-75,108194	179,76
Cucharó El	620	2,855556	-75,399194	183,82
Santa Barbara	454	2,865528	-75,339889	143,94
Mesa Redonda	500	3,118472	-75,199028	147,89
Neiva	516	2,939722	-75,249028	159,76
Aeropuerto Benito Salas	439	2,94875	-75,293056	174,78
Gironda La Hacienda	1060	2,91	-75,12	151,61
Palacio-Vegalarga	1100	2,942639	-75,066389	145,31

Una vez calculados los valores de precipitación máxima en un periodo de retorno de 100 años en las estaciones meteorológicas del IDEAM utilizadas en el presente estudio, se procedió a establecer los valores de precipitación máxima diaria en toda el área de la cuenca haciendo uso del modelo geoestadístico de interpolación “Kriging”.

La heterogeneidad espacial de precipitación máxima diaria establecida dentro de la cuenca del Río Las Ceibas muestra valores de lluvias en un periodo de retorno de 100 años que van desde los 150 hasta los 180 mm/día; asimismo, se observa que la zona más baja de la cuenca y la región de transición de zona media a alta, presentan los valores más elevados de precipitación como se evidencia en la figura 38.

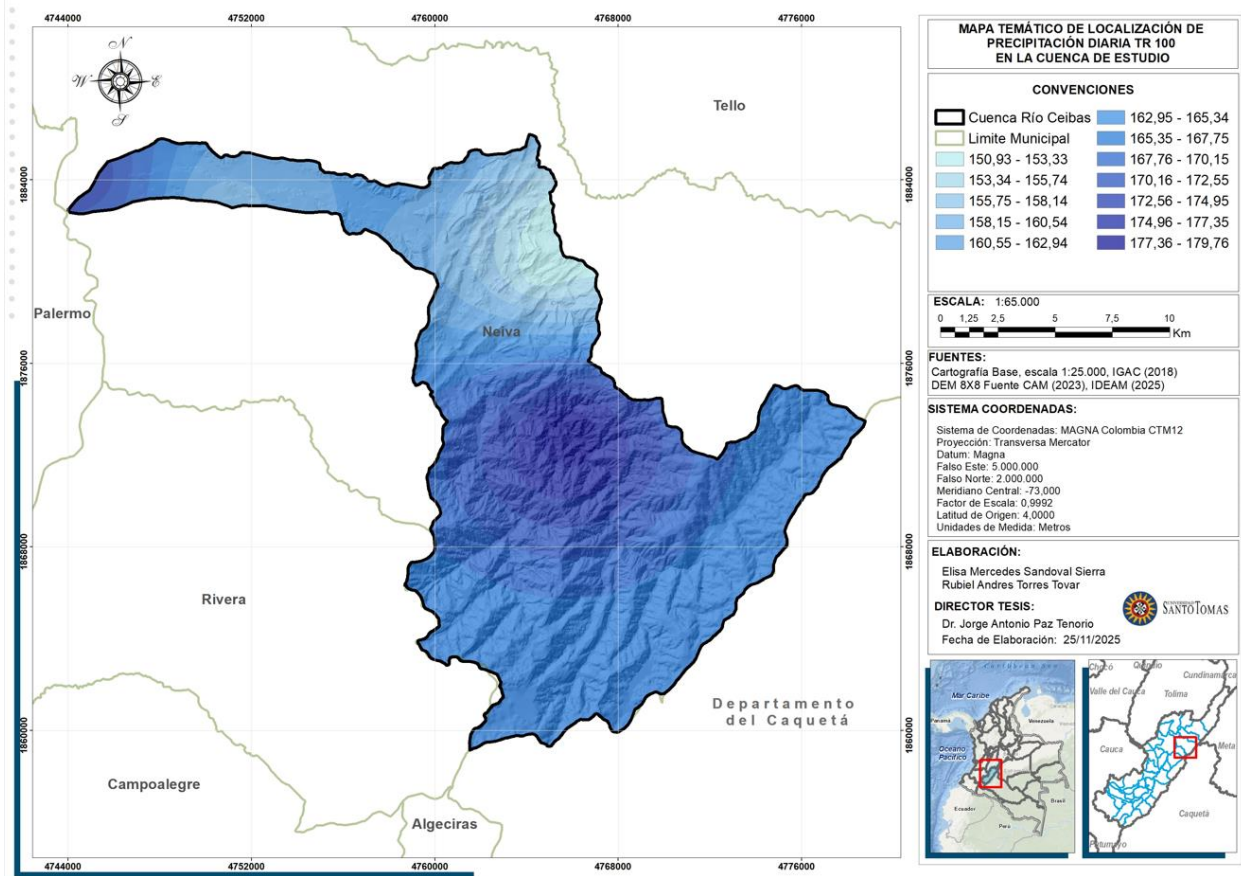


Figura 38. Mapa de precipitación diaria Tr 100 Años en la cuenca.

El factor de precipitación del método Mora y Vahrson (1993) para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del Río Las Ceibas representa uno de los dos factores externos detonantes, al cuantificar el papel de la lluvia extrema diaria en la generación de inestabilidad de laderas. Este factor refleja la capacidad de la precipitación intensa para

incrementar la presión de poros, disminuir la resistencia al corte de los suelos y, en consecuencia, activar procesos de remoción en masa.

En el presente estudio, los valores de precipitación máxima diaria registrados en la cuenca del Río Las Ceibas se ubicaron dentro del intervalo comprendido entre 101 y 200 mm/día, rango que, de acuerdo con la tabla de clasificación del método, corresponde a una calificación “Baja” y a un Factor Tp igual a “2” como se muestra a continuación figura 39:

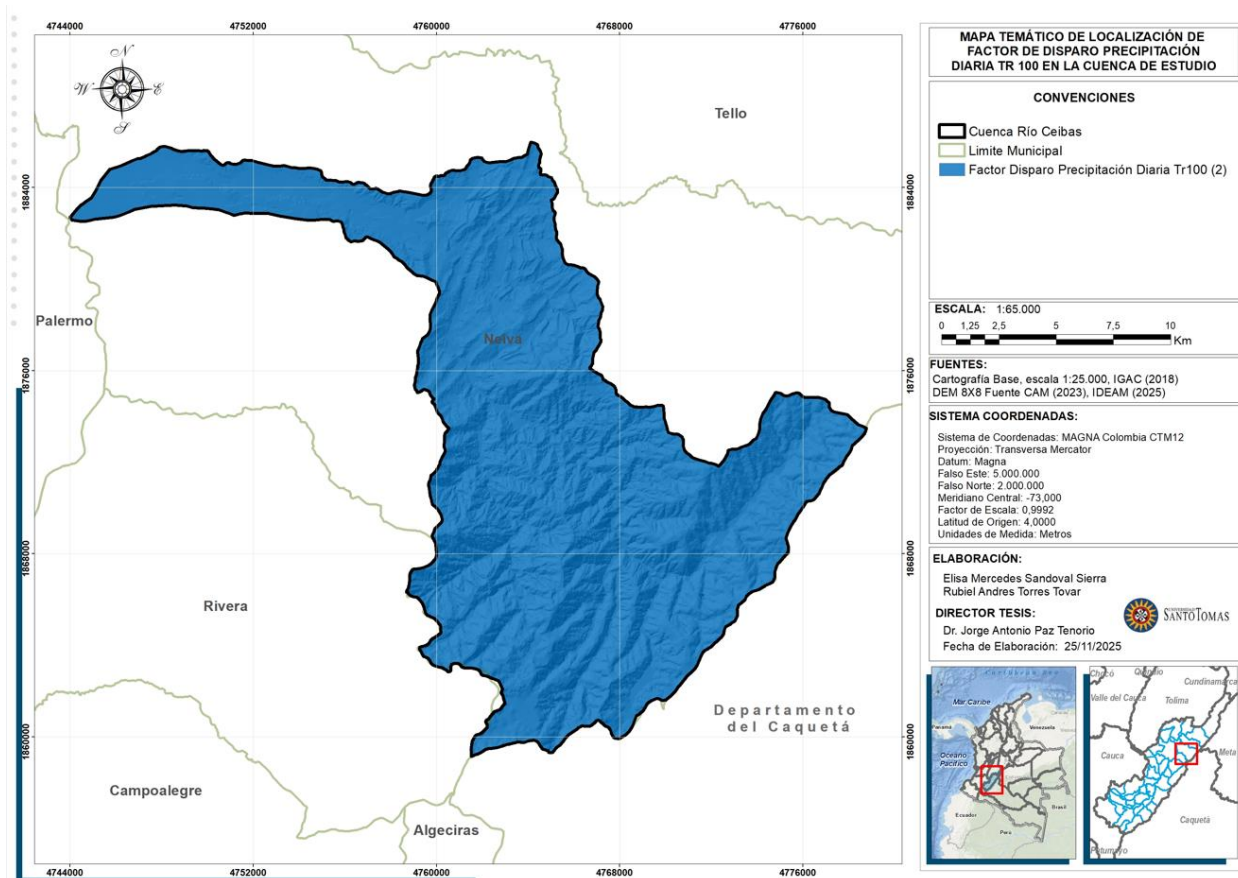


Figura 39. Mapa de Factor de disparo - precipitación diaria Tr 100 Años en la cuenca.

Este resultado indica que, aunque la cuenca presenta eventos de lluvia intensa con capacidad de alterar el equilibrio mecánico del suelo superficial, dichos eventos no alcanzan magnitudes extremas que impliquen una influencia detonante alta o muy alta sobre la ocurrencia

de deslizamientos. No obstante, este nivel de precipitación sigue siendo hidrológicamente importante, debido que es suficiente para generar saturación progresiva de los poros vacíos en el suelo e incremento de la carga hidráulica en laderas, lo que favorece la inestabilidad y también contribuye a las condiciones propicias para reactivar deslizamientos preexistentes, especialmente en zonas con pendientes elevadas y materiales poco consolidados.

Es importante precisar que este resultado no indica ausencia de amenaza, sino que refleja una condición de detonancia asociada a lluvias moderadas, cuya peligrosidad real se incrementa cuando ocurre en periodos continuos de varios días, dado que estas acumulaciones sucesivas pueden conducir a la saturación completa del suelo. Esta condición se potencia, cuando interactúa con factores pasivos como la pendiente, la litología y la humedad del suelo. En este sentido, la precipitación máxima diaria en la cuenca de Las Ceibas actúa como un factor de disparo, cuyo efecto depende de la susceptibilidad intrínseca del terreno.

Shimizu y Asahiro (2026) en su investigación establecen que la lluvia es un factor crítico en el desencadenamiento de deslizamientos, y existe una correlación entre la magnitud de estos y la cantidad de lluvia. En particular, sugieren que la lluvia a corto plazo tiene una influencia significativa en la probabilidad de que se produzcan deslizamientos.

Asimismo, Ayele et al. (2025) afirman que los deslizamientos de tierra pueden ser causados por fuertes precipitaciones, por lo que, la cantidad de lluvia, su intensidad y la distribución espacial tienen impacto directo en los eventos de movimientos en masa. A su vez Calpa (2026) concluye en su trabajo de investigación que, durante los eventos de precipitación, los suelos que presentan características hidráulicas que contribuyen a un drenaje lento alcanzan el punto de saturación primero, generando mayor inestabilidad.

9.3 Zonificación de Susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa en la cuenca producto de la metodología de Mora y Vahrson.

A partir de la integración de los factores pasivos y detonantes en la cuenca, se obtuvo el mapa de susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa en la cuenca del río las Ceibas, aplicando la metodología de Mora y Vahrson (1993). En este procedimiento, cada variable fue ponderada según su grado de incidencia sobre la estabilidad del terreno, de acuerdo con los criterios de los autores, permitiendo obtener una representación espacial como se evidencia en la figura 40.

El resultado final, ilustrado en la figura 40, muestra que el nivel de susceptibilidad “Moderado” predomina ampliamente en la cuenca, ocupando un 74,09 % del área total (22.108,06 ha). Esta categoría refleja condiciones geomorfológicas que, aunque no extremadamente inestables, presentan una combinación de pendientes medias a altas, suelos con moderada cohesión y episodios de precipitación que pueden favorecer la saturación temporal del terreno. Estas características hacen que estas zonas requieren especial atención en procesos de ocupación y planificación territorial, debido a su vulnerabilidad ante eventos extremos o acumulativos de lluvia (Mora & Vahrson, 1993; SGC, 2020).

La categoría de susceptibilidad media (0,04 %; 12,62 ha) corresponde a áreas puntuales con combinaciones locales de alta pendiente, suelos con limitada capacidad de drenaje y condiciones estructurales desfavorables, ubicadas principalmente en los sectores medios de la cuenca. Aunque representan una proporción mínima, su presencia es significativa en términos de riesgo, pues en estos puntos es donde la acumulación de humedad, sumada a las lluvias intensas o a una posible acción sísmica, puede detonar procesos de remoción en masa.

Por su parte, las zonas clasificadas con susceptibilidad baja (9,51 %; 2.837,57 ha) y muy baja (16,36 %; 4.883,23 ha) se concentran principalmente en los sectores altos del norte y en

donde termina la cuenca que es área más plana. En estos lugares predominan materiales más competentes y relieves suaves, lo que reduce la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. Sin embargo, su estabilidad no debe considerarse 100% estable, ya que como afirma Quevedo et al. (2023), los cambios en el uso del suelo y la cobertura tienen capacidad de modificar las condiciones de equilibrio, especialmente en zonas de contacto entre formaciones litológicas contrastantes o en laderas con cubiertas vegetales degradadas.

La distribución espacial de las categorías en la cuenca evidencia una tendencia de incremento de la susceptibilidad de norte a sur, coincidente con el aumento del gradiente altitudinal y la variabilidad litológica, donde los materiales más alterados y fracturados de las formaciones sedimentarias del Grupo Honda y del Macizo de Garzón presentan condiciones más favorables al deslizamiento. Este patrón concuerda con observaciones previas de estudios geotécnicos realizados por el Servicio Geológico Colombiano (2025) y con la cartografía de movimientos en masa históricos, que reportan mayor concentración de deslizamientos en las partes medias y bajas del río Las Ceibas.

En síntesis, los resultados del modelo de Mora y Vahrson (1993) aplicado en la cuenca del río Las Ceibas permiten identificar una cuenca con predominio de susceptibilidad moderada, donde las condiciones morfológicas, litológicas e hidrológicas interactúan para generar un equilibrio dinámico. Si bien los factores detonantes analizados (precipitación y sismicidad) presentan valores de incidencia relativamente bajos según la categoría de la metodología, su efecto acumulativo o sinérgico bajo eventos extremos puede incrementar significativamente la probabilidad de remoción, especialmente en las zonas con pendientes superiores al 30 %.

La conclusión anterior es comparable con experiencias de aplicación de la metodología en contextos colombianos, donde la combinación de factores condicionantes y desencadenantes

determina la expresión espacial de la amenaza por remoción en masa. Por ejemplo, estudios de caso realizados en áreas urbanas y rurales de Colombia como Rodríguez et al. (2013) han demostrado que aun cuando la mayor extensión del territorio pueda clasificarse con susceptibilidad baja o moderada, puntos localizados con condiciones geomorfológicas y de uso del suelo adversas concentran la mayor parte del riesgo real, requiriendo medidas puntuales de mitigación y ordenamiento.

Asimismo, investigaciones recientes como Ortiz-Maestre et al. (2023) que adaptaron y complementaron el método Mora y Vahrson (1993) han resaltado la importancia de incorporar variables locales por ejemplo cambios en cobertura y drenaje superficial para mejorar la correspondencia entre zonificaciones y ocurrencias históricas de deslizamientos en municipios del Caribe colombiano. Es por lo que la zonificación obtenida en la cuenca del río Las Ceibas aporta una base para priorizar acciones de gestión del riesgo, pero debe complementarse.

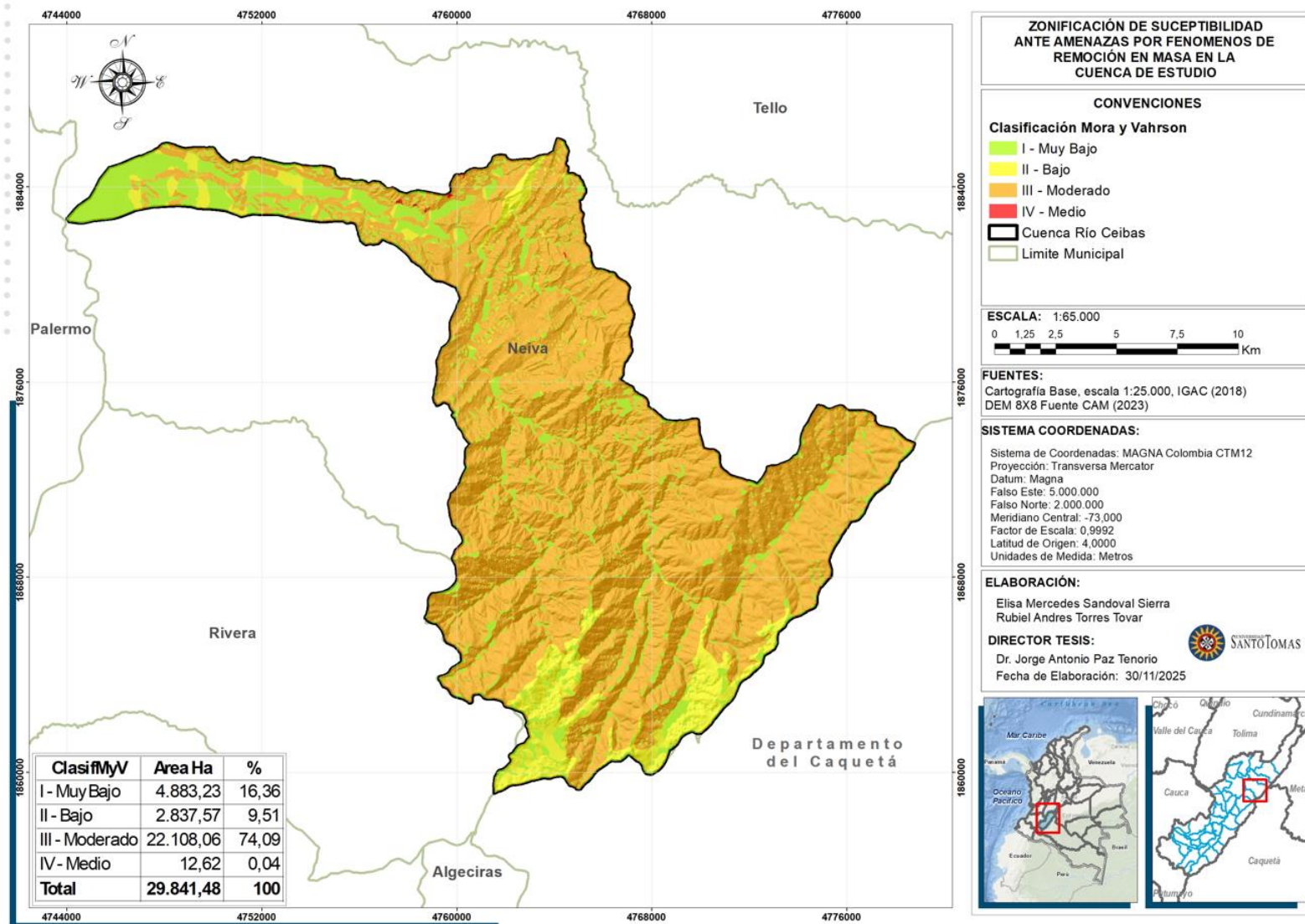


Figura 40. Mapa de zonificación de susceptibilidad ante amenazas por fenómenos de remoción en masa en la cuenca.

9.3.1 Zonificación de Susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa producto de la metodología de Mora y Vahrson Vs Equipamientos e Infraestructura presente en la Cuenca.

Complementando la interpretación de la zonificación de susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa, se realizó un análisis de superposición espacial entre las categorías obtenidas de amenaza mediante la metodología de Mora y Vahrson (1993) para la cuenca de estudio y la localización de equipamientos (Centros educativos, Bocatomas y Centro de Salud) y redes de infraestructura vial presentes en la cuenca del río Las Ceibas, esta información fue tomada de los instrumentos de planificación territorial. Obteniendo de este proceso la espacialización de los elementos expuestos que podrían verse afectados ante la ocurrencia de eventos de inestabilidad como se evidencia en la figura 41. La mayor concentración de equipamientos, especialmente aquellos asociados a seis centros educativos rurales, en cuanto a redes de infraestructura vial se identificó que del total (470,56 Km) es decir el 66,94% se localizan en áreas clasificadas con susceptibilidad moderada.

La relación de estos elementos en zonas con condiciones geomorfológicas intermedias sugiere la necesidad de incorporar criterios de gestión del riesgo en los procesos de planificación territorial, dado que, aunque la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa no es extrema, sí se presentan condiciones que pueden favorecer su activación bajo eventos detonantes como lluvias intensas, o eventos sísmicos de fuerte Magnitud y superficiales.

En cuanto a las zonas de susceptibilidad Baja y Muy Baja se observó una menor densidad de equipamientos. En la categoría Baja se identificó la superposición con dos instituciones educativas, mientras que en la categoría muy baja se registraron cinco. Con respecto a las redes de infraestructura vial, se identificó que el 25,79% de las vías se localizan en la categoría de

susceptibilidad Muy Bajo y el 7,27% en categoría Bajo. Si bien estos equipamientos presentan condiciones relativamente estables, la presencia de vías implica intervenciones sobre el terreno que pueden modificar localmente su estabilidad. Especialmente en sectores donde se realizan cortes de talud o se altera por condiciones de saturación del suelo, lo que puede generar inestabilidad del terreno y, eventualmente, desencadenar procesos de remoción en masa.

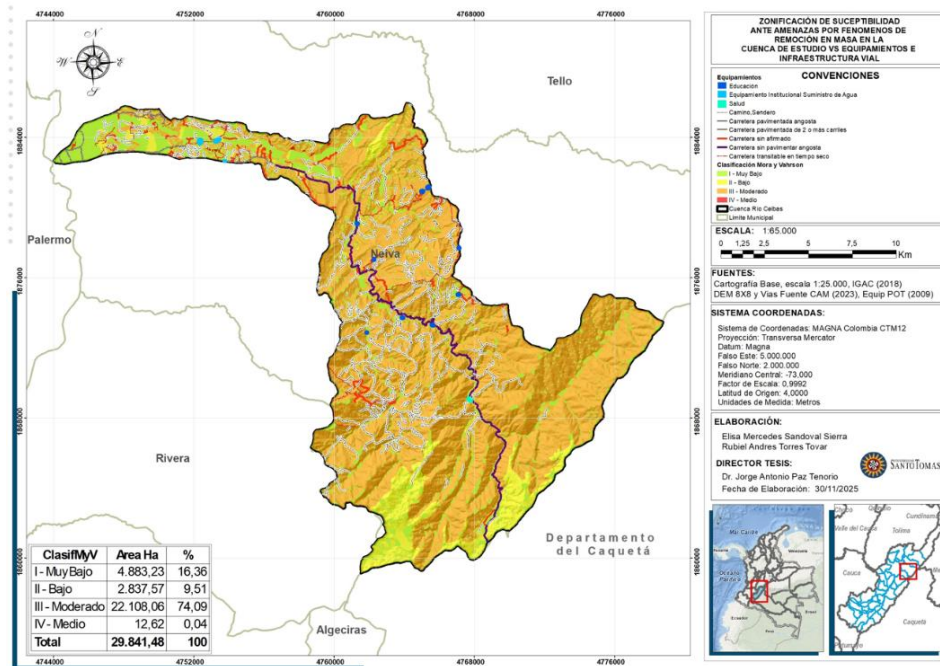


Figura 41. Zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa Vs Equipamientos e Infraestructura Vial.

Finalmente, se evidenció que la red vial principal, encargada de conectar los distintos sectores de la cuenca, atraviesa principalmente áreas con susceptibilidad moderada y, en menor proporción, sectores con condiciones baja y muy baja. Lo anterior, refleja la necesidad de implementar acciones de monitoreo, mantenimiento y estabilización de taludes a lo largo de los corredores viales, con el propósito de reducir la vulnerabilidad de la infraestructura, garantizando la continuidad de las funciones territoriales. Así mismo, estas medidas contribuirían a prevenir la ocurrencia de eventos similares a los registrados históricamente en la cuenca como el desastre de Balsillas ocurrido el 29 de diciembre de 2012.

9.4 Comparación del resultado de amenazas aplicado con la metodología de Mora y Vahrson con registro de datos históricos de deslizamiento en la cuenca.

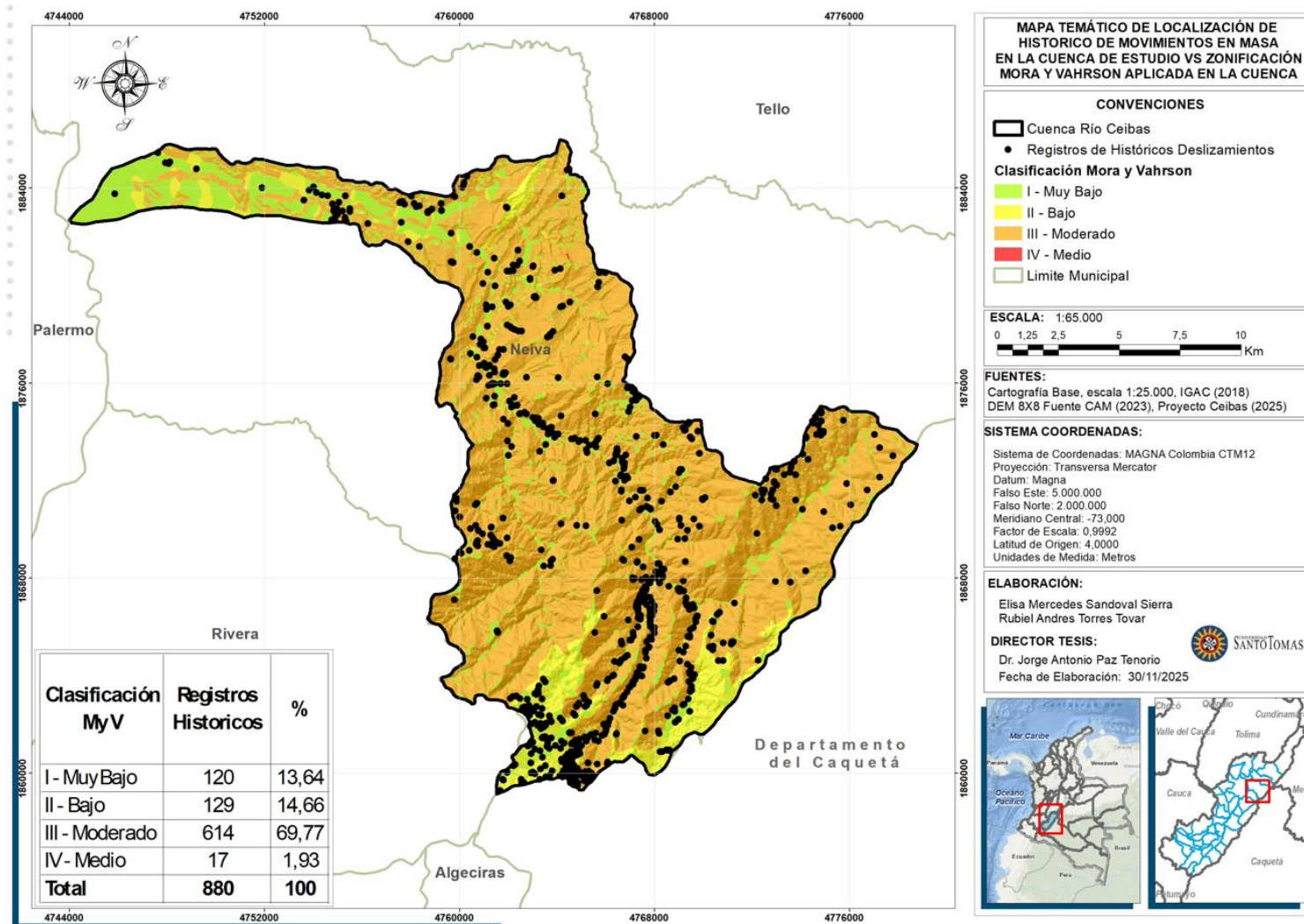


Figura 42. Localización de Históricos de deslizamientos Vs Zonificación

Para analizar la confiabilidad espacial del modelo, se evaluó la distribución de los eventos históricos de remoción en masa dentro de las diferentes categorías de susceptibilidad de amenaza obtenidas mediante la metodología de Mora y Vahrson. Este análisis permitió identificar la concentración de eventos en cada categoría y establecer el grado de correspondencia espacial entre los registros históricos y la zonificación generada.

La figura 42, presenta la comparación entre la zonificación de amenazas generada mediante la metodología de Mora y Vahrson y el inventario histórico de deslizamientos, lo que permitió evaluar la ubicación espacial entre las áreas clasificadas como susceptibles y los eventos registrados en la cuenca del Río Las Ceibas. Este contraste constituyó un paso importante para validar la capacidad del modelo de identificar zonas con condiciones favorables a la inestabilidad ante fenómenos de remoción en masa y, al mismo tiempo, reconocer los alcances y limitaciones de su aplicación.

A continuación, en la tabla 10 se presenta la distribución porcentual de eventos históricos, evidenciando que las categorías moderada y media concentran la mayor proporción de registros de remoción en masa, lo cual sugiere una correspondencia espacial coherente entre la zonificación obtenida y el comportamiento histórico documentado en la cuenca.

Tabla 10. Distribución porcentual de eventos históricos, evidenciando que las categorías

Clasificación Mora y Vahrson	Registros Históricos	%
I- Muy Bajo	120	13,64
II- Bajo	129	14,66
III- Moderado	614	69,77
IV- Medio	17	1,93
Total	880	100

Fuente: Elaboración propia, (2026)

La superposición del mapa de susceptibilidad ante amenazas de la figura 40. Con los 880 registros georreferenciados mostraron que la mayor concentración de eventos se localiza dentro

de la categoría de amenaza moderada, que abarca aproximadamente tres cuartas partes del territorio como se evidencia en la figura 43. Esta coincidencia permite capturar las interacciones entre los factores pasivos y detonantes, los cuales explican buena parte de la dinámica de los fenómenos de remoción en masa observados en la cuenca. La tendencia coincide, además con el predominio de pendientes fuertes y con condiciones recurrentes en los sitios donde históricamente han ocurrido deslizamientos como se evidencia a continuación:

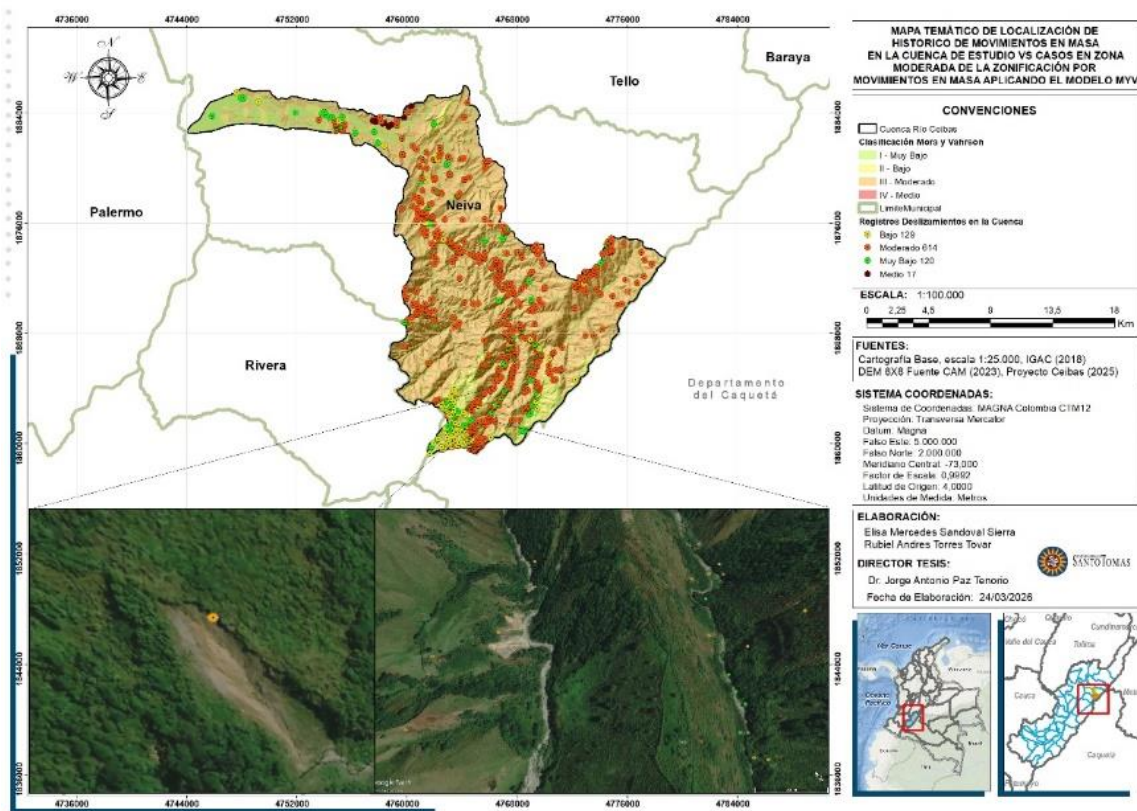


Figura 43. Casos reportados en amenaza moderada Vs Históricos

Los casos localizados en amenaza media presentes en la figura 44 se distribuyen de forma continua a lo largo de los sectores medio y bajo de la cuenca, en áreas caracterizadas por pendientes moderadas a fuertes y por la presencia de unidades litológicas con niveles intermedios de cohesión y fracturamiento. El patrón observado en el mapa evidencia una relación directa entre la ocurrencia de deslizamientos y la interacción de factores pasivos, como el relieve

y la litología, con detonantes asociados principalmente a la precipitación y, en menor medida, a la actividad sísmica.

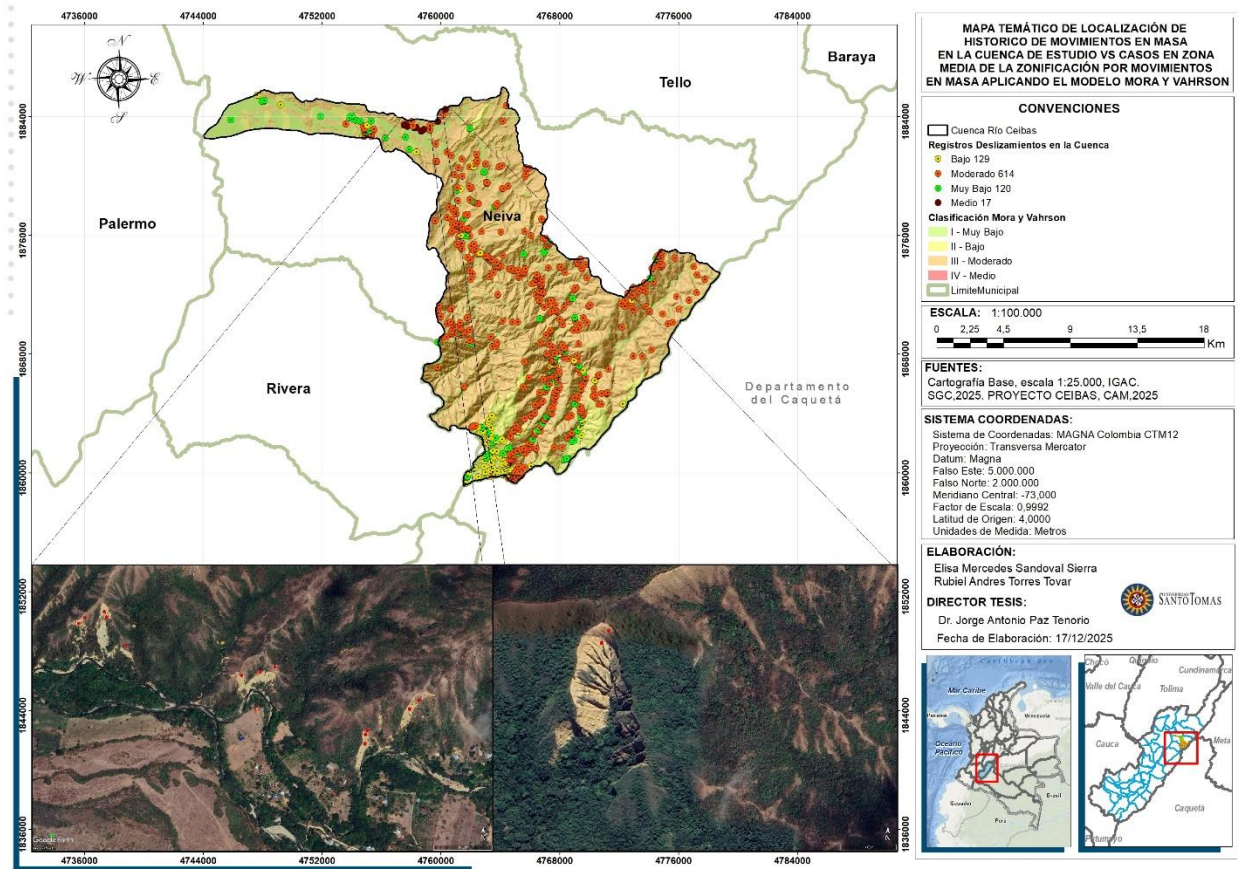


Figura 44. Casos reportados en amenaza Media Vs Históricos revisados en Google earth.

La verificación espacial también mostró la presencia de un número reducido de eventos dentro de las categorías de amenaza baja y muy baja 14,66% y 13,64% respectivamente como se aprecia en la figura 45. Si bien esta proporción es menor, su ocurrencia puede sugerir que algunos detonantes locales o modificaciones antrópicas del terreno como cambios recientes en la cobertura vegetal, apertura de vías, remoción de suelos o alteraciones en los drenajes, pueden generar inestabilidades no plenamente representadas por los parámetros del modelo original. Estos casos puntuales indican la necesidad de continuar ajustando la metodología con variables

adicionales que mejoren su resolución espacial, especialmente en zonas donde las condiciones ambientales han cambiado de forma acelerada.

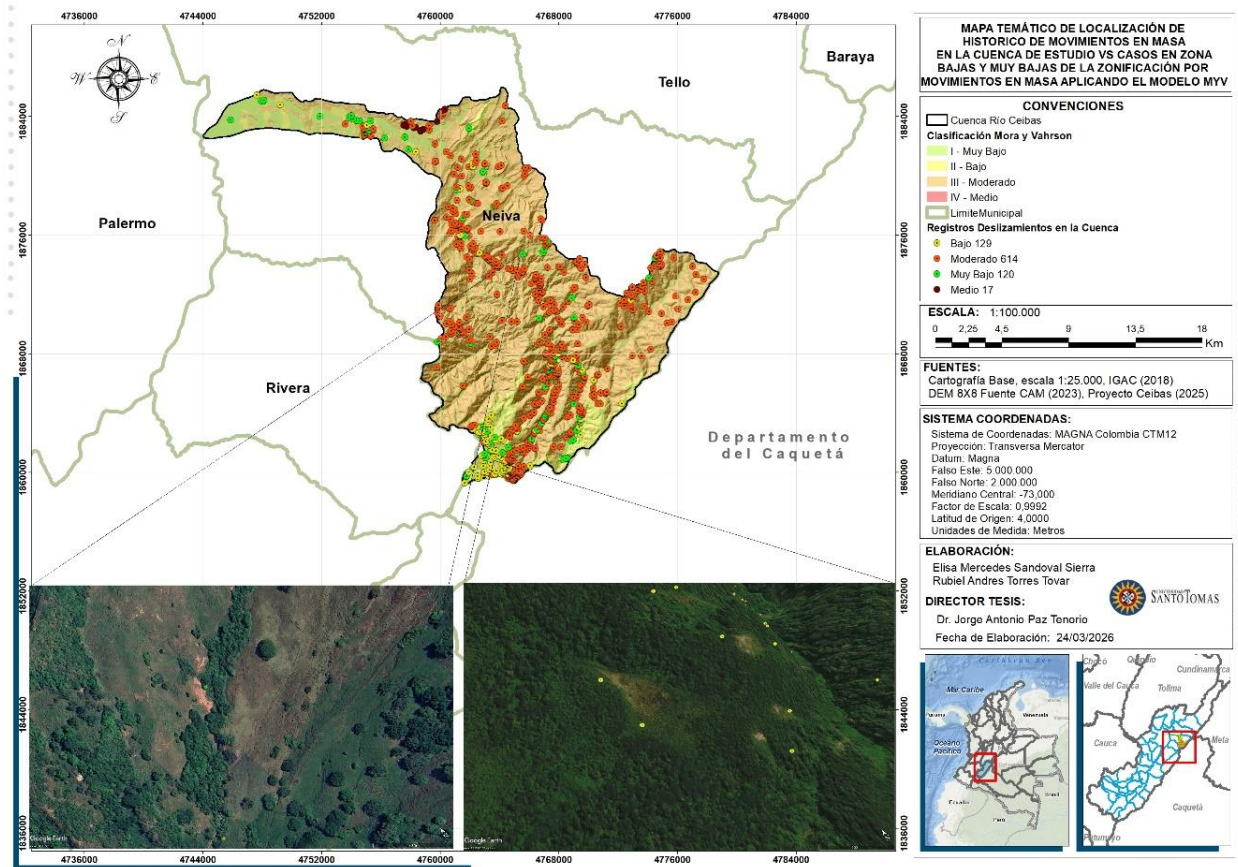


Figura 45. Casos reportados en amenaza baja y muy baja Vs Históricos revisados en Google earth.

Asimismo, el análisis comparativo entre zonas clasificadas con amenaza moderada y los registros históricos muestra que la cuenca experimenta un equilibrio dinámico en el que pequeños incrementos en la saturación del suelo, lluvias intensas o aceleraciones sísmicas moderadas pueden detonar procesos de remoción en masa. La validación permite concluir que, aunque los detonantes presentan valores categorizados como bajos en algunas áreas según la metodología, su efecto combinado resulta decisivo en escenarios de umbral, especialmente en laderas con pendientes superiores al 30 %.

La comparación entre la zonificación obtenida y el inventario histórico en el área de la cuenca permite concluir que la metodología de Mora y Vahrson permite delimitar áreas con condiciones favorables a la inestabilidad. No obstante, en futuros ejercicios se recomienda ajustar los parámetros de la metodología a condiciones locales. En cuanto a los deslizamientos registrados en sectores clasificados con amenaza baja o muy baja destacan la necesidad de revisiones periódicas que incorporen cambios recientes en la cobertura, intervenciones antrópicas o variaciones locales en el drenaje. Bajo esta perspectiva, la actualización continua de los insumos y la validación con nuevos registros permitirá que la zonificación se consolide como una herramienta fiable para la gestión del riesgo y para la toma de decisiones en procesos de planificación territorial dentro de la cuenca.

En los últimos años, la evaluación de susceptibilidad y amenaza por remoción en masa ha incorporado metodologías basadas en aprendizaje automático, análisis multicriterio e inteligencia artificial, las cuales buscan aumentar la precisión en la identificación de zonas inestables. Estas metodologías difieren del modelo de Mora y Vahrson principalmente en la cantidad de información requerida, el nivel de procesamiento y la complejidad de los análisis.

Liu et al. (2024), en la cuenca del río Beiluo en China, combinaron índices geomorfológicos con el modelo MaxEnt y factores condicionantes asociados a deslizamientos. Los resultados mostraron un mejor desempeño predictivo, alcanzando valores AUC de hasta 0.803. El estudio evidencio que la incorporación de variables geomorfológicas detalladas y técnicas de aprendizaje automático mejora la representación espacial de los procesos de remoción en masa. Sin embargo, los autores afirman que este tipo de modelos dependen de inventarios históricos amplios y de una validación estadística rigurosa para obtener resultados confiables.

De manera similar, Salehpour Jam et al. (2023) aplicaron metodologías híbridas multicriterio tipo AHP-SAW, AHP-TOPSIS y AHP-VIKOR para la elaboración de mapas de susceptibilidad en Iran, Los valores AUC obtenidos oscilaron entre 0.793 y 0.833. Los autores resaltan que estos métodos facilitan la integración de variables ambientales y análisis rasterizados con herramientas SIG, aunque advierten que los resultados pueden variar dependiendo de la selección de variables y de la ponderación definida por los expertos.

Por otra parte, investigaciones más recientes han incorporado enfoques de inteligencia artificial explicable (XAI) y modelos de aprendizaje ensamblado. En la investigación de Utthasini et al. (2025), en los Himalayas de Uttarakhand (India), desarrollaron un modelo basado en Random Forest, XGBoost y ensamblajes de machine learning con análisis SHAP, alcanzando valores AUC cercanos a 0.979. El estudio demuestra altas capacidades predictivas mediante la integración de 35 variables geoambientales y grandes inventarios históricos; sin embargo, los autores reconocen que este tipo de metodologías requiere bases de datos robustas, mayor capacidad computacional y procesos complejos de entrenamiento y calibración de modelos.

Asimismo, Jen y Chen (2026) desarrollaron un enfoque multitemporal mediante fotogrametría SfM-MVS y modelos digitales de superficie históricos para evaluar cambios geomorfológicos asociados a deslizamientos y flujos de detritos en Taiwán. Los autores lograron reconstruir dinámicas topográficas de varias décadas y detectaron deformaciones previas a eventos de inestabilidad. Aunque estos enfoques permiten análisis espaciales muy detallados, su aplicación depende de la disponibilidad de imágenes históricas de alta resolución y de procesos especializados de corrección y procesamiento fotogramétrico.

Frente a estas metodologías, el modelo de Mora y Vahrson continúa siendo una alternativa funcional para estudios regionales donde la disponibilidad de información y monitoreo es limitada.

Su estructura multicriterio permite integrar variables geomorfológicas, litológicas, hidroclimáticas y sísmicas mediante herramientas SIG convencionales, sin requerir altos niveles de procesamiento computacional.

A pesar de estas limitaciones, el análisis comparativo realizado con registros históricos georreferenciados este estudio permitió evidenciar una correspondencia espacial adecuada entre las categorías de amenaza obtenidas y la distribución histórica de eventos en la cuenca del río Las Ceibas, lo que sugiere que el modelo Mora y Vahrson continúa siendo una herramienta metodológicamente válida para estudios regionales de evaluación de amenazas por remoción en masa en cuencas andinas con restricciones de información detallada.

La zonificación obtenida puede servir como información de apoyo para instrumentos de planificación y ordenamiento territorial como el POMCA del río Las Ceibas, los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y los instrumentos municipales de gestión del riesgo, especialmente en la incorporación de determinantes ambientales y criterios relacionados con amenazas por movimientos en masa. La articulación de este tipo de análisis con procesos institucionales puede fortalecer la toma de decisiones orientadas a la reducción de condiciones de amenaza y al manejo sostenible del territorio.

Conclusiones

En este trabajo de investigación, se utilizó la metodología de Mora y Vahrson en combinación con tecnologías geoespaciales como son los SIG, para mapear la zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa, analizando la combinación de los factores pasivos y de disparo que integran características geomorfológicas como son pendiente, litología, geología, sismicidad, e hidroclimáticas en la cuenca. Los resultados mostraron que las zonas clasificadas con niveles de amenaza alta y media se concentran principalmente en sectores de pendientes pronunciadas, litologías susceptibles, mayores contenidos de humedad del suelo y regímenes de precipitación intensos, condiciones que históricamente han favorecido la ocurrencia de deslizamientos en la cuenca.

La mayor parte del factor pendiente (Sr) de la cuenca se ubica en las categorías “Alto” y “Muy Alto” lo que infiere que la morfodinámica del relieve ejerce un control directo sobre la distribución de zonas potencialmente inestables, lo cual es coherente con los patrones identificados en estudios recientes desarrollados.

El análisis litológico reforzó lo anterior, al mostrar que buena parte de la cuenca se asienta sobre unidades con niveles intermedios de cohesión, fracturamiento y alterabilidad. Aunque estas litologías no representan por sí solas un factor crítico, su interacción con el relieve y con condiciones de saturación sostenida aumenta la probabilidad de deslizamientos superficiales.

En cuanto al componente de la sismicidad en la cuenca del río Las Ceibas, incorporado como factor detonante dentro del modelo de Mora y Vahrson, permitió reconocer que, aunque la actividad sísmica registrada no alcanzó niveles de aceleración pico extraordinarios o niveles altos dentro de la metodología, su influencia adquiere relevancia al interactuar con los otros factores

como son la pendiente y con unidades litológicas susceptibles al fracturamiento. Sumado lo anterior al comportamiento histórico de los deslizamientos demuestra que incluso aceleraciones menores pueden detonar fallamientos superficiales cuando se presentan en condiciones de saturación acumulada o durante ciclos de lluvia intensa.

El análisis hidrológico sirvió como base para la elaboración de los mapas de humedad del suelo y precipitación máxima diaria, el primero como representación de un factor intrínseco de susceptibilidad y el segundo como un factor desencadenante; ambos factores tuvieron una clasificación “Bajo” según Mora y Vahrson, sugiriendo que su impacto en la influencia directa en la ocurrencia de deslizamientos se encuentra condicionado por la interacción con los demás factores presentes en la cuenca.

El contraste espacial entre la zonificación obtenida y el inventario histórico de eventos georreferenciados permitió evaluar la confiabilidad del modelo. Los resultados mostraron que la mayor parte de los eventos registrados se concentra en áreas clasificadas con niveles de amenaza moderada (69,77%) de la cuenca. La validación geoespacial mediante el análisis de imágenes satelitales confirmó, en estas zonas de amenaza media y moderada, la presencia de cicatrices asociadas a procesos de remoción en masa, incluyendo deslizamientos de mayor extensión y expresión morfológica. Estos hallazgos indican que existe una correspondencia espacial entre la ocurrencia histórica de los eventos y los factores condicionantes y detonantes considerados en la metodología, lo que respalda la capacidad de la metodología para representar de forma adecuada los patrones territoriales de la amenaza por remoción en masa a escala de cuenca.

En los resultados obtenidos se evidenció la presencia del número reducido de eventos en zonas de amenaza baja y muy baja, lo que indica que estos sectores mantienen condiciones relativamente estables o se deduce que es conveniente continuar ajustando y validando la

metodología con parámetros acorde a las condiciones y características del área de estudio para su espacialización.

El enfoque comparativo de esta investigación, basado en la validación mediante registros históricos, representa uno de los principales aportes de esta investigación. La incorporación del inventario de deslizamientos permitió ir más allá de la generación cartográfica y avanzar hacia una evaluación crítica del desempeño de la metodología, fortaleciendo su aplicabilidad práctica y destaca su valor como herramienta de apoyo a la toma de futuras decisiones en el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo por movimientos en masa.

Los resultados obtenidos aportan un insumo técnico relevante para los procesos de planificación ambiental y territorial en la cuenca del río Las Ceibas, en particular para la articulación entre instrumentos como el POMCA y el POT del municipio de Neiva. Asimismo, la investigación establece una base metodológica replicable para futuras evaluaciones de amenaza en cuencas con características similares, y abre la posibilidad de integrar, en estudios posteriores, enfoques complementarios que incorporen variables dinámicas, análisis probabilísticos o técnicas avanzadas de modelación espacial, con el fin de aportar a un proceso de gestión del riesgo, planificación territorial y la toma de decisiones orientadas a reducción de impactos ante los fenómenos de remoción en masa.

Los resultados obtenidos corresponden a una zonificación de amenaza y susceptibilidad ante fenómenos de remoción en masa, derivada de la interacción de variables físicas y detonantes establecidas en el modelo Mora y Vahrson. En consecuencia, el estudio no constituye una evaluación conjunta del riesgo, debido a que no incorpora variables de vulnerabilidad ni análisis de exposición de elementos sociales, económicos o de infraestructura.

Aunque la metodología Mora y Vahrson demostró una correspondencia espacial adecuada frente al inventario histórico analizado, el estudio reconoce que la precisión de los resultados puede verse condicionada por la escala cartográfica utilizada, la resolución de los insumos geográficos y la disponibilidad de información histórica confiable.

De igual forma, se identificó que metodologías recientes basadas en modelos estadísticos y aprendizaje automático ofrecen mayores niveles de precisión predictiva en algunos contextos; sin embargo, su aplicación requiere mayores capacidades técnicas, disponibilidad de datos multitemporales y procesos de calibración avanzados.

Se recomienda que futuras investigaciones integren metodologías híbridas que combinen modelos multicriterio con técnicas estadísticas, aprendizaje automático e información satelital multitemporal, con el fin de fortalecer la precisión espacial de las zonificaciones y mejorar los procesos de validación de amenazas por remoción en masa en cuencas andinas.

En términos territoriales, los resultados obtenidos pueden constituir un insumo de referencia para entidades ambientales y administraciones municipales en la priorización de áreas para seguimiento, evaluación y formulación de medidas preventivas frente a fenómenos de remoción en masa.

Consideraciones éticas

La presente investigación se desarrolló bajo criterios de transparencia y uso responsable de la información, considerando que la información recolectada constituye un insumo de apoyo para la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial en la cuenca del río Las Ceibas. El estudio se fundamentó en información secundaria oficial suministrada por entidades como la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), garantizando la confiabilidad y trazabilidad de los datos utilizados.

Asimismo, se garantizó la transparencia metodológica mediante la descripción de las fuentes de información, variables analizadas, escalas cartográficas y procedimientos SIG empleados para la aplicación del modelo de Mora y Vahrson. Adicionalmente, las entidades oficiales que suministraron la información utilizada en el estudio no establecieron restricciones específicas sobre el uso académico de los datos entregados en sus comunicaciones oficiales.

De igual manera, en cada una de las salidas cartográficas y mapas temáticos elaborados en la presente investigación se conservaron las respectivas fuentes de información base utilizadas para el desarrollo de cada temática, garantizando la trazabilidad, reconocimiento institucional y transparencia en la representación de los resultados.

Referencias Bibliográficas

- Abdollahi, M, Farshid Vahedifard, Ben A. (2024). Leshchinsky, Hydromechanical modeling of evolving post-wildfire regional-scale landslide susceptibility, *Engineering Geology*, Volume 335, 107538, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107538>.
- Ait Omar, M., Etebaai, I., Taher, M., & Tawfik, A. (2025). Landslide susceptibility mapping in the Bokoya Massif, Northern Morocco: A geospatial and multi-factor analysis using the analytic hierarchy process (AHP). *Scientific African*, 30, e02980. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02980>
- Al-kordi, Abdulmohsen Al-Amri, Govinda raju. (2025) Landslide Susceptibility Mapping Using Geospatial, Analytical Hierarchy Process (AHP), and Binary Logistic Regression (BLR) Techniques- A Study of Wadi Habban Basin, Shabwah, Yemen, *Results in Earth Sciences*, , 100103, ISSN 2211-7148, <https://doi.org/10.1016/j.rines.2025.100103>.
- Alcántara Ayala, I., y Murillo García, F. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 47-64.
- Aomei Zhang, Xianmin Wang, Witold Pedrycz, Qiyuan Yang, Xuwen Wang, Haixiang Guo. (2024). Near real-time spatial prediction of earthquake-triggered landslides based on global inventories from 2008 to 2022, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 185, 2024,108890, ISSN 0267-7261, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108890>.
- Apu, S.I., Sharmili, N., Gazi, M.Y. et al. (2025). Remote Sensing and GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping in a Hilly District of Bangladesh: A Comparison of Different Geospatial Models. *J Indian Soc Remote Sens* 53, 531–548 <https://doi.org/10.1007/s12524-024-01988-x>

- Arcila, M. García, J., Montejo, J., Eraso, J., Valcarcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagani, M. y Díaz, F. (2020). Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model.
<https://doi.org/10.32685/9789585279469>
- Asnake Boyana Ayele, Abiyot Legesse Tura, Abera Uncha Utallo, Abren Gelaw Mekonnen, (2025). Spatial assessments of landslide hazard vulnerability using decision support system in the Sile-Sago Watershed, Lake Chamo Rift Valley Basin, Ethiopia, *Environmental Challenges*, Volume 18, 101057, ISSN 2667-0100,
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101057>.
- Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., & Núñez Román, O. (2011). Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, (47), 141–162.
<https://www.redalyc.org/pdf/4517/451745770006.pdf>
- Berber, Samet. Sener Ceryan, Murat Ercanoglu. (2025). Comprehensive landslide hazard assessment using spatial, temporal and size probabilities combined with landslide density analysis in Çanakkale (NW Türkiye), *Advances in Space Research*, ISSN 0273-1177,
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.04.048>.
- Calpa, Fabricio Fernández, Euripedes A. Vargas, Guilherme J.C. Gomes, Raquel Q. Velloso, Marcelo Miqueletto, Marcos Massao Futai. (2026). Multi-failure numerical analysis of rainfall-triggered landslides at the basin-scale, *Computers and Geotechnics*, Volume 189, , 107622, ISSN 0266-352X, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107622>.
- Chand Rai, Vijendra Kumar Pandey, Kaushal Kumar Sharma, Sanjeev Sharma. (2024). Landslide susceptibility analysis in the Bhilangana Basin (India) using GIS-based machine

- learning methods, *Geosystems and Geoenvironment*, Volume 3, Issue 2, 100253, ISSN 2772-8838, <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2024.100253>.
- Chung, C. F., Park, S., & Lee, S. (2021). *Assessment of landslide susceptibility using topographic and geomorphological parameters derived from high-resolution DEM data*. *Geomorphology*, 386, 107745. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107745>
- 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. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- Consejo de Neiva. (2009). Acuerdo 026 de 2009. Por Medio Del Cual Se Revisa Y Ajusta El Acuerdo Numero 016 De 2000 Que Adopta El Plan De Ordenamiento Territorial De Neiva.
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM. (2016). Plan de Ordenación Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Loro, Río Las Ceibas y Otros Directos al Magdalena (MD) (Código 2111-01). Fase de aprestamiento. https://www.cam.gov.co/media/filer_public/3f/bd/3fbd4ea1-550d-47a3-9f6f-593def6af2de/1_aprestamiento_pomca_vp.pdf
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM. (2023). Resolución No 1096 del 2 de mayo del 2023. Por medio de la cual se aprueba un POMCA. https://www.cam.gov.co/media/filer_public/db/0d/db0d5b69-47b8-46a2-b24f-0ae78012694a/res_1096_02_05_2023.pdf
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena -CAM. (2023¹). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Loro, Río Las Ceibas y Otros Directos al Magdalena. <https://www.cam.gov.co/transparencia/recurso-hidrico/>

- Cruden, & Varnes (1996). *Landslide types and processes*. En A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and mitigation* (pp. 36–75). Transportation Research Board, National Academy Press. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- Emre Özşahin, Çağlar Kıvanç Kaymaz. (2014). Avalanche Susceptibility and Risk Analysis of Eastern Anatolian Region Using GIS, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 120, , Pages 663-672, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.02.147>.
- Gómez, Edier Aristizábal, Edwin F. García, Diver Marín, Santiago Valencia, Mariana Vásquez. (2023). Landslides forecasting using satellite rainfall estimations and machine learning in the Colombian Andean region, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 125, 104293, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104293>.
- Gómez-Miranda, I. N., Restrepo-Estrada, C., Builes-Jaramillo, A., & Porto de Albuquerque, J. (2025). Advanced AI techniques for landslide susceptibility mapping and spatial prediction: A case study in Medellín, Colombia.
- Guzzetti, F., Cardinali, M. Reichenbach, P. Carrara, A. (2000). Comparing landslides maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. *Environmental Management*. 25:3, 247-363
- H.X. Lan, C.H. Zhou, L.J. Wang, H.Y. Zhang, R.H. Li. (2004) Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China, *Engineering Geology*, Volume 76, Issues 1–2, Pages 109-128, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.009>.
- Hao Ma, Fawu Wang. (2025). Factors controlling the formation and movement of clustered shallow landslides triggered by the extreme rainstorm in July 2023 in Beijing, China,

Geomorphology, Volume 478, 109728, ISSN 0169-555X,
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109728>.

Henriques, C., Zêzere, J. L., & Trigo, R. M. (2015). *The role of the lithological setting on the landslide pattern in southern Portugal*. *Geomorphology*, 233, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.011>

Hualin Li, Shouhong Zhang, Jianjun Zhang, Wenlong Zhang, Zhuoyuan Song, Peidan Yu, Chenxin Xie. (2023). A framework for identifying priority areas through integrated eco-environmental risk assessment for a holistic watershed management approach, *Ecological Indicators*, Volume 146, 109919. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109919>.

Jen, W.-H., & Chen, Y.-C. (2026). Photogrammetric reconstruction of multi-decadal topographic changes from historical aerial imagery for landslide and debris-flow hazard assessment. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 41, Article 101866.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101866>

Kang, D., Dan, S., Hua, Z., Jingyi, L., Chenlu, W., Zhenguo, W., Shaohua, W. (2025). Study on landslide hazard risk in Wenzhou based on slope units and machine learning approaches *Scientific Reports*, 15 (1), art. no. 7511, DOI: [10.1038/s41598-025-91669-7](https://doi.org/10.1038/s41598-025-91669-7)

Keh-Jian Shou, Chih-Ming Yang. (2015). Predictive analysis of landslide susceptibility under climate change conditions — A study on the Chingshui River Watershed of Taiwan, *Engineering Geology*, Volume 192, 2015, Pages 46-62, ISSN 0013-7952,
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.03.012>.

Keh-Jian Shou, Jia-Fei Lin. (2020). Evaluation of the extreme rainfall predictions and their impact on landslide susceptibility in a sub-catchment scale, *Engineering Geology*, Volume 265, 105434. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105434>.

- Ken-ichiro Shimizu, Kazuo Asahiro. (2026). The influence of orchard and forest management on rainfall-induced landslides: A study of Hiraenoki Community in southwestern Japan, *Trees, Forests and People*, Volume 23, 101103, ISSN 2666-7193, <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.101103>.
- Khan, I. Ashutosh Kainthola, Harish Bahuguna, Rayees Ahmed, Mohamed Abioui. (2025). Unravelling the impact of landslide inventory on landslide susceptibility in the Indian Himalaya, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 139, 103930, ISSN 1474-7065, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.103930>.
- Lee, S., Kang, T., Kim, M., Ko, H., & An, H. (2025). Evaluation of spatiotemporal effects of soil depth on shallow landslides and debris flows via coupled numerical analysis. *Progress in Disaster Science*, 28, 100470. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2025.100470>
- Li, Y., Wang, J., & Wu, C. (2023). *Influence of relative relief and topographic roughness on landslide distribution in mountainous regions of Southwest China*. *CATENA*, 226, 107012. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107012>
- Lijun Qian, Lihua Ou, Guoxin Li, Ying Chen, Bo Qian. (2025). Optimizing the application of machine learning models in predicting landslide susceptibility using the information value model in Junlian County of Sichuan Basin, *Advances in Space Research*, , ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.020>.
- Liu, F., Zhang, T., Deng, Y., Qian, F., & Yang, N. (2024). Landslide susceptibility prediction based on landform predisposing indexes: An example from the Beiluo River Basin. *Advances in Space Research*, 74, 5348–5370. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.08.003>
- Lopez, M., García, D., & Pérez, S. (2020). Aplicación del método Mora-Vahrson para evaluar la susceptibilidad a deslizamiento en el municipio de Manaure, Cesar, Colombia. *Revista*

de Estudios Latinoamericanos sobre reducción de riesgo

<https://www.revistareder.com/ojs/index.php/reder/article/view/50/53>

López, R., Amat D. Zuluaga, Felipe Gómez, Luis Tapia. (2020). Aplicación del Método Mora-Vahrson para Evaluar la Susceptibilidad a Deslizamiento en el Municipio de Manaure, Cesar, Colombia, Vol 4 , ISSN 0719-8477, <https://doi.org/10.55467/reder.v4i2.50>

Maestre, J., Pérez, R., & Díaz, L. (2023). Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa implementando el método Mora-Vahrson modificado para el corregimiento de Chemesquemena (Cesar, Colombia). Revista de Geomorfología Aplicada. <https://doi.org/10.14483/22487638.19951>.

Marin, R. J., García, E. F., & Aristizábal, E. (2020). Effect of basin morphometric parameters on physically-based rainfall thresholds for shallow landslides. Engineering Geology, 278, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105855>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012) Decreto 1640 de 2012. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. Agosto, 2, 2012 Consultado en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49987>

Miranda, C. Restrepo-Estrada, A. Builes-Jaramillo, João Porto de Albuquerque. (2025) Advanced AI techniques for landslide susceptibility mapping and spatial prediction: A case study in Medellín, Colombia, Applied Computing and Geosciences, Volume 25, , 100226, ISSN 2590-1974, <https://doi.org/10.1016/j.acags.2025.100226>.

Mondini, A, Fausto Guzzetti, Massimo Melillo, Antonio Pievatolo. (2025) Short to long term space-time prediction of rain-induced landslides under uncertainty, Science of The Total

Environment, Volume 984, , 179453, ISSN 0048-9697,
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179453>.

Mora, S. & Vahrson, W. (1993). Determinación a priori de la amenaza de deslizamientos sobre grandes áreas, utilizando indicadores morfodinámicos. En: Memoria sobre el Primer Simposio. Bogotá, Colombia. pp. 259-273

Olarte, J. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano.
<https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/view/36/31/381>

Pacheco Quevedo, R., Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N. et al. (2023). Land use and land cover as a conditioning factor in landslide susceptibility: a literature review. *Landslides*, 20, 2537-2551. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-02020-4>

Paz Tenorio et al, (2011). Los procesos de remoción en masa; génesis, limitaciones y efectos en el crecimiento urbano de la ciudad de tuxtla gutiérrez, chiapas, México. *Revista Geográfica de América Central*. Número Especial EGAL, 2011- Costa Rica. Pp 12-13.
<https://www.redalyc.org/pdf/4517/451744820602.pdf>

Paz Tenorio, J. A., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M., & Velasco Herrera, J. A. (2017). *Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. *Investigaciones Geográficas*, 92, 1-16. <https://doi.org/10.14350/rig.52822>

Peifeng Ma, Li Chen, Chang Yu, Qing Zhu, Yulin Ding, Zherong Wu, Hongsheng Li, Changyao Tian, Xuanmei Fan. (2025). Dynamic landslide susceptibility mapping over last three decades to uncover variations in landslide causation in subtropical urban mountainous

- areas, Remote Sensing of Environment, Volume 326, 114800, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114800>.
- Pengju Pu, Jianjun Hao, Dingding Ma, Jiangting Yan. (2023) Digital Design and Data Management System for Network APP Based on GIS Technology, Procedia Computer Science, Volume 228, Pages 1110-1119, ISSN 1877-0509, doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.145
- Pichawut Manopkawee, Niti Mankhemthon. (2025) Landslide susceptibility assessment using the frequency ratio model in the Mae Chan River watershed, northern Thailand, Quaternary Science Advances, Volume 17, 100263, ISSN 2666-0334, <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100263>.
- Pollock, Joseph Wartman. (2025). MM 3: Multimodal framework for regional-scale quantitative landslide risk analysis, MethodsX, Volume 14, 103218, ISSN 2215-0161, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103218>.
- Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2018). *Investigating the efficiency of statistical and machine-learning models for landslide susceptibility assessment: A case study in Iran. CATENA*, 163, 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.029>
- Pradhan, B., Sameen, M. I., & Lee, S. (2022). *Spatial prediction of landslide susceptibility integrating terrain attributes and triggering factors: A global review. Earth-Science Reviews*, 231, 104089. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104089>
- Quanpeng Ji, (2024). Computer graphics processing technology based on GIS model and its application, Systems and Soft Computing, Volume 6, , 200173, ISSN 2772-9419, doi.org/10.1016/j.sasc.2024.200173.

- Quesada Roman & Sergio Feoli Boraschi. (2018). Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para Determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica, *Revista Geográfica de América Central*, Volumen 2, Pp. 17-45, <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>
- Rani, R., Dahal, A., Berti, M., & Lombardo, L. (2026). Transformer, more than meets the eye: A deep learning approach to integrate rainfall time-series in multi-type landslide probability modelling. *Geoscience Frontiers*, 17, 102295. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2026.102295>
- Rapolla, A. V. Paoletti, M. Secomandi. (2010). Seismically-induced landslide susceptibility evaluation: Application of a new procedure to the island of Ischia, Campania Region, Southern Italy, *Engineering Geology*, Volume 114, Issues 1–2, Pages 10-25, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.03.006>.
- Roberto J. Marin, María Fernanda Velásquez, (2020) Influence of hydraulic properties on physically modelling slope stability and the definition of rainfall thresholds for shallow landslides, *Geomorphology*, Volume 351, 106976, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106976>.
- Rodríguez, J. G., Quintana Cabeza, C. D., Rivera Alarcón, H. U., & Mosquera Téllez, J. (2013). Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y Vahrson: estudio de caso. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 4(1), 13–22. <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/aaas/es/article/view/2013>
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., & Tabatabaei, M. R. (2023). Raster-based landslide susceptibility mapping using compensatory MADM methods. *Environmental Modelling & Software*, 159, Article 105567. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105567>

- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2025). *Base de datos de sismicidad histórica y reciente. Periodo 1993–2025*. Subdirección de Geología Básica.
- Servicio Geológico Colombiano. (2013). Metodología de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. <https://acortar.link/fwSzDZ>
- Servicio Geológico Colombiano. (2025, septiembre 11). *Respuesta al radicado SGC 2025-280-008545-1. Solicitud de información sobre aceleración sísmica PGA (Tr)*. Dirección de Geoamenazas. Radicado No. 2025-600-010838-2.
- Shihao Xiao, Limin Zhang, Te Xiao, Ruochen Jiang, Dalei Peng, Wenjun Lu, Xin He, (2024). Landslide Damming Threats Along the Jinsha River, China, Engineering, Volume 42, Pages 326-339, ISSN 2095-8099, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.07.001>.
- Shou, K.-J., & Lin, J.-F. (2020). Evaluation of the extreme rainfall predictions and their impact on landslide susceptibility in a sub-catchment scale. Engineering Geology, 265, 105434. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105434>
- Sk Asraful Alam, Sujit Mandal, Ramkrishna Maiti, (2025). Geospatial intelligence for landslide susceptibility and risk analysis: Insights from NH31A and east Sikkim Himalaya settlements, Natural Hazards Research, Volume 5, Issue 1, Pages 187-208, ISSN 2666-5921, <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.10.001>.
- Tsedal Mulugeta, Leulalem Shano, Muralitharan Jothimani. (2024). Landslide susceptibility modeling in the Kulfo river catchment, rift valley, Ethiopia: An integrated geospatial and statistical analysis, Quaternary Science Advances, Volume 14, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100191>.
- Utthasini, M., Ilampooranan, I., Singh, S. K., Kanga, S., Kumar, P., Halder, K., Pradhan, B., Srivastava, A. K., Chatterjee, R. S., Chakraborty, R., Ali, T., & Meraj, G. (2026).

- Enhancing landslide susceptibility mapping in the Himalayas: Geospatial and machine learning with explainable AI (XAI). *Gondwana Research*, 149, 262–290. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2025.08.003>.
- Vipin Chauhan, Laxmi Gupta, Jagabandhu Dixit. (2025) Machine learning and GIS-based multi-hazard risk modeling for Uttarakhand: Integrating seismic, landslide, and flood susceptibility with socioeconomic vulnerability, *Environmental and Sustainability Indicators*, Volume 26, 2025, 100664, ISSN 2665-9727, <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100664>.
- Vuillez, Marj Tonini, Karen Sudmeier-Rieux, Sanjaya Devkota, Marc-Henri Derron, Michel Jaboyedoff. (2018). Land use changes, landslides and roads in the Phewa Watershed, Western Nepal from 1979 to 2016, *Applied Geography*, Volume 94, Pages 30-40, ISSN 0143-6228, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.03.003>.
- Yafeng Lu, Wenguang Chen, Xiaoqing Chen, Zhengyang Li. (2025) Effects of microclimate on soil moisture distribution in complex topography at the small watershed scale in the Anning River Region, Southwest China, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 59, 102381, ISSN 2214-5818, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102381>.
- Yan Chong, Guan Chen, Xingmin Meng, Shiqiang Bian, Fengchun Huang, Linxin Lin, Dongxia Yue, Yi Zhang, Fuyun Guo. (2023). Formation mechanism and quantitative risk analysis of the landslide-induced hazard chain by an integrated approach for emergency management: A case study in the Bailong River basin, China, *CATENA*, Volume 233, , 107522, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107522>.
- Zhao Binru, Dai Qiang, Han Dawei, Dai Huichao, Mao Jingqiao, Zhuo Lu. (2019) Probabilistic thresholds for landslides warning by integrating soil moisture conditions with rainfall

thresholds Journal of Hydrology, 574, pp. 276 – 287.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.062>