



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Movimientos en masa en el municipio de Soacha con detonante lluvia

Mass movements in the municipality of Soacha triggered by rain.

Johann camilo Pinilla Avila

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencia humanas, Departamento de Geografía
Ciudad, Colombia
2023

Movimientos en masa en el municipio de Soacha con detonante lluvia

Johann Camilo Pinilla Avila

Trabajo final de especialización para optar al título de:
Especialista en análisis espacial

Director (a):

PhD. José Daniel Pabón Caicedo

Línea de Investigación:

Amenazas Naturales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencia humanas, Departamento de Geografía

Ciudad, Colombia

2023

Resumen

Se ha realizado un estudio mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el objetivo de cartografiar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en áreas específicas utilizando modelos de relación de frecuencia (RF). Durante el estudio, se identificaron un total de 151 eventos de movimientos en masa. Los cuatro factores que condicionan los deslizamientos de tierra, como la pendiente, la cobertura, los tipos de suelo y la precipitación, se integraron con los movimientos en masa. Esto permitió determinar los pesos asociados a cada factor condicionante de los movimientos en masa, así como las clases de factores, mediante la aplicación de modelos de relación de frecuencia. Los mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra se generaron al superponer los pesos correspondientes a todos los factores condicionantes mediante la calculadora ráster de la herramienta de análisis espacial en ArcGIS. Posteriormente, los mapas resultantes de susceptibilidad a movimientos en masa se categorizaron en clases que representan niveles de susceptibilidad, que van desde muy baja hasta muy alta.

Palabras Clave: Movimientos en Masa, Susceptibilidad, Factores Condicionantes, Sistemas de Información Geográfica, Deslizamientos de Tierra, Susceptibilidad, Gestión del Riesgo, Planificación del Uso del Suelo, Prevención y Mitigación

Abstract

A study has been conducted using Geographic Information Systems (GIS) aiming to map landslide susceptibility in specific areas using Frequency Ratio (FR) models. During the study, a total of 151 mass movement events were identified. The four factors conditioning landslides, such as slope, land cover, soil types, and precipitation, were integrated with the mass movements. This allowed determining the weights associated with each conditioning factor of mass movements, as well as the factor classes, through the application of frequency ratio models. Landslide susceptibility maps were generated by overlaying the corresponding weights for all conditioning factors using the raster calculator in the ArcGIS spatial analysis tool. Subsequently, the resulting maps of mass movement susceptibility were categorized into classes representing levels of susceptibility, ranging from very low to very high.

Keywords: Mass Movements, Susceptibility, Conditioning Factors, Geographic Information Systems, Landslides, Susceptibility, Risk Management, Land Use Planning, Prevention and Mitigation.

Contenido

	Pág.
Resumen	III
Lista de figuras.....	VI
Lista de tablas	VII
Introducción	8
1. Antecedentes y Justificación	9
2. Planteamiento del problema.....	11
3. Objetivos.....	13
3.1 Objetivo general	13
3.2 Objetivos específicos	13
4. Marco conceptual y teórico	13
5. Metodología	15
6. Resultados.....	17
7. Conclusiones.....	28
Bibliografía	32

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Ubicación del municipio objeto de estudio	10
Figura 2-1 Distribución movimientos en masa en el municipio.....	11
Figura 2-2 Precipitación anual promedio y su relación con movimientos en masa.....	12
Figura 4-1 Modelo de susceptibilidad a movimientos en masa	14
Figura 6-1 Distribución de la precipitación en relación con los movimientos en masa....	19
Figura 6-2 Distribución de la pendiente en relación con los movimientos en masa.....	19
Figura 6-3 Distribución de la cobertura de la tierra en relación con los movimientos en masa	20
Figura 6-4 Distribución de los suelos de la en relación con los movimientos en masa... 20	20
Figura 6-5 Susceptibilidad a movimientos en masa y su relación con los movimientos en masa reportados para el municipio.....	26
Figura 6-6 Distribución de los movimientos en masa según categorías de Susceptibilidad	28

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 6-1 Relación espacial entre cada factor condicionante y ocurrencia de movimientos en masa	21
Tabla 6-2 Distribución de los movimientos en masa (MM) según categorías de Susceptibilidad	27

Introducción

Los movimientos en masa en Soacha son una problemática que afecta a la población y al medio ambiente. Estos eventos naturales se producen por la inestabilidad de las laderas, que se ven afectadas por factores como la lluvia, la erosión, la deforestación y la urbanización. Para prevenir y reducir los daños causados por estos eventos, es necesario realizar una zonificación de amenazas por movimientos en masa, que consiste en identificar y delimitar las zonas que presentan mayor riesgo de sufrir estos fenómenos. Esta zonificación permite implementar medidas de prevención y mitigación, como reubicar a las familias que habitan en zonas de alto riesgo, fortalecer las infraestructuras existentes y planificar el ordenamiento territorial evitando las zonas inestables. Así, se puede proteger la vida y el patrimonio de las personas, mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias y conservar los recursos naturales y los ecosistemas de la zona.

El proyecto consiste en zonificar el territorio según el nivel de amenaza por movimientos en masa. Para ello, se identifican y clasifican las zonas que pueden sufrir estos eventos. Se recogen datos de geología, suelos, pendiente, cobertura y clima, y se analizan para elaborar un mapa de amenaza. Se estudia la influencia de la lluvia en los movimientos en masa. La lluvia puede saturar los suelos, hacerlos más pesados y menos resistentes. También puede infiltrarse en el terreno, generando presiones que pueden provocar movimientos en masa. Con la zonificación de amenaza y la relación con la lluvia, se hace un mapa sectorizado. Este mapa indica los grados de amenaza según la geología, la topografía, el tipo de suelo, la vegetación, el uso del suelo y la historia de movimientos en masa. También muestra cómo la lluvia afecta a estos factores para aumentar o disminuir la amenaza

1. Antecedentes y Justificación

Soacha es el municipio más poblado del departamento de Cundinamarca en Colombia. Su área es de 184 km², y su población es de 808,288 (2022). Su área urbana está conurbada con la de Bogotá, siendo parte de su área metropolitana (DANE, 2018). En términos económicos, Soacha ha sufrido una transformación que pasó de ser un municipio eminentemente rural a una ciudad donde se congregan los sectores industriales, minero y de servicios con proyección regional. En la década de los años 50 hasta los 80, la vocación productiva del municipio era industrial, pero en los años 90, esta transición a servicios. (Alcaldía de Soacha, 2023). Es importante mencionar que Soacha presenta características propicias para ser destino de población migrante, tales como cercanía y alto índice de interrelación socioeconómica con Bogotá, además de su carácter urbano, con una estructura productiva industrial que ofrece oportunidades de empleo.

Este municipio, a diferencia de las demás localidades del departamento de Cundinamarca, ha experimentado en las últimas décadas una continua y creciente inmigración, con uno de los más altos porcentajes de personas provenientes de otras regiones del país, donde solamente uno de cada cinco residentes tiene la condición de nativo. Esta condición de municipio receptor en los procesos de desplazamiento ha traído consigo una modificación intensa en el uso del suelo y una masiva concentración de asentamientos humanos en áreas no propicias para la vivienda, como en laderas de alta a muy alta pendiente, zonas adyacentes a antiguos frentes de explotación minera, áreas inundables asociadas a drenajes naturales o terrenos muy susceptibles o con evidentes procesos de inestabilidad.

Soacha, situada en la región andina de Colombia, se caracteriza por su topografía montañosa, con altitudes que varían entre 2,200 y 3,000 metros sobre el nivel del mar. Su clima subtropical de altura resulta en temperaturas moderadas durante todo el año. Los suelos varían desde aluviales y coluviales en las áreas más bajas hasta suelos más pedregosos y delgados en las áreas montañosas debido a la erosión. La ciudad se encuentra en una región geológicamente activa, lo que la hace propensa a eventos geológicos como deslizamientos de tierra y movimientos tectónicos.

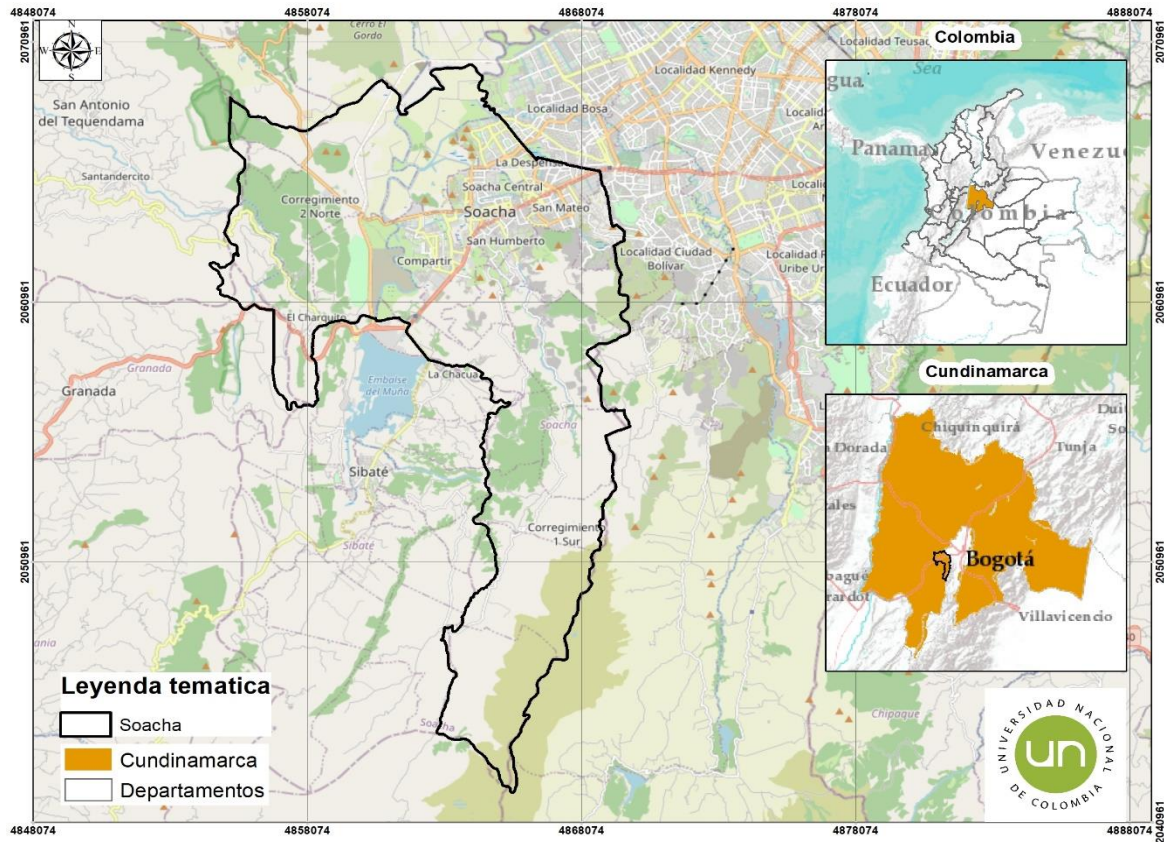


Figura 1-1 Ubicación del municipio objeto de estudio

La lluvia en Soacha sigue un patrón estacional, con una temporada de lluvias de abril a noviembre y una temporada seca el resto del año. Durante la temporada de lluvias, las precipitaciones pueden ser intensas y prolongadas, lo que puede dar lugar a inundaciones y deslizamientos de tierra. La altitud de la ciudad influye en la temperatura y la cantidad de lluvia que recibe, siendo más fresca y abundante a mayor altitud. Las lluvias son vitales para la vegetación y la agricultura en la región, siendo fundamentales para el crecimiento de los cultivos y el mantenimiento de la biodiversidad.

Los deslizamientos de tierra en Soacha son un problema recurrente que afecta a cientos de familias, especialmente en la comuna 4. Las causas de los deslizamientos son la falta de planeación urbana y las condiciones naturales del en donde se asienta el municipio. Las consecuencias de los deslizamientos son la pérdida de viviendas, la amenaza a la vida humana y el desplazamiento forzado. El municipio de Soacha tiene varios eventos históricos relacionados con afectaciones causadas por movimientos en masa dentro del

registro de prensa se indican eventos ocurridos en los años 2009, 2010, 2013, 2016, 2017, 2019, 2022 y 2023, en total en los registros de prensa se encuentran 11 eventos aproximadamente. Adicionalmente se tienen registros de otras fuentes de información de eventos importantes en los años 1998, 2000 y 2001. Como catálogo de movimientos en masa se tiene el reporte del SGC (SGC, Servicio geológico colombiano, 2013) y el catálogo del SIMMA con reportes desde el año 1954 al 2019 y se concentran en su mayoría en la comuna 5, 6 y la vereda San Francisco.

2. Planteamiento del problema

Dada la recurrencia de los desastres por eventos de remoción masa en el municipio de Soacha, se requiere avanzar hacia la gestión del riesgo de desastre. Para el efecto, es necesario generar conocimiento sobre la amenaza, el cual sirva de base para plantear las acciones para tratar tal problemática.

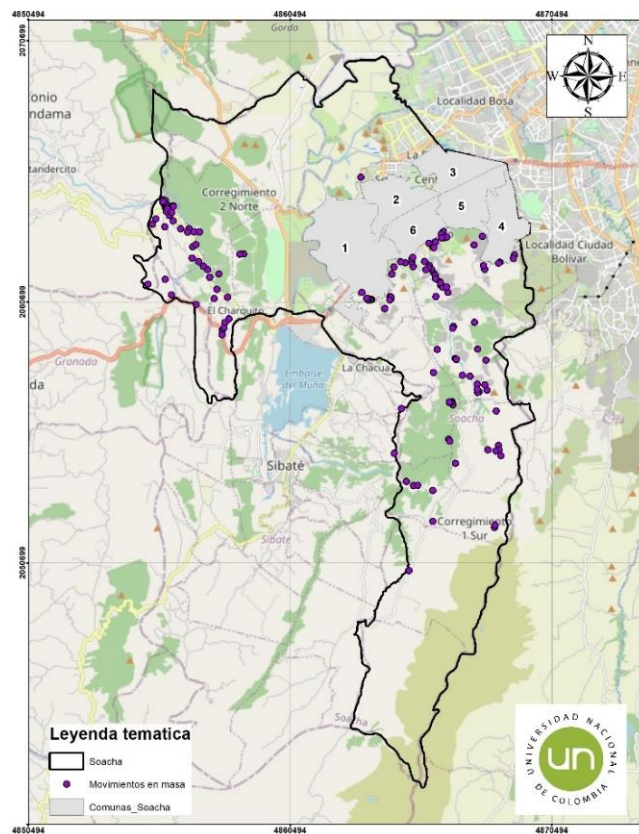


Figura 2-1 Distribución movimientos en masa en el municipio

Los reportes de movimientos en masa en el municipio de Soacha muestran una distribución desigual, con una mayor concentración hacia el norte del territorio. Se pueden distinguir tres zonas principales donde se han registrado estos fenómenos: cerca de la comuna 5, en el área de Terreros; la comuna 6, en el sector de San Humberto; y el corregimiento 1, a lo largo de la vía El Colegio-El Charquito. Estas zonas se encuentran cerca o dentro del área urbana del municipio, lo que implica un mayor riesgo para la población y la infraestructura. Por el contrario, en el corregimiento 2, que corresponde a la zona sur del municipio y que presenta condiciones topográficas más complejas, se han reportado pocos casos de movimientos en masa.

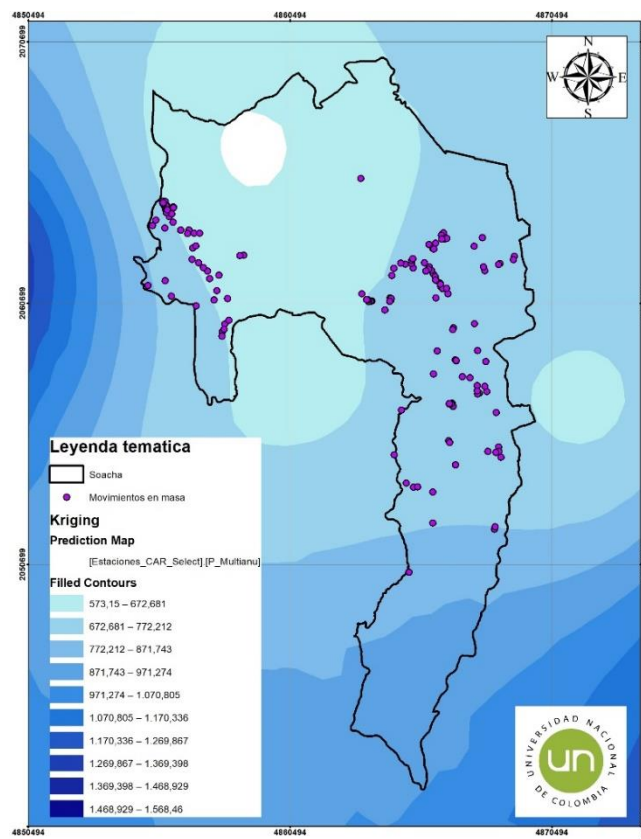


Figura 2-2 Precipitación anual promedio y su relación con movimientos en masa

Un aspecto distintivo de los movimientos en masa es que no se correlacionan con las zonas de mayor precipitación anual promedio, sino que se localizan en las zonas que tienen entre 672 y 743 mm de promedio anual. Esto se debe a que la precipitación influye en la estabilidad del suelo, pero también intervienen otros factores.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Elaborar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en el municipio de Soacha

3.2 Objetivos específicos

- Calcular los pesos de los factores que influyen en los movimientos en masa
- Calcular de manera probabilística la posibilidad de movimientos en masa en diversas zonas.
- Clasificar las áreas en función de su nivel de Susceptibilidad.

4. Marco conceptual y teórico

Los movimientos en masa son fenómenos que implican el desplazamiento de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera. Un movimiento en masa se desencadena principalmente por la saturación del suelo debido a la lluvia intensa, el deshielo o la infiltración de agua en el terreno (Li, 2022). Esto debilita la cohesión entre las partículas del suelo y reduce la fricción entre ellas, lo que facilita el deslizamiento. La inclinación o pendiente de un terreno es un factor crítico, las laderas empinadas son más propensas a los deslizamientos de tierra, ya que la fuerza gravitatoria tiende a superar la resistencia del suelo a mantenerse en su lugar. (Servicio geológico colombiano, 2017). Los demás factores diferentes a la pendiente se pueden dividir en variables condicionantes, y variables detonantes. La primera variable puede establecer la magnitud espacial de los movimientos en masa y la segunda variable corresponde a un impulso externo como una lluvia intensa, un sismo e incluso una actividad antrópica capaz de provocar una respuesta casi inmediata que produzca una drástica reducción en la resistencia de los materiales. Para el objetivo de este proyecto se analizarán los movimientos en masa con detonante por lluvias intensas.

Los procesos que generan los movimientos en masa pueden ser generados por la reducción de la resistencia al cortante del material debido a la infiltración de lluvia, la pérdida de la cohesión aparente, el aumento de la presión de poros o la reducción de la succión de la matriz de los suelos (Li A.G., 2005). Los movimientos superficiales están relacionados

con lluvias cortas e intensas mientras que los movimientos profundos están relacionados con lluvias de larga duración (Crosta, 1998) (Aleotti, 2004) (Aleotti, 2004). Los factores clave que influyen en los deslizamientos de tierra provocados por las lluvias incluyen propiedades del suelo como la permeabilidad, la morfología de las pendientes, la vegetación y los niveles de humedad anteriores, la cobertura por su parte contribuye a la resistencia de los suelos y las condiciones de flujo sub-superficial (Crosta, 1998). Dentro de las variables manejadas en diferentes guías metodológicas de Colombia se encuentra la geomorfología, geología, suelos y cobertura de tierra (IDEAM, 2012). Ahora bien, aunque las metodologías colombianas no consideran la humedad del suelo, esta se considera en otros estudios como un antecedente y una variable condicionante en (Lanni, 2009).

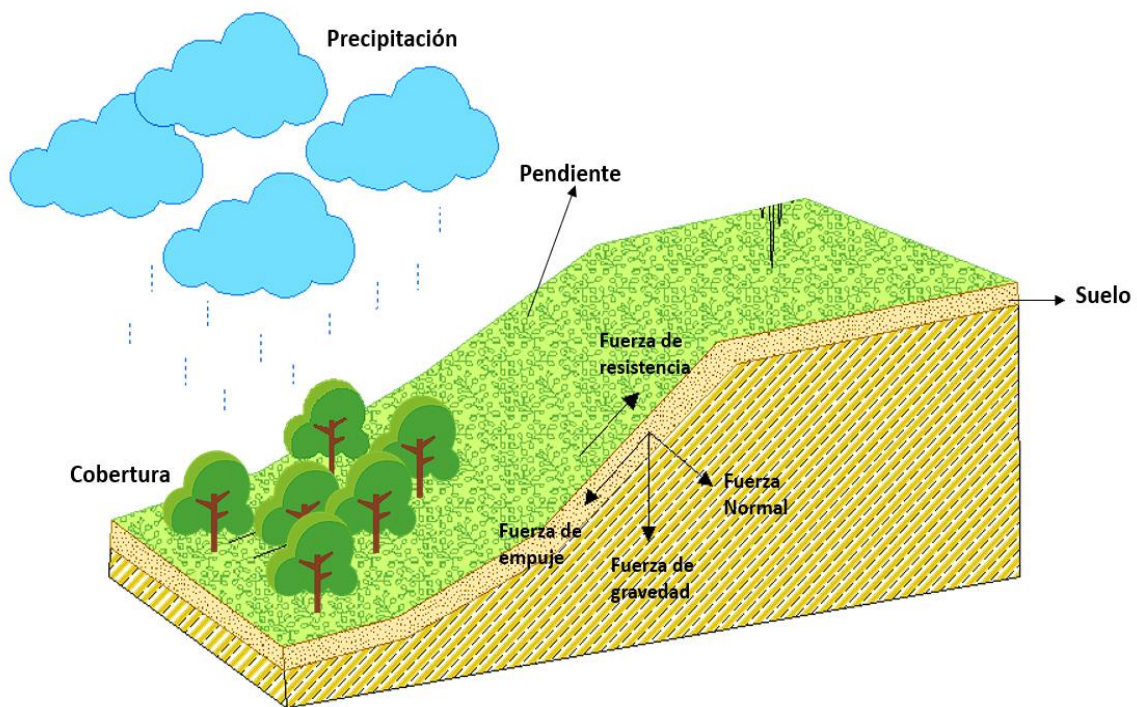


Figura 4-1 Modelo de susceptibilidad a movimientos en masa

Existen muchos tipos de movimientos en masa, algunos de los cuales son lentos y pequeños, mientras que otros pueden ser grandes y rápidos, con un gran poder destructivo. La clasificación más conocida de estos movimientos fue propuesta por Varnes (Varnes, 1958) y actualizada por Cruden & Varnes (Cruden, 1996), quienes clasificaron los movimientos en masa según el tipo de movimiento (caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos, y propagación lateral) y el tipo de material (suelo y roca). Los modelos físicos relacionan los patrones de lluvia con los cambios de presión intersticial y la estabilidad de

las pendientes. Los modelos estadísticos definen umbrales de intensidad/duración de las precipitaciones correlacionados con eventos pasados de deslizamientos de tierra.

5. Metodología

Para el cálculo de Susceptibilidad se plantea modelar la susceptibilidad por movimientos en masa, según la referencia (E. Aristizábal, 2019), de la siguiente forma:

- **Identificación y Mapeo de los Movimientos en Masa:** En este primer paso, se identifican y se realiza un mapeo de los movimientos en masa en el área de estudio. Esto implica conocer dónde se han producido previamente estos eventos, las fuentes de estos datos es SIMMA (SGC, Servicio geológico colombiano, 2023), (SGC, Servicio geológico colombiano, 2013), se consultaron otras fuentes de información como fuentes de periódico, revistas y la página web DESINVENTAR, pero estas carecen de una georreferenciación precisa.
- **Identificación y Mapeo de Factores Condicionantes:** Se identifican y mapean los factores que están directa o indirectamente relacionados con la ocurrencia de movimientos en masa. Los factores para manejar dentro de esta metodología son: pendientes, coberturas, suelos y precipitación promedio multianual. (Aristizábal, y otros, 2022). El mapa de pendientes proviene de un DEM Alos Palsar de 12,5 metros de resolución espacial, la capa de cobertura y suelos proviene del POMCA del río Bogotá y Sumapaz y la precipitación proviene del modelamiento Kriging desarrollado en el software ArcGIS mediante su herramienta de "Geoestatistical Analyst" con datos de precipitación de estaciones de la corporación autónoma regional de Cundinamarca CAR.
- **Estimación de la Contribución de Factores Condicionantes:** En este paso, se estima la contribución relativa de cada factor condicionante en la ocurrencia de los movimientos en masa. Se determina cuán influyentes son estos factores en el desencadenamiento de los eventos. Para esto se utilizará El Modelo de Relación de Frecuencia (RF).

La relación de frecuencia se define como la proporción entre el área donde ocurrieron deslizamientos de tierra y el área total de estudio. Además, también representa la relación

entre las probabilidades de que ocurra un deslizamiento de tierra y la ocurrencia sin deslizamiento de tierra para un atributo específico. En términos generales, una relación de frecuencia más elevada sugiere una asociación más fuerte entre un factor condicionante y la probabilidad de deslizamientos de tierra, y viceversa. Un valor de 1 indica una relación promedio para el área de deslizamientos respecto al área total. Cuando el valor de FR supera 1, denota una alta probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de tierra, mientras que un valor inferior a 1 indica una relación más débil entre las probabilidades de deslizamientos.

La elaboración del Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSM) se logra sumando los valores de RF asociados a todos los factores considerados, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$LSM = RF1 + RF2 + RFn$$

Donde $RF1$, $RF2$, RFn representan los valores de RF asociados a cada factor considerado en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos. Este enfoque integral permite la evaluación global de la susceptibilidad en un área determinada, proporcionando una valiosa herramienta para la gestión y mitigación de riesgos asociados a movimientos en masa. (Aristizábal, 2019). La obtención de FR se puede realizar mediante la siguiente ecuación, tal como se describe a continuación

$$RF = \frac{N_p/N}{N_{lp}/N_l}$$

Donde N_p es el número de píxeles de cada clase en cada factor condicionante, N es el número total de píxeles del área de estudio N_{lp} es el número de deslizamientos en cada clase de cada factor condicionante, N_l es el número total de deslizamientos en toda el área de estudio. Por último, se calcula el PR, que corresponde a la ponderación de cada factor correspondiente a la siguiente ecuación:

$$PR = (Max-Min)Min RF / Max-Min RF$$

6.Resultados

A partir de los cálculos de FR mostrados en la **Tabla 6-1** se tiene que para la capa de pendientes el mayor número de movimientos en masa se encuentra en la clase 12-25, sin embargo, por la relación de área las pendientes mayores a 75 tienen un mayor RF, Caso similar pasa con la precipitación en donde los movimientos en masa no se presentan en áreas con precipitación alta y los mayores RF se presentan entre los 622 y los 743 mm anuales promedio. En cuanto a las coberturas los mayores RF se presentan sobre Red vial, ferroviaria y terrenos asociados, Zonas de extracción minera y Mosaico de pastos con espacios naturales. Por último, el mayor RF en suelos lo tuvo la clase MMVe2 correspondiente a suelos muy superficiales de textura muy fina, con 60% o más de arcilla,

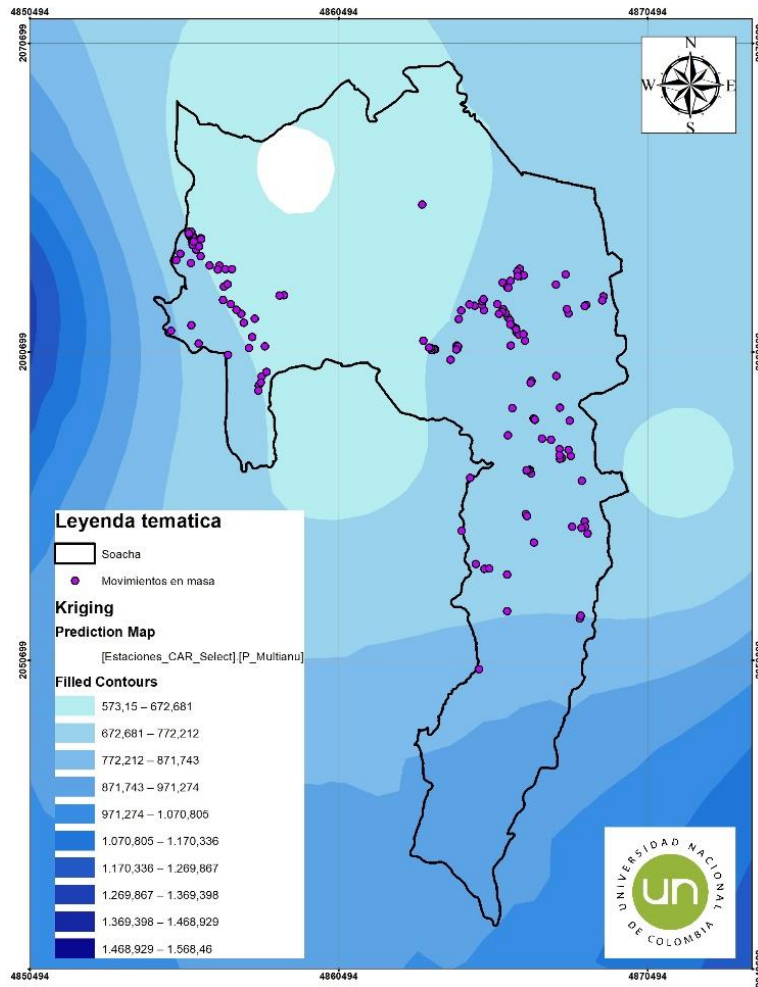


Figura 6-1 Distribución de la precipitación en relación con los movimientos en masa

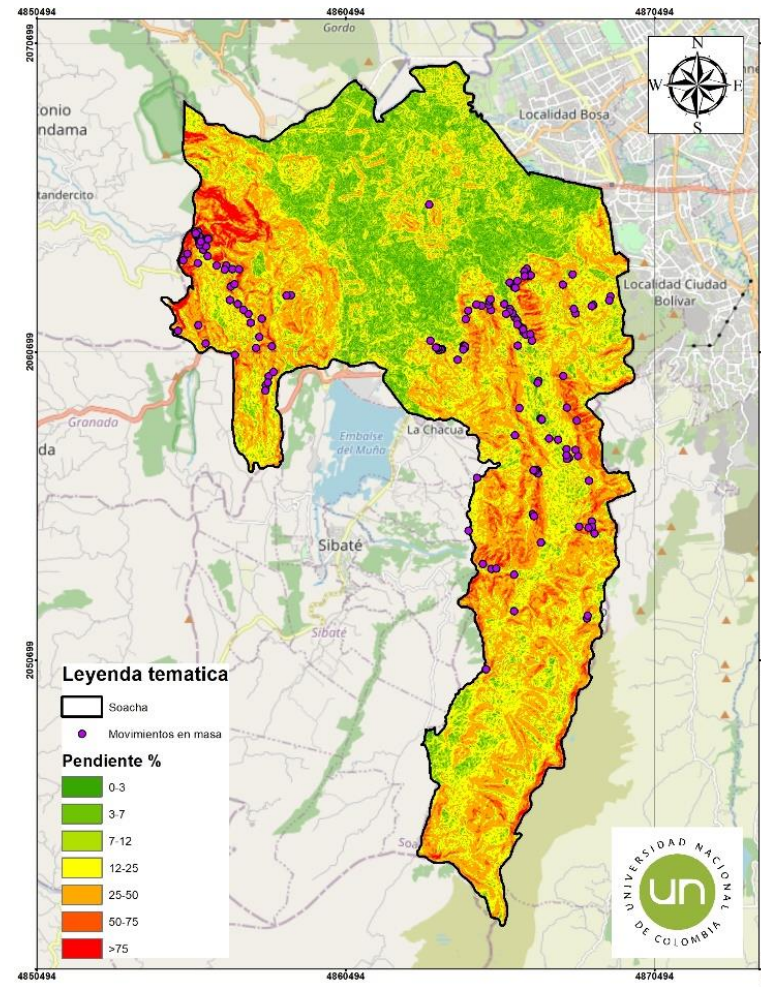


Figura 6-2 Distribución de la pendiente en relación con los movimientos en masa

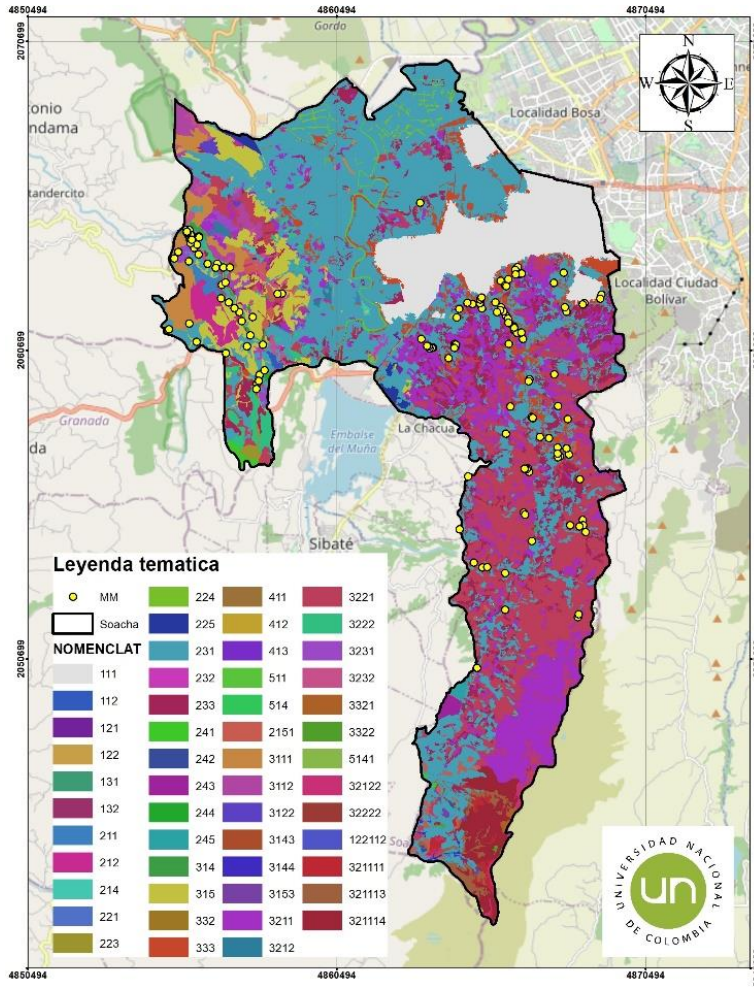


Figura 6-3 Distribución de la cobertura de la tierra en relación con los movimientos en masa

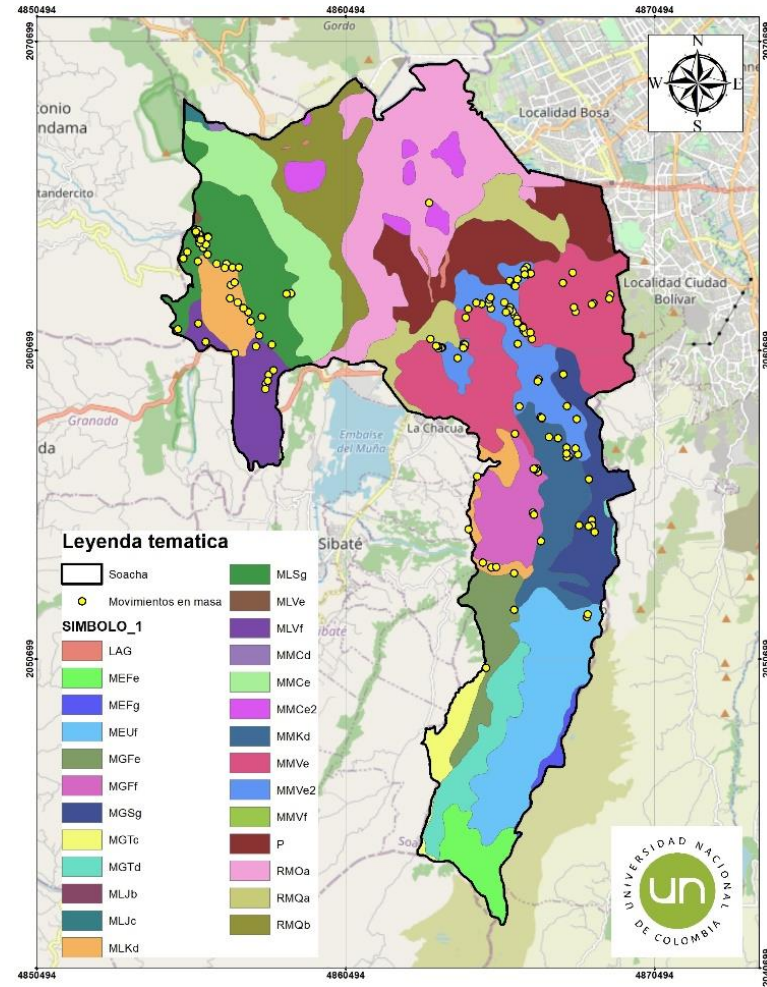


Figura 6-4 Distribución de los suelos de la en relación con los movimientos en masa

Tabla 6-1 Relación espacial entre cada factor condicionante y ocurrencia de movimientos en masa

Factor Condicionante	ID Clase	Clase	Clase Píxel	Clase Píxel %	MM	MM %	RF	RF %	RF % ENTERO	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min)Min RF	Peso Factor condicionante (PR)
Pendiente	1	0-3	7001431	3,80%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	2	3-7	14545303	7,90%	4	2,65%	0,34	0,032	3,22					
	3	7-12	39700680	21,57%	9	5,96%	0,28	0,027	2,66					
	4	12-25	52572500	28,56%	45	29,80%	1,04	0,100	10,03					
	5	25-50	55299108	30,04%	64	42,38%	1,41	0,136	13,56					
	6	50-75	11861497	6,44%	14	9,27%	1,44	0,138	13,83					
	7	>75	3099501	1,68%	15	9,93%	5,90	0,567	56,70					
Total							10,40	1,000	100,00	0,00	0,567	0,567	0,333	0,59
Precipitación (mm, promedio Multianual)	1	573,15-622,12	216940	18,40%	2	1,32%	0,07	0,019	1,88					
	2	622,12-678,46	304808	25,86%	58	38,41%	1,49	0,389	38,85					
	3	678,46-743,25	418352	35,49%	84	55,63%	1,57	0,410	41,00					
	4	743,25-817,78	78244	6,64%	7	4,64%	0,70	0,183	18,27					
	5	817,78-903,50	105670	8,96%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	6	903,50-1002,09	54852	4,65%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
Total							3,82	1,000	100,00	0	0,410	0,410	0,333	1,23
Cobertura	111	Tejido urbano continuo	116438	9,88%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	112	Tejido urbano discontinuo	944	0,08%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	121	Zonas industriales o comerciales	783	0,07%	1	0,66%	9,97	0,096	9,59					

Factor Condicionante	ID Clase	Clase	Clase Píxel	Clase Píxel %	MM	MM %	RF	RF %	RF % ENTERO	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min)Min RF	Peso Factor condicionante (PR)
	122	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3137	0,27%	14	9,27%	34,84	0,335	33,50					
	131	Zonas de extracción minera	568	0,05%	2	1,32%	27,49	0,264	26,43					
	132	Zonas de disposición de residuos	75	0,01%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	211	Otros cultivos transitorios	3348	0,28%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	212	Cereales	9962	0,85%	1	0,66%	0,78	0,008	0,75					
	214	Hortalizas	1018	0,09%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	215	Tubérculos	8732	0,74%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	221	Cultivos permanentes herbáceos	74	0,01%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	223	Cultivos permanentes arbóreos	1776	0,15%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	224	Cultivos agroforestales	5462	0,46%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	225	Cultivos confinados	3902	0,33%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	231	Pastos limpios	407265	34,55%	60	39,74%	1,15	0,011	1,11					
	232	Pastos arbolados	1699	0,14%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	233	Pastos enmalezados	84162	7,14%	5	3,31%	0,46	0,004	0,45					
	241	Mosaico de cultivos	2364	0,20%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					

Factor Condicionante	ID Clase	Clase	Clase Píxel	Clase Píxel %	MM	MM %	RF	RF %	RF % ENTERO	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min)Min RF	Peso Factor condicionante (PR)
	242	Mosaico de pastos y cultivos	302	0,03%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	243	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2619	0,22%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	244	Mosaico de pastos con espacios naturales	511	0,04%	1	0,66%	15,28	0,147	14,69					
	245	Mosaico de cultivos y espacios naturales	1699	0,14%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	311	Bosque denso	31507	2,67%	12	7,95%	2,97	0,029	2,86					
	312	Bosque abierto	1681	0,14%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	314	Bosque de galería y/o ripario	3477	0,29%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	315	Plantación forestal	43385	3,68%	1	0,66%	0,18	0,002	0,17					
	321	Herbazal	179284	15,21%	13	8,61%	0,57	0,005	0,54					
	322	Arbustal	198509	16,84%	13	8,61%	0,51	0,005	0,49					
	323	Vegetación secundaria o en transición	14879	1,26%	6	3,97%	3,15	0,030	3,03					
	332	Afloramientos rocosos	1702	0,14%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	333	Tierras desnudas y degradadas	41757	3,54%	20	13,25%	3,74	0,036	3,60					
	411	Zonas pantanosas	65	0,01%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					

Factor Condicionante	ID Clase	Clase	Clase Píxel	Clase Píxel %	MM	MM %	RF	RF %	RF % ENTERO	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min)Min RF	Peso Factor condicionante (PR)
	412	Turberas	87	0,01%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	413	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	175	0,01%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	511	Ríos (50 m)	5373	0,46%	2	1,32%	2,91	0,028	2,79					
	514	Cuerpos de agua artificiales	145	0,01%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
Total							104,00	1,000	100,00	0	0,335	0,335	0,333	1,01
Suelos	1	MMCe2	22991	1,95%	3	0,86%	0,44	0,025	2,54					
	2	RMQa	43019	3,64%	8	2,29%	0,63	0,036	3,62					
	3	MLKd	40050	3,39%	17	4,86%	1,43	0,083	8,26					
	4	MMKd	48890	4,14%	7	2,00%	0,48	0,028	2,79					
	5	MGFf	40724	3,45%	7	2,00%	0,58	0,033	3,34					
	6	RMOa	160141	13,57%	1	0,29%	0,02	0,001	0,12					
	7	MGSg	49298	4,18%	7	2,00%	0,48	0,028	2,76					
	8	MMCd	860	0,07%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	9	MLJc	2162	0,18%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	10	MMCe	74583	6,32%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	11	MLVe	688	0,06%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	12	MLJb	172	0,01%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	13	MMVe	141542	11,99%	48	13,71%	1,14	0,066	6,60					
	14	MMVf	211	0,02%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	15	MLVf	42403	3,59%	8	2,29%	0,64	0,037	3,67					

Factor Condicionante	ID Clase	Clase	Clase Píxel	Clase Píxel %	MM	MM %	RF	RF %	RF % ENTERO	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min)Min RF	Peso Factor condicionante (PR)
	16	MEFe	28423	2,41%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	17	MMVe2	57343	4,86%	62	17,71%	3,65	0,210	21,04					
	18	MGTd	37670	3,19%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	19	MGFe	34843	2,95%	1	0,29%	0,10	0,006	0,56					
	20	MEUf	96043	8,14%	2	0,57%	0,07	0,004	0,41					
	21	P	82362	6,98%	141	40,29%	5,77	0,333	33,31					
	22	LAG	2396	0,20%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	23	MLSg	78719	6,67%	36	10,29%	1,54	0,089	8,90					
	24	RMQb	70586	5,98%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
	25	MGTc	18701	1,58%	2	0,57%	0,36	0,021	2,08					
	26	MEFg	5620	0,48%	0	0,00%	0,00	0,000	0,00					
							17,33	1,00	100,00	0	0,333	0,333	0,333	1,00

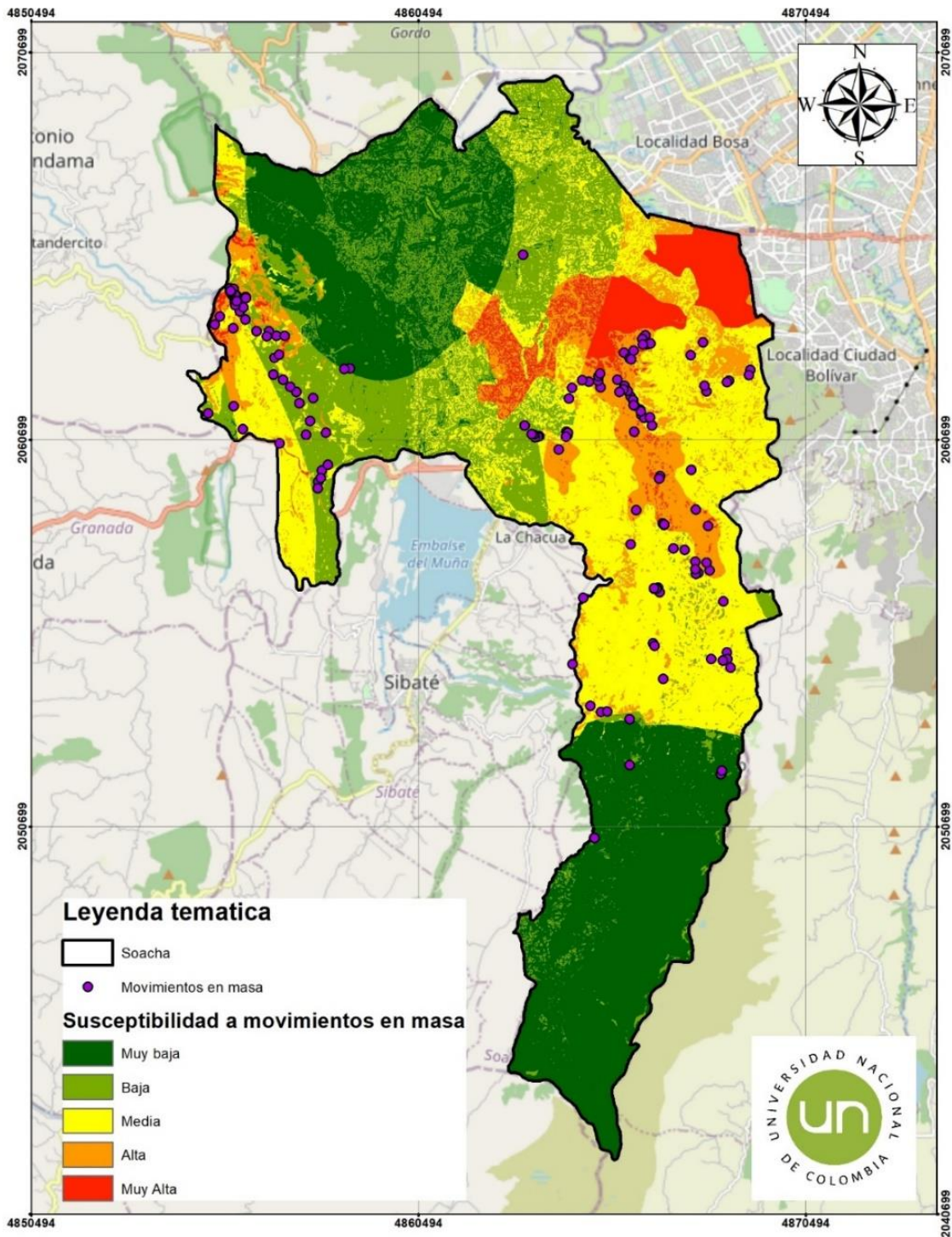


Figura 6-5 Susceptibilidad a movimientos en masa y su relación con los movimientos en masa reportados para el municipio.

Los datos de la Tabla 6-1 revelan relación entre diferentes factores condicionantes y la ocurrencia de eventos de movimientos en masa (MM). En cuanto a la pendiente, se destaca que las áreas con pendientes superiores al 75% muestran una frecuencia significativamente alta de eventos de MM, con 15 MM y una relación de frecuencia del 57%. Respecto a la precipitación, se observa un aumento en la frecuencia de eventos de MM con menores niveles de precipitación, siendo las categorías de ID 2 y 3 las que presentan la mayor frecuencia con 142 MM y una relación de frecuencia del 79.85%. En cuanto a la cobertura del suelo, ciertas categorías, como "Red vial, ferroviaria y terrenos asociados" y "Zonas de extracción minera", están asociadas con frecuencias notables de eventos de MM. Finalmente, en la clasificación de suelos, la categoría "P" se destaca con la mayor frecuencia (141 eventos) y una relación de frecuencia del 33%, sugiriendo una fuerte correlación con eventos de MM.

En términos generales, estos hallazgos indican que ciertos factores condicionantes, como pendiente pronunciada, alta precipitación y características específicas de cobertura y suelos, están estrechamente vinculados a la ocurrencia de eventos de movimientos en masa. El uso de la relación de frecuencia proporciona una perspectiva relativa de la prevalencia de estos eventos en comparación con el total, permitiendo una comprensión más detallada de las asociaciones. Sin embargo, la interpretación completa de estos resultados podría beneficiarse de un análisis más profundo y contextualizado, considerando la interacción entre múltiples factores y evaluando la significancia estadística de las asociaciones identificadas.

Tabla 6-2 Distribución de los movimientos en masa (MM) según categorías de Susceptibilidad

Categoría	MM	MM %
Muy Baja	5	3%
Baja	26	17%
Media	52	34%
Alta	55	36%
Muy Alta	13	9%

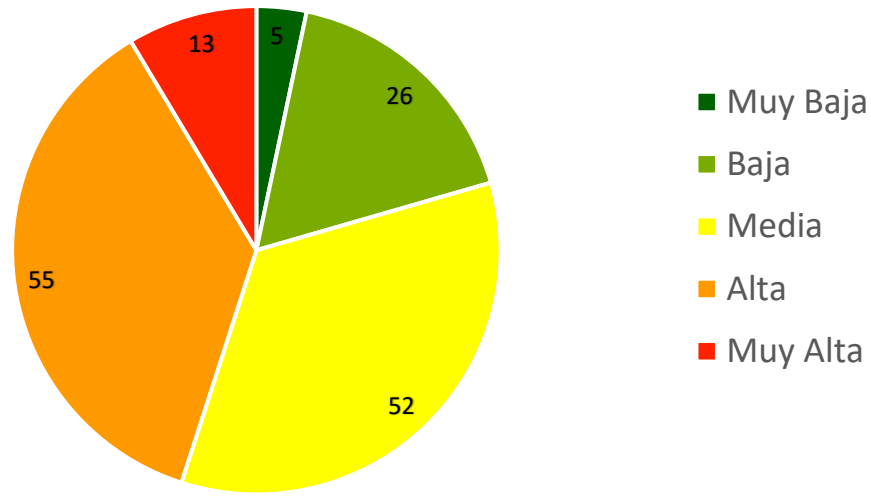


Figura 6-6 Distribución de los movimientos en masa según categorías de Susceptibilidad

En la **Tabla 6-2** y **Figura 6-6** se puede observar la distribución de eventos de movimientos en masa (MM) en diferentes categorías, se puede observar una coherencia con los resultados previos. Las categorías de riesgo más elevado, como "Alta" y "Muy Alta", alinean sus porcentajes con las frecuencias más altas de eventos de MM (45%) observadas en los factores condicionantes, respaldando la idea de que ciertos factores, como pendiente pronunciada, alta precipitación y características específicas de cobertura y suelos, pueden influir significativamente en la ocurrencia de movimientos en masa.

En particular, las categorías de susceptibilidad "Alta" y "Muy Alta" combinadas representan un porcentaje considerable del total de eventos de MM (45%), subrayando la importancia de abordar y comprender estos factores en términos de gestión de riesgos y planificación del uso del suelo. Por otro lado, las categorías "Muy Baja" y "Baja" constituyen una proporción menor del total (20%), lo que indica que, en términos relativos, estos eventos son menos frecuentes en condiciones consideradas de riesgo más bajo.

7. Conclusiones

El presente documento ha explorado la relación entre diversos factores condicionantes y la ocurrencia de eventos de movimientos en masa (MM) en el municipio de Soacha,

Cundinamarca. A través de un análisis detallado de la pendiente, precipitación, cobertura del suelo y clasificación de suelos, se han identificado patrones significativos que proporcionan una comprensión más completa de la susceptibilidad a los movimientos en masa en la región. En términos generales, los resultados revelan que ciertos factores condicionantes están estrechamente vinculados a la ocurrencia de eventos de movimientos en masa. La pendiente pronunciada emerge como un elemento crucial, con áreas que presentan pendientes superiores al 75% mostrando una frecuencia significativamente alta de eventos de MM. Este hallazgo destaca la importancia de considerar la topografía del terreno al evaluar el riesgo de movimientos en masa y sugiere la necesidad de medidas preventivas específicas en áreas con pendientes pronunciadas.

La relación entre la precipitación y la frecuencia de eventos de MM ha proporcionado resultados poco esperados. Contrario a las expectativas iniciales, se observa un aumento en la frecuencia de eventos de MM con menores niveles de precipitación. Las categorías de precipitación con ID 2 y 3 exhiben la mayor frecuencia de eventos, desafiando las percepciones convencionales sobre la influencia directa de precipitaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. Esta observación subraya la necesidad de una evaluación más matizada de los patrones climáticos locales y la consideración de factores adicionales en futuras investigaciones. La cobertura del suelo ha demostrado ser un factor significativo, con ciertas categorías, como "Red vial, ferroviaria y terrenos asociados" y "Zonas de extracción minera", asociadas con frecuencias notables de eventos de MM. Estos resultados indican que las actividades humanas y las modificaciones en la cobertura del suelo pueden desempeñar un papel clave en la susceptibilidad de una región a los movimientos en masa. La planificación del uso del suelo debería tener en cuenta estas asociaciones para minimizar los riesgos asociados con estas actividades.

En la clasificación de suelos, la categoría "P" ha destacado con la mayor frecuencia de eventos de MM y una relación de frecuencia del 33%. Este hallazgo sugiere que ciertos tipos de suelos pueden ser más propensos a los movimientos en masa, enfatizando la necesidad de considerar las características del suelo en la evaluación de riesgos. Un enfoque integral que aborde tanto la topografía como las características del suelo puede ofrecer una evaluación más precisa y detallada del riesgo de movimientos en masa.

La distribución de los movimientos en masa según las categorías de susceptibilidad confirma la coherencia con los resultados obtenidos en los factores condicionantes. Las categorías de riesgo más elevado, como "Alta" y "Muy Alta", alinean sus porcentajes con las frecuencias más altas de eventos de MM observadas en los análisis previos. Este patrón refuerza la idea de que ciertos factores, como la pendiente pronunciada y características específicas de cobertura y suelos, pueden influir significativamente en la ocurrencia de movimientos en masa. Es relevante destacar la efectividad del modelo de relación de frecuencia (FR) utilizado para identificar áreas susceptibles a movimientos en masa en el municipio de Soacha. Este enfoque se basa en la relación de la frecuencia relativa de eventos de MM en comparación con el total, proporcionando una perspectiva relativa de la prevalencia de estos eventos. Los mapas de susceptibilidad generados a partir de este modelo han demostrado ser una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión del riesgo, brindando información clave para autoridades gubernamentales y no gubernamentales.

El estudio ha identificado 151 ubicaciones de movimientos en masa en el municipio de Soacha, lo que ha permitido la preparación de un mapa de inventario de deslizamientos. Este mapa, combinado con el mapa de susceptibilidad, ofrece una visión integral de las áreas críticas y propensas a movimientos en masa. Estas herramientas son esenciales para la planificación del uso del suelo y la implementación de medidas preventivas y de mitigación. A pesar de los logros del estudio, es importante reconocer las limitaciones y las áreas para futuras investigaciones. La interpretación completa de los resultados podría beneficiarse de un análisis más profundo y contextualizado, considerando la interacción entre múltiples factores y evaluando la significancia estadística de las asociaciones identificadas. Además, se sugiere explorar modelos de precipitación adicionales, como precipitaciones máximas y torrenciales, para comprender mejor las complejidades de las relaciones climáticas con los movimientos en masa.

En conclusión, este estudio ha arrojado indicios sobre la compleja red de factores condicionantes que contribuyen a la ocurrencia de movimientos en masa en el municipio de Soacha. Los resultados proporcionan información valiosa para la toma de decisiones

en la gestión del riesgo y la planificación del uso del suelo. Se espera que estos hallazgos sirvan como base para futuras investigaciones y contribuyan al desarrollo de estrategias efectivas para prevenir y mitigar la ocurrencia de eventos de movimientos en masa en la región y, por extensión, en otras áreas geográficas con características similares.

Bibliografía

- Alcaldía de Soacha. (2023). Obtenido de <https://alcaldiasoacha.gov.co/NuestroMunicipio/Paginas/Economia.aspx>
- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology* 73, 247-265.
- Aristizábal E., H. M. (2010). una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 34(ISSN 0370-3908.), 209-227.
- Aristizábal, E. V. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *TecnoLógicas*, 43-64. doi:<https://doi.org/10.22430/22565337.1247>
- Aristizábal, E., Morales-García, P., Vásquez-Guarín, M., Ruíz-Vásquez, D., PalacioCórdoba, J., Ángel-Cárdenas, F., . . . Ordóñez-Carmona, O. (2022). Methodologies for landslides hazard assessment in basic hazard studies: case study municipality of Andes, Antioquia, Colombia. *Boletín de Geología*, 199-2017. doi:<https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022009>
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation. *Environmental Geology*, 35, 131-145.
- Cruden, D. &. (1996). LANDSLIDES: INVESTIGATION AND MITIGATION. CHAPTER 3 - LANDSLIDE TYPES AND PROCESSES. *Transportation Research Board Special Report*.
- DANE. (2018). *Censo Nacional de población y vivienda*. Obtenido de <https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/sociedad/cnpv-2018/>
- E. Aristizabal, M. V. (2019). The Susceptibility of Landslide Evaluation. *TecnoLógicas*, vol. 22, 39-60. doi:<https://doi.org/10.22430/22565337.1247>
- IDEAM. (2012). *METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD GENERAL DEL TERRENO A LOS MOVIMIENTOS EN MASA*. Bogotá: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.
- Lanni, C. R. (2009). Analysis of the effect pf normal and lateral subsurface water flow on the triggering of shallow landslides with a distributed hydrological model. *Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling*. France, 157-162.
- Li A.G., Y. L. (2005). Field monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope. *Canadian Geotechnical Journal* 42, 13-26.
- Li, D. L. (2022). High Mountain Asia hydropower systems threatened by climate-driven landscape instability. *Nature Geoscience*, 520 - 530.
- Servicio geologico Colombiano. (2017). *clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de colombia*. Bogotá.
- SGC, Servicio geologico colombiano. (2013). *Zonificación geomecánica y amenaza por movimientos en masa en el municipio de soacha – cundinamarca*. Bogotá.
- SGC, servicio geologico colombiano. (2017). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA*. Bogotá: SGC.
- SGC,Servicio geologico colombiano. (2023). *SIMMA*. Obtenido de Sistema de Información de movimientos en masa: <https://simma.sgc.gov.co/#/>
- van Westen, C. J. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assesment: An over-view. *Engineering Geology*, 102, 112-131.
- Varnes, D. (1958). LANDSLIDE TYPES AND PROCESSES. *Highway Research Board Special Report*.